المؤتمر الاقليمي:
المساحة و التنمية
شرم الشيخ، ٣-٦ أكتوبر ٢٠١٥

جمهورية مصر العربية
وزارة الموارد المائية و الري
المركز القومي لبحوث المياه

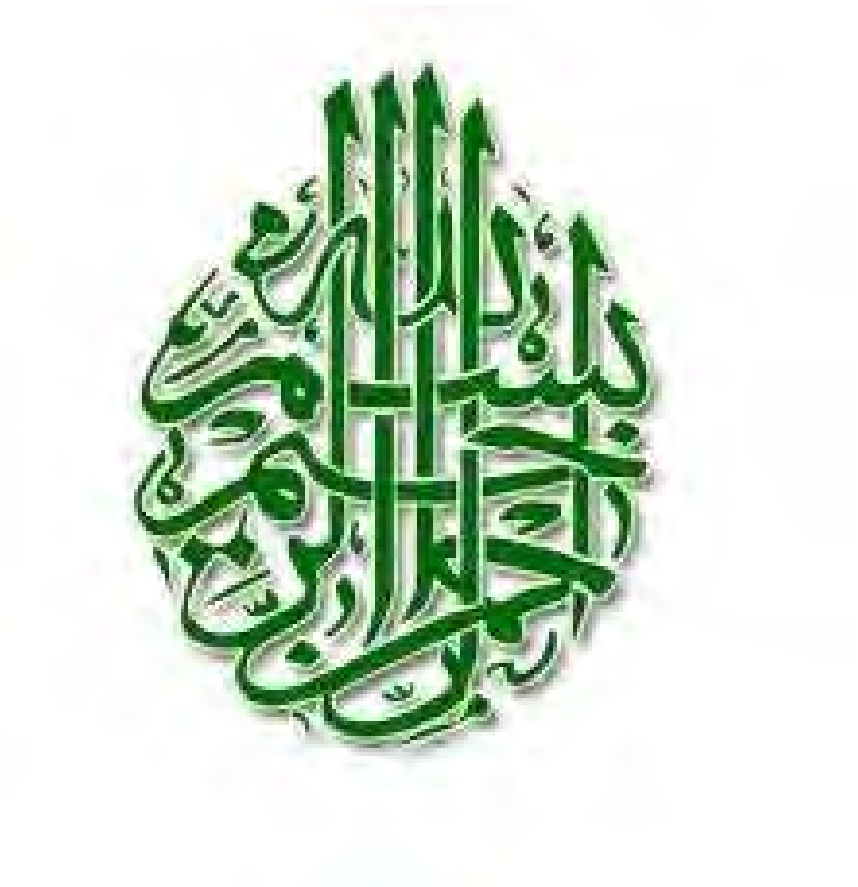
أساسيات علوم المساحة و الجيوماتكس

Basics of Surveying and Geomatics

اعداد

أ.د. / جمعة محمد داود
Gomaa M. Dawod

معهد بحوث المساحة
المركز القومي لبحوث المياه



شكر و تقدير

أتقدم بخالص الشكر و التقدير لكلا من معالي الأستاذ الدكتور محمد عبد المطلب رئيس المركز القومي لبحوث المياه و للأستاذة الدكتورة دلال النجار مقرر المؤتمر الإقليمي للمساحة و التنمية علي تفضلهما بالموافقة علي توزيع هذا الكتاب ضمن فعاليات المؤتمر.

أهدي هذا العمل لمن أتشرف أن أكون أحد طلابها والتي كان لها بالغ الفضل بعد الله سبحانه و تعالي في حياتي العملية منذ أن تشرفت بالعمل معها في معهد بحوث المساحة وإشرافها علي رسالتي للدكتوراه و تشجيعها الدائم لي، فبكل إجلال و احترام و تقدير أهدي كتابي هذا للأستاذة الدكتورة دلال صبحي النجار.

د. جمعة محمد داود

المحتويات

	صفحة
تقديم	ت
قائمة المحتويات	ث
الباب الأول: مقدمة: المساحة و الجيوماتكس	١
الفصل الأول: تعريف الجيوماتكس	٢
١-١ مقدمة	٢
١-٢ تعريف الجيوماتكس	٢
١-٣ مكونات الجيوماتكس	٤
١-٤ أخصائي الجيوماتكس	٨
الفصل الثاني: تاريخ وأقسام علم المساحة	٩
٢-١ تعريف المساحة	٩
٢-٢ تاريخ المساحة	٩
٢-٣ أقسام علم المساحة	١١
٤-٤ العمل المساحي	١٤
الباب الثاني: المساحة الأرضية	١٥
الفصل الثالث: وحدات و نظم القياس	١٦
٣-١ وحدات القياس	١٦
٣-١-١ وحدات القياس الطولية	١٦
٣-١-٢ وحدات قياس المساحات	١٧
٣-٢ نظم قياس الزوايا	١٨
٣-٢-١ النظام الستيني لقياس الزوايا	١٨
٣-٢-٢ النظام المئوي لقياس الزوايا	١٩
٣-٢-٣ النظام الدائري لقياس الزوايا	٢٠
٣-٢-٤ التحويل بين نظم قياس الزوايا	٢١
٣-٣ الأشكال الهندسية البسيطة	٢٢
٣-٤ أنواع اتجاه الشمال	٢٩
٣-٤-١ الشمال المغناطيسي	٢٩
٣-٤-٢ الشمال الجغرافي	٢٩
٣-٤-٣ زاوية الاختلاف	٢٩
٣-٥ أنواع الانحرافات	٣١
٣-٥-١ الانحراف الدائري	٣٢
٣-٥-٢ الانحراف المختصر	٣٢

تابع المحتويات **صفحة**

٣-٥-٣ التحويل بين الانحراف الدائري والانحراف المختصر ٣٣
٣-٥-٤ الانحراف الأمامي و الانحراف الخلفي لخط ٣٤
٣-٦ أنواع المسافات ٣٦

الفصل الرابع: قياس المسافات ٣٨

٤-١ قياس المسافات بالشريط ٣٨
٤-١-١ أنواع الشريط ٣٨
٤-١-٢ أدوات مساعدة مع الشريط ٣٩
٤-١-٣ الرفع المساحي بالشريط ٤١
٤-٢ قياس المسافات الكترونيا ٤٣

الفصل الخامس: قياس الانحرافات ٤٨

٥-١ البوصلة المغناطيسية ٤٨
٥-٢ الرفع المساحي بالبوصلة المغناطيسية ٤٩

الفصل السادس: قياس الزوايا (جهاز الثيودليت) ٥٢

٦-١ نبذة تاريخية ٥٢
٦-٢ جهاز الثيودليت ٥٤
٦-٢-١ الثيودليت البصري ٥٤
٦-٢-٢ الثيودليت الرقمي ٥٦
٦-٣ ضبط الثيودليت ٥٧
٦-٤ الرفع المساحي بالثيودليت ٥٨
٦-٥ حسابات ترافرس الثيودليت ٦٢
٦-٥-١ الترافرس المغلق ٦٣
٦-٥-٢ الأرصاد الناقصة في الترافرس المغلق ٧١
٦-٥-٣ الترافرس الموصل ٧٤
٦-٥-٤ الترافرس المفتوح ٨١
٦-٦ شبكات الترافرس ٨٤
٦-٧ اللوحة المستوية ٨٥

الفصل السابع: الميزانية ٨٦

٧-١ المنسوب و الارتفاع ٨٦
٧-٢ الميزانية ٨٩
٧-٣ جهاز الميزان وملحقاته ٩٢
٧-٤ أعمال الميزانية الطولية و العرضية ٩٦
٧-٥ حسابات الميزانية المباشرة ٩٨
٧-٥-١ طريقة سطح الميزان ٩٨

تابع المحتويات **صفحة**

٧-٥-٢ طريقة الارتفاع و الانخفاض ١٠٠
٧-٥-٣ حساب خطأ الميزانية ١٠١
٧-٦ الميزانية الشبكية ١٠٣
٧-٧ الميزانية العكسية ١٠٧
٧-٨ الميزانية الدقيقة ١٠٨
٧-٩ الميزانية المثلثية ١١٠

الفصل الثامن: الرفع المساحي التاكيومتري ١١١

٨-١ نظرية و استخدامات المساحة التاكيومترية ١١١
٨-٢ طريقة شعرات الاستاديا ١١٢
٨-٣ طريقة الظلال ١١٥
٨-٤ تعيين قيم لا يمكن رصدها ١١٧
٨-٤-١ تعيين ارتفاع هدف لا يمكن الوصول إليه ١١٧
٨-٤-٢ تعيين مسافة لا يمكن الوصول إليها ١١٩
٨-٥ التقاطع الأمامي و العكسي ١٢١
٨-٥-١ التقاطع الأمامي ١٢١
٨-٥-٢ التقاطع العكسي ١٢٣

الفصل التاسع : جهاز المحطة الشاملة ١٢٧

٩-١ مكونات و مميزات المحطة الشاملة ١٢٧
٩-٢ تشغيل المحطة الشاملة ١٢٩
٩-٣ أنواع متقدمة من المحطة الشاملة

الفصل العاشر: المنحنيات ١٣٣

١٠-١ أنواع المنحنيات الأفقية ١٣٣
١٠-١-١ تعريف المنحني ١٣٤
١٠-١-٢ أجزاء المنحني البسيط ١٣٥
١٠-١-٣ حساب أجزاء المنحني البسيط ١٣٥
١٠-١-٤ تعيين زاوية التقاطع و نصف قطر المنحني في الطبيعة ١٣٦
١٠-٢ توقيع المنحنيات الأفقية في الطبيعة ١٣٧
١٠-٢-١ توقيع المنحنيات الأفقية بجهاز الثيودليت ١٣٧
١٠-٢-٢ توقيع المنحنيات الأفقية بجهاز المحطة الشاملة ١٤١
١٠-٣ المنحنيات الرأسية ١٤٣

تابع المحتويات **صفحة**

الباب الثالث: المساحة الجيوديسية و النظام العالمي لتحديد المواقع ١٥١

الفصل الحادى عشر: علم الجيوديسيا ١٥٢

١١-١ الجيوديسيا و المساحة ١٥٣
١١-٢ تاريخ علم الجيوديسيا ١٥٤
١١-٣ تطبيقات علم الجيوديسيا ١٥٥
١١-٤ أقسام الجيوديسيا ١٥٦

الفصل الثاني عشر: شكل الأرض والمراجع الجيوديسية ونظم الإحداثيات ١٦١

١٢-١ مقدمة ١٦١
١٢-٢ شكل الأرض ١٦١
١٢-٣ المراجع ١٦٣
١٢-٤ نظم الإحداثيات ١٦٥
١٢-٤-١ الإحداثيات الجغرافية أو الجيوديسية ١٦٧
١٢-٤-٢ الإحداثيات الكروية ١٦٨
١٢-٤-٣ الإحداثيات الجيوديسية الكارتيزية أو الفراغية أو الديكارتية ١٦٩
١٢-٤-٤ الإطار المرجعي الأرضي العالمي ١٧٠
١٢-٤-٥ التحويل بين الإحداثيات الجغرافية ١٧٠
١٢-٤-٦ إسقاط الخرائط ١٧١
١٢-٤-٧ نظم الإحداثيات المسقطة أو المستوية ١٨٥
١٢-٤-٨ التحويل بين المراجع ١٨٩

الفصل الثالث عشر: الجيوديسيا الأرضية وشبكات الثوابت ١٩٧

١٣-١ أنواع شبكات الثوابت الأرضية ١٩٧
١٣-٢ شبكات الثوابت الأرضية الأفقية (شبكات المثلثات) ١٩٧
١٣-٢-١ درجات شبكات المثلثات ١٩٩
١٣-٢-٢ خطوات إنشاء شبكات المثلثات ٢٠١
١٣-٢-٣ متانة شبكات المثلثات ٢٠٢
١٣-٢-٤ الاشتراطات في شبكات المثلثات ٢٠٦
١٣-٢-٥ شروط ضبط شبكات المثلثات ٢٠٩
١٣-٣ شبكات الثوابت الأرضية الرأسية (شبكات الروبيرات) ٢١٤

الفصل الرابع عشر: جيوديسيا الأقمار الصناعية ٢١٧

١٤-١ جيوديسيا الأقمار الصناعية ٢١٨
١٤-١-١ مميزات جيوديسيا الأقمار الصناعية ٢١٨
١٤-١-٢ تاريخ جيوديسيا الأقمار الصناعية ٢٢٠
١٤-١-٣ تطبيقات جيوديسيا الأقمار الصناعية ٢٢١

تابع المحتويات **صفحة**

١٤-٢ أنواع الارتفاعات ٢٢٣
١٤-٣ إشارات الأقمار الصناعية ٢٢٥
١٤-٤ الغلاف الجوي ٢٢٩
١٤-٥ حركة الأقمار الصناعية ٢٣٠
١٤-٦ ارتفاع مدارات الأقمار الصناعية ٢٣٢
١٤-٧ شبكات الثوابت الأرضية ثلاثية الأبعاد (شبكات الجي بي أس) ٢٣٣

الفصل الخامس عشر: الجاذبية الأرضية ٢٣٥

١٥-١ الجاذبية (التثاقلية) الأرضية ٢٣٥
١٥-٢ تطبيقات الجاذبية الأرضية ٢٣٧
١٥-٣ وحدات قياس الجاذبية الأرضية ٢٣٨
١٥-٤ أجهزة قياس الجاذبية الأرضية ٢٣٨
١٥-٥ شبكات الجاذبية الأرضية ٢٤٠
١٥-٦ شذوذ الجاذبية الأرضية ٢٤٣
١٥-٧ تأثير الجاذبية الأرضية علي القياسات الأرضية ٢٤٥
١٥-٨ قياس الجاذبية الأرضية من الفضاء ٢٤٦
١٥-٩ قياس الجاذبية الأرضية من الجو ٢٤٨
١٥-١٠ المنظمات العالمية في مجال الجاذبية الأرضية ٢٤٩

الفصل السادس عشر: الجيويد ٢٥١

١٦-١ سطح الجيويد ٢٥١
١٦-٢ النمذجة الكروية الهارمونية لمجال الجاذبية الأرضية ٢٥٤
١٦-٣ نماذج الجيويد العالمية ٢٥٧
١٦-٣-١ نموذج الجيويد العالمي ٢٠٠٨ ٢٥٨
١٦-٣-٢ استخدام EGM2008 لحساب الجيويد ٢٦٠
١٦-٤ الجي بي أس و الجيويد ٢٦٩
١٦-٥ نمذجة الجيويد ٢٧٠
١٦-٥-١ نمذجة الجيويد من أرصاد الجاذبية الأرضية ٢٧٠
١٦-٥-٢ نمذجة الجيويد من أرصاد الجي بي أس و الميزانيات ٢٧٢

الفصل السابع عشر: نظرية الأخطاء ٢٧٦

١٧-١ مصادر و أنواع الأخطاء ٢٧٦
١٧-٢ مبادئ إحصائية في المساحة ٢٧٨
١٧-٣ مبدأ الوزن في القياسات المساحية ٢٨٤
١٧-٤ ضبط الشبكات ٢٩٠
١٧-٥ الضبط بطريقة مجموع أقل المربعات ٢٩١
١٧-٥-١ ضبط أقل المربعات لمعادلات الرصد ٢٩٢
١٧-٥-٢ ضبط أقل المربعات للمعادلات غير الخطية ٣٠٣

تابع المحتويات	صفحة

١٧-٥-٣ ضبط أقل المربعات لمعادلات الشرط ٣١٠
١٧-٦ ضبط الشبكات بطريقة حرة ٣٢٨
١٧-٧ تحليل نتائج ضبط الشبكات ٣٣١

الفصل الثامن عشر: مقدمة عن النظام العالمي لتحديد المواقع ٣٣٥

١٨-١ مقدمة ٣٣٥
١٨-٢ نبذة تاريخية ٣٣٧
١٨-٣ مكونات نظام الجي بي أس ٣٤٠
١٨-٣-١ قسم الفضاء أو الأقمار الصناعية ٣٤١
١٨-٣-٢ قسم التحكم و المراقبة ٣٤٢
١٨-٣-٣ قسم المستقبلات الأرضية ٣٤٣

الفصل التاسع عشر:اشارات و بيانات الجي بي أس ٣٤٥

١٩-١ مقدمة ٣٤٥
١٩-٢ تركيب الاشارات ٣٤٥
١٩-٣ أرصاد الجي بي أس ٣٤٦
١٩-٣-١ أرصاد المسافة الكاذبة باستخدام الشفرة ٣٤٧
١٩-٣-٢ أرصاد فرق طور الإشارة الحاملة ٣٤٩
١٩-٤ مصادر الأخطاء في قياسات الجي بي أس ٣٥٢
١٩-٥ خطة تحديث تقنية الجي بي أس ٣٥٨
١٩-٦ مبدأ الفروقات في مرحلة الحسابات ٣٦٠

الفصل العشرين: طرق الرصد في الجي بي أس ٣٦٣

٢٠-١ مقدمة ٣٦٣
٢٠-٢ طرق الرصد ٣٦٣
٢٠-٢-١ طرق الرصد الثابتة ٣٦٥
٢٠-٢-١-١ طريقة الرصد الثابت التقليدي ٣٦٥
٢٠-٢-١-٢ طريقة الرصد الثابت السريع ٣٦٦
٢٠-٢-٢ طرق الرصد المتحركة ٣٦٧
٢٠-٢-٢-١ طرق الرصد المتحرك والحساب لاحقا ٣٦٧
٢٠-٢-٢-٢ طرق الرصد المتحرك مع الحساب اللحظي ٣٦٨
٢٠-٢-٣ مقارنة بين طرق الرصد المختلفة ٣٦٩
٢٠-٣ حسابات خطوط القواعد لأرصاد الجي بي أس ٣٧١

الفصل الحادي و العشرين: الرصد العملي بالجي بي أس ٣٧٣

٢١-١ مقدمة ٣٧٣
٢١-٢ التخطيط و التصميم ٣٧٣

تابع المحتويات	صفحة

٢١-٢-١ أهداف المشروع و الدقة المطلوبة ٣٧٣
٢١-٢-٢ اختيار أجهزة الاستقبال وبرامج الحساب ٣٧٥
٢١-٢-٣ تصميم خطة الرصد ٣٧٦
٢١-٢-٤ تصميم الربط علي شبكات التحكم ٣٧٨
٢١-٢-٥ اختيار المرجع الجيوديسي المطلوب ٣٨٠
٢١-٢-٦ اختيار مواقع النقاط وتثبيت العلامات ٣٨٠
٢١-٢-٧ اختيار أنسب أوقات الرصد ٣٨١
٢١-٢-٨ اختيار أنسب طريقة للرصد ٣٨٣
٢١-٢-٩ المتطلبات الأخرى ٣٨٤
٢١-٣ الرصد الحقلي ٣٨٥
٢١-٤ الحسابات و الضبط ٣٨٩
٢١-٥ تحويل الإحداثيات ٣٩٣

الفصل الثاني و العشرين: حسابات الجي بي أس ٣٩٤

٢٢-١ مقدمة ٣٩٤
٢٢-٢ عيوب الشبكات الجيوديسية في ضبط أقل المربعات ٣٩٤
٢٢-٣ اكتشاف أخطاء الأرصاد بعد الضبط ٣٩٥
٢٢-٤ تطبيقات ضبط أقل مجموع مربعات في أرصاد الجي بي أس ٣٩٧
٢٢-٥ خدمات الجي بي أس علي الانترنت ٣٩٨
٢٢-٥-١ المنظمة العالمية لخدمات النظم الملاحية بالأقمار الصناعية ٣٩٨
٢٢-٥-٢ خدمات حسابات مجانية لأرصاد الجي بي إس ٤٠١
٢٢-٦ نظم أخري للملاحة بالأقمار الصناعية ٤٠٢

الباب الرابع: المساحة التصويرية و الاستشعار عن بعد ٤٠٦

الفصل الثالث و العشرين: القياس من الصور الجوية ٤٠٧

٢٣-١ مقدمة ٤٠٧
٢٣-٢ نبذة تاريخية ٤٠٧
٢٣-٣ مميزات و تطبيقات الصور الجوية ٤٠٩
٢٣-٤ آلات و معدات التصوير الجوي ٤١٠
٢٣-٤-١ كاميرا التصوير الجوي ٤١١
٢٣-٤-٢ أنواع الصور الجوية ٤١٤
٢٣-٤-٣ الفروق بين الصورة الجوية و الخريطة ٤١٦
٢٣-٥ أسس التصوير الجوي ٤١٨
٢٣-٥-١ الضوء الكهرومغناطيسي ٤١٨
٢٣-٥-٢ العدسات ٤٢١
٢٣-٥-٣ الأفلام ٤٢٢
٢٣-٦ القياس من الصور الجوية ٤٢٣
٢٣-٦-١ حساب مقياس رسم الصور الجوية ٤٢٣

تابع المحتويات **صفحة**

٢٣-٦-٢ تطبيقات مقياس رسم الصور الجوية في تصميم الطيران ٤٢٧
٢٣-٦-٣ حساب الإحداثيات الأرضية للمعالم ٤٢٧
٢٣-٦-٤ الإزاحة علي الصور الجوية ٤٢٨
٢٣-٦-٥ الإبصار المجسم ٤٣٣
٢٣-٦-٦ التداخل بين الصور الجوية ٤٣٧
٢٣-٦-٧ الابتعاد وقياس الارتفاعات من الصور الجوية ٤٣٨
٢٣-٧ تصميم خطة الطيران والتصوير الجوي ٤٤١

الفصل الرابع و العشرين: مقدمة عن الاستشعار عن بعد ٤٤٦

٢٤-١ ما هو الاستشعار عن بعد؟ ٤٤٦
٢٤-٢ الاشعاع الكهرومغناطيسي ٤٤٨
٢٤-٣ المجال الكهرومغناطيسي ٤٤٩
٢٤-٤ التفاعل مع الغلاف الجوي ٤٥٣
٢٤-٥ التفاعل مع الأهداف ٤٥٦
٢٤-٦ الاستشعار الموجب و السالب ٤٥٨
٢٤-٧ خصائص المرئيات ٤٥٩

الفصل الخامس و العشرين: الأقمار الصناعية و المستشعرات ٤٦١

٢٥-١ الاستشعار من علي الأرض و من الجو و من الفضاء ٤٦١
٢٥-٢ خصائص الأقمار الصناعية ٤٦٢
٢٥-٣ درجة الوضوح المكانية و حجم الخلية والمقياس ٤٦٥
٢٥-٤ درجة الوضوح الطيفية ٤٦٧
٢٥-٥ درجة الوضوح الراديومترية ٤٦٩
٢٥-٦ درجة الوضوح المؤقتة/الزمنية ٤٧٠
٢٥-٧ الكاميرات و التصوير الجوي ٤٧٣
٢٥-٨ المسح متعدد الأطياف ٤٧٧
٢٥-٩ التصوير الحراري ٤٧٩
٢٥-١٠ التشوه الهندسي في المرئيات ٤٨٠
٢٥-١١ أقمار و مستشعرات الطقس ٤٨٢
٢٥-١٢ أقمار و مستشعرات أرصاد الأرض ٤٨٦
٢٥-١٣ أقمار و مستشعرات الارصاد البحرية ٤٩٥
٢٥-١٤ مستشعرات أخري ٤٩٨
٢٨-١٥ استقبال و بث و معالجة البيانات ٤٩٩

الفصل السادس و العشرين: تحليل المرئيات ٥٠٠

٢٦-١ مقدمة ٥٠٠
٢٦-٢ عناصر التفسير البصري ٥٠٠
٢٦-٣ المعالجة الرقمية للمرئيات ٥٠٤

تابع المحتويات	صفحة

٢٦-٤ المعالجة الأولية ٥٠٦
٢٦-٥ تحسين المرئية ٥١٠
٢٦-٦ تحويل المرئية ٥١٣
٢٦-٧ تصنيف و تحليل المرئيات ٥١٥
٢٦-٨ دمج و تكامل و تحليل البيانات ٥١٧

الفصل السابع و العشرين: تطبيقات الاستشعار عن بعد ٥٢١

٢٧-١ مقدمة ٥٢١
٢٧-٢ تطوير الخرائط ٥٢١
٢٧-٣ تطبيقات زراعية ٥٢٤
٢٧-٤ تطبيقات مراقبة ازالة الغابات ٥٢٦
٢٧-٥ تطبيقات جيولوجية ٥٢٧
٢٧-٦ تطبيقات هيدرولوجية ٥٢٨
٢٧-٧ تطبيقات غطاءات و استخدامات الأرض ٥٢٩
٢٧-٨ تطبيقات مراقبة المحيطات و الشواطئ ٥٣٠

الباب الخامس: الخرائط و الكارتوجرافيا ٥٣٢

الفصل الثامن و العشرين: علم الخرائط ٥٣٣

٢٨-١ مقدمة ٥٣٣
٢٨-٢ خرائط الحضارات القديمة ٥٣٣
٢٨-٣ خرائط الحضارة الإسلامية ٥٣٧
٢٨-٤ خرائط الحضارة الأوروبية ٥٣٩
٢٨-٥ مكة المكرمة في الخرائط القديمة ٥٤٠
٢٨-٦ عوامل تطور الخرائط الحديثة ٥٤٠
٢٨-٧ علم الكارتوجرافيا ٥٤٣
٢٨-٨ تعريف الخريطة ٥٤٤
٢٨-٩ أنواع الخرائط ٥٤٥
٢٨-٩-١ أنواع الخرائط بناءا علي مقياس الرسم ٥٤٦
٢٨-٩-٢ أنواع الخرائط بناءا علي الهدف من الخريطة ٥٤٨
٢٨-٩-٣ أنواع الخرائط بناءا علي طرق تمثيل الظاهرات ٥٤٩
٢٨-٩-٤ أنواع الخرائط بناءا علي مادة إنتاجها ٥٥٠

الفصل التاسع و العشرين: مكونات الخريطة ٥٥٢

٢٩-١ مكونات الخريطة ٥٥٢
٢٩-٢ أساسيات الخريطة ٥٥٣
٢٩-٣ مقياس الرسم ٥٥٦
٢٩-٣-١ أنواع مقياس الرسم ٥٥٧

تابع المحتويات	صفحة

٢٩-٣-٢ تطبيقات مقياس الرسم ٥٦٦
٢٩-٣-٣ طرق القياس علي الخرائط ٥٦٨
٢٩-٣-٤ تصغير و تكبير الخرائط ٥٧١
٢٩-٤ شبكة الاحداثيات ٥٧١
٢٩-٥ شكل الأرض وإحداثيات الخرائط ٥٧٣
٢٩-٦ إسقاط الخرائط ٥٧٥
٢٩-٧ الرموز ٥٧٧
٢٩-٨ مفتاح الخريطة ٥٨٣

الفصل الثلاثين: ترتيب و تصميم الخرائط ٥٨٧

٣٠-١ ترتيب الخرائط ٥٨٧
٣٠-٢ النظام العالمي لترقيم الخرائط المليونية ٥٨٧
٣٠-٣ نظم ترتيب الخرائط في جمهورية مصر العربية ٥٨٩
٣٠-٤ تصميم الخريطة ٥٩٥
٣٠-٥ عرض محتويات الخريطة ٥٩٦

الفصل الحادي و الثلاثين: الخريطة الموضوعية والخريطة الكنتورية ٦٠٤

٣١-١ مقدمة ٦٠٤
٣١-٢ الخرائط الموضوعية النوعية ٦٠٤
٣١-٣ الخرائط الموضوعية الكمية ٦٠٤
٣١-٣-١ خرائط رموز الموضع الكمية ٦٠٥
٣١-٣-٢ خرائط رموز الخط الكمية ٦٠٦
٣١-٣-٣ خرائط رموز المساحة الكمية ٦٠٦
٣١-٤ الخريطة الكنتورية ٦٠٧
٣١-٥ خطوط الكنتور ٦٠٨
٣١-٥-١ مفهوم خطوط الكنتور ٦٠٨
٣١-٥-٢ خصائص خطوط الكنتور ٦٠٩
٣١-٥-٣ خطوط الكنتور والانحدارات ٦١٠
٣١-٦ عمل الخريطة الكنتورية ٦١١
٣١-٧ عمل القطاعات من الخريطة الكنتورية ٦١٣
٣١-٨ طرق أخري لتمثيل تضاريس سطح الأرض ٦١٥

الباب السادس: نظم المعلومات الجغرافية ٦١٨

الفصل الثاني و الثلاثين: مقدمة عن نظم المعلومات الجغرافية ٦١٩

٣٢-١ لماذا الاهتمام بنظم المعلومات الجغرافية؟ ٦١٩
٣٢-٢ نظم المعلومات الجغرافية أم المكانية؟ ٦٢٠
٣٢-٣ ماهية نظم المعلومات الجغرافية؟ أداة أم تقنية أم علم؟ ٦٢١

تابع المحتويات **صفحة**

٣٢-٤ نظرة تاريخية لتطور نظم المعلومات الجغرافية ٦٢٥
٣٢-٥ مكونات نظم المعلومات الجغرافية ٦٢٧
٣٢-٦ مميزات نظم المعلومات الجغرافية ٦٢٩
٣٢-٧ تطبيقات علم نظم المعلومات الجغرافية ٦٣٠
٣٢-٧-١ تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في الخدمات الحكومية ٦٣١
٣٢-٧-٢ تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في الخدمات التجارية ٦٣٣
٣٢-٧-٣ تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في النقل و المواصلات ٦٣٤
٣٢-٧-٤ تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في مجال البيئة ٦٣٥

الفصل الثالث و الثلاثين: التمثيل الجغرافي و طبيعة البيانات المكانية ٦٣٧

٣٣-١ مقدمة ٦٣٧
٣٣-٢ التمثيل الرقمي ٦٣٧
٣٣-٣ التمثيل الجغرافي ٦٣٨
٣٣-٤ خصائص التمثيل الجغرافي ٦٣٨
٣٣-٤-١ الأهداف المنفصلة والمجالات المتصلة ٦٤٠
٣٣-٤-٢ البيانات الخطية و البيانات الشبكية ٦٤١
٣٣-٥ الخرائط الورقية ٦٤٤
٣٣-٦ التعميم ٦٤٥
٣٣-٧ طبيعة البيانات الجغرافية ٦٤٧
٣٣-٨ الارتباط المكاني ٦٤٨
٣٣-٩ اختيار العينة المكانية ٦٤٩
٣٣-١٠ تأثير الُبعد أو مسافة التأثير ٦٥٠
٣٣-١١ قياس تأثير المسافة كارتباط مكاني ٦٥٢
٣٣-١٢ التبعية بين الظاهرات المكانية ٦٥٤
٣٣-١٢ التغيرات الفجائية في البيانات الجغرافية ٦٥٦
٣٣-١٣ دقة و جودة تمثيل العالم الحقيقي ٦٥٧
٣٣-١٤ عدم اليقين في إدراك الظاهرات المكانية ٦٥٧
٣٣-١٥ عدم اليقين في قياس و تمثيل الظاهرات المكانية ٦٥٩

الفصل الرابع و الثلاثين: البيانات وقواعد المعلومات الجغرافية ٦٦٣

٣٤-١ نمذجة البيانات الجغرافية ٦٦٣
٣٤-٢ نماذج بيانات نظم المعلومات الجغرافية ٦٦٤
٣٤-٢-١ نماذج التصميم بالكمبيوتر و الرسومات و الصور ٦٦٥
٣٤-٢-٢ نموذج البيانات الشبكية ٦٦٥
٣٤-٢-٣ نموذج البيانات الخطية ٦٦٦
٣٤-٢-٤ نموذج بيانات الشبكات ٦٦٩
٣٤-٢-٥ نموذج بيانات شبكات المثلثات غير المنتظمة ٦٦٩
٣٤-٢-٦ نموذج بيانات الأهداف ٦٧٠
٣٤-٣ نمذجة البيانات الجغرافية ٦٧١

تابع المحتويات **صفحة**

٣٤-٤ تجميع بيانات نظم المعلومات الجغرافية ٦٧٢
٣٤-٥ الطرق الأساسية لتجميع البيانات ٦٧٣
٣٤-٥-١ الحصول علي البيانات الشبكية ٦٧٣
٣٤-٥-٢ الحصول علي البيانات الخطية ٦٧٥
٣٤-٦ الطرق الثانوية لتجميع البيانات ٦٧٦
٣٤-٦-١ الحصول علي البيانات الشبكية بالمسح الضوئي ٦٧٧
٣٤-٦-٢ الطرق الثانوية للحصول علي البيانات الخطية ٦٧٧
٣٤-٧ الحصول علي البيانات من مصادر خارجية ٦٧٩
٣٤-٨ انشاء و صيانة قواعد البيانات الجغرافية ٦٧٩
٣٤-٩ نظم إدارة البيانات ٦٨٠
٣٤-١٠ تخزين البيانات في جداول قواعد البيانات ٦٨١
٣٤-١١ لغة الاستعلام **SQL** ٦٨٣
٣٤-١٢ أنواع ووظائف قواعد البيانات الجغرافية ٦٨٤
٣٤-١٣ تصميم قواعد البيانات الجغرافية ٦٨٦
٣٤-١٤ نظم المعلومات الجغرافية التوزيعية ٦٨٧
٣٤-١٥ توزيع البيانات ٦٨٨
٣٤-١٦ نظم المعلومات الجغرافية المحمولة ٦٨٩
٣٤-١٧ برامج نظم المعلومات الجغرافية ٦٩٢
٣٤-١٧-١ تطور برامج نظم المعلومات الجغرافية ٦٩٣
٣٤-١٧-٢ أساليب بناء برامج نظم المعلومات الجغرافية ٦٩٤
٣٤-١٧-٣ البناء الثلاثي لبرامج نظم المعلومات الجغرافية ٦٩٥
٣٤-١٧-٤ التخصيص في برامج نظم المعلومات الجغرافية ٦٩٧
٣٤-١٧-٥ منتجي برامج نظم المعلومات الجغرافية ٦٩٨
٣٤-١٨ أنواع برامج نظم المعلومات الجغرافية ٦٩٨
٣٤-١٩ نظم المعلومات الجغرافية الديناميكية ٧٠٠

الفصل الخامس و الثلاثين: الخرائط و التحليل و النمذجة في نظم المعلومات الجغرافية ٧٠٢

٣٥-١ الكارتوجرافيا و انتاج الخرائط ٧٠٢
٣٥-٢ التصور الجغرافي ٧٠٤
٣٥-٢-١ مقدمة ٧٠٤
٣٥-٢-٢ التصور الجغرافي و الاستعلام المكاني ٧٠٥
٣٥-٢-٣ التصور الجغرافي و تحويل صور البيانات ٧٠٦
٣٥-٣ التصور الجغرافي و نظم المعلومات الجغرافية للجمهور ٧٠٧
٣٥-٤ الاستعلام و القياس و التحويل ٧٠٩
٣٥-٤-١ مقدمة: ما هو التحليل المكاني؟ ٧٠٩
٣٥-٤-٢ الاستعلام ٧١٠
٣٥-٤-٣ القياسات ٧١٢
٣٥-٤-٤ التحويلات ٧١٤
٣٥-٥ التلخيص الوصفي و التصميم و الاستنتاج ٧١٩

تابع المحتويات	صفحة

٣٥-٥-١ مقدمة: المزيد من التحليل المكاني؟ ٧١٩
٣٥-٥-٢ التخليص الوصفي ٧١٩
٣٥-٥-٣ قياس الأنماط: البيانات المكانية للنقاط ٧٢١
٣٥-٥-٤ قياس الأنماط: البيانات غير المكانية للنقاط ٧٢٢
٣٥-٦ الموقع الأمثل ٧٢٣
٣٥-٦ -١ أفضل موقع لنقطة ٧٢٣
٣٥-٦ -٢ أفضل مسار ٧٢٤
٣٥-٦ -٤ الاختبارات الإحصائية ٧٢٤
٣٥-٧ النمذجة المكانية ٧٢٥
٣٥-٧-١ مقدمة ٧٢٥
٣٥-٧ -٢ أنواع النماذج ٧٢٧
٣٥-٧-٣ تقنيات النمذجة ٧٣٠
٣٥-٧ -٤ الطرق متعددة المعايير ٧٣١
٣٥-٧-٥ الدقة و الفعالية: اختبار النماذج ٧٣٣
٣٥-٨ ادارة نظام معلومات جغرافي ٧٣٣
٣٥-٨-١ مقدمة: النظرة العامة ٧٣٣
٣٥-٨-٢ عملية تطوير نظام معلومات جغرافي قابل للاستدامة ٧٣٤
٣٥-٨-٣ فريق العمل قي نظام معلومات جغرافي قابل للاستدامة ٧٣٧
٣٥-٩ نظم المعلومات الجغرافية و الادارة و الاقتصاد المعرفي ٧٣٨
٣٥-٩-١ الإدارة ونجاح نظم المعلومات الجغرافية ٧٣٨
٣٥-٩-٢ مهارات العاملين في نظم المعلومات الجغرافية ٧٣٩
٣٥-٩-٣ نظم المعلومات الجغرافية والتنمية المستدامة ٧٣٩
٣٥-٩-٤ اقتصاد المعرفة و نظم المعلومات الجغرافية ٧٤٠

المراجع ٧٤٣

١- المراجع العربية ٧٤٣
١-١ الكتب المطبوعة ٧٤٤
١-٢ الكتب الرقمية للمؤلف ٧٤٤
١-٣ محاضرات فيديو للمؤلف ٧٤٤
٢- المراجع الأجنبية ٧٤٥

نبذة عن المؤلف ٧٤٩

الباب الأول

مقدمة: المساحة و الجيوماتكس

Surveying and Geomatics

الفصل الأول

تعريف الجيوماتكس

١-١ مقدمة

من مقولات العالم الإغريقي الشهير ايراتوثنيس (٢٧٥-١٩٣ قبل الميلاد): "لآلاف السنوات وكل إنسان يعتمد علي ملكيته الخاصة، لكن قياس المحيط المكاني سيجعل كل إنسان يخرج من حدود قريته ويتجاوز أو يسمو فوق أرضه الخاصة وسيصبح وريثا لكوكب لأرض".

منذ بدء الخليقة والإنسان يحاول أن يكتشف المكان الذي يعيش فيه و الأماكن المحيطة به. ومع سعي الإنسان لمعرفة أماكن توافر الموارد الطبيعية وتحديد الأماكن المناسبة للزراعة بدأ علم الجغرافيا منذ آلاف السنين. وفي القرن العشرين الميلادي بدأت أنشطة علمية كثيرة تتجاوز المفهوم التقليدي للجغرافيا من خلال ما يمكن أن نطلق عليه القياسات الأرضية الكونية Earth observations من خلال تطبيق واستخدام قياسات أرضية يتم جمعها بواسطة المسح الأرضي Ground Survey و نظم تحديد المواقع المعتمدة علي الأقمار الصناعية Global Satellite Positioning Systems و المسح التصويري Photogrammetry والاستشعار عن بعد Remote Sensing سواء بالطائرات أو بالأقمار الصناعية. ويتم جمع كل هذه القياسات و البيانات، مع اختلاف قدرتها التوضيحية المكانية Resolution و اختلاف دقتها Accuracy، في طبقات يتم تخزينها و تحليلها وإدارتها في نظم معلومات جغرافية Geographic Information Systems و نظم اتخاذ القرار Decision Support Systems اعتمادا علي تطوير ما يعرف بالنظم الذكية Expert Systems. وهذا الكم الهائل من البيانات يجب بالضرورة تنظيمه و تحليله وإتاحته للمستخدمين بدون أي تأخير للحصول علي التمثيل الدقيق للوضع المكاني. ومن هنا فقد تزايدت الحاجة الي التعامل مع كل هذه البيانات و القياسات بأسلوب معرفي متعدد التخصصات. وقد أُطلق علي هذا الأسلوب المعرفي الجديد اسم "الجيوماتكس Geomatics" وهي كلمة مكونة من مقطعين: geo بمعني الأرض و matics اختصارا لكلمة informatics بمعني علوم أو معلومات، ومن هنا فيمكننا أن نقول أن مصطلح الجيوماتكس يدل علي علم المعلوماتية الأرضية.

١-٢ تعريف الجيوماتكس

ظهر مصطلح الجيوماتكس للمرة الأولى في بداية الثمانينات من القرن العشرين الميلادي في جامعة لافال Laval الكندية، اعتمادا علي مفهوم أن تقنية الحاسبات قد أنتجت ثورة علمية في المسح أو القياسات الأرضية وفي تمثيل البيانات رقميا بدرجة تناسب التعامل مع كم ضخم من البيانات. ومن هنا فأن **تعريف الجيوماتكس يتمثل في:**

"أسلوب متكامل متعدد التخصصات لاختيار الأجهزة و التقنيات المناسبة لجمع و تخزين ونمذجة و تحليل و استرجاع و عرض و توزيع المعلومات المكانية - الناتجة من عدة مصادر و المحددة الدقة و الخصائص - في صورة رقمية"

Geomatics is defined as a systemic, multidisciplinary, integrated approach to selecting the instruments and the

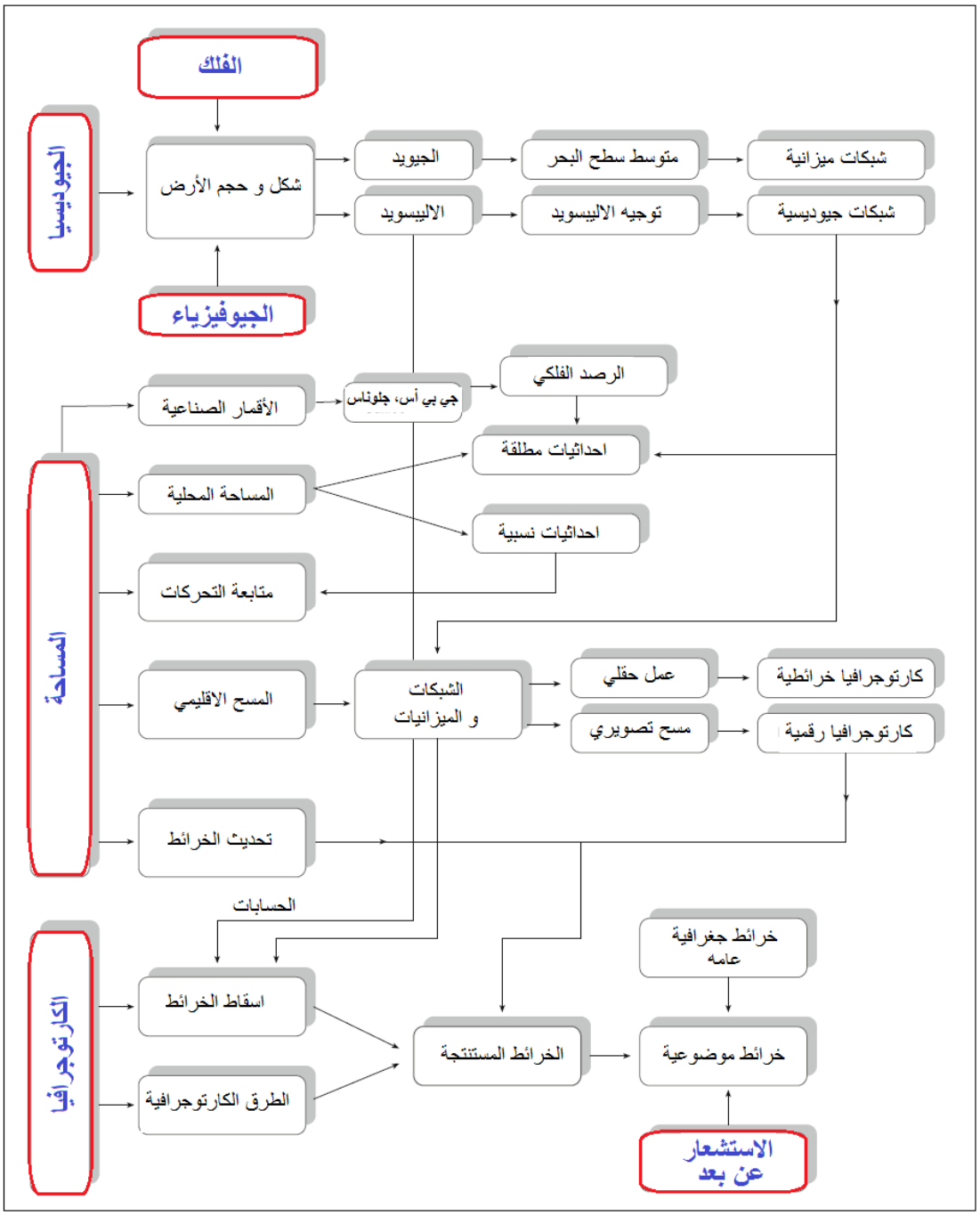
appropriate techniques for collecting, storing, integrating, modeling, analyzing, retrieving at will, transforming, displaying and distributing spatially georeferenced data from different sources with well-defined accuracy characteristics, continuity and in a digital format.

ويعتمد علم أو تخصص الجيوماتكس في جوهره علي عدد من التخصصات العلمية أو العلوم الأساسية وأيضا التقنيات والتي تشمل:

- علم الكمبيوتر Computer Science: ويستخدم في تمثيل و تشغيل (حساب) المعلومات المجمعة من خلال تطوير أجهزة تقنية (عتاد أو hardware) و طرق و نماذج و نظم تقنية (برامج أو software).
- علم الجيوديسيا Geodesy: ويستخدم لتحديد شكل و حجم الأرض والنماذج الرياضية المستخدمة في هذا التمثيل مثل السطوح المرجعية أو الاليبسويد Ellipsoids و نماذج الجيويد Geoid Models وأيضا لتمثيل مجال الجاذبية الأرضية.
- علم المساحة Surveying: وهو الذي يجمع الطرق و الأجهزة و التقنيات المستخدمة في قياس و تمثيل تفاصيل معالم وتضاريس سطح الأرض.
- علم الخرائط Cartography: يقدم علم الكارتوجرافيا قواعد و أسس و طرق تمثيل المعالم الطبيعية و البشرية لسطح الأرض سواء تمثيلا ورقيا (خرائط تقليدية) أو رقميا (خرائط رقمية).
- علم المساحة التصويرية Photogrammetry: يحدد مواقع و أشكال الأهداف الأرضية من خلال القياسات علي الصور الجوية.
- الاستشعار عن بعد Remote Sensing: للحصول علي معلومات مكانية و بيئية دون الاحتكام المباشر مع الأهداف الأرضية (أي من بعد).
- النظام العالمي لتحديد المواقع GPS or Global Positioning System : للحصول علي الإحداثيات الثلاثية الأبعاد للأهداف الثابتة أو المتحركة لأي مكان علي سطح الأرض وتحت أية ظروف مناخية.
- نظم المسح الليزري Laser Scanning System: لتحديد الأهداف وقياس مسافاتها من خلال استخدام الأشعة في النطاق البصري (من ٠.٣ الى ١٥ مايكرومتر).
- نظم المعلومات الجغرافية Geographic Information Systems or GIS : تسمح بقدرات قوية للغاية في تخزين و معالجة و تحليل و عرض كم هائل من البيانات المكانية.
- نظم اتخاذ القرار Decision Support System or DSS: لتطبيق نظم معلومات جغرافية معقدة أو مركبة بهدف إيجاد سيناريوهات محتملة لنمذجة الواقع الحقيقي علي الأرض و توفير مجموعة من الحلول لمتخذي القرار.
- النظم الذكية Expert System or ES: تأخذ في الاعتبار أجهزة تستطيع أن تقلد عملية الإدراك لدي الخبراء وقدراتهم علي إدارة الحقائق المركبة وذلك بطريقة حسابية رقمية.
- نظم المعلومات الجغرافية العنكبوتية WebGIS: لتوفير و إتاحة و توزيع البيانات المكانية من خلال حاسبات (كمبيوترات) عن بعد بطريقة الشبكات الحاسوبية.

- علم الوجود Ontology: لتحديد المفاهيم والعلاقات لعنصر أو مجموعة من العناصر من خلال نظره إدراكية أو مفهوميه للعالم تستخدم في تطبيق محدد.

والأجزاء التالية تقدم وصفا مختصرا لكل عنصر من هذه العناصر المكونة للجيوماتكس.



شكل (١-١) بعض مكونات الجيوماتكس الرئيسية والعلاقات بينهم

١-٣ مكونات الجيوماتكس

علم الكمبيوتر:

يعتمد علم المعلوماتية Informatics بصفة رئيسية علي علم الكمبيوتر بشقيه التقنيين سواء تقنيات العتاد أو الأجهزة المادية Hardware و تقنيات البرامج Software التي تعد وسيلة استنباط المعلومات. وقد زادت حاجة الإنسان لعلم المعلوماتية في العقود القليلة الماضية لحاجته الماسة للتعامل مع كم هائل من البيانات المركبة في جميع مجالات حياته. ولو أمعنا النظر فسنجد أن المخ البشري في حد ذاته يتعامل مع البيانات و يحللها ومن ثم يستطيع الوصول الي معلومات وبناءا عليها يقوم باتخاذ قراراته. وتقوم أجهزة الحاسوب بتخزين مجموعة من البيانات و الخطوات و الإرشادات ومن ثم تنفيذ هذه الخطوات بتتابع، بينما تعد البرامج الحاسوبية هي طريقة تنفيذ الخطوات المطلوبة بدقة و سرعة عالية.

البيانات و المعلومات:

يستخدم الكثيرون مصطلحي البيانات Data و المعلومات Information بطريقة مترادفة، مع أنهما مختلفين تماما في المعنى. فإذا أخذنا مثالا بسيطا فأن مجموعة من الحروف الأبجدية هي "بيانات" بينما تعد الكلمة المكونة من هذه الحروف بمثابة "معلومات". فالبيانات هي قياسات للعالم الخارجي، بينما المعلومات هي ما يستطيع أي نظام ذكي (سواء المخ البشري أو نظام الكتروني) الحصول عليه من معلومات بناءا علي تحليل هذه البيانات. أي أن الحصول علي معلومة هو عملية إدراكية مبنية علي البيانات. فكمثال فأن قواعد البيانات الرقمية هي بيانات بينما نتائج الاستعلام عن سؤال محدد تُعد معلومات. وكمثال متعلق بالجيوماتكس فمن الممكن القول أن الصورة الخام القمر الصناعي هي نوع من البيانات بينما المعلومات هنا هي ما يمكن استنباطه من هذه الصورة مثل الخرائط الطبوغرافية أو الموضوعية.

الجيوديسيا و الكارتوجرافيا:

منذ القدم كان من أهم التحديات أمام العلماء و الباحثين كيفية تمثيل سطح الأرض بطريقة اصطناعية شاملة و دقيقة بقدر الإمكان. ويعد علم الكارتوجرافيا هو علم تمثيل سطح الأرض علي خريطة بناءا علي قواعد محددة. ويقدم الاتحاد العالمي للكارتوجرافيا تعريفا شاملا للخريطة وهو: الخريطة هي تمثيل اصطناعي للواقع الجغرافي يمثل مظاهر مختارة أو خصائص معينة - يتم تمثيلها بناءا علي وجهة نظر معد الخريطة - ويتم تصميم هذا التمثيل لاستخدامه عندما تكون المعلومات المكانية هي الأساس المطلوب التعامل معه. ويبني علم الكارتوجرافيا علي عدد من العلوم الأساسية الأخرى مثل علوم الفيزياء والجغرافيا و الهندسة والرياضيات بالإضافة للعلوم التقنية الحديثة مثل التقنيات الإحصائية و الحاسوبية للتعامل مع البيانات.

يهتم علم الجيوديسيا بتحديد شكل و أبعاد كوكب الأرض من خلال شقيه الجيوديسيا الفيزيقية و الجيوديسيا الهندسية. تقوم الجيوديسيا الفيزيقية أو الطبيعية بتحديد مجال الجاذبية الأرضية للأرض ومن ثم تحديد الشكل الحقيقي للأرض المعروف باسم الجيويد. وعلي الجانب الآخر فأن أفرع الجيوديسيا الهندسية - مثل الفلك - تقوم بتحديد مواقع النقاط والظاهرات علي الأرض وذلك من خلال القياسات الفلكية علي النجوم الطبيعية أو من خلال القياسات علي الأقمار الصناعية.

المساحة:

المساحة أو الطبوغرافيا (مشتقة من مقطعين: طبو بمعني مكان و غرافيا بمعني كتابة) هي علم وصف معالم سطح الأرض باستخدام الرسم و القياس. ومنذ القدم فيعد علم المساحة أحد فروع العلوم الهندسية التطبيقية حيث عرفته البشرية منذ آلاف السنين خاصة لتمثيل وتحديد الملكيات. ومع بداية القرن العشرين الميلادي دخلت تقنيات التصوير الجوي و التصوير الفضائي لتكمل الصورة العامة لمفهوم المساحة.

المساحة التصويرية:

تعرف المساحة التصويرية علي أنها عملية اشتقاق معلومات مترية عن هدف محدد من خلال قياسات تتم علي صور جوية (ملتقطة من الطائرات) مما يقود الي عملية تفسير الصور (بصريا أو من خلال أجهزة) للحصول أيضا علي معلومات وصفية عن الهدف. ومع تطبيق التصوير باستخدام الأشعة غير المرئية فقد توسع مفهوم المساحة التصويرية و تفسير الصور ليشمل الاستشعار عن بعد و أيضا التفسير الرقمي للصور digital image processing باستخدام أجهزة و برامج حاسوبية. ومن ثم فقد أصبح هناك تعريفا جديدا للمساحة التصويرية و الاستشعار عن بعد ليصبح:

> علم و فن و تقنية الحصول علي معلومات عن أهداف طبيعية وعن البيئة من خلال عملية جمع و قياس و تحليل الصور (الفوتوغرافية أو الرقمية) وعملية النمذجة الرياضية للطاقة الكهرومغناطيسية المسجلة بواسطة أجهزة (كاميرات أو ماسحات) دون الاحتكاك المباشر مع هذه الأهداف.

الاستشعار عن بعد:

يشمل الاستشعار عن بعد تقنيات اشتقاق معلومات عن هدف أو موقع محدد يقع علي مسافة من جهاز الاستشعار (المستشعر). وهناك ما يعرف بالاستشعار عن بعد السالب passive remote sensing حيث يكون مصدر المعلومات هو الأشعة المنبعثة أو المنعكسة أو الممتصة بواسطة الهدف وهي ما تسمح لنا بدراسة وتحديد طبيعة الهدف من خلال مدي تفاعله مع هذه الأشعة. فلكل عنصر من عناصر الأرض طبيعة محددة في التعامل مع الأشعة من حيث درجة أو نسبة الامتصاص أو الانعكاس أو الانبعاث وذلك بناءا علي الخصائص الطبيعية و الكيمائية والتكوينية لهذا العنصر. وفي هذا النوع من الاستشعار عن بعد (السالب) تكون الشمس هي المصدر الرئيسي للأشعة أو الطاقة المستخدمة في عملية الاستشعار، أي أن المستشعر يقوم فقط باستقبال الأشعة أو الطاقة. أما الاستشعار عن بعد الموجب أو الفاعل active remote sensing فأن جهاز الاستشعار ذاته هو من يطلق ثم يستقبل الطاقة الكهرومغناطيسية، وذلك مثل مفهوم الرادار حيث يتم إطلاق أشعة ترتد من الهدف ومن خلال قياس الفترة الزمنية يمكن حساب المسافة بين الهدف و جهاز الرادار.

وتتعدد التطبيقات البيئية للاستشعار عن بعد (والتصوير الجوي أيضا) لتشمل الجيولوجيا و الجيومورفولوجي (علم أشكال سطح الأرض) و الهيدرولوجيا و علم دراسة المحيطات ودراسات الموارد الطبيعية و الزراعية والتلوث البيئي والتخطيط العمراني و الإقليمي ودراسة و متابعة المخاطر البيئية وتطبيقات أخرى كثيرة. وتجدر الإشارة الى أن الاستشعار عن بعد لا

يجمع معلومات مباشرة عن البيئة لكن اشتقاق المعلومات يتم من خلال تحويل قيم الطاقة الكهرومغناطيسية الي قيم محددة تعبر عن الطبيعة الكيمائية و الفيزيقية و الحيوية للأهداف المستشعرة، ومن ثم فأن نتائج الاستشعار عن بعد تعتمد أساسا علي البرامج الحاسوبية و النماذج الرياضية المستخدمة في تفسير و تحليل الطاقة التي يستقبلها و يسجلها جهاز الاستشعار.
ويتميز الاستشعار عن بعد (خاصة بالأقمار الصناعية) بإمكانية استشعار نفس المنطقة الجغرافية عدة مرات في فترة زمنية تتراوح من عدة ساعات الي عدة أسابيع، وهذا ما يسمح لنا بإمكانية الحصول علي خرائط محدثة بصفة دورية وأيضا إمكانية متابعة الظاهرات الجغرافية المتحركة أو الديناميكية.

النظم العالمية لتحديد المواقع:

تسمح نظم تحديد المواقع بالحصول علي الإحداثيات ثلاثية الأبعاد three-dimensional positions للأهداف الثابتة أو المتحركة في أي مكان علي الأرض و تحت أية ظروف مناخية. والفكرة الأساسية في هذه النظم تعتمد علي إرسال الأقمار الصناعية لموجات من الراديو يتم استقبالها و تسجيلها من خلال أجهزة استقبال أرضية خاصة، ومن ثم حساب إحداثيات موقع جهاز الاستقبال. وتعتمد تلك الحسابات علي معرفة إحداثيات القمر الصناعي ذاته (في لحظة إرسال الإشارة الراديوية) اعتمادا علي المعرفة المسبقة لمدار القمر الصناعي في الفضاء منسوبة الي نظام إحداثيات و مرجع جيوديسي محدد (مثل المرجع الجيوديسي العالمي WGS84). ويتم تحديد إحداثيات موقع جهاز الاستقبال (أو الأنتنا antenna) من خلال حساب المسافة بين الجهاز و القمر الصناعي بمعرفة الزمن المستغرق بين لحظة إرسال الشارة من القمر الصناعي و لحظة استقبالها في جهاز الاستقبال.

حاليا يوجد نظامين عالميين من النظم العالمية لتحديد المواقع وهما النظام الأمريكي المعروف باسم النظام العالمي لتحديد المواقع Global Positioning System المعروف اختصارا باسم الجي بي أس GPS ، والنظام الروسي لتحديد المواقع المعروف باسم جلوناس GLONASS. كما يقوم الاتحاد الأوروبي بتطوير نظام عالمي جديد لتحديد المواقع تحت اسم جاليليو Galileo، وأيضا تقوم الصين بتطوير نظام مشابه.

المسح الليزري:

تعد تقنية المسح الليزري تقنية مساحية مميزة للحصول علي الأبعاد الثلاثية بدقة عالية وفي مستوي ملموس من الآلية و الإنتاجية العالية. تعتمد هذه التقنية علي وجود مصدر أو جهاز (ثابت أو متحرك سواء علي الأرض أو من خلال طائرة) لإطلاق أشعة الليزر تغطي مجموعة كبيرة من النقاط، ومن خلال استقبال الأشعة المنعكسة من كل نقطة يمكن تحديد الأبعاد الثلاثية لكلا منها ومن ثم الحصول علي صورة ثلاثية الأبعاد لكل معالم المنطقة. وتعد تقنية المسح الليزري تطورا ثوريا في مفهوم المساحة التصويرية حيث أصبح من الأسهل و الأسرع الحصول علي الإحداثيات الثلاثية للأهداف دون الحاجة لتوافر الصور المزدوجة stereo pair of photographs مما سمح بتخفيض خطوات و تكلفة عملية اشتقاق الإحداثيات وجعلها تتم بصورة شبة أوتوماتيكية و بمعدل عالي من الإنتاجية.

نظم المعلومات الجغرافية:

كبرنامج حاسوبي لإدارة المعلومات الجغرافية ظهرت نظم المعلومات الجغرافية Geographic Information Systems - أو اختصارا GIS - لأول مرة في منتصف الستينات من القرن العشرين الميلادي. إلا أن التسعينات من القرن العشرين شهدت زيادة هائلة في انتشار تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية مع زيادة قدراتها علي تخزين و أرشفة و تشغيل و نمذجة و تحليل البيانات بهدف تمثيل الواقع الحقيقي. وتوجد عدة تعريفات لنظم المعلومات الجغرافية و منهم علي سبيل المثال تعريف Aronoff 1989: نظم المعلومات الجغرافية هي مجموعة من الخطوات الحاسوبية تستخدم لتخزين و إدارة و معالجة البيانات المكانية أو الجغرافية ، وأيضا تعريف Burrough 1997: نظم المعلومات الجغرافية هي مجموعة فعالة من الأدوات لجمع و تخزين و تحليل و عرض البيانات المكانية عن الواقع الحقيقي لغرض أو أعراض محددة. ويعتمد تمثيل البيانات المكانية علي: (أ) البيانات المكانية وتشمل الموقع أو الإحداثيات منسوبة لنظام محدد، (ب) البيانات غير المكانية للأهداف أو المعالم مثل الاسم و النوع والمساحة .... الخ، (ج) العلاقات المكانية بين الأهداف أو المعالم (الطبولوجي).

نظم اتخاذ القرار و النظم الذكية:

تطور تعريف تقنية نظم المعلومات الجغرافية لينتج ما يمكن أن نطلق عليه اسم تقنية نظم اتخاذ القرار Decision Support Systems أو اختصار DSS والتي يمكن تعريفها كالتالي: هي مجموعة فعالة من الأدوات لجمع و تخزين و تحليل و عرض البيانات المكانية عن الواقع الحقيقي بهدف إمداد متخذي القرار بتقديرات موضوعية عن المشاكل البيئية. وتهدف نظم اتخاذ القرار الي دراسة البدائل المختلفة لمشكلة محددة بهدف بيان وتحديد التداعيات أو الآثار المحتملة لكلا منهم. فكمثال عند دراسة حدوث فيضان أو بركان فيتم دراسة قوته و امتداده المكاني وآثاره المتوقعة بهدف الوصول الي وضع خطة محددة للتعامل معه وتحديد خطة إخلاء السكان.

المعلومات المكانية:

في عام ٢٠٠٣م ظهر مصطلح معلومات البيانات المكانية Spatial Data Information مع إنشاء منظمة البنية التحتية للمعلومات العالمية Global Spatial Data Infrastructure والتي عرفا اختصارا باسم GSDI. وتهدف هذه المنظمة لزيادة التعاون الدولي لتكوين بنية تحتية للمعلومات المكانية علي المستويات الوطنية و العالمية والتي ستسمح للأمم بدراسة أدق للظواهر الاجتماعية و الاقتصادية و البيئية. ومن ثم فقد أصبح مصطلح المعلومات المكانية GeoSpatial Information (أو اختصارا GI) مصطلحا مقبولا علي المستوي العالمي للتحديد الدقيق للعالم الذي نعيش فيه.

الجغرافيا:

تعتمد الجغرافيا علي عدة علوم طبيعية و بشرية لتشكل معا مفهوما تفسيريا لتحليل و تفسير العلاقات و المؤثرات للأهداف المتطورة باستمرار. ومن ثم فتشمل الدراسات الجغرافية أسس علوم الأرض (مثل الجيولوجيا و المناخ و دراسة استخدامات الأراضي ... الخ) والعلوم الرياضية الطبيعية (مثل الرياضيات و الإحصاء و الفيزياء .. الخ) والعلوم الإنسانية المجتمعية (مثل التاريخ و الاجتماع ... الخ) وأيضا العلوم السياسية و الاقتصادية (مثل الاقتصاد و

السياسة و القانون و التخطيط ... الخ). ومن هنا فأن دراسة الجغرافيا للمكان لا تعتمد فقط علي الموقع بل تمتد لتشمل مفاهيم التوزيع والانتشار و الترابط و العلاقات المكانية بين المظاهر و المعالم الأرضية.

١-٤ أخصائى الجيوماتكس

مع الزيادة الكبيرة في تطبيقات المعلومات المكانية والحاجة لعدة تخصصات و تقنيات للتعامل معها فقد تطور حديثا تخصص علمي جديد تحت مسمي أخصائي أو خبير الجيوماتكس. فإذا نظرنا للتطور التاريخي فنجد تخصص المساحة الأرضية قد ظهر مع بداية القرن السابع عشر الميلادي ليدل علي علم يجمع علوم الرياضيات و الفيزياء و الفلك. ومع بداية القرن التاسع عشر وزيادة اعتماد المساحة علي الرياضيات و أجهزة القياس الدقيقة فقد تم تصنيف المساحة الأرضية كأحد تخصصات أو أفرع الهندسة المدنية. ومع توسع تخصصات و تقنيات المساحة لتشمل الجيوديسيا و التصوير الجوي و الاستشعار عن بعد و نظم المعلومات الجغرافية ونظم اتخاذ القرار فلم يعد مصطلح "المساح" أو "مهندس المساحة" شاملا لكل هذه التقنيات ومن ثم ظهر تخصص "أخصائي أو خبير الجيوماتكس" وهو الفرد الذي يستطيع أن يتعامل مع كل مكونات علم الجيوماتكس بصورة تكاملية.

الفصل الثاني

تاريخ و أقسام علم المساحة

٢-١ تعريف المساحة

يمكن تعريف علم المساحة بأنه علم تحديد المواقع للمظاهر الطبيعية و البشرية الموجودة علي أو تحت سطح الأرض وتمثيل هذه المظاهر علي خرائط تقليدية (مطبوعة) أو رقمية (باستخدام الحاسب الآلي).

أيضا يمكن تعريف علم المساحة بأنه العلم الذي يبحث في الطرق المناسبة لتمثيل سطح الأرض على خرائط. هذا التمثيل يشمل بيان جميع المحتويات القائمة والموجودة على سطح الأرض ، سواء أكانت طبيعية (مثل الهضاب والجبال والصحاري والأنهار والبحار والمحيطات) أو كانت صناعية (مثل الترع والمصارف والقناطر والسدود والطرق وخطوط السكك الحديدية والمنشآت والمباني والمدن وحدود الدول السياسية) ، وكذلك حدود الملكيات الخاصة والعامة. ومن الواجب أن تكون الخريطة صورة صادقة مصغرّة للطبيعة التي تمثلها، وأن تؤدي الغرض الذي عملت من أجله تاما كاملا.

٢-٢ تاريخ المساحة

ترجع بدايات علم المساحة إلي آلاف السنين حيث وجدت آثار تدل علي أن قدماء المصريين (ألف و خمسمائة عام قبل الميلاد) قد استخدموا المساحة في قياس و تحديد الملكيات الزراعية وذلك بهدف حساب مساحات الأراضي الزراعية لتقدير الضرائب لها ، وأيضا في إعادة تثبيت علامات حدود الملكيات بعد حدوث فيضان عالي لنهر النيل. وأستخدم المصريون القدماء أدوات بسيطة لقياس المسافات و اخترعوا وحدات لها. وكان يطلق علي العاملين بالمساحة أسم "شادي الحبل" Rope Stretchers حيث كانوا يستخدمون الحبال في قياس المسافات. كما تثبت الخصائص الهندسية لأهرامات الجيزة في مصر (وخاصة تساوي أضلاع الأضلاع بدقة و التوجه الدقيق لجهة الشمال) وكذلك اختيار موقع معبد أبو سمبل في جنوب مصر (بحيث تتعامد أشعة الشمس علي وجه تمثال الملك تحديدا في يوم عيد ميلاده) أن المصريين القدماء كانت لديهم خبرة جيدة بأعمال المساحة.

شكل (٢-١) قياسات المساحة في عهد قدماء المصريين

ومن أشهر التجارب المساحية في ذلك العصر ما قام به العالم الإغريقي أرسطوستنيس Eratosthenes - في عام ٢٠٠ قبل الميلاد تقريبا في مدينة الإسكندرية - بمحاولة حساب محيط الأرض والتي كانت بداية علم المساحة الجيوديسية. تلا ذلك ابتكار اليونانيون والرومان لعدد من أجهزة المساحة لعمل التوجيه والتسوية ويعتبر العالم اليوناني هيرون Heron - في عام ١٢٠ قبل الميلاد - الرائد الأول في المساحة والذي حولها إلي علم متخصص يحتاج للدراسة و التدريب.

أضاف علماء المسلمين إضافات علمية قوية لعلم المساحة فقد ابتكروا أجهزة قياس الزوايا والتوجيه مثل جهاز الاسطرلاب والأجهزة الدقيقة للتسوية ، كما برعوا في الرياضيات التي يقوم عليها علم المساحة مثل العالم الكبير الخوارزمي الذي أنشأ أول خريطة دقيقة للعالم عرفت باسم خريطة المأمون.

شكل (٢-٢) جهاز الاسطرلاب لقياس الزوايا

مع بداية القرن الثامن عشر الميلادي بدأ إنشاء شبكات الثوابت الأرضية في أوروبا بهدف إقامة العلامات المساحية التي تسمح بالتحديد الدقيق للمواقع لكل دولة.

شكل (٢-٣) نماذج لأجهزة ثيودليت قديمة لقياس الزوايا

تطور علم المساحة بدرجة هائلة في القرن العشرين الميلادي مع ابتكار أجهزة قياس المسافات بالليزر وإطلاق الأقمار الصناعية واختراع الحاسبات الآلية. ومع تعدد تطبيقات علم المساحة في المجالات المدنية و العسكرية علي كافة تخصصاتها بدأ البعض يطلق أسماء جديدة علي هذا العلم مثل علم الجيوماتكس Geomatics ليكون تعبيرا شاملا عن التكامل بين المساحة الأرضية و المساحة الفضائية و الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية. ومن التعريفات الحديثة لعلم الجيوماتكس أنه العلم و الفن و التقنيات الخاصة بالطرق والوسائل المختلفة لقياس و تجميع المعلومات الخاصة بالسطح الفيزيائي و البيئي للأرض والتعامل مع هذه المعلومات لإنتاج خرائط متعددة الأغراض مع رفع كفاءة تجميع و تدقيق و تحديث البيانات المكانية ذات البعد الجغرافي وإدارة هذه البيانات داخل قاعدة بيانات نظم المعلومات الجغرافية مع ضمان تطورها و استدامتها.

جهاز المحطة الشاملة

جهاز تسوية الأرض بالليزر

جهاز جي بي أس

شكل (٢-٤) أجهزة مساحية حديثة

٢-٣ أقسام علم المساحة

توجد عدة تقسيمات لأنواع تطبيقات المساحة سواء من حيث مجال الاستخدام أو من حيث الهدف من العمل المساحي أو من حيث الجهاز المساحي المستخدم ... الخ. إلا أن أقسام المساحة هي:

(أ) المساحة الأرضية Terrestrial Survey:

تشمل المساحة الأرضية تطبيقات و قياسات علم المساحة علي سطح الأرض من خلال أجهزة موضوعة علي سطح الأرض ، وتنقسم طبقا لطبيعة هذه القياسات إلي نوعين أساسيين:

أ-١ المساحة الجيوديسية Geodetic Survey:

في هذا النوع من علوم المساحة يتم الاعتماد علي الشكل الحقيقي شبه الكروي للأرض - والذي هو شكل غير مستوي - ومن ثم تعتمد الأجهزة و طرق الحسابات المستخدمة في المساحة الجيوديسية علي هذا المبدأ الهام. غالبا يتم استخدام المساحة الجيوديسية في تمثيل مساحات كبيرة من سطح الأرض.

أ-٢ المساحة المستوية Plane Survey:

عند إجراء القياسات المساحية في منطقة صغيرة من سطح الأرض (عدة كيلومترات مربعة) يمكن إهمال الشكل الحقيقي للأرض والاكتفاء بافتراض أن هذا الجزء الصغير يمكن تمثيله كمستوي ، ومن هنا جاء أسم المساحة المستوية.

تنقسم المساحة المستوية إلي فرعين: (١) المساحة التفصيلية Cadastral Survey والتي تهتم بتوضيح حدود الملكيات العامة و الخاصة ويكون هذا التمثيل باستخدام بعدين فقط (الطول و العرض) لكل هدف ولذلك يسمي هذا النوع من أقسام المساحة بالمساحة ثنائية الأبعاد ، (٢) المساحة الطبوغرافية Topographic Survey والتي تهتم بقياس البعد الثالث (الارتفاع أو الانخفاض) لكل هدف بحيث يتم تمثيله من خلال ثلاثة أبعاد: الطول و العرض و الارتفاع. ولذلك تسمي المساحة الطبوغرافية باسم المساحة ثلاثية الأبعاد.

كما توجد بعض التقسيمات الأخرى للمساحة المستوية حيث يقسمها البعض إلي عدة أنواع طبقا للهدف من المشروع المساحي ذاته مثل:

- المساحة الأرضية أو التفصيلية Land or Cadastral Survey: تهتم بالتحديد الدقيق للمواقع و الحدود لقطع الأراضي في منطقة صغيرة.
- المساحة الطبوغرافية Topographic Survey: تهتم بجمع الأرصاد و القياسات الأفقية وكذلك الارتفاعات للمظاهر الطبيعية و البشرية لتطوير الخرائط ثلاثية الأبعاد.
- المساحة الهندسية أو الإنشائية Engineering or Construction Survey: تهتم بجمع القياسات لكل مراحل تنفيذ المشروعات الهندسية.
- مساحة الطرق Route Survey: تهتم لتنفيذ العمل المساحي المطلوب لإنشاء مشروعات النقل مثل الطرق و السكك الحديدية ومد الأنابيب وخطوط الكهرباء.

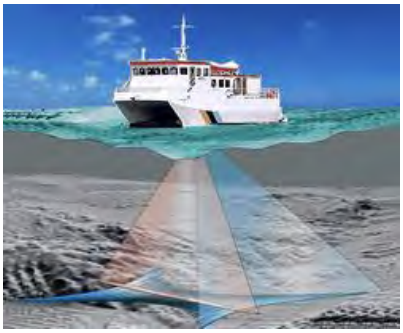
(ب) المساحة التصويرية أو الجوية Photogrammetry:

تتكون المساحة الجوية من عمل قياسات من الصور الملتقطة بكاميرات موضوعة في طائرات ثم استخدام هذه القياسات في إنتاج الخرائط المساحية. ويرجع تاريخ هذا النوع من المساحة إلي منتصف القرن العشرين الميلادي. ومع إطلاق الأقمار الصناعية ظهر علم الاستشعار عن بعد والذي يعتمد علي التصوير الفضائي من خلال كاميرات و أجهزة موضوعة داخل الأقمار الصناعية ، ومن هنا فيمكن إضافة علم الاستشعار عن بعد إلي قسم المساحة التصويرية. يمكن تقسيم المساحة التصويرية إلي ثلاثة أفرع: (١) المساحة الجوية Aerial Photogrammetry وهي حالة التصوير من الطائرات ، (٢) المساحة التصويرية الأرضية Close-Range Photogrammetry وهي حالة التصوير من علي سطح الأرض ، (٣) المساحة التصويرية الفضائية أو الاستشعار عن بعد Satellite Photogrammetry وهي حالة التصوير من الأقمار الصناعية.

شكل (٢-٥) المساحة الجوية

(ج) المساحة البحرية أو الهيدروجرافية Hydrographic Survey:

تهتم المساحة البحرية – كما هو واضح من أسمها – بتحديد مواقع الظاهرات الموجودة علي أو تحت سطح المياه في البحار والأنهار و المحيطات. ومن أمثلة منتجات المساحة البحرية الخرائط الهيدروجرافية التي تمثل تضاريس قاع البحر.



شكل (٢-٦) المساحة الهيدروجرافية

(د) المساحة الفلكية Astronomical Survey:

يعتمد هذا الفرع من أفرع المساحة علي رصد الأجرام السماوية واستخدام هذه القياسات في تحديد مواقع الظاهرات الجغرافية الموجودة علي سطح الأرض. وكانت المساحة الفلكية أحد أهم تطبيقات علم المساحة في إنشاء شبكات الثوابت الأرضية (نقاط معلومة الإحداثيات) قديما، إلا أن هذا التطبيق أصبح الآن يعتمد علي استخدام الأقمار الصناعية بدلا من النجوم الطبيعية. مازال الاعتماد علي المساحة الفلكية قسما هاما من أقسام علم المساحة وخاصة في التطبيقات المساحية التي تتطلب دقة عالية جدا - مثل دراسة تحركات القشرة الأرضية - إلا أن تقنياته وأجهزته قد تغيرت و تطورت كثيرا في الفترة الماضية، مثل تقنية VLBI (تقنية قياس خطوط القواعد الطويلة جدا باستقبال أشعة الأجرام السماوية).

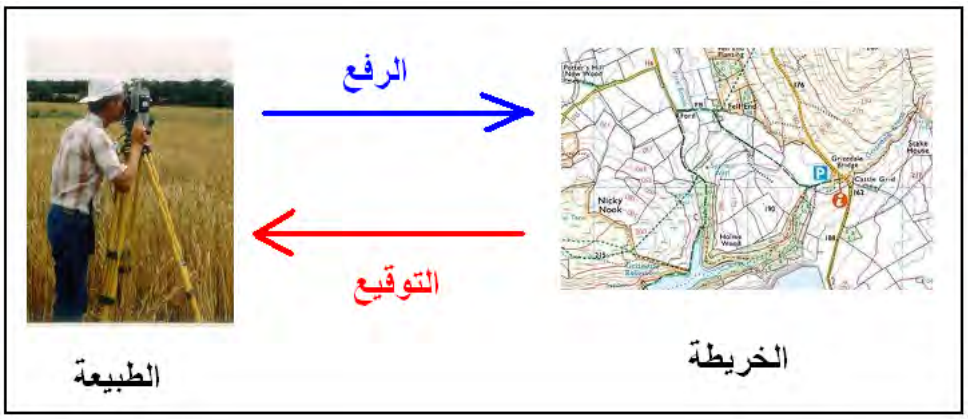
شكل (٢-٧) هوائيات تحديد المواقع بتقنية VLBI

٢-٤ العمل المساحي

يمكن تقسيم العمل المساحي بصفة عامة إلي جزأين أساسيين: الرفع و التوقيع:

الرفع Layout: وهو إجراء القياسات المساحية في الطبيعة ومن ثم تمثيلها علي الخريطة ، أي أن عملية الرفع هي عملية نقل المعلومات من الطبيعة إلي الخريطة.

التوقيع Setting out: وهو تحديد مواقع (إحداثيات) لظواهر أو أهداف محددة علي الخريطة ومن ثم تحديد هذه المواقع في الطبيعة ، أي أن عملية التوقيع هي عملية نقل المعلومات من الخريطة إلي الطبيعة.



شكل (٢-٨) أقسام العمل المساحي

الباب الثاني

المساحة الأرضية

Land Surveying

الفصل الثالث

وحدات و نظم القياس

ينصب العمل المساحي علي إجراء قياسات طولية (مسافات) و زاوية في الطبيعة ، لذلك فمن المهم لدارس علم المساحة أن يلم بالنظم و الوحدات المختلفة المستخدمة في تنفيذ هذه القياسات أو الأرصاد وطرق التحويل بينها.

٣-١ وحدات القياسات

٣-١-١ وحدات القياس الطولية

يوجد نظامين مستخدمين في قياس المسافات و الأطوال وهما النظام الدولي والنظام الانجليزي.

في النظام الدولي (يسمي أيضا النظام الفرنسي) ويرمز له بالرمز SI يتم استخدام وحدات المتر و مشتقاته كالآتي:

١ متر (م) = ١٠ ديسيمتر (دسم)
١ ديسيمتر (دسم) = ١٠ سنتيمتر (سم)
١ سنتيمتر (سم) = ١٠ ملليمتر (مم)
١ كيلومتر (كم) = ١٠٠٠ متر (م)

أي أن:
١ متر (م) = ١٠٠ سنتيمتر (سم)
١ متر (م) = ١٠٠٠ ملليمتر (مم)
١ كيلومتر (كم) = ١٠،٠٠٠ ديسيمتر (دسم)
١ كيلومتر (كم) = ١٠٠،٠٠٠ سنتيمتر (سم)
١ كيلومتر (كم) = ١،٠٠٠،٠٠٠ ملليمتر (مم)

أما في النظام الانجليزي فيتم استخدام وحدات القدم و مشتقاته كالآتي:

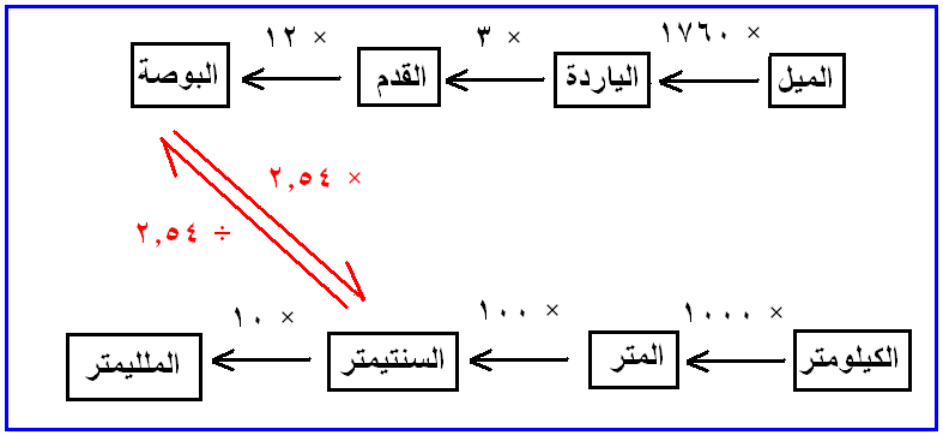
١ ميل = ١٧٦٠ ياردة
١ ياردة = ٣ قدم
١ قدم = ١٢ بوصة

للتحويل بين كلا نظامي القياسات الطولية فتوجد عدة علاقات رياضية تشمل:

١ متر = ٣.٢٨٠٨ قدم
١ متر = ٣٩.٣٧ بوصة
١ متر = ٣ ياردة
١ كيلومتر = ٠.٦٢١٢٧ ميل
١ بوصة = ٢.٥٤ سنتيمتر

١ قدم = ٣٠.٤٨ سنتيمتر
١ ياردة = ٠.٩١٤٤ متر
١ ميل = ١٦٠٩.٣٥ متر
١ ميل = ١.٦٠٩٣٤ كيلومتر

للسهولة يمكن الاكتفاء بمعرفة علاقة رياضية واحدة فقط للتحويل بين كلا النظامين كما في المثال التالي:



شكل (٣-١) التحويل بين نظم الوحدات الطولية

أحسب طول الطريق بين مكة المكرمة و الرياض بالميل إذا علمت أن طوله يبلغ ٨٨٠ كيلومتر؟

الطول = ٨٨٠ ×١٠٠٠ × ١٠٠ / (٢.٥٤ × ١٢ × ٣ × ١٧٦٠)
= ٥٤٦.٨٠٦ ميل

أحسب طول ملعب كرة قدم بالمتر إن كان طوله يساوي ١٠٠ ياردة؟

الطول = ١٠٠ × ٣ × ١٢ × ٢.٥٤ / (١٠٠)
= ٩١.٤٤ متر

٣-١-٢ وحدات قياس المساحات

١ متر مربع = ١٠٠ × ١٠٠ = ١٠٠٠٠ سنتيمتر مربع
١ كيلومتر مربع = ١٠٠٠ × ١٠٠٠ = ١٠٠٠٠٠٠ متر مربع

نظام وحدات قياس المساحات (وخاصة الزراعية) في المملكة العربية السعودية:

١ دونم = ١٠٠٠ متر مربع
١ هكتار = ١٠ دونم
١ هكتار = ١٠٠٠٠ متر مربع

١ كيلومتر مربع = ١٠٠ هكتار

نظام وحدات قياس المساحات (وخاصة الزراعية) في جمهورية مصر العربية:

١ فدان = ٢٤ قيراط
١ قيراط = ٢٤ سهم

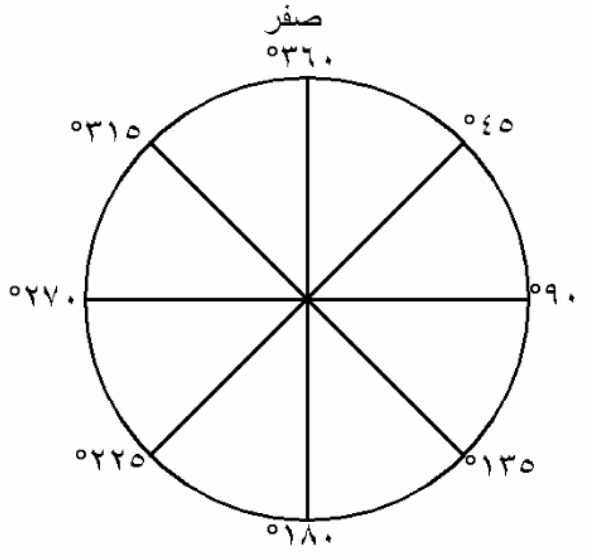
١ فدان = ٤٢٠٠.٨٣ متر مربع
١ قيراط = ١٧٥.٠٩ متر مربع
١ سهم = ٧.٢٩ متر مربع

٣-٢ نظم قياس الزوايا

توجد ثلاثة أنظمة لقياس الزوايا (والاتجاهات) وهي النظام الستيني و النظام المئوي و النظام الدائري:

٣-٢-١ النظام الستيني لقياس الزوايا

في النظام الستيني تقسم الدائرة إلي ٣٦٠ قسما يسمي الجزء الواحد منها الدرجة الستينية ويرمز له بالرمز (°) ، ثم تقسم الدرجة الستينية الواحدة إلي ٦٠ جزءا يسمي الواحد منهم الدقيقة الستينية ويرمز له بالرمز (') ، ثم تقسم الدقيقة الستينية الواحدة إلي ٦٠ جزءا يسمي الواحد منهم الثانية الستينية ويرمز له بالرمز (").



شكل (٣-٢) النظام الستيني لقياس الزوايا

أي أن:
١ درجة ستينية ° = ٦٠ دقيقة ستينية '
١ دقيقة ستينية ' = ٦٠ ثانية ستينية "

١ درجة ستينية ^{o} = ٦٠ × ٦٠ = ٣٦٠٠ ثانية ستينية $^{"}$

وتكتب الزاوية الستينية بالشكل التالي: ٤٥" ٥٢' ١٢٧^{o} أي: ١٢٧ درجة و ٥٢ دقيقة و ٤٥ ثانية.

مثال:

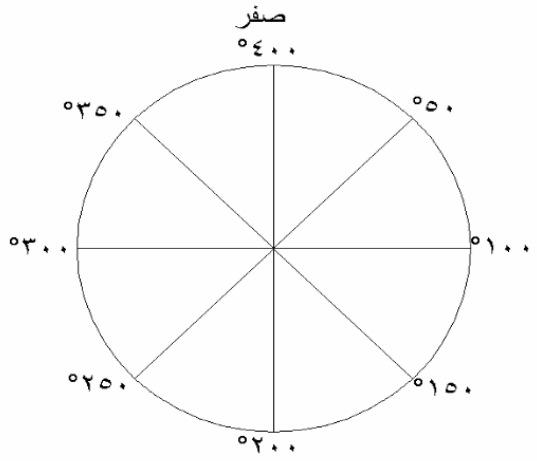
الزاوية ٤٥" ٥٢' ١٢٧^{o} = (٤٥" ÷ ٦٠) + ٥٢' + ١٢٧^{o} = ١٢٧^{o} ٥٢'.٧٥

= (٥٢'.٧٥ ÷ ٦٠)' + ١٢٧^{o} = ١٢٧^{o} .٨٧٩١٦٧

= (٤٥" ÷ ٦٠) + (٥٢' ÷ ٦٠) + ١٢٧^{o} = ١٢٧^{o} .٨٧٩١٦٧

٣-٢-٢ النظام المئوي لقياس الزوايا

في النظام المئوي (يسمي أيضا جراد) تقسم الدائرة إلي ٤٠٠ قسما يسمي الجزء الواحد منها الدرجة المئوية أو الجراد ويرمز له بالرمز (^{g}) ، ثم تقسم الدرجة المئوية الواحدة إلي ١٠٠ جزءا يسمي الواحد منهم الدقيقة المئوية ويرمز له بالرمز (^{c}) ، ثم تقسم الدقيقة المئوية الواحدة إلي ١٠٠ جزءا يسمي الواحد منهم الثانية المئوية ويرمز له بالرمز (^{cc}).



شكل (٣-٣) النظام المئوي لقياس الزوايا

أي أن:

١ درجة مئوية ^{g} = ١٠٠ دقيقة مئوية ^{c}

١ دقيقة مئوية ^{c} = ١٠٠ ثانية مئوية ^{cc}

١ درجة مئوية ^{g} = ١٠٠ × ١٠٠ = ١٠٠٠٠ ثانية مئوية ^{cc}

وتكتب الزاوية الستينية بالشكل التالي: ٨٥^{cc} ٦٢^{c} ٣٧٢^{g} أي: ٣٧٢ درجة و ٦٢ دقيقة و ٨٥ ثانية.

مثال:

الزاوية ٨٥^{cc} ٦٢^{c} ٣٧٢^{g}

= (٨٥ ^{cc} ÷ ١٠٠) + ٦٢ ^{c} ٣٧٢ ^{g} = ٦٢.٨٥ ^{c} ٣٧٢ ^{g}

= (٦٢.٨٥ ^{c} ÷ ١٠٠) ^{c} + ٣٧٢ ^{g} = ٣٧٢.٦٢٨٥ ^{g}

= (٨٥^{cc} ÷ ١٠٠) + (٦٢^{c} ÷ ١٠٠) + ٣٧٢^{g} = ٣٧٢.٦٢٨٥ ^{g}

٣-٢-٣ النظام الدائري لقياس الزوايا

يعادل التقدير الدائري لأي زاوية النسبة بين طول القوس الذي يقابل هذه الزاوية (المقطوع من دائرة مركزها رأس هذه الزاوية) ونصف قطر هذه الدائرة.

تقاس الزاوية الدائرية بوحدات تسمي "الراديان" - ويرمز له بالرمز ^{r} - حيث يكون محيط الدائرة الكاملة = ٢ ط = ٢ × ٢٢ ÷ ٧ = ٦.٢٨٣١٨٥٣٠٧ راديان.

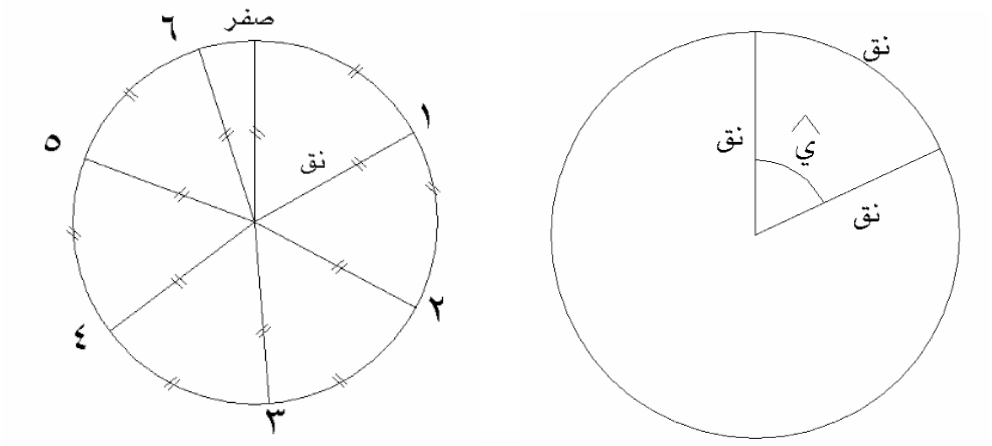
أي أن:

١ راديان = ٥٧.٢٩٥٧٧٩٥^{o}

= ٥٧ ^{o} ١٧ ' ٤٤.٨ "

= ٢٠٦٢٦٥ "

= ٦٣.٦٦١٩٩٧٢ ^{g}



شكل (٣-٤) النظام الدائري لقياس الزوايا

٣-٢-٤ التحويل بين نظم قياس الزوايا

(أ) للتحويل بين النظام الستيني و النظام المئوي:

بما أن الدائرة تعادل ٣٦٠ درجة ستينية وفي نفس الوقت تعادل ٤٠٠ درجة مئوية ، أي أن:

٣٦٠ درجة ستينية = ٤٠٠ درجة مئوية

إذن:

١ درجة ستينية	= ١.١١١١١١	درجة مئوية
١ درجة مئوية	= ٠.٩	درجة ستينية

(ب) للتحويل بين النظام الستيني و النظام الدائري:

بما أن الدائرة تعادل ٣٦٠ درجة ستينية وفي نفس الوقت تعادل ٢ ط راديان ، أي أن:

٣٦٠ درجة ستينية = ٢ ط راديان

إذن:

١ درجة ستينية	= ط ÷ ١٨٠	راديان
١ درجة دائرية	= ١٨٠ ÷ ط	درجة ستينية

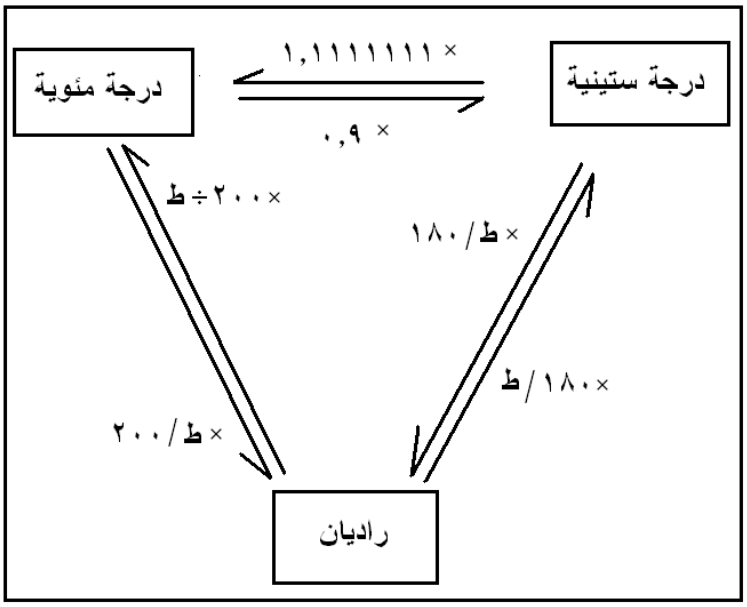
(ج) للتحويل بين النظام المئوي و النظام الدائري:

بما أن الدائرة تعادل ٤٠٠ درجة مئوية وفي نفس الوقت تعادل ٢ ط راديان ، أي أن:

٤٠٠ درجة مئوية = ٢ ط راديان

إذن:

١ درجة مئوية	= ط ÷ ٢٠٠	راديان
١ درجة دائرية	= ٢٠٠ ÷ ط	درجة مئوية



شكل (٣-٥) التحويل بين نظم قياس الزوايا

أمثلة:

١- حول الزاوية المئوية ٤٥^{cc} ٨٠^{c} ١٧١^{g} إلي التقدير الستيني:

الزاوية = (٤٥ ÷ ١٠٠٠٠) + (٨٠ ÷ ١٠٠) + ١٧١ = ١٧١.٨٠٤٥ ^{g}
= ١٧١.٨٠٤٥ × ٠.٩ = ١٥٤.٦٢٤٠٥ ^{o}
= ١٥٤ ^{o} ٣٧ " ٢٧ "

٢- حول الزاوية ١٥٤ ^{o} ٣٧ " ٢٧ " إلي التقدير الدائري:

الزاوية = (٢٧ ÷ ٣٦٠٠) + (٣٧ ÷ ٦٠) + ١٥٤ = ١٥٤.٦٢٤٠٥ ^{o}
= ١٥٤.٦٢٤٠٥ × ط / ١٨٠
= ٢.٦٩٩٧٨٥ راديان

٣-٣ الأشكال الهندسية البسيطة

مساحة المربع = مربع طول الضلع = طول الضلع × نفسه (٣-١)

مساحة المستطيل = الطول × العرض (٣-٢)

مساحة متوازي الأضلاع = القاعدة × الارتفاع (٣-٣)

مساحة المعين = القاعدة × الارتفاع أو = نصف حاصل ضرب القطرين (٣-٤)

مساحة شبه المنحرف = نصف مجموع القاعدتين × الارتفاع (٣-٥)

مساحة الشكل الرباعي = نصف حاصل ضرب القطرين × جيب الزاوية المحصورة بينهما (٣-٦)

مساحة الدائرة = مربع نصف قطر الدائرة × ط = ط (نق)^{٢} (٣-٧)

حيث:
ط = ٧/٢٢ ، نق = نصف قطر الدائرة

مساحة سطح الكرة = ٤ ط (نق)^{٢} (٢-١)

مساحة الشكل البيضاوي = ط × نصف المحور الأكبر × نصف المحور الأصغر (٣-٨)

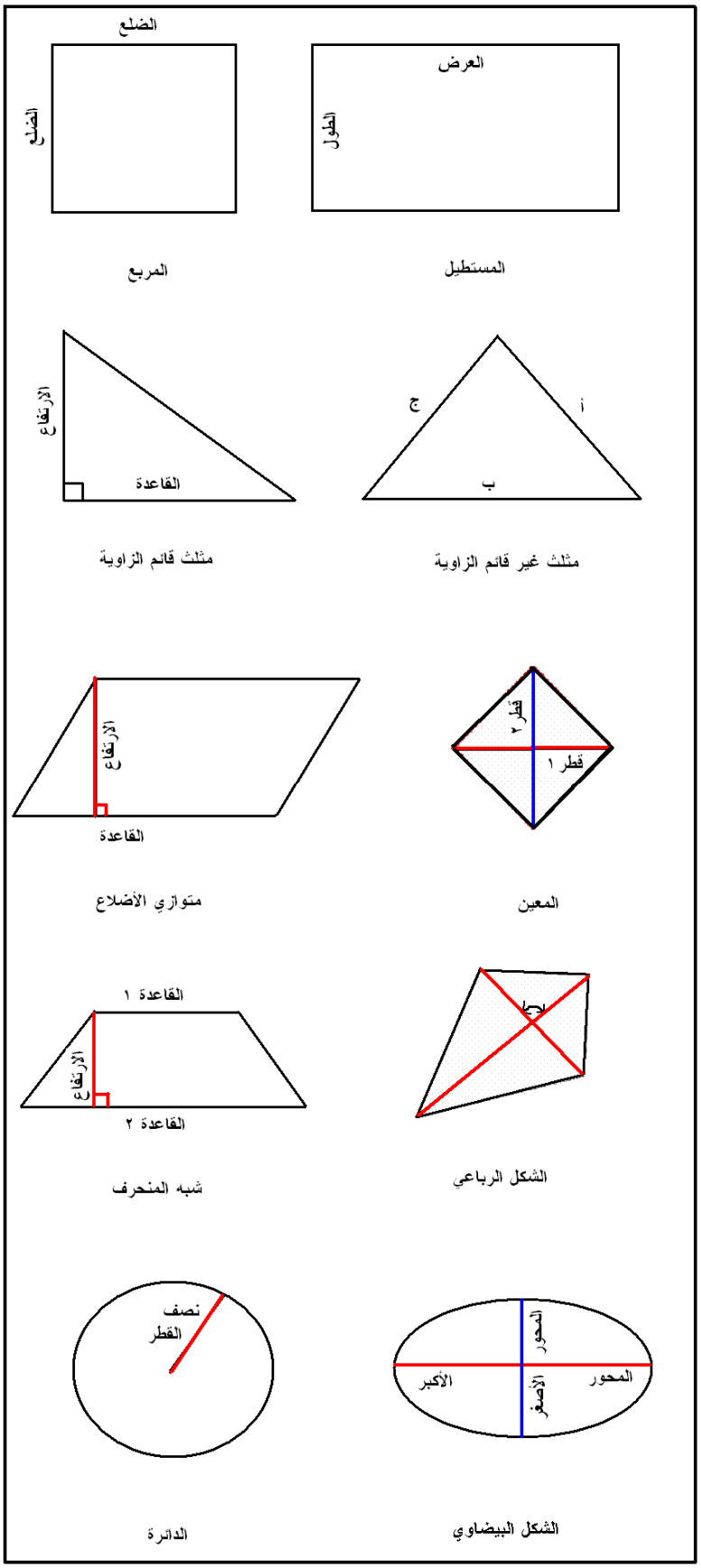
مساحة المثلث القائم الزاوية = ٠.٥ × القاعدة × الارتفاع (٣-٩)

مساحة المثلث غير قائم الزاوية = الجذر التربيعي [س × (س-أ) × (س-ب) × (س-ج)] (٣-١٠)

حيث:

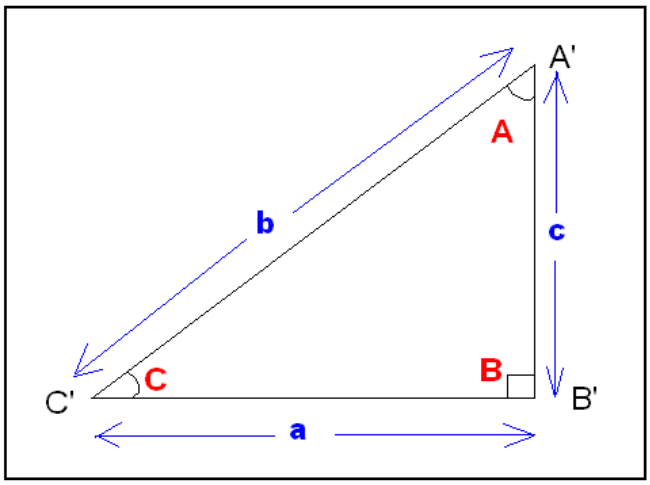
أ ، ب ، ج قيم أطوال الأضلاع الثلاثي للمثلث

س = نصف مجموع أضلاع المثلث = (أ + ب + ج) ÷ ٢



شكل (٣-٦) الأشكال الهندسية البسيطة

المثلث قائم الزاوية:



شكل (٣-٧) المثلث قائم الزاوية

النسب المثلثية:

جا أو sin لأي زاوية = طول الضلع المقابل / طول الوتر (٣-١١)

جتا أو cos لأي زاوية = طول الضلع المجاور / طول الوتر (٣-١٢)

ظا أو tan لأي زاوية = طول الضلع المقابل / طول الضلع المجاور (٣-١٣)

في المثلث الموضح فأن:

$\sin C = c / b$, $\cos C = a / b$, $\tan C = c / a$ (3-14)

معادلة فيثاغورث:

مربع طول الوتر = مربع طول المقابل + مربع طول المجاور

$b^2 = a^2 + c^2$ (3-15)

So:

$b = \sqrt{(a^2 + c^2)}$

$a = \sqrt{(b^2 - c^2)}$

$c = \sqrt{(b^2 + a^2)}$

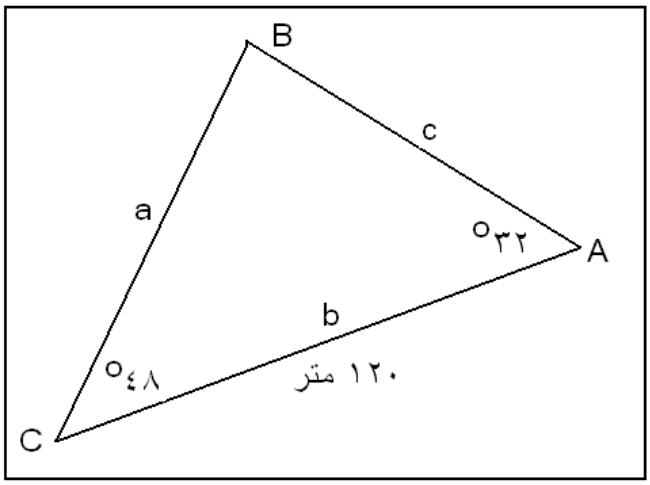
قانون جيب الزاوية:

لأي مثلث سواء كان قائم الزاوية أو لا فأن:

طول الضلع الأول / جا الزاوية المقابلة له = طول الضلع الثاني / جا الزاوية المقابلة له = طول الضلع الثالث / جا الزاوية المقابلة له

$$a / \sin A = b / \sin B = c / \sin C \qquad (3\text{-}16)$$

وبذلك يمكن حل المثلث (أي حساب باقي معلوماته) إذا علمنا منه زاويتين و ضلع:



شكل (٣-٨) مثال للمثلث غير قائم الزاوية

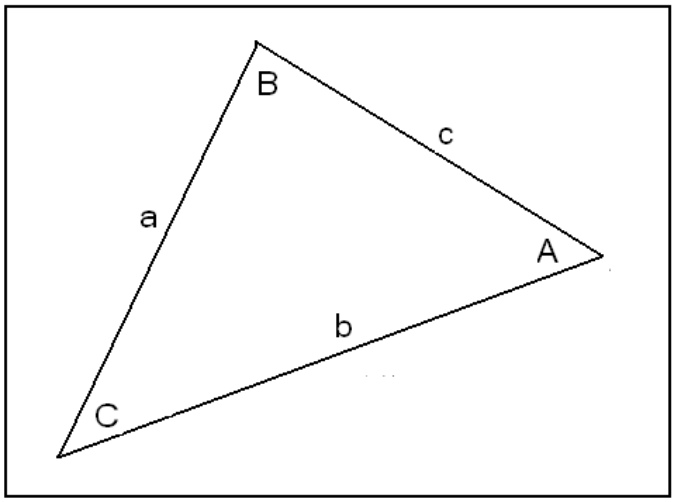
مثال:

$B = 180^\circ - (32^\circ + 48^\circ) = 100^\circ$
$120 / \sin 100^\circ = a / \sin 32^\circ = c / \sin 48^\circ$
$a = 120 \times \sin 32^\circ / \sin 100^\circ = 64.57$ m
$c = 120 \times \sin 48^\circ / \sin 100^\circ = 90.55$ m

قانون جيب تمام الزاوية:

لأي مثلث سواء كان قائم الزاوية أو لا فأن:

مربع طول أي ضلع = مجموع مربعي الضلعين الآخرين ناقص ضعف حاصل ضربهما في جيب تمام الزاوية المحصورة بينهما:



شكل (٣-٩) المثلث غير قائم الزاوية

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2\,b\,c\cos A \qquad (3\text{-}17)$$

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2\,a\,c\cos B \qquad (3\text{-}18)$$

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2\,a\,b\cos C \qquad (3\text{-}19)$$

وبذلك يمكن حل المثلث (أي حساب باقي معلوماته) إذا علمنا منه ضلعين و زاوية.

معادلات مثلثيه أخري:

$$\sec = 1 / \cos \qquad (3\text{-}20)$$

حيث: sec = قا الزاوية

$$\csc = 1 / \sin \qquad (3\text{-}21)$$

حيث: csc = قتا الزاوية

$$\cot = 1 / \tan \qquad (3\text{-}22)$$

حيث: cot = ظتا الزاوية

$$\sin^2 + \cos^2 = 1 \qquad (3\text{-}23)$$

$$\tan^2 + 1 = \sec^2 \quad (3\text{-}24)$$

$$\cot^2 + 1 = \csc^2 \quad (3\text{-}25)$$

$$\sin (A + B) = \sin A \cos B + \cos A \sin B \quad (3\text{-}26)$$

$$\cos (A + B) = \cos A \cos B - \sin A \sin B \quad (3\text{-}27)$$

$$\tan (A+B) = (\tan A + \tan B) / (1 – \tan A \tan B) \quad (3\text{-}28)$$

$$\sin 2A = 2 \sin A \cos A \quad (3\text{-}29)$$

$$\cos 2A = \cos^2 A – \sin^2 A = 1 – 2 \sin^2 A = (2 \cos^2 A) – 1 \quad (3\text{-}30)$$

$$\tan 2A = (2 \tan A) / (2 \cot A) \quad (3\text{-}31)$$

$$\sin (A - B) = \sin A \cos B - \cos A \sin B \quad (3\text{-}32)$$

$$\cos (A - B) = \cos A \cos B + \sin A \sin B \quad (3\text{-}33)$$

$$\tan (A+B) = (\tan A - \tan B) / (1 + \tan A \tan B) \quad (3\text{-}34)$$

$$\sin (A/2) = \pm \sqrt{} [(1 – \cos A) / 2] \quad (3\text{-}35)$$

$$\cos (A/2) = \pm \sqrt{} [(1 + \cos A) / 2] \quad (3\text{-}36)$$

$$\tan (A/2) = \pm \sqrt{} [(1 – \cos A) / (1+\cos A)] \quad (3\text{-}37)$$

٣-٤ أنواع اتجاه الشمال

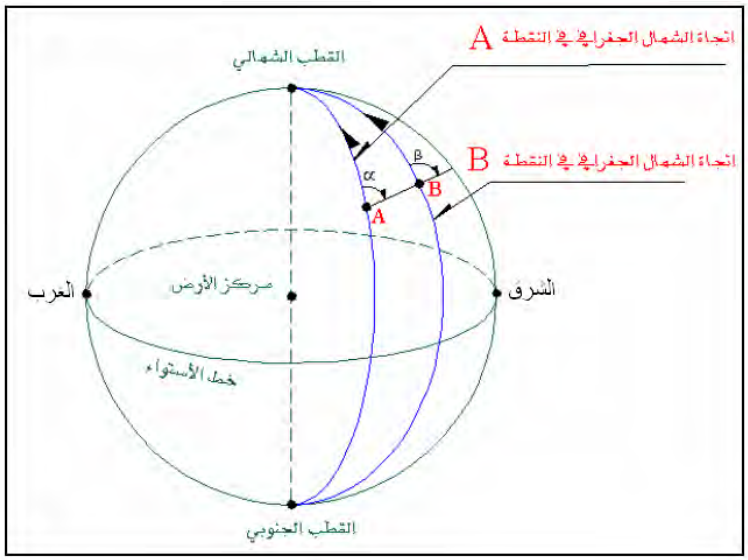
أتفق العاملون بالمساحة منذ مئات السنين علي اعتبار اتجاه الشمال هو الاتجاه المرجعي Reference Direction عند قياس الاتجاهات في الطبيعة وأيضا في الخريطة. لكن يوجد نوعين من أنواع اتجاه الشمال:

٣-٤-١ الشمال المغناطيسى Magnetic Meridian

هو الاتجاه الذي تحدده أبره مغناطيسية حركة الحركة كاملة الاتزان وليست تحت أي تأثير مغناطيسي محلي. فإذا تركت هذه الإبرة حركة الحركة فأنها ستتجه ناحية اتجاه الشمال الذي يطلق عليه أسم الشمال المغناطيسي. وهذه هي الفكرة التي بنيت عليها أجهزة البوصلة المغناطيسية التي يمكن استخدامها في الطبيعة لتحديد اتجاه الشمال. لكن أهم مشاكل الشمال المغناطيسي أنه غير ثابت (غير متوازي عند مجموعة من النقاط) بل أنه يتغير عند نفس النقطة من عام لآخر.

٣-٤-٢ الشمال الجغرافى Geographic or True Meridian

هو الاتجاه أو الخط الواصل بين أي نقطة وكلا القطبين الشمالي و الجنوبي للأرض. الشمال الحقيقي هو اتجاه ثابت غير متغير ويتم تحديده من خلال الأرصاد و القياسات الفلكية ، وحيث أنه ثابت وغير متغير فهو المستخدم في إنشاء الخرائط.



شكل (٣-١٠) اتجاه الشمال

٣-٤-٣ زاوية الاختلاف Declination Angle

يطلق أسم زاوية الاختلاف علي الزاوية المحصورة بين اتجاهي الشمال المغناطيسي و الجغرافي عند نقطة معينة في زمن معين. فإذا كان الشمال المغناطيسي شرق الشمال الجغرافي

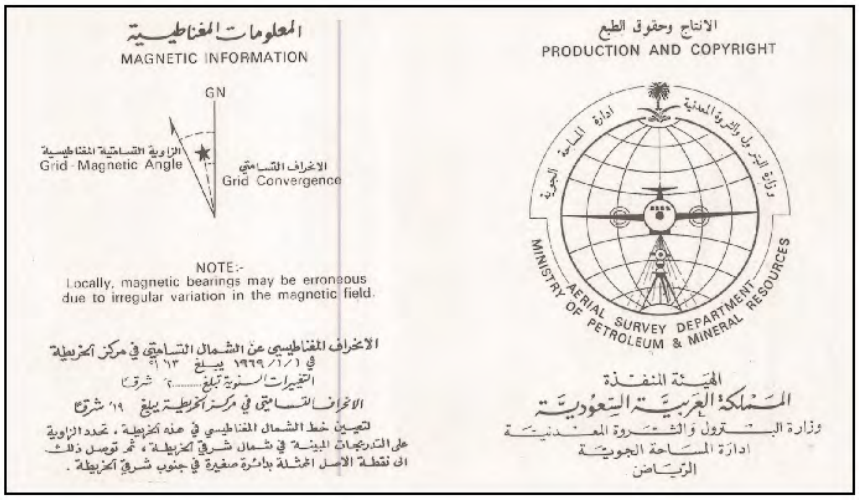
فتكون إشارة زاوية الاختلاف موجبه ، وإذا كان الشمال المغناطيسي غرب الشمال الجغرافي فتكون إشارة زاوية الاختلاف سالبة:

الانحراف الجغرافي = الانحراف المغناطيسي ± زاوية الاختلاف (٣-٣٨)

حيث:

+ إن كانت زاوية الاختلاف شرقا
- إن كانت زاوية الاختلاف غربا

وغالبا توضع زاوية الاختلاف علي الخريطة لتحدد قيمتها و اتجاهها عند إنشاء الخريطة:



شكل (٣-١١) مثال لمعلومات زاوية الاختلاف علي خريطة

تتغير زاوية الاختلاف بطريقة منتظمة في عدة دورات علي مدار : (أ) تغير كل ٣٠٠ سنة تقريبا ، (ب) تغير سنوي ، (ج) تغير يومي.

مثال:

تم قياس الانحراف المغناطيسي لخط في عام ١٩٩٤م ووجد أنه يبلغ ٣٠' ٥٤° ووجد أن زاوية الاختلاف في عام ١٩٩٠م تبلغ ٣٠' ١٧° شرقا وتتغير سنويا بمعدل ٣' للغرب. أحسب الانحراف الحقيقي لهذا الخط؟

بما أن زاوية الاختلاف للشرق فتجمع قيمتها ، بينما تطرح قيمة التغير السنوي لأنه للغرب:

الانحراف الحقيقي = ٣٠' ٥٤° + [٣٠' ١٧° - (٣' × ٤ سنوات)]
= ٣٠' ٥٤° + [٣٠' ١٧° - ١٢']
= ٣٠' ٥٤° + [١٨' ١٧°]
= ٤٨' ٧١°

يمكن معرفة قيمة زاوية الاختلاف من خلال مواقع بعض الجهات المتخصصة علي شبكة الانترنت مثل موقع الوكالة الأمريكية للمحيطات والمناخ المعروفة باسم NOAA في الرابط التالي:

http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/Declination.jsp

القيم التالية تمثل زوايا الاختلاف لبعض المواقع في يوم ١/١/ ٢٠١٢ م:

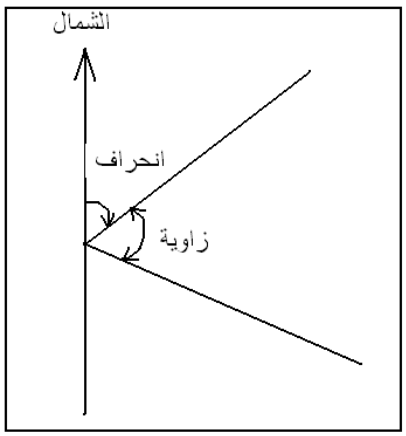
المدينة	الموقع الجغرافي التقريبي		زاوية الاختلاف
	خط الطول	دائرة العرض	
مكة المكرمة	٣٩.٨٢٥° شرقا	٢١.٤٢٦° شمالا	١٥° ٠٢' غربا
المدينة المنورة	٣٩.٦١١° شرقا	٢٤.٤٥٦° شمالا	١٤° ٢٩' غربا
القاهرة	٣١.٢٢٩° شرقا	٣٠.٠٥٨° شمالا	١١° ١٥' غربا

٣-٤-٤ الشمال الاختياري أو المفروض Arbitrary or Assumed Meridian:

في حالة عدم معرفة الراصد في الطبيعة لأيا من اتجاهي الشمال المغناطيسي أو الجغرافي فأنه يقوم بافتراض اتجاه شمال لكي يبدأ منه أعمال القياس المساحي (غالبا يكون اتجاه أحد خطوط العمل المساحي) كاتجاه مرجعي مفروض لهذا العمل. ولاحقا قد يتمكن الراصد من معرفة العلاقة بين هذا الشمال الاختياري والشمال الحقيقي ومن ثم يقوم بتصحيح قياساته لينسبها إلي اتجاه الشمال الحقيقي.

٣-٥ أنواع الانحرافات

يطلق مصطلح "الزاوية" علي الزاوية المقاسة بين خطين ، بينما يطلق مصطلح "الانحراف Bearing or Azimuth" علي الزاوية المقاسة بدءا من اتجاه الشمال إلي الخط المطلوب. فان كان الاتجاه المرجعي (لبدء القياس) هو الشمال المغناطيسي فنحصل علي الانحراف المغناطيسي ، بينما إن كان الاتجاه المرجعي (لبدء القياس) هو الشمال الجغرافي فنحصل علي الانحراف الجغرافي أو الحقيقي.

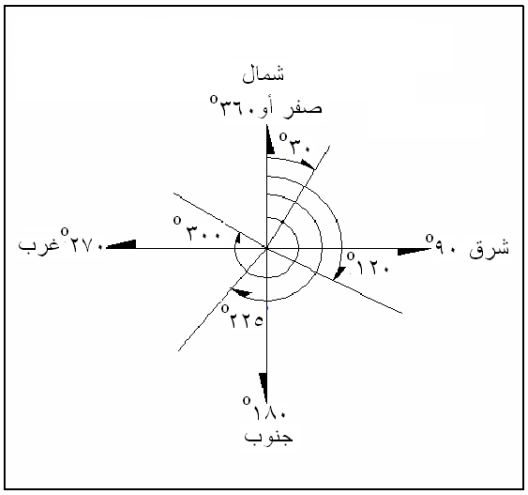


شكل (٣-١٢) الزاوية و الانحراف

يوجد نوعين من أنواع الانحرافات المستخدمة في المساحة: الانحراف الدائري و الانحراف المختصر.

٣-٥-١ الانحراف الدائري Azimuth

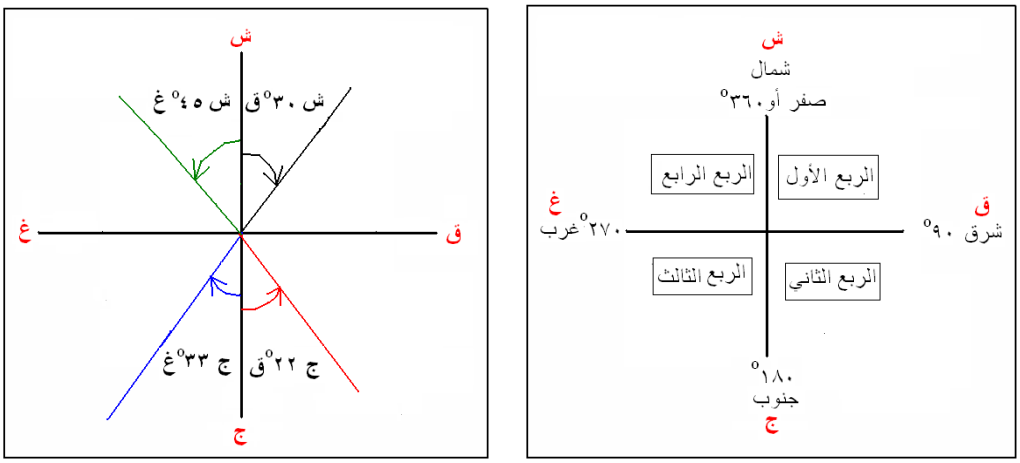
هو الزاوية المقاسة (١) بدءا من اتجاه الشمال (٢) وباتجاه دوران عقرب الساعة ، وتتراوح قيمته بين الصفر و ٣٦٠ درجة ستينية.



شكل (٣-١٣) الانحراف الدائري

٣-٥-٢ الانحراف المختصر Bearing

هو الزاوية المقاسة (١) بدءا من اتجاه الشمال (٢) أو اتجاه الجنوب (٣) وباتجاه دوران عقرب الساعة (٤) أو ضد اتجاه دوران عقرب الساعة، وتتراوح قيمته بين الصفر و ٩٠ درجة ستينية فقط. ولذلك فلا بد من ذكر ربع الدائرة الواقع به الانحراف المختصر.

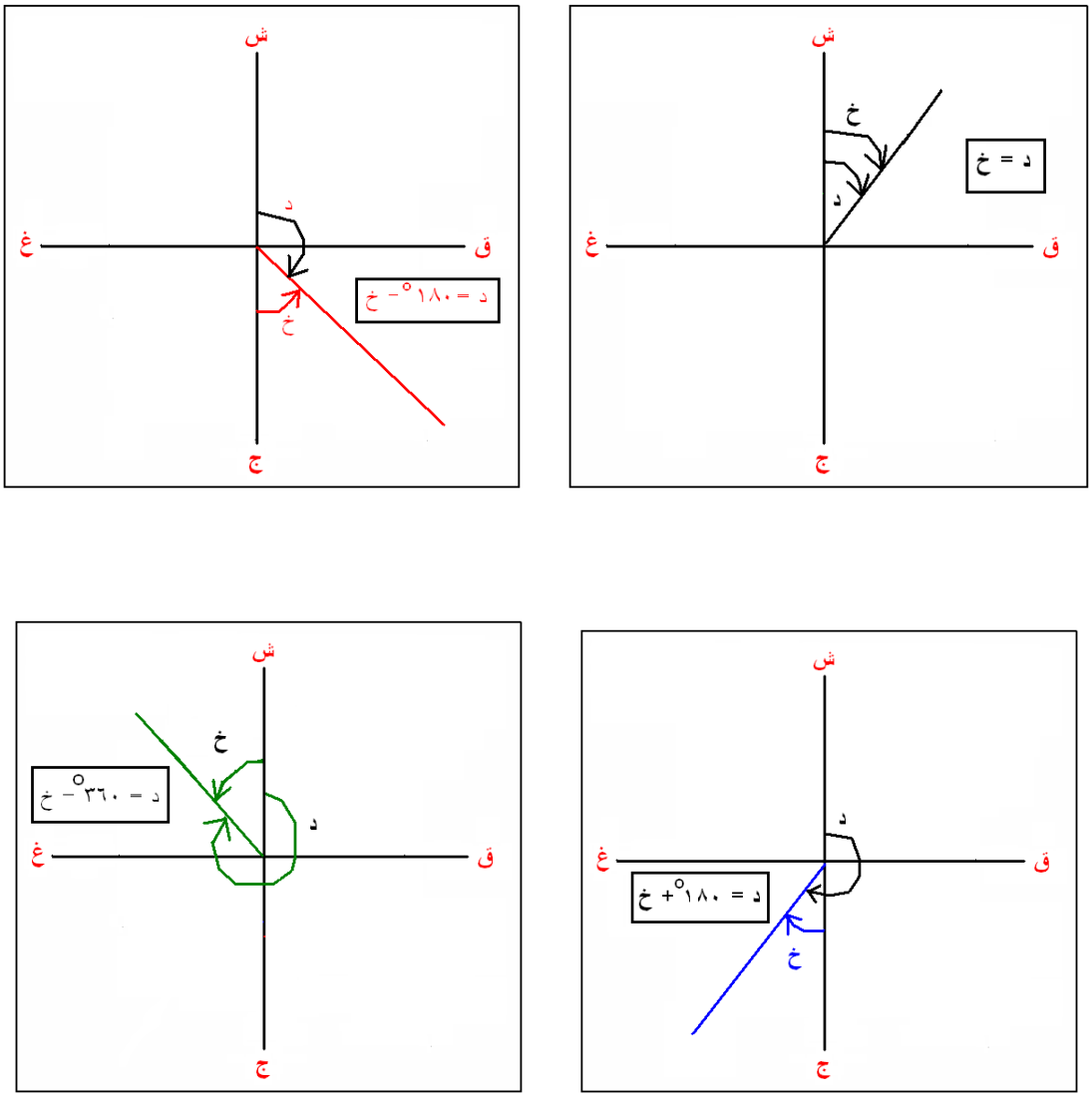


شكل (٣-١٤) الانحراف المختصر

٣-٥-٣ التحويل بين الانحراف الدائري و الانحراف المختصر

طبقا للربع الواقع به الانحراف المختصر فيمكن استنباط المعادلات الأربعة التالية للتحويل بين الانحراف الدائري (د) والانحراف المختصر (خ) كما في الشكل التالي:

الربع	المعادلة	
الأول	د = خ	(٢-٣٩)
الثاني	د = ١٨٠° – خ	(٢-٤٠)
الثالث	د = ١٨٠° + خ	(٢-٤١)
الرابع	د = ٣٦٠° – خ	(٢-٤٢)



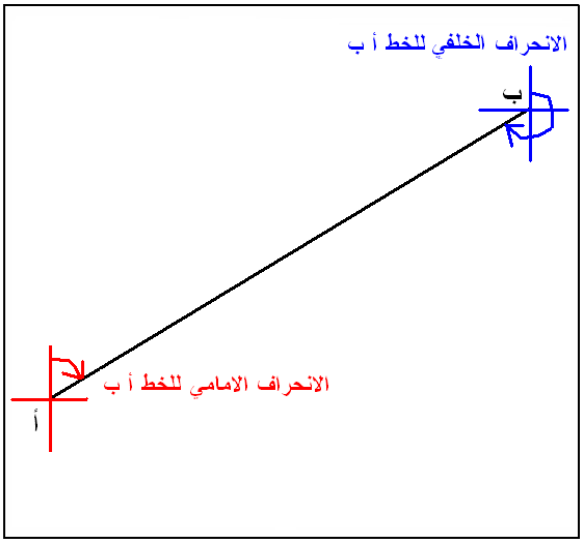
شكل (٣-١٥) التحويل بين الانحراف الدائري و المختصر

الجدول التالي يوضح بعض الأمثلة للتحويل بين كلا نوعي الانحراف:

الانجراف الدائري	الانحراف المختصر
٤٩" ٠٣' ٠١٤°	ش ٤٩" ٠٣' ٠١٤° ق
٤٢" ٣٦' ١٣٠°	ج ١٨" ٢٣' ٠٤٩° ق
٥٣" ٤٤' ٢١٨°	ج ٥٣" ٤٤' ٠٣٨° غ
٥٨" ١٧' ٢٩٤°	ش ٠٢" ٤٢' ٠٦٥° غ

٣-٥-٤ الانحراف الأمامي و الانحراف الخلفي لخط:

يتكون أي خط من نقطتي البداية و النهاية ، ولذلك فيكون له انحرافين: الانحراف الأمامي وهو الانحراف المقاس عند بداية الخط ، والانحراف الخلفي وهو الانحراف المقاس عند نهاية الخط.



شكل (٣-١٦) الانحراف الأمامي و الخلفي

والعلاقة بينهما هي:

الانحراف الخلفي = الانحراف الأمامي ± ١٨٠° (٣-٤٣)

حيث:

+ عندما يكون الانحراف المعلوم منهما أقل من ١٨٠°

- عندما يكون الانحراف المعلوم منهما أكبر من ١٨٠°

مثال ١:

أوجد الانحراف الخلفي للخط أ ب الذي يبلغ انحرافه الأمامي ٤٢" ٣٦' ١٣٠° ؟

حيث أن الانحراف المعلوم أقل من ١٨٠° فأن:

الانحراف الخلفي = الانحراف الأمامي + ١٨٠°
= ٤٢" ٣٦' ١٣٠° + ١٨٠°
= ٤٢" ٣٦' ٣١٠°

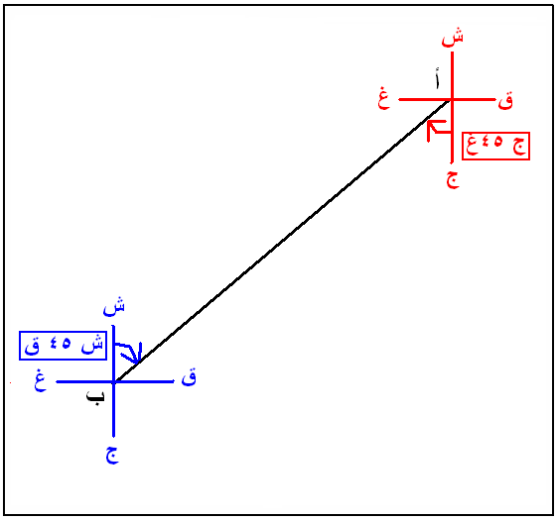
مثال ٢:

أوجد الانحراف الخلفي للخط أ ب الذي يبلغ انحرافه الأمامي المختصر ج ٤٥° غ ؟

الانحراف الأمامي المختصر ج ٤٥° غ يقع في الربع الرابع : إذن:
الانحراف الأمامي الدائري للخط أ ب = ٣٦٠° – خ
= ٣٦٠° - ٤٥° = ٣١٥°
حيث أن الانحراف المعلوم أكبر من ١٨٠° فأن:
الانحراف الخلفي = الانحراف الأمامي - ١٨٠°
= ٣١٥° - ١٨٠° = ١٣٥°

وحيث أن هذا الانحراف الخلفي الدائري يقع في الربع الثاني فأن الانحراف الخلفي المختصر له:
خ = ١٨٠° – د
= ١٨٠° – ١٣٥° = ش ٤٥° ق

إذن الانحراف الخلفي المختصر للخط أ ب (ش ٤٥° ق) يمكن الحصول عليه مباشرة من الانحراف الأمامي المختصر لهذا الخط (ج ٤٥° غ) بمجرد عكس إشارات الربع وبدون أية حسابات حيث تظل قيمة الزاوية كما هي:

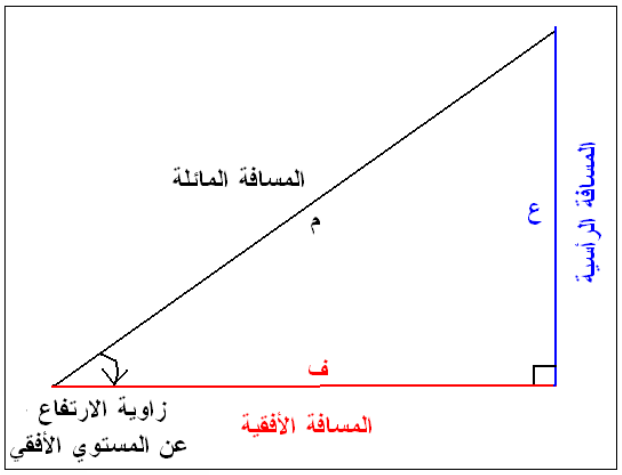


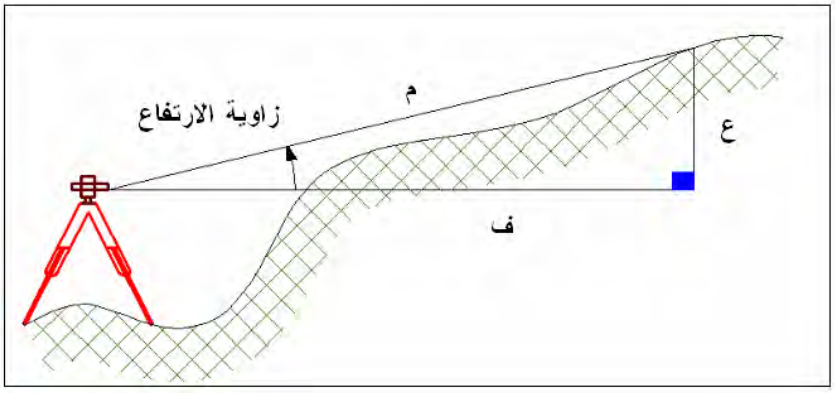
٣-٦ أنواع المسافات

تنقسم المسافات إلي ثلاثة أنواع: الأفقية والمائلة و الرأسية.

عند قياس المسافة بين نقطتين يقعان علي مستوي أفقي واحد (لا يوجد فرق ارتفاع بينهما) فهذه المسافة تسمي المسافة الأفقية. بينما إذا كانت احدي النقطتين مرتفعة عن الأخرى فالمسافة المقاسة بينهما يطبق عليها اسم المسافة المائلة. أما الفرق في المستوي الرأسي بين هاتين النقطتين (فرق الارتفاع بينهما) فيسمي المسافة الرأسية.

يجمع مثلث قائم الزاوية بين المسافات الثلاثة مما يمكننا من حساب مسافة من مسافة أخري بعدة طرق:





شكل (٣-١٧) أنواع المسافات

$$م^{٢} = ف^{٢} + ع^{٢}$$

أي أن:

$$ف = \sqrt{(م^{٢} - ع^{٢})} \qquad (٣-٤٤)$$

وبذلك يمكن حساب المسافة الأفقية (التي يتم توقيعها علي الخرائط) بمعلومية قيمة المسافة المائلة (المقاسة في الطبيعة) والمسافة الرأسية (فرق الارتفاع بين النقطتين).

جتا (زاوية الارتفاع) = ف / م

أي أن:

ف = م × جتا (زاوية الارتفاع) (٣-٤٥)

وبذلك يمكن حساب المسافة الأفقية (التي يتم توقيعها علي الخرائط) بمعلومية قيمة المسافة المائلة (المقاسة في الطبيعة) وقيمة زاوية الارتفاع بين النقطتين.

الفصل الرابع

قياس المسافات

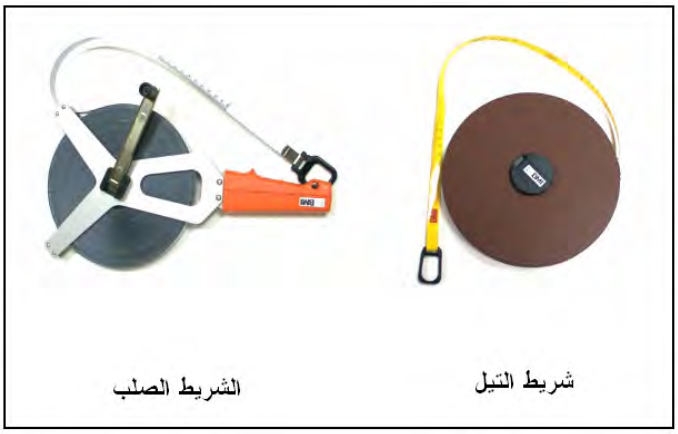
تعد المسافات أحد أهم أنواع القياسات المساحية ، وان كانت هي أقدمها تاريخيا إلا أنها مازالت تحتل جانبا كبيرا من الأهمية في العمل المساحي. وكما هو معروف فأننا نقوم بقياس المسافة المائلة (المباشرة أو الفراغية) في الطبيعة ثم نحولها – حسابيا – إلي المسافة الأفقية التي يتم توقيعها في الخرائط. يوجد أسلوبين لقياس المسافات في الطبيعة: إما بالشريط أو باستخدام جهاز قياس المسافات الكترونيا.

٤-١ قياس المسافات بالشريط Tape

٤-١-١ أنواع الشرائط

قبل ابتكار الشريط (بصورته الحالية) كان يتم استخدام ما يسمي بالجنزير chain لقياس المسافات والذي يتكون من عدد من حلقات الحديد التي تكون شريطا له طول معين معاير بدقة.

تصنع الشرائط إما من (١) الصلب أو من (٢) مادة الكتان أو التيل ، بينما للقياسات الدقيقة يتم استخدام (٣) شريط الأنفار (٣٥% من مادة النيل و ٦٥% من الحديد) حيث أن لا يتأثر كثيرا بالحرارة إلا أنه أغلي سعرا من كلا النوعين السابقين. تأتي الشرائط في أطوال محددة هي ١٠، ٢٠ ، ٣٠ ، ٥٠ ، ١٠٠ متر.



شكل (٤-١) أنواع الشريط

يتميز شريط التيل بسهولة حمله لأنه خفيف وعادة يتم استخدامه في الأعمال التي لا تتطلب دقة عالية لأنه يتأثر بالبلل ويتغير طوله نتيجة الشد. أما الشريط الصلب فهو أدق من النوع الأول نظرا لصلابته وقله تمدده أو انكماشه إلا أنه أثقل وزنا من الشريط الكتان كما أنه قابل للصدأ.

٤-١-٢ أدوات مساعدة مع الشريط

عند قياس المسافات بالشريط (في حالة أن المسافة المطلوب قياسها أكبر من طول الشريط ذاته) فتوجد عدة أدوات مساعدة تشمل:

١- الشواخص Range Pole or Rod:

يتكون الشاخص من عمود خشبي (أو معدني أحيانا) يتراوح طوله بين ٢ و ٥ متر ، ويستخدم في توجيه الخط المطلوب قياسه حتى تكون جميع الأجزاء المقاسة بالشريط واقعه علي الخط المستقيم الواصل بين النقطتين المطلوب قياس المسافة بينهما.

٢- الأوتاد Pegs:

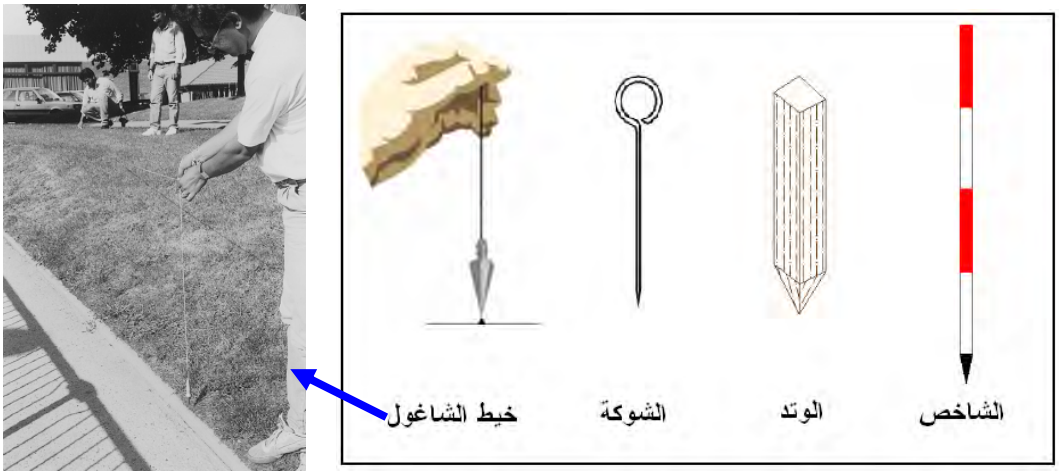
الوتد هو قطعة مضلعة أو مستديرة يتراوح طولها بين ٢٠ و ٣٠ سنتيمتر ويكون طرفها السفلي مدببا ليسهل غرزه في الأرض، وتستخدم لتحديد مكان علامات بداية و نهاية الخط المقاس. الأوتاد أما خشبية تستخدم في الأراضي الزراعية أو حديدية تستخدم في الأراضي الصلبة.

٣- الشوك Pins or Arrows:

وهي عبارة عن أسياخ من الصلب بطول يتراوح بين ٣٠ و ٤٠ سنتيمتر تستخدم لتحديد بداية ونهاية الشريط.

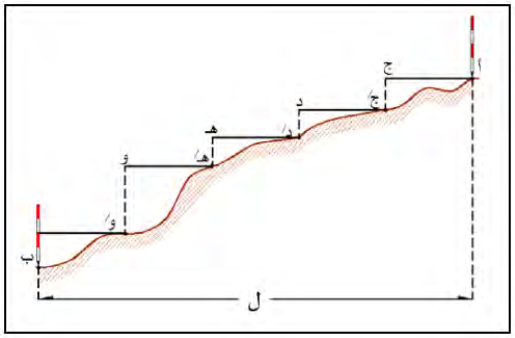
٤- خيط الشاغول Plumb Bob:

وهو خيط ينتهي بقطعة معدنية مخروطة الشكل ذات رأس مدبب ، يستخدم لتحديد مسقط بداية الشريط عندما يكون في وضعه الأفقي أعلي من سطح الأرض.



شكل (٤-٢) أدوات مساعدة مع الشريط

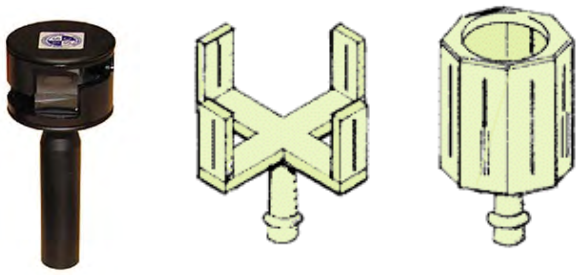
إذا كان قياس المسافة المطلوبة سيتم علي أرض غير منتظمة الميل فيتم تجزئتها إلي عدة أقسام بحيث يكون الشريط في وضع أفقي في كل جزء ، وذلك باستخدام خبط الشاغول:



شكل (٤-٣) قياس المسافات علي أرض مائلة

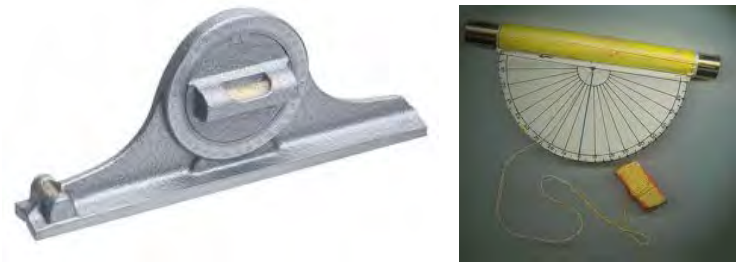
للأعمال المساحية الدقيقة يتم أيضا استخدام ترمومتر لقياس درجة حرارة الجو أثناء القياس ليتم لاحقا تصحيح الخط المقاس بالشريط طبقا لتأثره بالحرارة. كما أيضا يتم استخدام ميزان ماء لضمان أفقية الشريط أثناء قياس المسافة.

يستخدم الشريط أيضا في إقامة عمود (خط يتعامد علي خط موجود في الطبيعة) وذلك بالاستعانة بجهاز آخر يسمي المثلث المساح Cross Staff أو بجهاز المثلث ذو المرآة.



شكل (٤-٤) المثلث المساح

عند قياس مسافة مباشرة كبيرة باستخدام الشريط يتم الاستعانة بجهاز الكلينومتر Clinometer لقياس زاوية الارتفاع حتى يمكن – لاحقا – حساب المسافة الأفقية المناظرة للمسافة المائلة المقاسة:



شكل (٤-٥) الكلينومتر

٤-١-٣ الرفع المساحي بالشريط

يتكون الرفع المساحي بالشريط من عدة خطوات تشمل:

(أ) استكشاف المنطقة:

يتم التعرف علي المنطقة المطلوب رفعها وذلك بالمرور فيها والتعرف علي معالمها وتكوين فكرة شاكلة عنها وما تحتويه من معالم.

(ب) رسم الكروكي:

يتم رسم كروكي – أو اسكتش – عام لمنطقة العمل لبيان المواقع النسبية التقريبية لمعالم المنطقة.

(ت) اختيار و تثبيت نقاط المضلع:

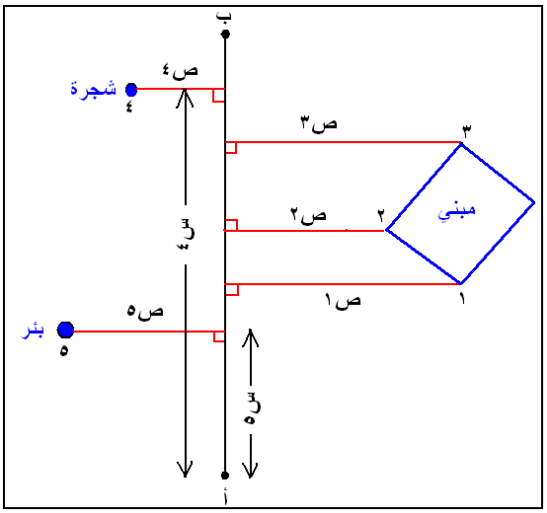
يتم اختيار مواقع لتثبيت نقاط أساسية للرفع المساحي (تسمي نقاط المضلع أو نقاط الهيكل الرئيسي) ثم تثبيت هذه المواقع باستخدام الأوتاد. يتم اختيار نقاط المضلع بحيث تتوافر المواصفات التالية في الخطوط (الوهمية) الواصلة بين نقاط المضلع:

- أن تكون الخطوط أقل ما يمكن أو بقدر حاجة العمل المطلوب فقط.
- أن تكون أطوال الخطوط في حدود ٢٠٠ متر.
- أن تكون أطوال الخطوط متقاربة بقدر الإمكان.
- أن تشكل مواقع النقاط مثلثات فيما بينها ، ويفضا أن تكون زوايا هذه المثلثان ما بين 30^{o} و 120^{o}.
- أن تكون الخطوط أقرب ما تكون للتفاصيل (المعالم) المطلوب رفعها مساحيا.
- أن تكون مواقع النقاط في مواقع ثابتة فلا تكون في أرض رخوة أو في مواقع تعترض السير أو عرضه للعبث بها.

كما يتم عمل كارت وصف لموقع كل نقطة من نقاط المضلع حتى يمكن إعادة تثبيت النقطة في حالة فقدها. يتكون كارت وصف كل نقطة من تحديد المعالم المحيطة بالنقطة مع قياس المسافة بين النقطة و ثلاثة مواضع ثابتة (أركان مبني علي سبيل المثال).

(ث) الرفع المساحي أو التحشية:

يتم رفع (تحديد موقع) كل معلم من معالم المنطقة من خلال قياس مسافتين: (١) طول العمود من المعلم إلي ضلع الهيكل الرئيسي ، (٢) المسافة من بداية ضلع المهيكل الرئيسي إلي تقاطعه مع هذا العمود. تشبه هذه العملية تحديد الاحداثي س والاحداثي ص لكل معلم إذا أعتبرنا أن ضلع الهيكل الرئيسي يمثل المحور السيني بينما العمودي عليه يمثل المحور الصادي. ويتم تسجيل هذه القياسات لجميع المعالم في ورقة مع رسم كروكي لها:



شكل (٤-٦) الرفع المساحي بالشريط

(ج) العمل المكتبي:

يتطلب رسم خريطة المنطقة - التي تم رفعها مساحيا – عدة خطوات مكتبية تشمل:

- رسم المضلع أو الهيكل الرئيسي بمعلومية أطوال أضلاعه المقاسة وذلك برسم أول (أطول) ضلع منه أولا ، ثم بطريقة تقاطع الأقواس يتم رسم ضلعي المثلث الأول ثم المثلث الثاني وهكذا.
- يتم توقيع مواقع (إحداثيات) كل معلم من المعالم بمعلومية أبعاد التحشية أي المسافتين المقاستين له في الطبيعة (مسافته علي الضلع و العمود منه إلي الضلع).
- يتم رسم إطار للخريطة الناتجة ويضاف إليها عنوانها ومقياس الرسم و اتجاه الشمال ومفتاح الخريطة.

تجدر الإشارة أنه في التطبيقات غير المساحية يمكن استخدام عجلة القياس لقياس المسافات بدقة تصل إلي عشرة سنتيمترات. تتكون عجلة القياس من عجلة متصلة بعداد رقمي يستطيع تحويل عدد لفات العجلة أثناء الحركة إلي قيمة المسافة المقطوعة وذلك بضرب عدد اللفات في قيمة محيط العجلة.

شكل (٤-٧) عجلة قياس المسافات

٤-٢ قياس المسافات الكترونيا

يعتمد مبدأ قياس المسافات الكترونيا علي المعادلة الرياضية التي تجمع كلا من المسافة و السرعة و الزمن:

المسافة = السرعة × الزمن (٤-١)

فإذا تمكننا من قياس سرعة شعاع أو موجة (كهرومغناطيسية electro-magnetic أو كهروبصرية electro-optical) أثناء انتقاله بين نقطتين وقمنا بقياس الزمن الذي استغرقته هذه الموجة للسفر بين كلا النقطتين فيمكننا حساب المسافة بينهما. بدأ تطبيق هذا المبدأ في مجال المساحة وذلك عن طريق إطلاق موجة من جهاز (عند النقطة الأولي من الخط المطلوب قياسه) إلي النهاية الثانية للخط حيث يوجد جهاز عاكس يقوم بعكس هذه الموجه في نفس مسارها ، ويقوم الجهاز المرسل بقياس الفترة الزمنية التي استغرقتها هذه الموجة منذ إطلاقها:

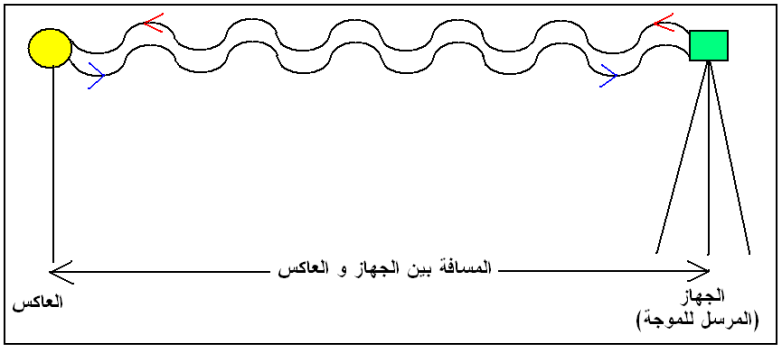
الفترة الزمنية = وقت الاستقبال – وقت الإرسال (٤-٢)

لكن هذه الفترة الزمنية المقاسة هي الزمن الذي استغرقته الموجه (١) منذ صدورها من الجهاز المرسل حتى وصولها للعاكس ثم (٢) عودتها مرة أخري للجهاز المرسل ، أي أنها ضعف الفترة الزمنية بين المرسل و العاكس. لذلك فأن المسافة المحسوبة ستعادل ضعف المسافة بين جهازي المرسل و العاكس:

ضعف المسافة بين المرسل و العاكس = الفترة الزمنية × سرعة الموجة (٤-٣)

المسافة بين المرسل و العاكس = (الفترة الزمنية × سرعة الموجة) ÷ ٢ (٤-٤)

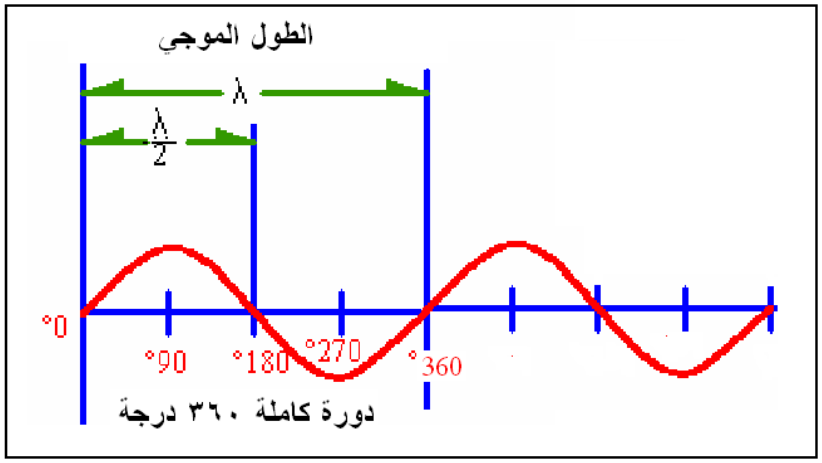
من المعلوم أن أي موجه تسير في الفضاء تكون سرعتها هي سرعة الضوء التي تعادل تقريبا ثلاثمائة ألف كيلومتر في الثانية (أو بالضبط ٢٩٩٧٩٢.٤٥٨ كيلومتر في الثانية) ، أي أن قياس الفترة الزمنية للموجه هو كل ما يلزم لحساب المسافة بين كلا من جهاز الإرسال والعاكس. ومن هنا جاءت فكرة ابتكار أجهزة قياس المسافات الكترونيا Electronic Distance Measurement والتي اختصرت إلي الأحرف الثلاثة EDM.



شكل (٤-٨) مبدأ قياس المسافات الكترونيا

تتأثر سرعة الموجة أثناء مرورها في الغلاف الجوي للأرض تبعا لعوامل انكسار الضوء الناتجة عن اختلاف درجة الحرارة و الضغط الجوي والرطوبة النسبية ، وبالتالي فلن تكون هذه السرعة هي نفس سرعة الضوء في الفراغ. لذلك تعتبر دقة قياس سرعة الضوء هي أهم عوامل قياس المسافات الكترونيا. تتراوح قيمة معامل انكسار الضوء في الغلاف الجوي بين ١.٠٠٠١ و ١.٠٠٠٥ تبعا لتأثير العوامل الجوية ، ولذلك يجب قياس تلك التأثيرات أثناء عملية القياس للحصول علي دقة عالية ، لكن يمكن استخدام قيمة متوسطة لمعامل الانكسار تبلغ ١.٠٠٠٣ للحصول علي دقة مناسبة للأعمال المساحية.

ينتشر الضوء في الغلاف الجوي علي هيئة منحني أقرب ما يكون لمنحني جيب الزاوية sinusoidal curve المعروف الذي يحدد طول الموجة الواحدة wavelength (نرمز لها بالرمز λ) وزاوية الطور Phase angle التي تبلغ ٣٦٠° درجة للدورة الكاملة (نرمز لها بالرمز θ).



شكل (٤-٩) انتشار الضوء

بالنظر للمعادلة ٤-٣ نجد أنه للوصول لدقة عالية في قياس المسافات الكترونيا فأن أجهزة EDM لابد أن تقيس فرق الزمن للموجة الكهرومغناطيسية بدقة عالية جدا مما يتطلب وجود ساعة ذرية (وهذا سيجعل سعر الجهاز عالي جدا أيضا). بدلا من ذلك فأن أجهزة EDM تعتمد علي طريقة فرق الطور Phase Difference والتي فيها يتم قياس عدد الدورات الكاملة بالإضافة لجزء الدورة الأخيرة للموجة المرسلة من جهاز الإرسال وحتى وصولها إليه مرة أخري بعد انعكاسها من العاكس الموضوع في النهاية الثانية للخط المطلوب قياسه. ويتم حساب المسافة كالآتي:

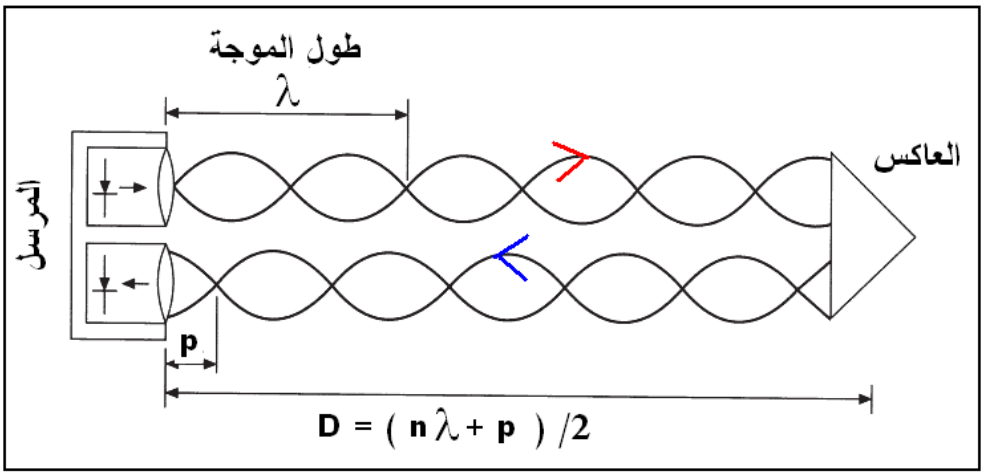
$$D = (n \lambda + p) / 2 \qquad (4\text{-}5)$$

حيث:

D	المسافة المطلوب قياسها
n	عدد الموجات الصحيحة أو الكاملة
λ	الطول الموجي أو طول الموجة
p	طول جزء الموجة المتبقية

ويتم حساب طول جزء الموجة المتبقية بنسبة قيمة زاوية الطور له (θ) ٣٦٠ درجة من طول الموجة الكاملة ، كالآتي:

$$p = (\theta / 360^{o}) \lambda \qquad (4\text{-}6)$$



شكل (٤-١٠) قياس المسافات الكترونيا بالموجات الكهرومغناطيسية

مثال:

أحسب المسافة بين نقطتين أ ، ب تم قياسها بجهاز EDM يعتمد علي إرسال موجة كهرومغناطيسية يبلغ طول موجتها ٢٠ متر وزاوية الطور لها ١١٥° ٤٢' إذا كان عدد الموجات الصحيحة ٩ موجات.

أولا: نحسب طول جزء الموجة المتبقية:

$$p = (\theta / 360^{o}) \lambda$$
$$= [(42' \ 115^{o}) / 360^{o}] \times 20 = 6.428 \text{ m}$$

ثانيا: نحسب طول المسافة المقاسة:

$$D = (n \lambda + p) / 2$$
$$= [(9 \times 20) + 6.428] / 2$$
$$= 93.214 \text{ m}$$

تتعدد أنواع الأشعة المستخدمة في قياس المسافات الكترونيا وتشمل (١) موجات الراديو وتستخدم في قياس المسافات الطويلة حتى ٥٠-٦٠ كيلومتر ، (٢) الموجات تحت الحمراء وهي الأكثر استخداما الآن في أجهزة المحطات الشاملة Total Station وتستخدم لقياس المسافات ١٠-٣٠ كيلومتر ، (٣) الموجات الضوئية المرئية والتي تستخدم لقياس المسافات الأقل من ١٠ كيلومتر ، (٤) الليزر المرئي للمسافات متناهية الصغر والتي تبلغ عشرات الأمتار.

بدأ إنتاج أجهزة قياس المسافات الكترونيا EDM منذ بداية الخمسينات من القرن العشرين الميلادي وكانت أجهزة منفصلة يتم تركيبها فوق أجهزة قياس الزوايا (الثيودليت) بحيث يتم قياس الزاوية و المسافة في نفس الوقت.

شكل (٤-١١) أجهزة قياس المسافات الكترونيا

معظم أجهزة المساحة لقياس المسافات الكترونيا تعتمد علي وجود عاكس Reflector أو منشور عاكس Prism يقوم بعكس الموجة إلي جهاز الاستقبال مرة أخري. يتكون العاكس من منشور من الزجاج النقي مطلي بمادة الفلوريسنت - لزيادة قوة انعكاس الأشعة - يوضع غاليا داخل إطار بلاستيكي ملون لسهولة رؤيته من مسافات كبيرة. وقد يوضع العاكس علي حامل ثلاثي لضمان وقوعه رأسيا أعلي النقطة المحتلة بالضبط (للقياسات المساحية الدقيقة) أو يوضع أعلي عصا pole يمسكها الراصد بيده.

شكل (٤-١٢) عواكس أجهزة قياس المسافات الكترونيا

أيضا توجد أهداف عاكسة Reflective Sheet يمكن استخدامها بديلا عن العاكس وهي عبارة عن ألواح رقيقة يتم طلاؤها بمادة الفلوريسنت العاكسة للأشعة. تستخدم الأهداف العاكسة في الطبيعة للمواقع التي لا يمكن تثبيت العاكس عندها مثل الحوائط و الأعمدة الخرسانية.

كما توجد أجهزة مساحية يمكنها قياس المسافات الكترونيا بدون عاكس Reflector-Less (للمسافات القصيرة وحتي مئات الأمتار) وذلك باستخدام موجات تتميز بخاصية الانعكاس عند اصطدامها بأي هدف. وبذلك فأن هذه النوعية من الأجهزة المساحية تمكننا من قياس المسافات

دون الحاجة لاحتلال نقطة نهاية الخط ، أي يمكنها قياس المسافة إلي أعلي قمة برج أو إلي خط تيار كهربائي .... الخ.

تم إنتاج بعض أجهزة قياس المسافات الكترونيا (باستخدام موجات الليزر المرئي) مخصصة للأعمال الهندسية البسيطة (غير المساحية) حيث أصبحت هذه الأجهزة محمولة يدويا hand-held ليتم استخدامها بصورة سريعة و بسيطة (داخل المنشئات و المباني مثلا) لقياس المسافات الصغيرة وبدقة سنتيمترات.

شكل (٤-١٣) أجهزة محمولة لقياس المسافات الكترونيا

تتأثر أجهزة قياس المسافات الكترونيا بعدة مصادر للأخطاء أهمها هو تأثير عوامل الطقس (الحرارة و الضغط الجوي و الرطوبة النسبية) عند نقطة جهاز الإرسال. لذلك توجد بعض التصحيحات الواجب حسابها لتصحيح المسافة المقاسة وتقدير المسافة الدقيقة بين جهازي المرسل و العاكس.

يعبر عن دقة المسافة المقاسة بأجهزة EDM في صورة نسبية ، أي أنها تتناسب مع طول المسافة المقاسة. أي أن دقة جهاز EDM تتكون من جزأين: (أ) خطأ ثابت القيمة و (٢) خطأ نسبي يعتمد علي طول المسافة المراد قياسها.

<u>مثال:</u>

دقة أحد أجهزة EDM = ± ٥ مللي + ٣ جزء في المليون (part per million or ppm)
= ± ٥ مللي + ٣ مللي لكل كيلومتر من طول الخط المقاس.

أي أن الجهاز به خطأ ثابت يبلغ ± خمسة ملليمترات (في هذا المثال) ، وأيضا خطا نسبي يعتمد علي طول المسافة المراد قياسها.

فإذا كان طول الخط المقاس يبلغ <u>٢ كيلومتر</u> فأن:

دقة أحد أجهزة EDM = ± ٥ مللي + ٣ مللي لكل كيلومتر من طول الخط المقاس.
= ± ٥ مللي + (٣ × ٢)
= ± ٥ مللي + ٦ مللي
= ± ١١ مللي

الفصل الخامس

قياس الانحرافات

تاريخيا تطورت أعمال الرفع المساحي لتشمل – بالإضافة لقياسات الشريط - قياس الانحرافات المغناطيسية للمعالم مع اختراع أجهزة البوصلة المغناطيسية. ربما يعود ذكر البوصلة كأول مرة إلي الصين في عام ١١٠٠ م تقريبا ، إلا أن علماء المسلمين قد أسهموا في تطوير هذا الجهاز واستخدامه في الملاحة البحرية وخاصة العالم العربي الكبير ابن ماجد في عام ١٤٥٠م تقريبا. مع أن البوصلة أصبحت غير مستخدمة الآن في القياسات المساحية الدقيقة إلا أنها ربما تستخدم في أعمال الاستكشاف المبدئي للمنطقة المراد رفعها.

٥-١ البوصلة المغناطيسية

تتكون البوصلة من إبرة مغناطيسية تترك حرة الحركة داخل علبة بها قرص مدرج من صفر اتلي ٣٦٠ درجة ستينية. تستخدم البوصلة لقياس الانحرافات المغناطيسية (هي الجهاز المساحي الوحيد لقياس الانحرافات المغناطيسية) بدقة ١ درجة ستينية أو أقل ، ولذلك فأنها لا تستخدم في الأعمال المساحية الدقيقة.

يوجد نوعين رئيسين من البوصلة المغناطيسية هما بوصلة المساحٍ Surveyor's Compass و البوصلة المنشورية Prismatic Compass وهي النوع الأحدث المنتشر حاليا.

شكل (٥-١) البوصلة المغناطيسية

تتميز البوصلة بعدة مميزات منها أنها خفيفة الوزن و بسيطة وسهل العمل بها ، كما أن الانحراف المقاس لأي خط مستقل عن انحراف أي خط آخر وبذلك لا تتراكم أخطاء القياس. تتركز أهم عيوب البوصلة المغناطيسية في دقتها القليلة حيث تقيس الانحرافات بدقة ١٠ دقائق ستينية في أحسن الأحوال ، كما أنهها تتأثر بالجاذبية المحلية في منطقة الرصد بالإضافة إلي أنها تعتمد علي التوجيه البصري مما لا يجعلها مناسبة للمسافات البعيدة.

٥-٢ الرفع المساحي بالبوصلة المغناطيسية

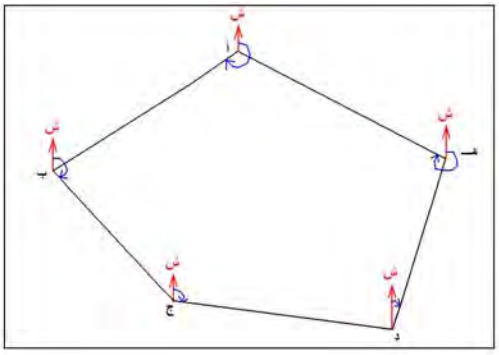
تتكون خطوات الرفع المساحي بالبوصلة من نفس خطوات الرفع المساحي بالشريط (الفصل الثالث) لكنها تختلف في أساليب وتفاصيل القياسات سواء للمضلع الرئيسي أو لعملية التحشية. تشمل أرصاد إنشاء مضلع البوصلة قياس قيمة الانحراف المغناطيسي لكل ضلع من أضلاعه.
يبدأ الراصد من النقطة أ (مثلا) حيث يضع البوصلة المغناطيسية أعلي النقطة تماما بالاستعانة بخيط الشاغول ، يتم وضع البوصلة في الوضع الأفقي سواء بالاكتفاء بالنظر أو باستخدام ميزان تسوية ، يوجه الراصد دليل البوصلة إلي الشاخص الموجود في النقطة التالية من نقاط المضلع بحيث تكون فتحة منشور البوصلة والشعرة الرأسية لها علي استقامة واحدة مع الشاخص ، ثم يقرأ الراصد قيمة انحراف هذا الخط علي تدريج البوصلة ويقوم بتسجيله في دفتر الأرصاد. ثم يتم تكرار نفس الخطوات لقياس انحراف النقطة الثانية من نقاط المضلع (من شروط المضلع أن كل نقطة تستطيع رؤية نقطتين علي الأقل من نقاط المضلع). بعد ذلك ينتقل الراصد للنقطة الثانية ويكرر نفس الخطوات.

من الانحرافات المغناطيسية يمكن حساب قيم الزوايا الداخلية للمضلع كالآتي:

الزاوية الداخلية عند أي نقطة = الانحراف الخلفي للضلع السابق –
الانحراف الأمامي للضلع اللاحق للنقطة (٥-١)

وإذا كان الانحراف الخلفي للضلع السابق أكبر من الانحراف الأمامي للضلع اللاحق فيضاف 360^{o} :

مثال:
للمضلع التالي تم قياس الانحراف المغناطيسي الأمامي و الخلف لكل ضلع من أضلاع المضلع فكانت كالآتي:



شكل (٥-٢) مثال لمضلع البوصلة

النقطة	الضلع	الانحـــــــراف الأمامي	الانحراف الخلفي
أ	أ ب	٢٠' ٢٤٣°	٢٠' ٠٦٢°
ب	ب ج	٠٠' ١٥٤°	٠٠' ٣٣٤°
ج	ج د	١٥' ١٠٦°	١٥' ٢٨٦°
د	د هـ	٠٥' ٠٢٩°	٠٥' ٢٠٩°
هـ	هـ أ	٣٠' ٣٠٢°	٣٠' ١٢٢°

الزاوية الداخلية عند أ = هـ أ ب = الانحراف الأمامي أ ب – الانحراف الخلفي هـ أ
= ٢٠' ٢٤٣° - ٣٠' ١٢٢° = ٥٠' ١٢٠°

الزاوية الداخلية عند ب = أ ب ج = الانحراف الأمامي ب ج – الانحراف الخلفي أ ب
= ٠٠' ١٥٤° - ٢٠' ٠٦٢° = ٤٠' ٩١°

الزاوية الداخلية عند ج = ب ج د = الانحراف الأمامي ج د – الانحراف الخلفي ج ب
= ١٥' ١٠٦° - ٠٠' ٣٣٤° + ٠٠' ٣٦٠°
= ١٥' ١٣٢°

الزاوية الداخلية عند د = ج د هـ = الانحراف الأمامي د هـ – الانحراف الخلفي د ج
= ٠٥' ٠٢٩° - ١٥' ٢٨٦° + ٠٠' ٣٦٠°
= ٥٠' ١٠٢°

الزاوية الداخلية عند هـ = د هـ أ = الانحراف الأمامي هـ أ – الانحراف الخلفي هـ د
= ٣٠' ٣٠٢° - ٠٥' ٢٠٩°
= ٢٥' ٠٩٣°

للتحقيق نطبق القانون العام لأي شكل مغلق أيا كان عدد أضلاعه وهو:

مجموع الزوايا الداخلية لأي مضلع = (ن – ٢) × ١٨٠° (٥-٢)

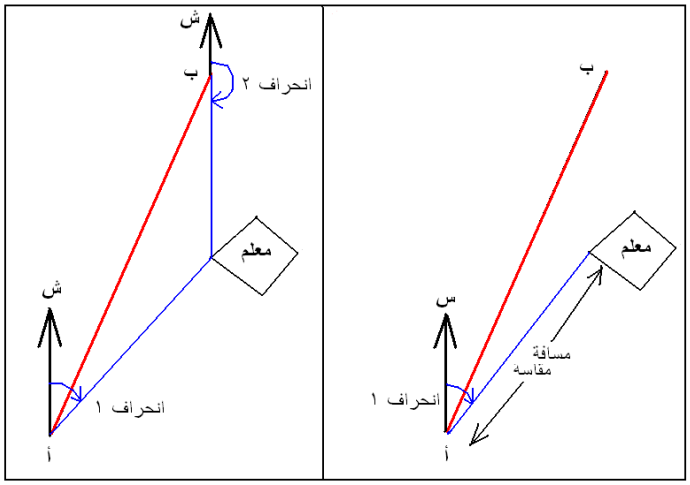
أو:
مجموع الزوايا الداخلية لأي مضلع = (٢ ن – ٤) × ٩٠°
حيث: ن = عدد نقاط المضلع

إذن في المثال الحالي:
مجموع الزوايا الداخلية = (ن – ٢) × ١٨٠°
= (٥ – ٢) × ١٨٠° = ٥٤٠°

بينما:
مجموع زوايا المضلع المحسوبة = ٥٠' ١٢٠° + ٤٠' ٩١° + ١٥' ١٣٢° +
٥٠' ١٠٢° + ٢٥' ٠٩٣°
= ٠٠' ٥٤١°

أي أن:
الخطأ في قياسات هذا المضلع = ٠٠' ٥٤١° - ٠٠' ٥٤٠° = ٠٠' ١°

أما في الرفع المساحي للمعالم أو الظواهر الموجودة في منطقة العمل (التحشية) فتوجد طريقتان لتحديد موقع كل معلم: (١) بقياس الانحراف المغناطيسي للخط الواصل من نقطة المضلع إلي الهدف مع قياس طول هذا الخط ، أو (٢) قياس انحرافين لهذا المعلم من نقطتين من نقاط المضلع.



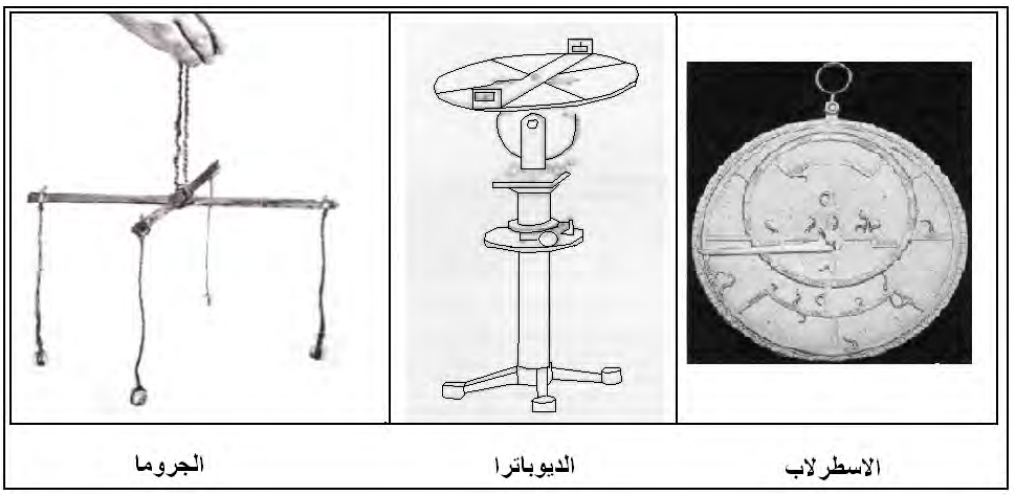
شكل (٥-٣) الرفع المساحي بالبوصلة

الفصل السادس

قياس الزوايا (جهاز الثيودليت)

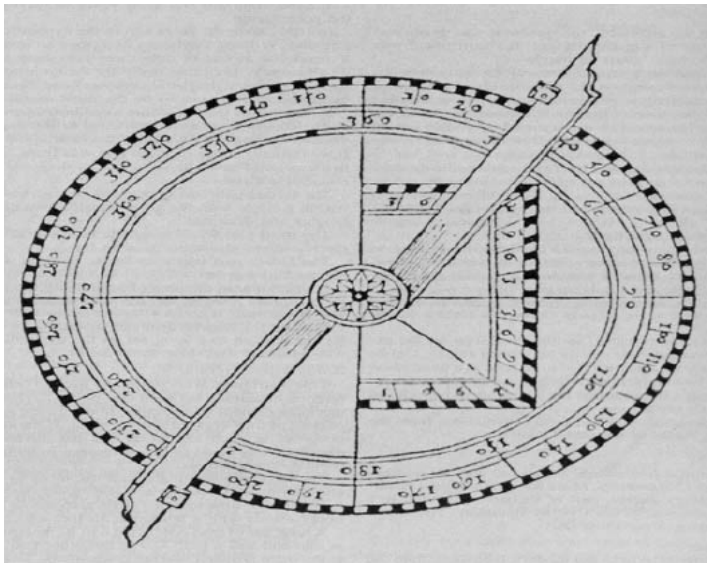
٦-١ نبذة تاريخية

تعد قياسات الزوايا من أهم أنواع القياسات المساحية والتي عرفها الإنسان منذ آلاف السنين. يمكن اعتبار جهاز الجروما Groma هو أول جهاز بدائي أبتكره قدماء المصريين في عام ١٥٠٠ قبل الميلاد تقريبا لإنشاء الزوايا القائمة في الطبيعة. وربما أستمر العمل بهذا الجهاز لعدة قرون قبل أن يتم ابتكار جهاز الديوبترا Dioptra من قبل الرومان في عام ١٥٠ ميلادي تقريبا. أما أول جهاز ملاحي حقيقي فقد كان الاسطرلاب الذي أخترعه علماء المسلمين في حوالي القرن الثامن الميلادي.



شكل (٦-١) أجهزة قياسات زاوية تاريخية

أما أسم الثيودليت Thedolite فقد ظهر لأول مرة في عام ١٥٧١م في كتاب للعالم ليونارد ديجيس Leonard Digges ، ويتكون الجهاز من تدريج دائري أفقي مركب علي عمود رأسي حيث كانت تقاس الزوايا من خلال زوج من النظرات (أو الشعرات) مركبين علي مسطرة دوارة. وفي عام ١٦٣١م أخترع العالم بيير فيرنر Pierre Vernier أول جهاز ورنية Vernier (أطلق عليها أسمه) وهي تدريج إضافي يركب علي التدريج الأصلي لزاوية الثيودليت بحيث يمكن قياس الزوايا بأجزاء من الدرجة. إلا أن أهم أنواع أجهزة الثيودليت المساحي الدقيق بدأ في الظهور تقريبا في العشرينات من القرن العشرين الميلادي علي يد السويسري هينريك فيلد Heinrich Wild وهو الاسم الشهير في عالم تصنيع الثيودليت المسمي بأسمه Wild الذي ظل لعقود طويلة أشهر و أدق أنواع الأجهزة المساحية لقياس الزوايا (مثل جهاز ثيودليت Wild T2 الشهير).



شكل (٦-٢) أول جهاز ثيودليت في التاريخ

شكل (٦-٣) جهاز الثيودليت الشهير Wild T2

أشهر الشركات المصنعة لأجهزة الثيودليت تشمل:

اسم الشركة	الموقع علي الانترنت
Leica	/http://www.leica-microsystems.com
Sokkia	/http://www.sokkia.com
Trimble	/http://www.trimble.com
Topcon	/http://global.topcon.com
Spectra Precision	http://www.spectraprecision.com/det2.aspx
Geomax	/http://www.geomax-positioning.com
Prexiso	http://www.prexiso.com/en/electronic-theodolite_88.htm
Pentax	http://www.pentax.jp/english/globalsites/index.html

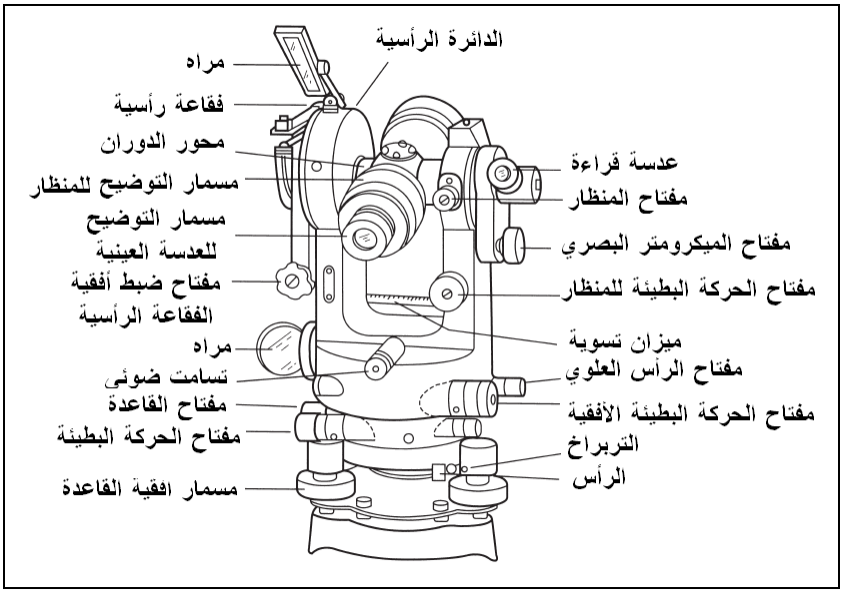
٦-٢ جهاز الثيودليت

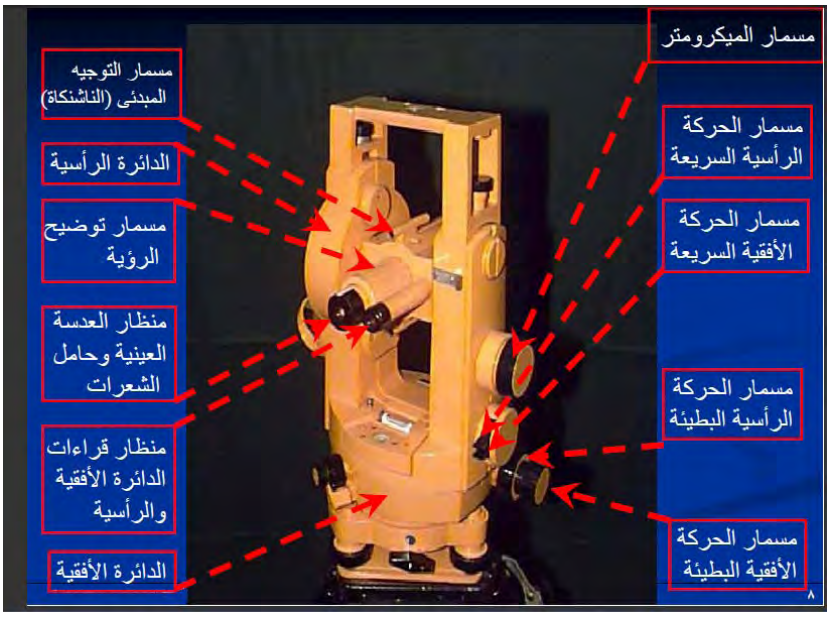
يمكن تقسيم أجهزة الثيودليت المساحية إلي مجموعتين: الأجهزة البصرية و الأجهزة الرقمية. كما توجد أنواع خاصة من أجهزة الثيودليت مثل جهاز الجيرو-ثيودليت Gyro-Theodolite المستخدم للقياسات تحت سطح الأرض (في المناجم و الأنفاق).

٦-٢-١ الثيودليت البصري

يتكون الثيودليت البصري (التقليدي) من عدد من الأجزاء الأساسية تشمل:

- التربراخ: القاعدة التي تجمع فوقها كل أجزاء الجهاز والتي بها ثلاثة مفاتيح لضبط أفقية ميزان التسوية (فقاعة الماء) المثبت عليها ، بالإضافة لمنظار تسامت ضوئي لضمان وقوع محور الجهاز أعلي النقطة الأرضية.
- الجزء السفلي: يحتوي الدائرة الأفقية لقياس الزوايا الأفقية ولها مفتاحين للحركة أحدهما للحركة الأفقية السريعة والآخر للحركة الأفقية البطيئة.
- الجزء العلوي أو الأليداد: يحتوي الدائرة الرأسية لقياس الزوايا الرأسية بالإضافة لميزان تسوية (فقاعة) رأسي.
- المنظار (التلسكوب) المجهز أيضا بمفتاحين للحركة الرأسية (السريعة و البطيئة) بالإضافة لعدستين عينية (القريبة من عين الراصد) و شيئية (الموجهة للهدف) ومعهما مفتاح لتوضيح الرؤية لكل عدسة.

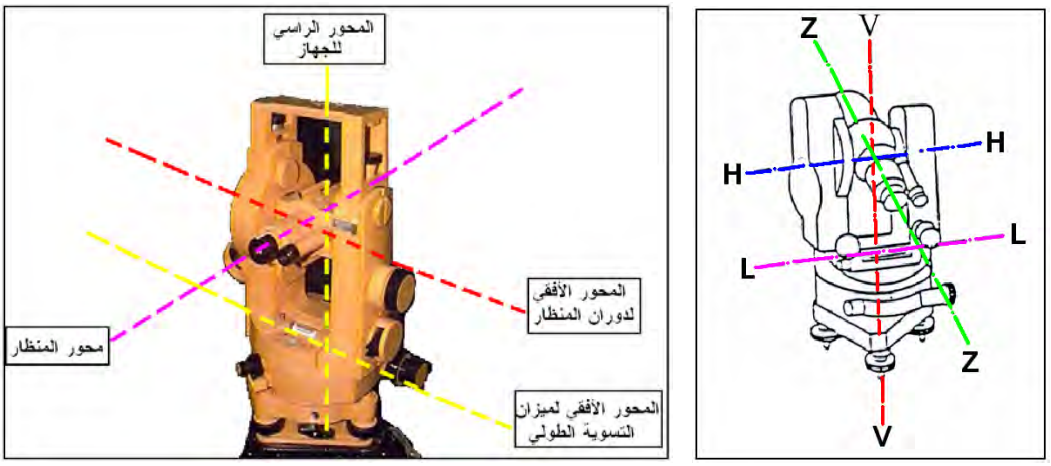




شكل (٦-٤) أجزاء الثيودليت

لجهاز الثيودليت ٤ محاور تتكون من:

١. المحور الرأسي V-V: يمر بمركز الدائرة الأفقية ويدور الجهاز حوله في مستوي أفقي.
٢. المحور الأفقي H-H: يمر بمركز الدائرة الرأسية ويدور الجهاز حوله في مستوي رأسي.
٣. محور ميزان التسوية الطولي L-L: الخط المستقيم المماس لميزان التسوية الطولي عند المنتصف.
٤. محور خط النظر Z-Z: الخط الواصل بين نقطة تقاطع حامل الشعرات للعدسة العينية والمركز الضوئي للعدسة الشيئية.



شكل (٦-٥) محاور الثيودليت

٦-٢-٢ الثيودليت الرقمي

الثيودليت الرقمي أو الالكتروني هو ثيودليت عادي تم إضافة شاشة الكترونية له لتظهر عليها الزوايا المرصودة بدلا من قرائنها يدويا في الثيودليت العادي. يحتاج الثيودليت الرقمي لبطارية لتشغيله وبعض أنواعه تحتوي علي كارت ذاكرة لتخزين القياسات ثم نقلها مباشرة للحاسب الآلي.

شكل (٦-٦) الثيودليت الرقمي

يتميز الثيودليت الرقمي بسهولة تشغيله وسرعته في انجاز العمل المساحي إلا أنه أغلي سعرا من الثيودليت العادي.

٦-٣ ضبط الثيودليت

يتكون ضبط الثيودليت من نوعين:

(١) الضبط الدائم وهو ضمان وضع و كفاءة تشغيل جميع أجزاء الثيودليت ، وغالبا يتم هذا النوع من الضبط في المصنع أو لدي الوكيل. يشمل الضبط الدائم ضمان العلاقات الأساسية بين محاور الثيودليت:

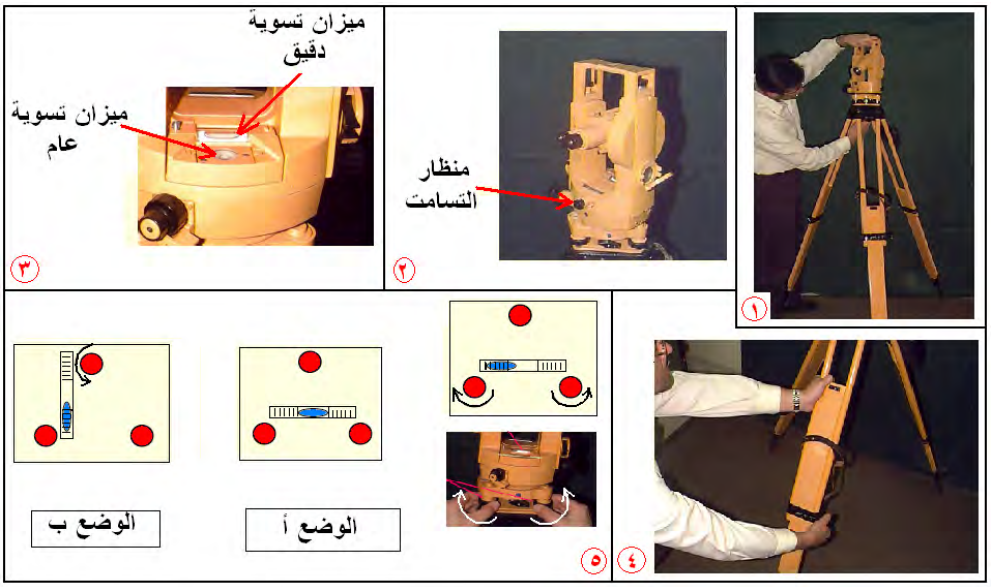
- مستوي الدائرة الأفقية عمودي علي المحور الرأسي للجهاز.
- مستوي الدائرة الرأسية عمودي علي المحور الأفقي للجهاز.
- المحور الأفقي للجهاز عمودي علي المحور الرأسي للجهاز.
- محور خط النظر عمودي علي المحور الأفقي للجهاز.

(٢) الضبط المؤقت وهو ما يتم عند كل استخدام للجهاز لقياس الزوايا أي عند كل نقطة في الموقع.

يتكون الضبط المؤقت للثيودليت من خطوتين يتم إجراؤهما بالتبادل و التكرار: ضبط الأفقية levelling لضمان وضع الجهاز في وضع أفقي تماما و ضبط التسامت centring لضمان وقوع المحور الرأسي للجهاز أعلي النقطة المساحية الأرضية تماما.

خطوات الضبط المؤقت للثيودليت (شكل ٦-٧):

- وضع الحامل الثلاثي أعلي النقطة الأرضية بالتقريب مع غرس الحامل في الأرض لضمان ثباته ، ثم ربط جهاز الثيودليت فوقه علي أن تكون أرجل الحامل الثلاثي متساوية الطول تقريبا (١).
- النظر في منظار التسامت (٢) لمعرفة موقع الجهاز من النقطة الأرضية ، ثم تحريك رجلين (أو شعبتين) من أرجل (شعب) الحامل الثلاثي بصورة دائرية حتى نري النقطة الأرضية في مركز منظار التسامت.
- ننظر لميزان التسوية العام (٣) لنري وضع فقاعة المياه التقريبية.
- إن كانت أفقية الجهاز غير مضبوطة نقوم بضبطها من خلال رفع أحد شعب (أرجل) الحامل الثلاثي لأعلي أو لأسفل من المسمار الذي يربط كلا جزأي الشعبة من منتصفها (٤).
- لضبط أفقية الجهاز بصورة تامة ننظر في ميزان التسوية الدقيق (٣) ونحرك الجهاز أفقيا حتى يكون موازيا لمسمارين من مسامير التسوية ثم نحرك كلا المسمارين معا بنفس الاتجاه سواء للداخل أو للخارج حتى تصبح الفقاعة في المنتصف تماما (٥ الوضع أ).
- ندير الجهاز أفقيا بزاوية ٩٠ درجة حتى يكون ميزان التسوية الدقيق عمودي علي الاتجاه السابق ، وننظر في ميزان التسوية الدقيق ونضبطه باستخدام المسمار الثالث من مسامير التسوية (٥ الوضع ب).
- نعود للنظر في منظار التسامت فان كانت النقطة الأرضية لم تعد في مركزه تماما فنقوم بفك مسمار تثبيت الثيودليت في قاعدة الحامل الثلاثي ثم نحرك الثيودليت (وليس الحامل الثلاثي) حتى نعيد وضع النقطة الأرضية في مركز منظار التسامت مرة أخري.
- أحيانا – وبعد إعادة ضبط التسامت في الخطوة السابقة – تكون أفقية الجهاز قد تغيرت قليلا مما يلزم إعادة ضبطها بنفس الطريقة مرة أخري.
- نكرر هذه الخطوات بالتبادل حتى نضمن أن كلا من التسامت و الأفقية قد تحققا تماما.



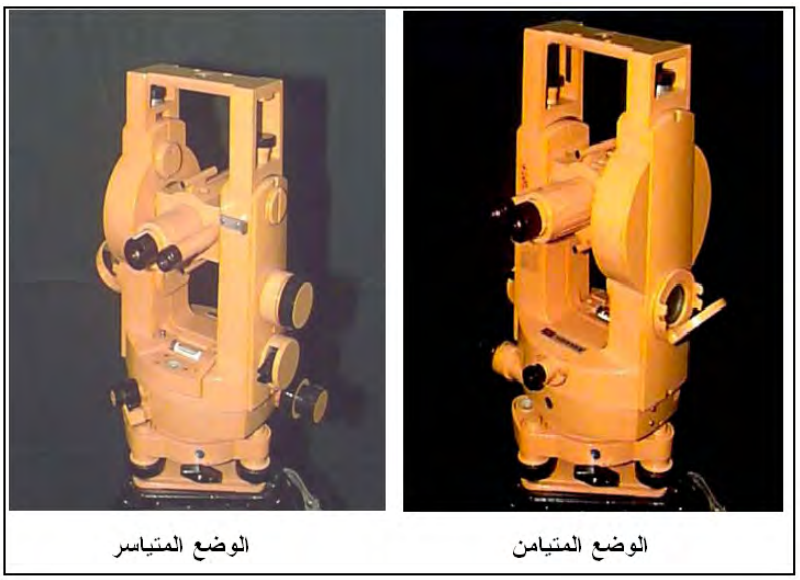
شكل (٦-٧) الضبط المؤقت للثيودليت

٦-٤ الرفع المساحي بالثيودليت

تتكون خطوات الرفع المساحي بالثيودليت من نفس الخطوات الرئيسية كما في الرفع بالشريط أو الرفع بالبوصلة (إلا أنها تختلف في كيفية تنفيذ العمل المساحي):

١. الاستكشاف وعمل كروكي عام للمنطقة.
٢. اختيار و تثبيت نقاط المضلع الأساسي.
٣. قياسات المضلع الأساسي.
٤. الرفع التفصيلي للمعالم (التحشية).
٥. العمل المكتبي و الحسابات.
٦. رسم الخريطة.

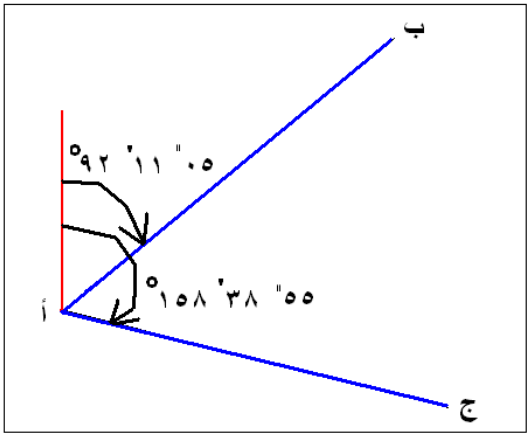
للحصول علي دقة عالية في قياس الزوايا الأفقية بجهاز الثيودليت فيتم قياس (أو رصد) كل زاوية في وضعين مختلفين للجهاز: (أ) الوضع المتيامن Face Right وهو عندما تكون الدائرة الرأسية للثيودليت علي يمين الراصد ، (ب) الوضع المتياسر Face Left وهو عندما تكون الدائرة الرأسية للثيودليت علي يسار الراصد. فإذا بدأنا بالوضع المتيامن فبعد قراءة الزاوية نقوم بلف الجهاز أفقيا ١٨٠ درجة ثم لف المنظار رأسيا ٩٠ درجة لنحصل علي الوضع المتياسر ونقوم بإعادة التوجيه وقراءة الزاوية الأفقية مرة أخري. الفرق بين كلا قراءتي الوضعين المتيامن و المتياسر هو ١٨٠ درجة إلا أنه ربما يوجد فرق بسيط سواء في الثواني أو الدقائق. تجدر الإشارة إلي أنه للتغلب علي تأثير الانكسار الضوئي علي أرصاد الثيودليت فأن أفضل أوقات الرصد تكون في فترة الصباح الباكر وفترة ما قبل الغروب مع تجنب العمل في الفترة قبل و بعد الظهر مباشرة حيث يحدث أكبر تأثير للانكسار في الغلاف الجوي.



شكل (٦-٨) أوضاع الرصد بالثيودليت

توجد عدة طرق لرصد الزوايا الأفقية بالثيودليت مثل طريقة التكرار و طريقة الزوايا الفردية و طريقة الاتجاهات. تعد طريقة الزوايا الفردية أسهل و أسرع طرق الرصد بالثيودليت وهي تعتمد علي قياس كل زاوية منفردة من خلال الوضعين المتيامن و المتياسر للثيودليت. يتم حساب متوسط كلا الوضعين (للدقائق والثواني فقط) لحساب قيمة الاتجاه لكل نقطة مرصودة، ثم نحسب قيمة الزاوية عن طريق طرح متوسط الاتجاهين. الجدول التالي يمثل أرصاد قياس الزاوية أ ب ج:

النقطة المرصودة	الوضع المتيامن	الوضع المتياسر	المتوسط	الزاوية
ب	٠٠" ١١' ٩٢°	١٠" ١١' ٢٧٢°	٠٥" ١١' ٩٢.٥°	٥٠" ٢٧' ٠٦٦°
ج	٥٠" ٣٨' ١٥٨°	٠٠" ٣٩' ٣٣٨°	٥٥" ٣٨' ١٥٨°	

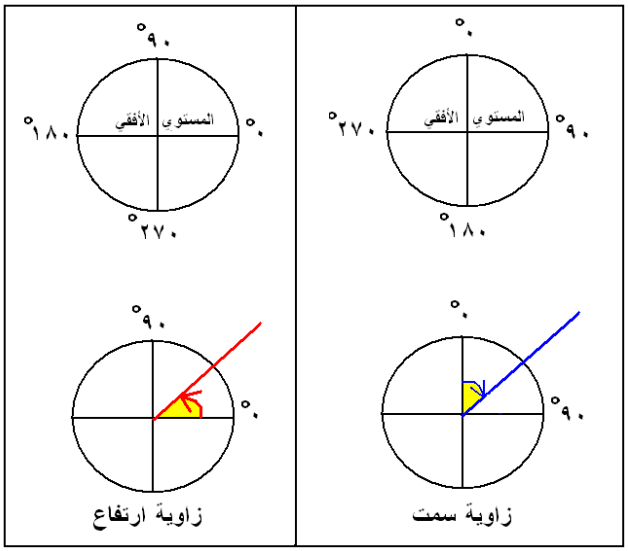


شكل (٦-٩) مثال لزاوية مرصودة بالثيودليت

يوجد في كل جهاز ثيودليت طريقة معينة لكي يتم بدء قياس الزوايا من نقطة محددة علي تدريج الدائرة الأفقية. مثلا إذا أردنا أن نقيس زاوية بحيث نبدأ القياس (التوجيه علي النقطة الأولي) عند صفر الدائرة الأفقية بالضبط ، أو عند قيمة زاوية تساوي ٩٠ درجة بالضبط. تختلف طريقة الحصول علي زاوية أفقية معينة من جهاز ثيودليت لآخر فبعض الأجهزة خاصة القديمة منها يوجد بها مسمار معين يسمي تثبيت الدائرة الأفقية بينما الأجهزة الحديثة يوجد بها زر يسمي زر الصفر. في حالة مسمار تثبيت الدائرة (للأجهزة القديمة) فيقوم الراصد بتحريك الثيودليت أفقيا حتى يحصل علي القراءة صفر في تدريج الدائرة الأفقية ثم يحرك هذا المسمار لوضع معين وبذلك يكون قد قام بتثبيت الدائرة الأفقية (أي أن قراءتها لن تتغير مهما تحرك الثيودليت نفسه). ثم يقوم الراصد بالتوجيه علي الهدف الأول (الضلع الأول أ ب من الزاوية المطلوب قياسها) وبعد ذلك يعيد المسمار لوضعه الأصلي (أي يكون قد حرر الدائرة الأفقية من وضعها الثابت إلي وضعها العادي). ثم يقوم الراصد بالتوجيه علي الهدف الثاني (الضلع الثاني أ ج للزاوية المطلوبة) وقراءة الدائرة الأفقية وبذلك يحصل مباشرة علي قيمة هذه الزاوية المرصودة. أما في أجهزة الثيودليت الحديثة فيوجد زر يقوم مباشرة – عند الضغط عليه – بجعل قراءة الدائرة الأفقية تساوي الصفر.

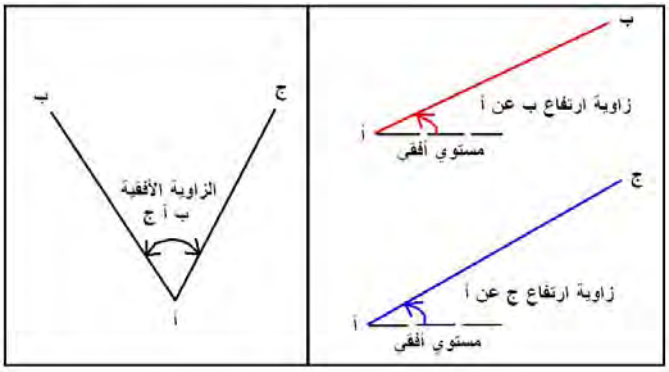
تختلف أجهزة الثيودليت في وضع أو تدريج الدائرة الرأسية ، فبعض الأجهزة يكون الوضع الأفقي لها عند زاوية رأسية تساوي صفر درجة بينما توجد أجهزة أخري يكون الأفق لها عند زاوية رأسية تساوي ٩٠ درجة. في الحالة الأولي فأن الزاوية الرأسية المرصودة تسمي زاوية الارتفاع Elevation Angle بينما في الحالة الثانية فأن الزاوية الرأسية المرصودة زاوية السمت Zenith Angle. يجب معرفة نوع الزاوية الرأسية لجهاز الثيودليت المستخدم لأن حسابات الارتفاع بين النقاط المرصودة ستعتمد علي نوع هذه الزاوية. العلاقة بين كلا نوعي الزاوية الرأسية هي:

زاوية الارتفاع + زاوية السمت = ٩٠° (٦-١)



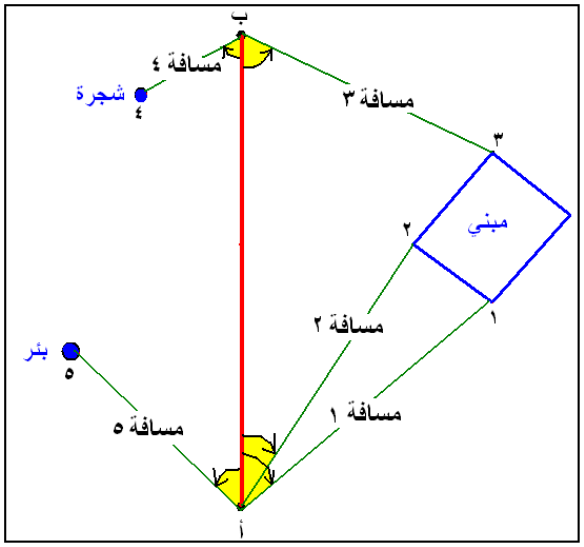
شكل (٦-١٠) زاوية الارتفاع و زاوية السمت

يجب ملاحظة أن كل نقطة مرصودة سيكون لها زاوية رأسية بينما توجد زاوية أفقية واحدة بين كل نقطتين:



شكل (٦-١١) زوايا الثيودليت الأفقية والرأسية

تتكون قياسات المضلع الرئيسي من قياس الزوايا الأفقية (الداخلية) والرأسية للمضلع مع قياس كل أطوال أضلاع المضلع سواء باستخدام الشريط أو باستخدام جهاز قياس المسافات الكترونيا EDM في حالة توافره. بالمثل فأن الرفع المساحي بالثيودليت (التحشية) يشمل قياس الزاوية الأفقية والرأسية لكل معلم بالإضافة لقياس بعد المعلم عن احدي نقاط المضلع الرئيسي.



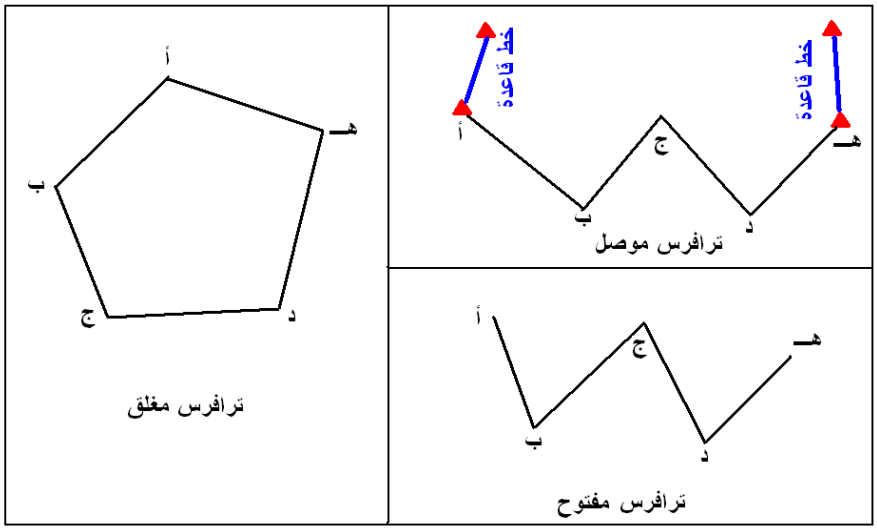
شكل (٦-١٢) الرفع المساحي بالثيودليت

٦-٥ حسابات ترافرس الثيودليت

كلمة "ترافرس Traverse " هي كلمة لاتينية يعود أصلها للقرن الرابع عشر الميلادي وتعني "المرور بـ" ، وهي كمصطلح مستخدم في قياسات علم المساحة منذ مئات السنين ليعني المضلع (الشكل متعدد النقاط).

توجد ٣ أنواع من الترافرسات:

١. الترافرس المغلق Closed or Polygonal Traverse : مضلع معلق تكون نقطة البداية له هي نقطة نهايته.
٢. الترافرس الموصل Link Traverse : يصل بين خطين معلومين (يسميا خطي قاعدة).
٣. الترافرس المفتوح Open or free Traverse : مضلع لا هو مغلق ولا هو موصل.



شكل (٦-١٣) أنواع الترافرس

يعد الترافرس المغلق هو أدق أنواع الترافرسات وهو أساس العمل المساحي الذي يتطلب دقة عالية. يرجع السبب في ذلك أن الترافرس المغلق له إمكانيات حسابية لاكتشاف أخطاء الرصد وتوزيعها (إن كانت في حدود القيم المسموح بها) أو رفض القياسات وإعادة قياسهم مرة أخري في الطبيعة ، مما يؤدي في النهاية إلي الحصول علي إحداثيات (مواقع) دقيقة للمعالم المطلوب رفعها و تمثيلها علي الخريطة. أما الترافرس الموصل ومع أنه أقل دقة من الترافرس المغلق إلا أنه قد يكون مناسبا للمشروعات الهندسية التي تمتد طوليا (مثل خطوط المياه و الكهرباء و الطرق ...الخ). بينما يعد الترافرس المفتوح أقل أنواع الترافرسات من حيث الدقة و يجب تجنبه بقدر الإمكان في الأعمال المساحية.

٦-٥-١ الترافرس المغلق

في الترافرس المغلق يتم رصد الزوايا الداخلية للترافرس بالإضافة لقياس أطوال أضلاعه. أيه قياسات في الطبيعة لن تكون خالية من الأخطاء سواء أخطاء الراصد نفسه أو أخطاء الجهاز أو تأثير العوامل الطبيعية علي مرحلة الرصد الحقلي. لذلك لا بد من حساب قيم الخطأ سواء في الزوايا أو الأضلاع المرصودة ، وبما أن الترافرس مغلق فتوجد شروط (أو معادلات) هندسية تمكننا من حساب قيم هذين النوعين من الأخطاء.

يتم حساب مجموع الزوايا الداخلية المرصودة للترافرس المغلق لكي يتم حساب قيمة الخطأ الزاوي للترافرس المغلق:

$$ز = مج - (ن-٢)\times ١٨٠^{o} \qquad (٦-٢)$$

حيث:
ز قيمة الخطأ الزاوي للترافرس
مج مجموع الزوايا الداخلية
ن عدد نقاط الترافرس

نقارن قيمة الخطأ الزاوي بالقيمة المسموح بها والتي تعتمد علي دقة الثيودليت المستخدم في رصد الترافرس. فان كان الخطأ الزاوي أكبر من القيمة المسموح بها فلا بد من إعادة رصد زوايا الترافرس مرة أخري أو علي الأقل إعادة رصد الزوايا المشكوك بها.

$$مسموح = ٢ و" \sqrt{ن} \qquad (٦-٣)$$

حيث:
مسموح قيمة الخطأ المسموح به بالثواني
و" دقة الثيودليت المستخدم بالثواني

تجدر الإشارة لوجود صيغة أخري للمعادلة (٥-٣) تكتب أحيانا كالتالي:

$$مسموح = ٧٠" \sqrt{ن}$$

هذه الصيغة تعد قديمة وكانت مستخدمة في السابق مع أجهزة الثيودليت منخفضة الدقة ، ومع توافر أجهزة ثيودليت حديثة دقيقة فأن المعادلة (٦-٣) هي الأنسب في حساب الحدود المسموح بها لأخطاء الزوايا المرصودة بالثيودليت.

إن كان الخطأ الزاوي للترافرس (يسمي أيضا خطأ القفل الزاوي) أقل من القيمة المسموح بها فيتم توزيع هذا الخطأ علي جميع الزوايا الداخلية بالتساوي وبعكس الإشارة:

$$ت = - ز / ن \qquad (٦-٤)$$

حيث:
ت التصحيح لكل زاوية من زوايا الترافرس.

ثم نحسب قيمة كل زاوية مصححة من زوايا الترافرس بإضافة قيمة التصحيح إلي قيمة الزاوية المرصودة أساسا.

عند تنفيذ الترافرس في الطبيعة يتم تحديد الانحراف لأحد خطوطه وذلك إما: (١) باستخدام البوصلة المغناطيسية ، أو (٢) بربط الترافرس علي أحد الخطوط المعلوم انحرافها.

بعد تصحيح الزوايا الداخلية للترافرس يتم حساب انحراف كل ضلع من أضلاعه (اعتمادا علي الضلع المعلوم الانحراف) باستخدام الزوايا المرصودة بعد تصحيحها:

انحراف الخط اللاحق = انحراف الخط السابق ± ١٨٠° + الزاوية المصححة بينهما (٦-٥)

يضاف ١٨٠° في حالة أن انحراف السابق أقل من ١٨٠° بينما نطرح ١٨٠° في حالة أن الانحراف السابق يكون أكبر من ١٨٠°.

كما يمكن كتابة المعادلة السابقة بصورة أخري:

انحراف الخط اللاحق = انحراف الخط السابق +١٨٠° + الزاوية المصححة بينهما (٦-٥ب)

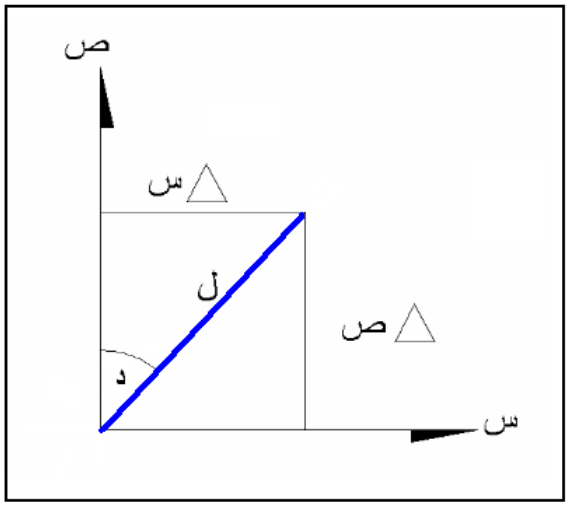
فإذا زاد الانحراف المحسوب عن ٣٦٠° فنطرح منه ٣٦٠°.

تتكون المرحلة الثالثة من حسابات الترافرس المغلق من حساب مركبات الخطوط:

$\Delta س = ل جا د$ (٦-٦)

$\Delta ص = ل جتا د$ (٦-٧)

حيث:
$\Delta س$ المركبة الأفقية للضلع
$\Delta ص$ المركبة الرأسية للضلع
ل طول الضلع
د انحراف الضلع



شكل (٦-١٤) مركبات الخط

ثم نحسب قيمة مركبات الخطأ الضلعي للترافرس:

Δ س$_{ت}$ = مجموع Δ س (٦-٨)

Δ ص$_{ت}$ = مجموع Δ ص (٦-٩)

حيث:
Δ س$_{ت}$ المركبة الأفقية للخطأ الطولي للترافرس
Δ ص$_{ت}$ المركبة الرأسية للخطأ الطولي للترافرس

يمكن حساب طول الخطأ الطولي للترافرس (يسمي أيضا خطأ القفل الضلعي) من خلال مركبتيه الأفقية والرأسية:

Δ ل = $\sqrt{}$ (Δ س$_{ت}^{٢}$ + Δ س$_{ت}^{٢}$) (٦-١٠)

حيث:

Δ ل خطأ القفل الضلعي للترافرس المغلق.

يتم بعد ذلك تحويل خطأ القفل الضلعي إلي خطأ نسبي:

Δ ل$_{٢}$ = Δ ل / مجموع أطوال أضلاع الترافرس (٦-١١)

حيث:
Δ ل$_{٢}$ نسبة خطأ القفل الضلعي.

غالبا تعتمد قيمة الخطأ الضلعي المسموح به علي طبيعة المشروع ذاته ومدي الدقة المطلوبة به، ومن هنا نقرر إن كان الخطأ الضلعي للترافرس مسموحا به أم لا. كمثال فأن هيئة المساحة المصرية تحدد قيمة ١ / ٢٠٠٠ كخطأ قفل ضلعي نسبي مسموحا به في أعمال الترافرسات داخل المدن. أي إن كانت قيمة خطأ القفل الضلعي للترافرس المرصود (Δ ل$_{٢}$) أقل من ١/٢٠٠٠ فنعتبره مسموحا به ، وان كان الخطأ اكبر من هذه القيمة فيتم إعادة رصد أو قياس أطوال أضلاع الترافرس مرة أخري.

توجد طريقتين لتوزيع خطأ القفل الضلعي (إن كان أقل من القيمة المسموح بها) للترافرس المغلق وهما: (أ) طريقة بودتش التي تعتمد علي توزيع الخطأ علي كل ضلع من أضلاع الترافرس بنسبة طول هذا الضلع إلي مجموع أطوال أضلاع الترافرس ، (ب) طريقة المركبات والتي تعتمد علي توزيع الخطأ علي كل ضلع من أضلاع الترافرس بنسبة طول مركبات هذا الضلع إلي مجموع أطوال مركبات أضلاع الترافرس. طريقة بودتش مناسبة أكثر لترافرس البوصلة بينما الطريقة الثانية (المركبات) هي الأنسب لترافرس الثيودليت.

(أ) توزيع الخطأ الضلعي بطريقة بودتش:

تصحيح المركبة الأفقية لخط = - Δ س$_{ت}$ × طول الضلع/مجموع أطوال الأضلاع (٦-١٢)

تصحيح المركبة الرأسية لخط = - Δ ص$_{ت}$ × طول الضلع/مجموع أطوال الأضلاع (٦-١٣)

(ب) توزيع الخطأ الضلعي بطريقة المركبات (تسمي أيضا طريقة الثيودليت):

تصحيح المركبة الأفقية لخط = - Δ س$_{ت}$ × Δ س /
المجموع المطلق Δ س للأضلاع (٦-١٤)

تصحيح المركبة الرأسية لخط = - Δ ص$_{ت}$ × Δ ص /
المجموع المطلق Δ ص للأضلاع (٦-١٥)

لكن في المعادلتين السابقتين فأن مجموع Δ س و مجموع Δ ص للأضلاع يساوي المجموع المطلق absolute sum وليس المجموع الجبري ، بمعني مجموع المركبات دون اعتبار إشاراتها.

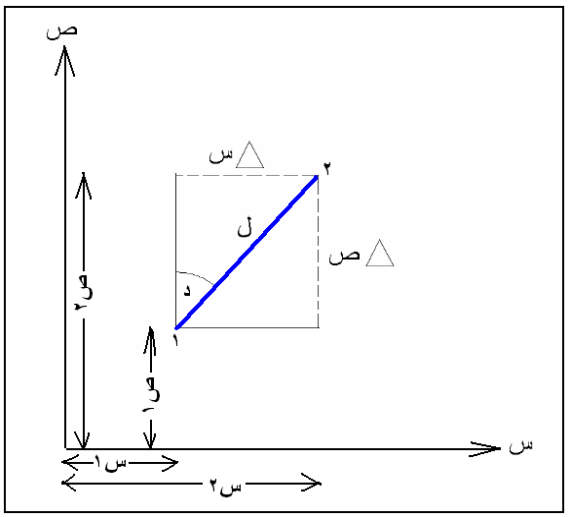
في الخطوة الأخيرة من حسابات ترافرس الثيودليت يتم حساب الإحداثيات المصححة (النهائية) لكل نقطة من نقاط الترافرس باستخدام كلا من الزوايا المصححة و أطوال الأضلاع المصححة. هنا يلزمنا معرفة إحداثيات احدي نقاط الترافرس ولربط المشروع (الترافرس) علي إحداثيات مساحية حقيقية للخرائط الوطنية يلزمنا ربط الترافرس علي احدي نقاط الثوابت الأرضية (معلومة الإحداثيات) للشبكة الوطنية. أما إن لم تتوفر نقطة ثوابت أرضية حقيقية بالقرب من منطقة العمل فيتم فرض إحداثيات احدي نقاط الترافرس وهو ما نسميه الصفر المخصوص.

س$_{٢}$ = س$_{١}$ + Δ س (٦-١٦)

ص$_{٢}$ = ص$_{١}$ + Δ ص (٦-١٧)

حيث:

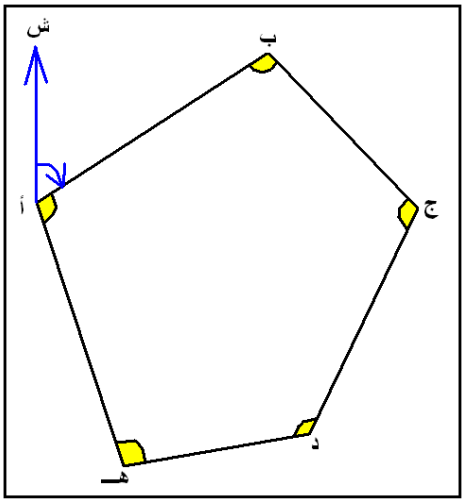
س١ ، ص١	إحداثيات النقطة الأولي للخط
س٢ ، ص٢	إحداثيات النقطة الثانية للخط
Δس ، Δص	المركبات المصححة للخط



شكل (٦-١٥) إحداثيات نقطتي الضلع

مثال:

الشكل التالي يمثل ترافرس مغلق تم قياس زواياه الداخلية وأطوال أضلاعه بالإضافة لرصد انحراف الضلع الأول (أ ب) ، والجدول التالي يشمل قيم الأرصاد.



شكل (٦-١٦) مثال لترافرس مغلق

النقطة	الضلع	الطول المقاس (متر)	الزاوية المرصودة
أ			
	أ ب	١٠٢.٦٩	٢٠" ٤٤' ٥٠٧٧
ب			
	ب ج	٩٧.٩٤	٠٠" ٢٢' ٥١٣٠
ج			
	ج د	٨٣.٥٥	٢٠" ٤٨' ٥٠٨١
د			
	د هـ	٧٣.٧٤	٢٠" ١٩' ٥١٣٧
هـ			
	هـ أ	١٠٨.٣٣	٤٠" ٤٤' ٥١١٢
أ			

مجموع أطوال أضلاع الترافرس = ٤٦٦.٢٥ متر

مجموع الزوايا الداخلية للترافرس = ٤٠" ٥٨' ٥٥٣٩

ن = عدد نقاط الترافرس = ٥

الخطأ الزاوي للترافرس المغلق (معادلة ٦-٢):

ز = مج – (ن-٢)×١٨٠٥
= ٤٠" ٥٨' ٥٥٣٩ – (٥-٢) × ١٨٠٥)
= ٤٠" ٥٨' ٥٥٣٩ – (٣ × ١٨٠٥)
= ٤٠" ٥٨' ٥٥٣٩ – ٥٥٤٠
= - ٢٠" ١'

فإذا علمنا أن هذا الترافرس تم رصده باستخدام ثيودليت دقته ٢٠" فأن الخطأ الزاوي المسموح به (معادلة ٦-٣):

مسموح = ٢ و" √ ن
= ٢ × ٢٠" √ ٥
= ٨٩.٤٤"
= ٢٩.٤٤" ١'

أي أن خطأ القفل الزاوي لهذا الترافرس أقل من القيمة المسموح بها ، إذن التصحيح لكل زاوية مرصودة (معادلة ٦-٤):

ت = - ز / ن = - (- ٢٠" ١') / ٥ = - (- ٨٠") / ٥ = + ١٦"

نحسب قيمة كل زاوية مصححة من زوايا الترافرس بإضافة قيمة التصحيح إلي قيمة الزاوية المرصودة أساسا.

الزاوية الداخلية المصححة عند النقطة أ =٢٠" ٤٤' ٥٠٧٧ + ١٦" = ٣٦" ٤٤' ٥٠٧٧

الزاوية الداخلية المصححة عند النقطة ب = ٠٠" ٢٢' ٥١٣٠ + ١٦" = ١٦" ٢٢' ٥١٣٠

الزاوية الداخلية المصححة عند النقطة ج = ٢٠" ٤٨' ٥٠٨١ + ١٦" = ٣٦" ٤٨' ٥٠٨١

الزاوية الداخلية المصححة عند النقطة د = ٢٠" ١٩' ٥١٣٧ + ١٦" = ٣٦" ١٩' ٥١٣٧

الزاوية الداخلية المصححة عند النقطة هـ = ٤٠" ٤٤' ٥١١٢ + ١٦" = ٥٦" ٤٤' ٥١١٢

تحقيق:
مجموع الزوايا المصححة = ٠٠" ٠٠' ٥٥٤٠

معلوم في هذا الترافرس أن انحراف الخط أ ب = ٣٦" ١٣' ٥٠٧٠

الآن يتم حساب انحراف كل ضلع من أضلاعه (اعتمادا علي الضلع المعلوم الانحراف) باستخدام الزوايا المرصودة بعد تصحيحها (المعادلة ٦-٥):

انحراف ب ج = انحراف أ ب + ٥١٨٠ - الزاوية المصححة عند ب
= ٣٦" ١٣' ٥٠٧٠ + ٥١٨٠ - ١٦" ٢٢' ٥١٣٠ = ٢٠" ٥١' ٥١١٩

انحراف ج د = انحراف ب ج + ٥١٨٠ - الزاوية المصححة عند ج
= ٢٠" ٥١' ٥١١٩ + ٥١٨٠ - ٣٦" ٤٨' ٥٨١ = ٤٤" ٠٢' ٥٢١٨

انحراف د هـ = انحراف ج د - ٥١٨٠ - الزاوية المصححة عند د
= ٤٤" ٠٢' ٥٢١٨ - ٥١٨٠ - ٣٦" ١٩' ٥١٣٧
= - ٥٢" ١٦' ٥٩٩ = ٠٨" ٤٣' ٥٢٦٠

انحراف هـ أ = انحراف د هـ - ٥١٨٠ - الزاوية المصححة عند هـ
= ٠٨" ٤٣' ٥٢٦٠ - ٥١٨٠ - ٥٦" ٤٤' ٥١١٢
= - ٤٨" ٠١' ٥٣٢ = ١٢" ٥٨' ٥٣٢٧

تحقيق:

انحراف أ ب = انحراف هـ أ - ٥١٨٠ - الزاوية المصححة عند أ
= ١٢" ٥٨' ٥٣٢٧ - ٥١٨٠ - ٣٦" ٤٤' ٥٧٧
= ٣٦" ١٣' ٥٠٧٠ = الانحراف المعلوم.

تتكون المرحلة الثالثة من حسابات الترافرس المغلق من حساب مركبات الخطوط (المعادلة ٦-٦ و ٦-٧) كما في الجدول التالي:

الضلع	الطول (ل)	الانحراف (ز)	Δس= ل جا ز	Δص= ل جتا ز
أ ب	١٠٢.٦٩	٥٠٧٠ ١٣' ٣٦"	٩٦.٦٣٥	٣٤.٧٤٠
ب ج	٩٧.٩٤	٥١١٩ ٥١' ٢٠"	٨٤.٩٤٢	- ٤٨.٧٥٦
ج د	٨٣.٥٥	٥٢١٨ ٠٢' ٤٤"	- ٥١.٤٩١	- ٦٥.٧٩٧
د هـ	٧٣.٧٤	٥٢٦٠ ٤٣' ٠٨"	- ٧٢.٧٧٥	- ١١.٨٩٣
هـ أ	١٠٨.٣٣	٥٣٢٧ ٥٨' ١٢"	- ٥٧.٤٥٤	٩١.٨٣٩

ثم نحسب قيمة مركبات الخطأ الضلعي للترافرس:
Δ س$_{ت}$ = مجموع Δ س = - ٠.١٤٣ متر
Δ ص$_{ت}$ = مجموع Δ ص = + ٠.١٣٣ متر

نحسب خطأ القفل الضلعي(المعادلة ٦-٨):

$$\Delta ل = \sqrt{(\Delta س_{ت}^{2} + \Delta ص_{ت}^{2})} = \sqrt{((-٠.١٤٣)^{2} + (+٠.١٣٣)^{2})} = ٠.١٩٥ \text{ متر}$$

يتم بعد ذلك تحويل خطأ القفل الضلعي إلي خطأ نسبي (المعادلة ٦-٩):

Δ ل$_{ر}$ = Δ ل / مجموع أطوال أضلاع الترافرس = ٠.١٩٥ / ٤٦٦.٢٥
= ١ / ٢٣٨٧.٤٨

وحيث أن قيمة خطأ القفل الضلعي للترافرس المرصود (١/٢٣٨٧) أقل من ١/٢٠٠٠ فنعتبره مسموحا به.ثم نستخدم طريقة المركبات لتوزيع خطأ القفل الضلعي (المعادلة ٦-١٢ و ٦-١٣) كما في الجدول التالي:

تصحيح Δس لأي ضلع = ٠.١٤٣ × Δس الضلع / المجموع المطلق Δس لجميع الأضلاع

تصحيح Δص لأي ضلع = - ٠.١٣٣ × Δص الضلع / المجموع المطلق Δص لجميع الأضلاع

الضلع	Δس	Δص	تصحيح Δس	تصحيحΔص
أ ب	٩٦.٦٣٥	٣٤.٧٤٠	٠.٠٣٨٠	- ٠.٠١٨٣
ب ج	٨٤.٩٤٢	- ٤٨.٧٥٦	٠.٠٣٣٤	- ٠.٠٢٥٦
ج د	- ٥١.٤٩١	- ٦٥.٧٩٧	٠.٠٢٠٣	- ٠.٠٣٤٦
د هـ	- ٧٢.٧٧٥	١١.٨٩٣	٠.٠٢٨٦	- ٠.٠٠٦٣
هـ أ	- ٥٧.٤٥٤	٩١.٨٣٩	٠.٠٢٢٦	- ٠.٠٤٨٣
المجموع الجبري	- ٠.١٤٣	+ ٠.١٣٢	+ ٠.١٤٣	- ٠.١٣٢
تحقيق				
المجموع المطلق	٣٦٣.٢٩٧	٢٥٣.٠٢٥		

الضلع	Δس المصححة	Δص المصححة
أ ب	٩٦.٦٧٣	٣٤.٧٢٢
ب ج	٨٤.٩٧٥	٤٨.٧٨٢ -
ج د	٥١.٤٧١ -	٦٥.٨٣٢ -
د هـ	٧٢.٧٤٦ -	١١.٨٩٩ -
هـ أ	٥٧.٤٣١ -	٩١.٧٩١

في الخطوة الأخيرة من حسابات ترافرس الثيودليت يتم حساب الإحداثيات المصححة (النهائية) لكل نقطة من نقاط الترافرس باستخدام المركبات المصححة (معادلة ٦-١٤ و ٦-١٥). فإذا علمنا أن الإحداثيات الحقيقية للنقطة أ هي ٦٣٤٨.١٥٢ ، ١٤٨٤٧.٧٤٤ متر فأن الإحداثيات النهائية لنقاط الترافرس ستكون كالآتي:

النقطة	الضلع	Δ س المصححة	Δ ص المصححة	س	ص
أ				٦٣٤٨.١٥٢	١٤٨٤٧.٧٤٤
	أ ب	٩٦.٦٧٣	٣٤.٧٢٢		
ب				٦٤٤٤.٨٢٥	١٤٨٨٢.٤٦٦
	ب ج	٨٤.٩٧٥	٤٨.٧٨٢ -		
ج				٦٥٢٩.٨٠٠	١٤٨٣٣.٦٨٤
	ج د	٥١.٤٧١ -	٦٥.٨٣٢ -		
د				٦٤٧٨.٣٢٩	١٤٧٦٧.٨٥٢
	د هـ	٧٢.٧٤٦ -	١١.٨٩٩ -		
هـ				٦٤٠٥.٥٨٣	١٤٧٥٥.٩٥٣
	هـ أ	٥٧.٤٣١ -	٩١.٧٩١		
أ	تحقيق			٦٣٤٨.١٥٢	١٤٨٤٧.٧٤٤

٦-٥-٢ الأرصاد الناقصة في الترافرس المغلق

في تطبيقات الهندسة المدنية يجب رصد جميع زوايا و أضلاع الترافرس المغلق. لكن في الحالات القصوى (وخاصة تطبيقات المساحة في المناجم والأنفاق) ربما يواجه الراصد صعوبة رصد ضلع معين من أضلاع ترافرس مغلق. في مثل هذه الحالات نستفيد من الخواص الهندسية والحسابية للترافرس المغلق لحساب الأرصاد الناقصة والتي يجب ألا تزيد عن اثنين. لكن تجدر الإشارة إلي أن حساب هذه الأرصاد الناقصة يكون علي حساب عدم اكتشاف أية أخطاء في الترافرس ، وفي هذه الحالة يجب التأكد من أن كل القياسات قد تمت بدقة عالية مع تكرار رصد كلا منها أكثر من مرة للتأكد من دقتها قبل استخدامها في حساب الأرصاد الناقصة.

ومن أمثلة الأرصاد الناقصة في الترافرس المغلق حالة رصد أضلاع وزوايا أضلاع ترافرس مغلق إلا ضلع واحد ناقص (لوجود عائق في مساره يمنع الرصد) يمكن حساب طول هذا الضلع و انحرافه كالآتي:

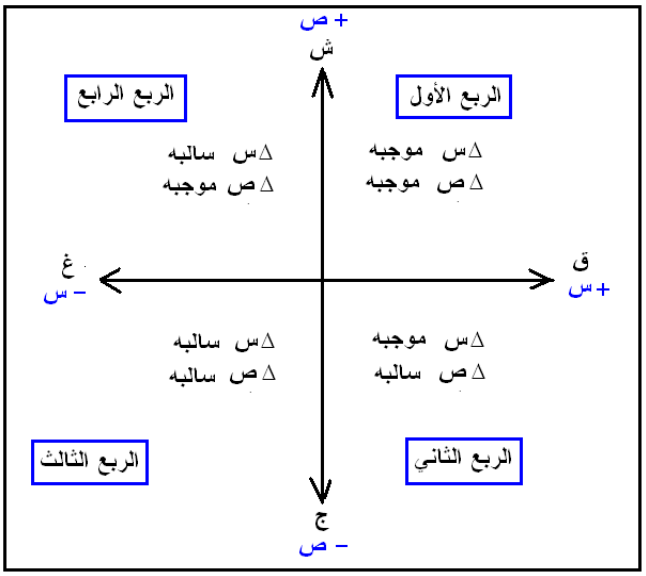
Δ س الضلع الناقص = - مجموع Δ س لباقي أضلاع الترافرس (٦-١٨)

Δ ص الضلع الناقص = - مجموع Δ ص لباقي أضلاع الترافرس (٦-١٩)

طول الضلع الناقص = √ (مربع Δ س الضلع الناقص + مربع Δ س الضلع الناقص) (٦-٢٠)

انحراف الضلع الناقص = ظ$^{-1}$ (Δ س الضلع الناقص / Δ ص الضلع الناقص) (٦-٢١)

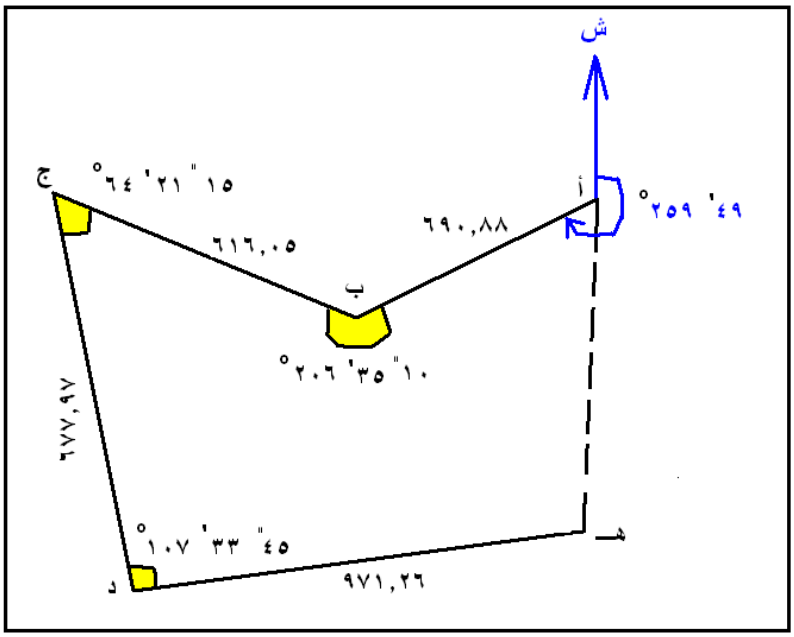
يجب مراعاة أن استخدام الآلة الحاسبة في المعادلة السابقة سينتج عنه قيمة الانحراف المختصر للضلع الناقص ، ومن خلال معرفة إشارة كل من Δ س ، Δ ص لهذا الضلع يمكن تحديد الربع الواقع به ومن ثم تحويل الانحراف المختصر إلي الانحراف الدائري لهذا الضلع الناقص.



شكل (٦-١٧) إشارات مركبات الأضلاع في كل ربع

مثال:

في الشكل التالي لم يمكن رصد طول الضلع أ هـ أو الزاويتين الداخليتين عند كلا من نقطة أ و نقطة هـ.



شكل (٦-١٨) مثال للأرصاد الناقصة في الترافرس المغلق

من خلال الانحراف المعلوم للضلع أ ب والزوايا الداخلية المرصودة يمكن حساب انحرافات باقي الأضلاع كالتالي:

انحراف أ ب = ٠٠" ٤٩' °٢٥٩

انحراف ب ج = ٠٠" ٤٩' °٢٥٩ – °١٨٠ + ١٠" ٣٥' °٢٠٦ = ١٠" ٢٤' °٢٨٦

انحراف ج د = ١٠" ٢٤' °٢٨٦ – °١٨٠ + ١٥" ٢١' °٦٤ = ٢٥" ٤٥' °١٧٠

انحراف د هـ = ٢٥" ٤٥' °١٧٠ – °١٨٠ + ٤٥" ٣٣' °١٠٧ = ١٠" ١٩' °٩٨

نحسب مركبات أضلاع الترافرس:

الضلع	الطول (ل)	الانحراف (ز)	Δس= ل جا د	Δص= ل جتا د
أ ب	٦٩٠.٨٨	٠٠" ٤٩' °٢٥٩	٦٧٩.٩٩٧ -	١٢٢.١٤٧ -
ب ج	٦١٦.٠٥	١٠" ٢٤' °٢٨٦	٥٩٠.٩٧٧ -	١٧٣.٩٦٥ +
ج د	٦٧٧.٩٧	٢٥" ٤٥' °١٧٠	١٠٨.٨٩٨ +	٦٦٩.١٦٧ -
د هـ	٩٧١.٢٦	١٠" ١٩' °٩٨	٩٦١.٠٣٩ +	١٤٠.٥٣٤ -
هـ أ	؟	؟	؟	؟
		المجموع الجبري	٢٠١.٠٣٧ -	٧٥٧.٨٨٣ -

من المعادلة (٦-١٨):

Δ س الضلع الناقص هـ أ = - مجموع Δ س لباقي أضلاع الترافرس
= - (-٢٠١.٠٣٧) = + ٢٠١.٠٣٧ متر

من المعادلة (٦-١٩):

Δ ص الضلع الناقص هـ أ = - مجموع Δ ص لباقي أضلاع الترافرس
= - (-٧٥٧.٨٨٣) = + ٧٥٧.٨٨٣ متر

من المعادلة (٦-٢٠):

طول الضلع الناقص هـ أ = √ (مربع Δ س الضلع الناقص + مربع Δ س الضلع الناقص)
= √ (٢٠١.٠٣٧ ٢ + ٧٥٧.٨٨٣ ٢)
= ٧٨٤.٠٩٣ متر

من المعادلة (٦-٢١):

الانحراف المختصر للضلع الناقص = ظ-١ (Δ س الضلع الناقص / Δ ص الضلع الناقص)
= ظ-١ (+ ٢٠١.٠٣٧ / + ٧٥٧.٨٨٣)
= ش ٢٥.٧٤" ٥١' ١٤° ق

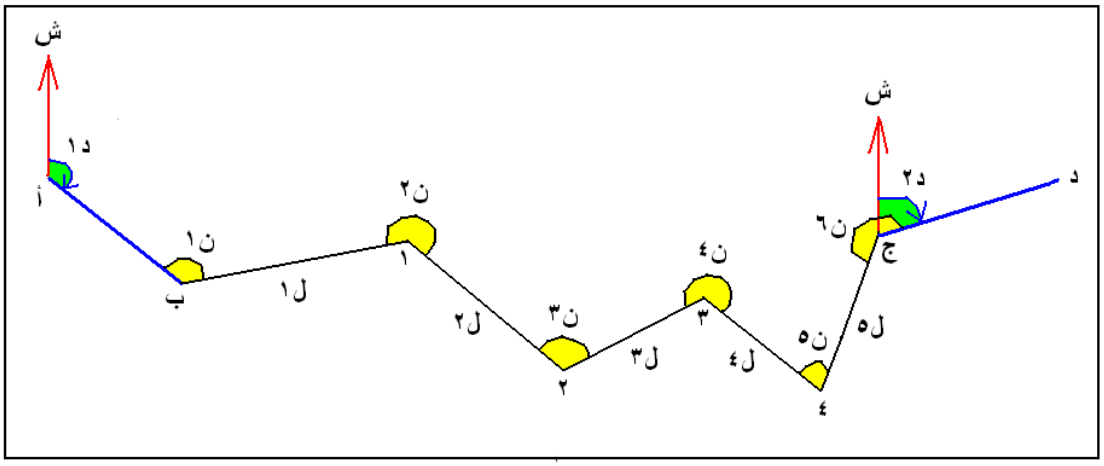
وحيث أن إشارة Δ س موجبة وإشارة Δ ص موجبة أيضا فأن هذا الانحراف المختصر يقع في الربع الأول. وفي هذا الربع فأن الانحراف الدائري يساوي الانحراف المختصر (معادلة ٣-٣٩).

الانحراف الدائري للضلع هـ أ = ٢٥.٧٤" ٥١' ١٤°

الانحراف الدائري للضلع أ هـ = الانحراف الخلفي للضلع هـ أ
= الانحراف الأمامي للضلع هـ أ + ١٨٠°
= ٢٥.٧٤" ٥١' ١٤° + ١٨٠° = ٢٥.٧٤" ٥١' ١٩٤°

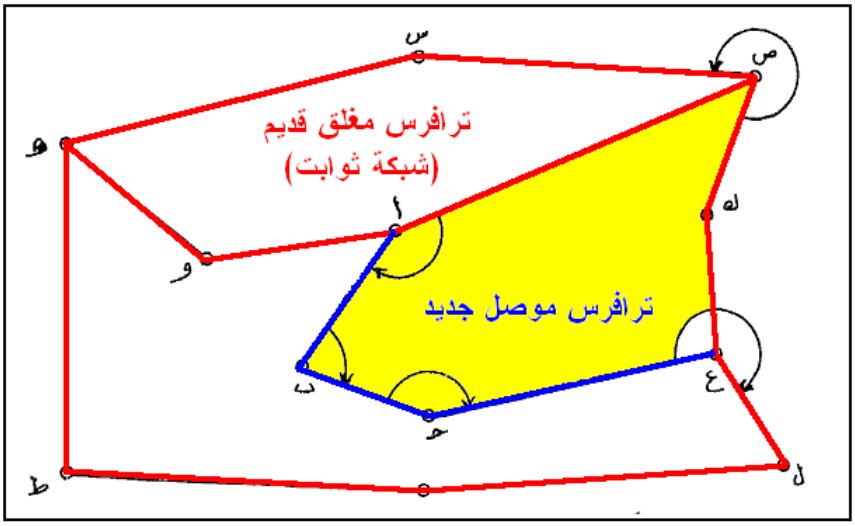
٦-٥-٣ الترافرس الموصل

جاء أسم الترافرس الموصل من حقيقية أنه يصل بين نقطتين معلومتين الإحداثيات (أ و ج في شكل ٦-١٨) كما أنه يصل بين خطين معلومين الانحراف(أ ب ، ج د). يتكون العمل الميداني في الترافرس الموصل من رصد الزاوية بين خط الربط الأول وأول أضلاع الترافرس ثم رصد الزوايا بين أضلاع الترافرس وكذلك الزاوية بين آخر أضلاع الترافرس وخط الربط الثاني ، بالإضافة لقياس أطوال الأضلاع سواء بالشريط أو بجهاز قياس مسافات الكترونيا.



شكل (٦-١٩) الترافرس الموصل

أحيانا نحتاج لعمل ترافرس موصل لإنشاء نقاط ثوابت أرضية جديدة (تكثيف شبكة الثوابت) في منطقة العمل التي يتوافر بها شبكة ثوابت قديمة (ترافرس مغلق علي سبيل المثال).



شكل (٦-٢٠) أحد تطبيقات الترافرس الموصل

في الترافرس الموصل يكون عدد الزوايا أكثر بواحد من عدد النقاط ، فإذا كان عدد أضلاع الترافرس الموصل = ن فأن عدد الزوايا المقاسة سيكون = ن +١. تتكون خطوات العمل المساحي في حالة الترافرس الموصل من نفس خطوات تنفيذ الترافرس المغلق (الاستكشاف ورسم الكروكي واختيار وتثبيت نقاط الترافرس .... الخ) لكنها تختلف في الحسابات.

يتم حساب خطأ القفل الزاوي في الترافرس الموصل كالآتي:

ز = مج – (د١ – د٢ + (ن+١)×١٨٠°) (٦-٢٢)

حيث:

ز	قيمة الخطأ الزاوي للترافرس
مج	مجموع الزوايا المقاسة بين أضلاع الترافرس والمأخوذة دائما عكس اتجاه دوران عقرب الساعة من الضلع السابق إلي الضلع اللاحق ابتداء من خط الربط الأول.
ن	عدد نقاط الترافرس
د١	انحراف خط الربط الأول
د٢	انحراف خط الربط الأخير

أما في حالة أن زوايا الترافرس الموصل قد تم رصدها مع اتجاه دوران عقرب الساعة فأن معادلة حساب خطأ القفل الزاوي تصبح:

ز = مج – (د٢ – د١ + (ن+١)×١٨٠°) (٦-٢٣)

يمكن أيضا حساب خطأ القفل الزاوي للترافرس الموصل بطريقة أخري تعتمد علي استخدام الزوايا المرصودة لحساب انحرافات خطوط الترافرس وصولا إلي حساب انحراف خط الربط الأخير ، ثم نقارن الانحراف المحسوب لهذا الخط مع انحرافه المعلوم أصلا:

ز = الانحراف المحسوب لخط الربط الأخير – الانحراف المعلوم لخط الربط الأخير

نقارن قيمة الخطأ الزاوي بالقيمة المسموح بها والتي تعتمد علي دقة الثيودليت المستخدم في رصد الترافرس. فان كان الخطأ الزاوي أكبر من القيمة المسموح بها فلا بد من إعادة رصد زوايا الترافرس مرة أخري أو علي الأقل إعادة رصد الزوايا المشكوك بها. وقيمة المسموح به في زوايا الترافرس الموصل هو نفس قيمة الترافرس المغلق (معادلة ٦-٣) إلا أن عدد الزوايا في حالة الترافرس الموصل سيكون أكبر بواحد من عدد نقاط الترافرس:

مسموح = ٢ و" √ ن+١ (٦-٢٤)

حيث:

مسموح	قيمة الخطأ المسموح به بالثواني
و"	دقة الثيودليت المستخدم بالثواني

في الخطوة الثانية من حسابات الترافرس الموصل نقوم بحساب انحرافات خطوط الترافرس بدءا من انحراف الضلع المعلوم (خط الربط) الأول باستخدام قيم الزوايا المرصودة. ثم نقوم بتوزيع خطأ القفل الزاوي (في حالة أنه أقل من القيمة المسموح بها) علي انحرافات الخطوط كالآتي:

تصحيح انحراف الخط الأول: ت١ = - ز / (ن + ١) (٦-٢٥)

تصحيح انحراف الخط الثاني: ت٢ = - ٢ ز / (ن + ١) (٦-٢٦)

وهكذا إلي أن نصل إلي:

تصحيح انحراف خط الربط الأخير: ت $_{ن+١}$ = - ز (ن+١) / (ن+١) = - ز (٦-٢٧)

تتكون المرحلة الثالثة من حسابات الترافرس المغلق من حساب مركبات الخطوط بنفس الطريقة كما في الترافرس المغلق (معادلة ٦-٦ و ٦-٧) ثم نحسب إحداثيات نقاط الترافرس بالاعتماد علي الإحداثيات المعلومة لنقطة الربط الأولي. ثم نحسب قيمة مركبات الخطأ الضلعي للترافرس الموصل كالآتي:

Δ س$_{ت}$ = س $_{ب}$ – س $_{ج}$ + مجموع Δ س (٦-٢٨)

Δ ص$_{ت}$ = ص $_{ب}$ – ص $_{ج}$ + مجموع Δ ص (٦-٢٩)

حيث:

Δ س$_{ت}$	المركبة الأفقية للخطأ الطولي للترافرس
Δ ص$_{ت}$	المركبة الرأسية للخطأ الطولي للترافرس
س $_{ب}$	الاحداثي الشرقي لنقطة الربط الأولي (نقطة أ).
ص $_{ب}$	الاحداثي الشمالي لنقطة الربط الأولي (نقطة أ).
س $_{ج}$	الاحداثي الشرقي لنقطة الربط الأخيرة (نقطة ج).
ص $_{ج}$	الاحداثي الشمالي لنقطة الربط الأخيرة (نقطة ج).

يمكن حساب طول الخطأ الطولي للترافرس (يسمي أيضا خطأ القفل الضلعي) من خلال مركبتيه الأفقية والرأسية (المعادلة ٦-٨):

Δ ل = $\sqrt{}$ (Δ س$_{ت}^{٢}$ + Δ س$_{ت}^{٢}$)

بعد ذلك يتم تحويل خطأ القفل الضلعي إلي خطأ نسبي كما في حالة الترافرس المغلق (معادلة ٦-٩):

Δ ل$_{٢}$ = Δ ل / مجموع أطوال أضلاع الترافرس

حيث:

Δ ل$_{٢}$	نسبة خطأ القفل الضلعي.

كما سبق القول فغالبا تعتمد قيمة الخطأ الضلعي المسموح به علي طبيعة المشروع ذاته ومدي الدقة المطلوبة به ، ومن هنا نقرر إن كان الخطأ الضلعي للترافرس مسموحا به أم لا. كمثال فأن هيئة المساحة المصرية تحدد قيمة ١ / ٢٠٠٠ كخطأ قفل ضلعي نسبي مسموحا به في أعمال الترافرسات داخل المدن. أي إن كانت قيمة خطأ القفل الضلعي للترافرس المرصود (Δ ل$_{٢}$) أقل من ١/٢٠٠٠ فنعتبره مسموحا به ، وان كان الخطأ اكبر من هذه القيمة فيتم إعادة رصد أو قياس أطوال أضلاع الترافرس مرة أخري.

نستخدم طريقة المركبات (طريقة الثيودليت) لتوزيع خطأ القفل الضلعي (إن كان أقل من القيمة المسموح بها) للترافرس الموصل كما سبق في حالة الترافرس المغلق (معادلة ٦-١٢ و ٦-١٣):

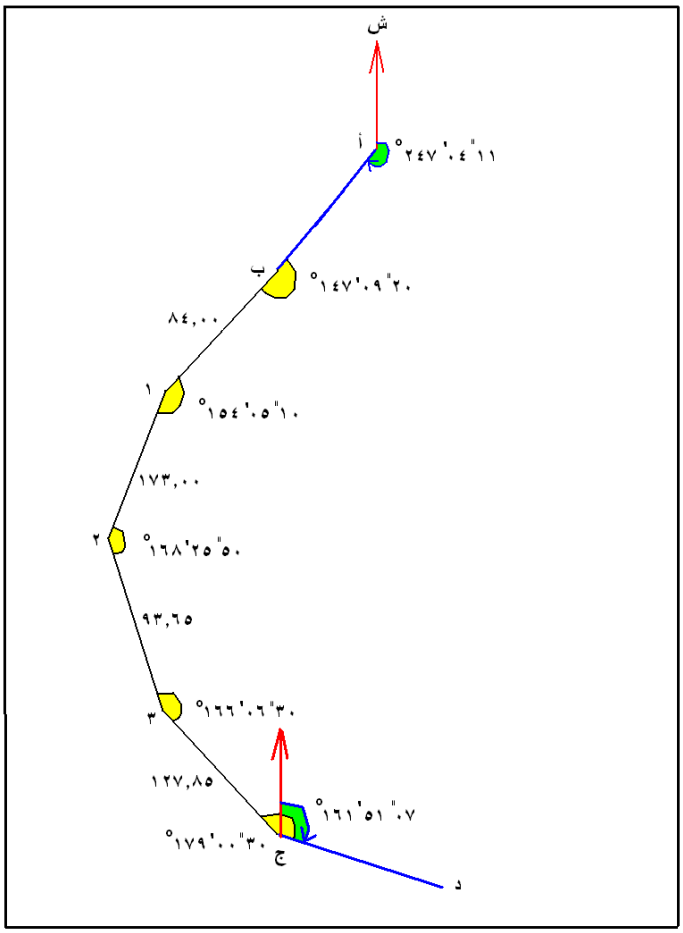
تصحيح المركبة الأفقية لخط = - Δ س ت × Δ س / المجموع المطلق Δ س للأضلاع

تصحيح المركبة الرأسية لخط = - Δ ص ت × Δ ص / المجموع المطلق Δ ص للأضلاع

باستخدام المركبات المصححة يتم حساب قيم الإحداثيات المصححة لجميع نقاط الترافرس الموصل.

مثال:

الشكل التالي يمثل أرصاد ترافرس موصل يبدأ من نقطة ب (١٠٧٤.١٨٢ ، ١١٢٥.٠٥٣) إلي نقطة ج (١٠٤٤.٨٤٦ ، ٦٦٨.٨٩٥) والمطلوب حساب إحداثيات نقاط هذا الترافرس.



شكل (٦-٢١) مثال لترافرس موصل

الخطأ الزاوي للترافرس (معادلة ٦-٢٠):

ز = مج – (د١ – د٢ + (ن+١)×١٨٠°)
= (٢٠" ٠٩' ١٤٧° + ١٠" ٠٥' ١٥٤° + ٥٠" ٢٥' ١٦٨° + ٣٠" ٠٦' ١٦٦° +
٣٠" ٠٠' ١٧٩°) - ٠٧" ٥١' ١٦١° - ١١" ٠٤' ٢٤٧° + ((٥+١) × ١٨٠°)
= + ٢٤"

فإذا علمنا أن هذا الترافرس تم رصده باستخدام ثيودليت دقته ١٠" فأن الخطأ الزاوي المسموح به (معادلة ٦-٣):

مسموح = ٢ و" √ ن
= ٢ × ٢٠" √ ٥ = ٤٤.٧٢ "

أي أن خطأ القفل الزاوي لهذا الترافرس أقل من القيمة المسموح بها ، إذن التصحيح لكل زاوية مرصودة (معادلة ٦-٤):

ت = - ز / ن
= - (+ ٢٤") / ٥ = - ٤.٨"

ثم نقوم بحساب انحراف كل ضلع من أضلاعه اعتمادا علي الضلع المعلوم الانحراف (مع تصحيح الزوايا المقاسة في نفس الخطوة:

انحراف ب ١ = انحراف أ ب - ١٨٠° + الزاوية المصححة عند ب
انحراف ب ١ = انحراف أ ب - ١٨٠° + (الزاوية المرصودة عند ب + التصحيح)
= ١١" ٠٤' ٢٤٧° - ١٨٠° + (٢٠" ٠٩' ١٤٧° – ٤.٨")
= ٢٦.٢" ١٣' ٢١٤°

انحراف ١ ٢ = انحراف ب ١ - ١٨٠° + الزاوية المصححة عند ١
= ٢٦.٢" ١٣' ٢١٤° - ١٨٠° + (١٠" ٠٥' ١٥٤° – ٤.٨")
= ٣١.٤" ١٨' ١٨٨°

انحراف ٢ ٣ = انحراف ١ ٢ - ١٨٠° + الزاوية المصححة عند ٢
= ٣١.٤" ١٨' ١٨٨° - ١٨٠° + (٥٠" ٢٥' ١٦٨° – ٤.٨")
= ١٦.٦" ٤٤' ١٧٦°

انحراف ٣ ج = انحراف ٢ ٣ - ١٨٠° + الزاوية المصححة عند ٣
= ١٦.٦" ٤٤' ١٧٦° - ١٨٠° + (٣٠" ٠٦' ١٦٦° – ٤.٨")
= ٤١.٨" ٥٠' ١٦٢°

<u>تحقيق:</u>
انحراف ج د = انحراف ٣ ج - ١٨٠° + الزاوية المصححة عند ج
= ٤١.٨" ٥٠' ١٦٢° - ١٨٠° + (٣٠" ٠٠' ١٧٩° + ٤.٨")
= ٠٧" ٥١' ١٦١° = الانحراف المعلوم.

تتكون المرحلة الثالثة من حسابات الترافرس المغلق من حساب مركبات الخطوط كما في الجدول التالي:

الضلع	الطول (ل)	الانحراف (ز)	Δس= ل جا ز	Δص= ل جتا ز
ب ١	٨٤.٠٠	٢١٤° ١٣' ٢٦.٢"	- ٤٧.٢٤٤	- ٦٩.٤٥٥
١ ٢	١٧٣.٠٠	١٨٨° ١٨' ٣١.٤"	- ٢٨.٠٠٠	- ١٧١.١٨٤
٢ ٣	٩٣.٦٥	١٧٦° ٤٤' ١٦.٦"	+ ٩.٣٢٩	- ٩٣.٤٩٨
٣ ج	١٢٧.٨٥	١٦٢° ٥٠' ٤١.٨"	+ ٣٧.٧١٠	- ١٢٢.١٦٢
المجموع	٤٧٨.٥٠	المجموع الجبري	- ٢٩.٢٠٥	- ٤٥٦.٢٩٩
		المجموع المطلق	١١٥.٢٨٣	٤٥٦.٢٩٩

ثم نحسب قيمة مركبات الخطأ الضلعي للترافرس:

Δ س$_{ت}$ = المجموع المطلق Δ س - س$_{ب}$ – س$_{ج}$
= ٧٤.١٨٢ – ٢٩.٢٠٥ – ١٠٤٤.٨٤٦ = + ٠.١٣١ متر

Δ ص$_{ت}$ = المجموع المطلق Δ ص - ص$_{ب}$ – ص$_{ج}$
= ١١٢٥.٠٥٣ – ٤٥٦.٢٩٩ – ٦٦٨.٨٩٥ = - ٠.١٤١ متر

نحسب خطأ القفل الضلعي:

Δ ل = √ (Δ س$_{ت}^{٢}$ + Δ ص$_{ت}^{٢}$) = √ ((+٠.١٣١) ^{٢} + (-٠.١٤١) ^{٢}) = ٠.١٩٢ متر

يتم بعد ذلك تحويل خطأ القفل الضلعي إلي خطأ نسبي:

Δ ل$_{ر}$ = Δ ل / مجموع أطوال أضلاع الترافرس = ٠.١٩٢ / ٤٧٨.٥٠ = ١ / ٢٤٨٦

وحيث أن قيمة خطأ القفل الضلعي للترافرس المرصود (١/٢٤٨٦) أقل من ١/٢٠٠٠ فنعتبره مسموحا به.ثم نستخدم طريقة المركبات لتوزيع خطأ القفل الضلعي كما في الجدول التالي:

الضلع	Δس	Δص	تصحيح Δس	تصحيحΔص
ب ١	- ٤٧.٢٤٤	- ٦٩.٤٥٥	- ٠.٠٥٤	+ ٠.٠٢١
١ ٢	- ٢٥.٠٠٠	- ١٧١.١٨٤	- ٠.٠٢٨	+ ٠.٠٥٣
٢ ٣	+ ٥.٣٢٩	- ٩٣.٤٩٨	- ٠.٠٠٦	+ ٠.٠٢٩
٣ ج	+ ٣٧.٧١٠	- ١٢٢.١٦٢	- ٠.٠٤٣	+ ٠.٠٣٨
		المجموع الجبري	- ٠.١٣١	= ٠.١٤١
			تحقيق	

الضلع	Δس المصححة	Δص المصححة
ب ١	٤٧.٢٩٨ -	٦٩.٤٣٤ -
١ ٢	٢٥.٠٢٨ -	١٧١.١٣١ -
٢ ٣	٥.٣٢٣ +	٩٣.٤٦٩ -
٣ ج	٣٧.٦٦٧ +	١٢٢.١٢٤ -

في الخطوة الأخيرة من حسابات ترافرس الثيودليت يتم حساب الإحداثيات المصححة (النهائية) لكل نقطة من نقاط الترافرس باستخدام المركبات المصححة:

النقطة	الضلع	Δ س المصححة	Δ ص المصححة	س	ص
ب				١٠٧٤.١٨٢	١١٢٥.٠٥٣
	ب ١	٤٧.٢٩٨ -	٦٩.٤٣٤ -		
١				١٠٢٦.٨٨٤	١٠٥٥.٦١٩
	١ ٢	٢٥.٠٢٨ -	١٧١.١٣١ -		
٢				١٠٠١.٨٥٦	٨٨٤.٤٨٨
	٢ ٣	٥.٣٢٣ +	٩٣.٤٦٩ -		
٣				١٠٠٧.١٧٩	٧٩١.٠١٩
	٣ ج	٣٧.٦٦٧ +	١٢٢.١٢٤ -		
ج	تحقيق			١٠٤٤.٨٤٦	٦٦٨.٨٩٥

٦-٥-٤ الترافرس المفتوح

لا يستخدم هذا النوع من الترافرس إلا في الأعمال التي لا تتطلب دقة عالية حيث أن الترافرس المفتوح لا يمكن اكتشاف أخطاؤه ولا يمكن تصحيحه. لمحاولة الوصول إلي مصداقية جيدة للترافرس المفتوح فيجب أن يتم رصده بالكامل مرتين علي الأقل ومن الأفضل أن يتم ذلك بواسطة راصدين مختلفين. تعتمد حسابات الترافرس المفتوح علي حساب إحداثيات كل نقطة مرتين (من مجموعتي الأرصاد) ونقارن بينهما فان كان الخطأ في حدود المسموح به فنحسب متوسط الإحداثيات لكل نقطة.

المسموح به (بالثواني) في خطأ القفل الزاوي = ٢ و √ ٢ن (٦-٣٠)

حيث:

و دقة الثيودليت المستخدم بالثواني
ن عدد الزوايا المرصودة

المسموح به (بالسنتيمتر) في الفرق بين إحداثيات المجموعتين لنفس النقطة
= ٢٥ + ٠.٠٦٢ ل + ١.١٣ √ ٢ ل (٦-٣١)

حيث:

ل طول ضلع الترافرس.

مثال:

قام راصدان بأخذ الأرصاد التالية لترافرس مفتوح ب ج د يربط علي الخط أ ب الذي يبلغ انحرافه ١٢' ١٦٢°. عين إحداثيات النقطتين ج ، د في هذا الترافرس علما بأن إحداثيات النقطة ب هي ١٠٠ غربا و ٢٥٠ جنوبا.

النقطة	الضلع	الطول (متر)		الزاوية في اتجاه عقرب الساعة	
		الراصد الأول	الراصد الثاني	الراصد الأول	الراصد الثاني
ب	ب ج	١٢٠.١٢	١٢٠.٤٤	١٣١° ٤٢' ٣٦"	١٣١° ٤١' ٥٤"
ج	ج د	٧٨.٤٨	٧٨.٣٠	٦٤° ١١' ٠٠"	٦٤° ١٠' ٤٨"

لحساب انحرافات أضلاع الترافرس:

انحراف ب ج للراصد الأول = ١٢' ١٦٢° + ١٨٠° + ٣٦" ٤٢' ١٣١° - ٣٦٠°
= ٣٦" ٥٤' ١١٣°

انحراف ب ج للراصد الثاني = ١٢' ١٦٢° + ١٨٠° + ٥٤" ٣١' ١٣١° - ٣٦٠°
= ٥٤" ٥٣' ١١٣°

الفرق بين نتائج الراصدين للخط ب ج = ٣٦" ٥٤' ١١٣° - ٥٤" ٥٣' ١١٣°
= ٤٢"

المسموح به (بالثواني) في خطأ القفل الزاوي = ٢ و √ ٢ن
= ٢ × ٣٠" √ (١×٢) = ٨٤.٨٥"
أي أن الخطأ الزاوي مسموحا به.

بالمثل فأن:
انحراف ج د للراصد الأول = ٣٦" ٠٥' ٣٥٨°
انحراف ج د للراصد الثاني = ٤٢" ٠٤' ٣٥٨°

الفرق = ٥٤ "

المسموح به (بالثواني) في خطأ القفل الزاوي = ٢ و √ ٢ن
= ٢ × ٣٠" √ (٢×٢) = ١٢٠"
أي أن الخطأ الزاوي مسموحا به أيضا.

نحسب مركبات الأضلاع لكلا الراصدين:

الضلع	المركبة الأفقية		المركبة الرأسية	
	للراصد الأول	للراصد الثاني	للراصد الأول	للراصد الثاني
ب ج	+ ١٠٩.٨١	+ ١١٠.١١	- ٤٨.٦٨	- ٤٨.٧٩
ج د	- ٢.٦٢	- ٢.٥٣	+ ٧٨.٤٤	+ ٧٨.٢٦

خطأ المركبة الأفقية للضلع ب ج = + ١٠٩.٨١ – ١١٠.١١ = - ٠.٣٠ متر

خطأ المركبة الرأسية للضلع ب ج = - ٤٨.٦٨ – (-٣٨.٧٩) = + ٠.١١ متر

خطأ القفل الضلعي للخط ب ج = √ (-٠.٣٠ ٢ + ٠.١١ ٢) = ٠.٣٢ متر

المسموح به لإحداثيات النقطة ج = ٢٥ + ٠.٠٦٢ × ١٢٠ + ١.١٣ √ (٢×١٢٠)
= ٤٩.٩٥ سنتيمتر

أي أن الخطأ في إحداثيات ج في حدود المسموح به.

خطأ المركبة الأفقية للضلع ج د = - ٢.٦٢ – (-٢.٦٣) = + ٠.٠١ متر

خطأ المركبة الرأسية للضلع ج د = + ٧٨.٤٤ – (٧٨.٢٦) = + ٠.١٨ متر

خطأ المركبة الأفقية عند د = خطأ المركبة الأفقية عند ج + خطأ المركبة الأفقية للخط ج د
= - ٠.٣٠ + ٠.٠١ = - ٠.٢٩ متر

خطأ المركبة الرأسية عند د = خطأ المركبة الرأسية عند ج +خطأ المركبة الرأسية للخط ج د
= + ٠.١١ + ٠.١٨ = + ٠.٢٩ متر

خطأ القفل الضلعي عند النقطة د = √ (-٠.٢٩ ٢ + ٠.٢٩ ٢) = ٠.٤١ متر

المسموح به لإحداثيات النقطة د = ٢٥ + ٠.٠٦٢ × (١٢٠+٧٨) +
١.١٣ √ (٢×(١٢٠+٧٨)) = ٥٩.٧٦ سنتيمتر

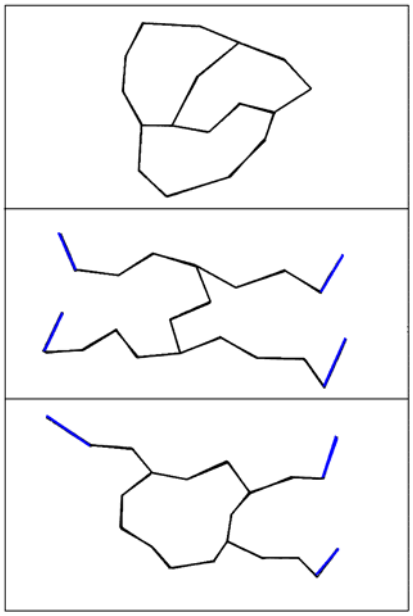
أي أن الخطأ في إحداثيات د في حدود المسموح به أيضا.

طالما أن الخطأ مسموحا به فنحسب إحداثيات النقاط كمتوسط للإحداثيات المحسوبة من واقع أرصاد الراصدين:

الخط	الراصد الأول		الراصد الثاني		المتوسط	
	س	ص	س	ص	س	ص
ب	١٠٠-	١٥٠ -	١٠٠-	١٥٠-	١٠٠-	١٥٠-
ب ج	+١٠٩.٨١	٤٨.٦٨ -	+١١٠.١١	٤٨.٧٩-		
ج	+٩.٨١	١٩٨.٦٨-	+١٠.١١	١٩٨.٧٩-	+٩.٩٦	١٩٨.٧٣٥-
ج د	٢.٦٢-	+٧٨.٤٤	٢.٦٣-	+٧٨.٢٦		
د	+٧.١٩	١٢٠.٢٤-	+٧.٤٨	١٢٠.٥٣-	+٧.٣٣٥	١٢٠.٣٨٥-

٦-٦ شبكات الترافرس

عند رفع منطقة جغرافية شاسعة فربما لا يكفي إنشاء ترافرس واحد يغطي المنطقة كلها ، وهنا يلجأ الراصد إلي إنشاء مجموعات أو حلقات من الترافرس تكون معا ما يعرف بشبكة الترافرس. قد تكون شبكة الترافرس مكونة من عدة حلقات (ترافرسات) مغلقة أو من ترافرسات مغلق مع ترافرسات موصلة. مرة أخري فأننا نتجنب الترافرس المفتوح في الأعمال المساحية التي تتطلب دقة عالية.

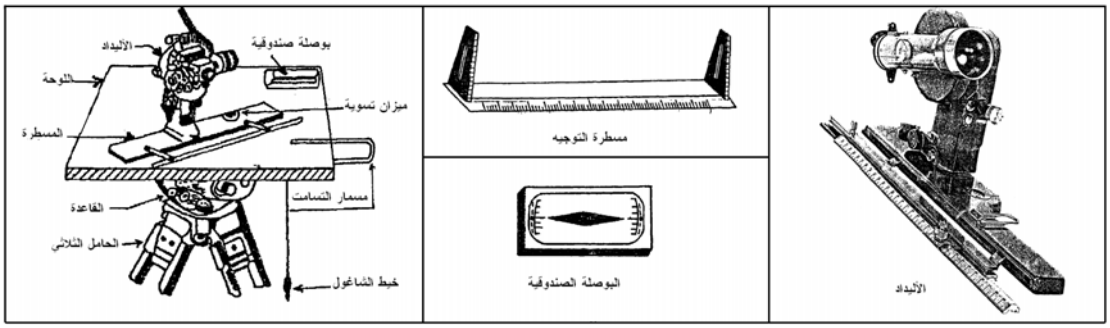


شكل (٦-٢٢) شبكة الترافرس

تتشابه أعمال الرصد و الرفع المساحي لشبكة ترافرس من تلك الخطوات المعتادة في إنشاء الترافرس المغلق أو الموصل ، إلا أنها قد تختلف في الأعمال المكتبية و الحسابات للوصول إلي الإحداثيات المضبوطة لجميع نقاط الشبكة. توجد عدة طرق حسابية لشبكة الترافرس (مثل طريقة بوبوف) إلا أن المستخدم حاليا ومع توافر أجهزة الحاسبات الآلية وبرامجها المتخصصة أن يتم استخدام طرق ضبط الشبكات Network Adjustment للوصول لدقة عالية في حساب إحداثيات نقاط الشبكة.

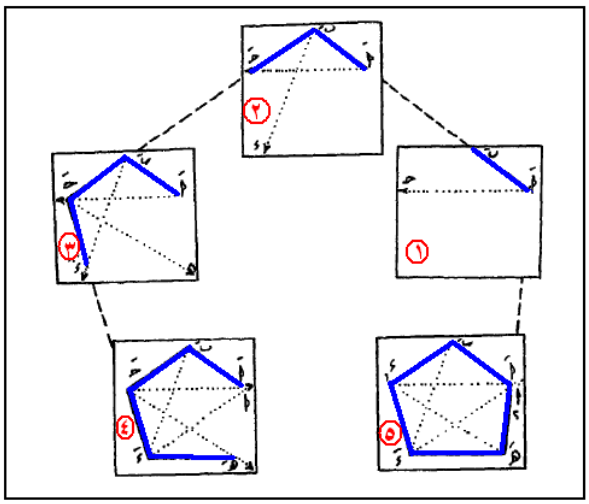
٦-٧ اللوحة المستوية:

اللوحة المستوية Plan Table (البلانشيطة كما يطلق عليها في مصر) هي جهاز مساحي كان مستخدما في السابق في أعمال المساحة وخاصة المساحة التفصيلية لقطع الأراضي الصغيرة. تتكون اللوحة المستوية من أليداد (مثل أليداد الثيودليت) مركب علي مسطرة مدرجة توضع علي لوحة خشبية أفقية تثبت فوقها قطعة من الورق.



شكل (٦-٢٣) اللوحة المستوية

تبدأ أعمال الرفع المساحي باستخدام اللوحة المستوية من إنشاء نقاط المضلع الرئيسي (مثل العمل بالثيودليت) مع توقيع هذا المضلع علي اللوحة مباشرة باستخدام مقياس الرسم المطلوب للخريطة. للرفع المساحي يبدأ العمل باحتلال أول نقطة من نقاط المضلع والتوجيه ناحية الأهداف (المعالم) المطلوب رفعها مع رسم خطوط التوجيه علي اللوحة. ننقل للنقطة التالية من نقاط المضلع ونكرر نفس الخطوات. بذلك فأن لكل معلم سيكون هناك خطي توجيه علي اللوحة (من نقطتين من نقاط المضلع الرئيسي) ومن ثم فأن تقاطع هذين الخطين يحدد موقع المعلم علي اللوحة. كان من أهم مميزات اللوحة المستوية أن الخريطة يتم الحصول عليها مع العمل الحقلي في آن واحد ، إلا أنه كجهاز مساحي أصبح قليل (أو نادر) الاستخدام حاليا.



شكل (٦-٢٤) مثال لخطوات الرفع باللوحة المستوية

الفصل السابع

الميزانية

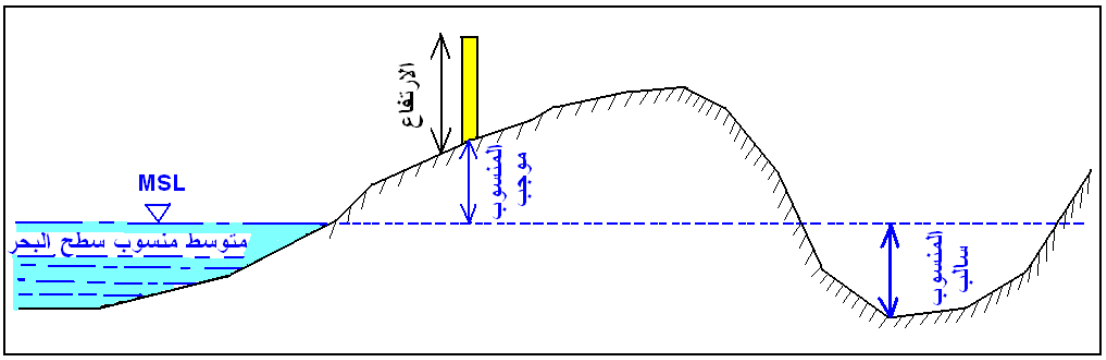
تستخدم تطبيقات المساحة مثل الشريط و الثيودليت في تحديد مواقع (إحداثيات) المعالم الجغرافية في مستوي ، أي من خلال تحديد بعدين (س ، ص) لكل نقطة. إلا أن الأرض ليست مستوي إنما هي مجسم شبه كروي وسطحه ليس مستويا بل تتخلله الجبال و الوديان و المنخفضات ، ولتمثيل أي معلم علي الأرض يلزمنا ثلاثة أبعاد وليس أثنين فقط. هذا البعد الثالث (البعد الرأسي) هو الهدف الذي تسعي الميزانية لقياسه. الميزانية هي فرع المساحة الذي يبحث في الطرق المختلفة لقياس البعد الثالث (الارتفاعات) للمعالم الجغرافية علي سطح الأرض.

الميزانية (أو التسوية) من أهم تطبيقات علم المساحة في كافة المشروعات المدنية و العسكرية علي الأرض، فهي أساس العمل المساحي في تنفيذ مشروعات البناء و الجسور و الكباري و الطرق و السكك الحديدية والترع و المصارف والسدود وتسوية الأراضي ... الخ.

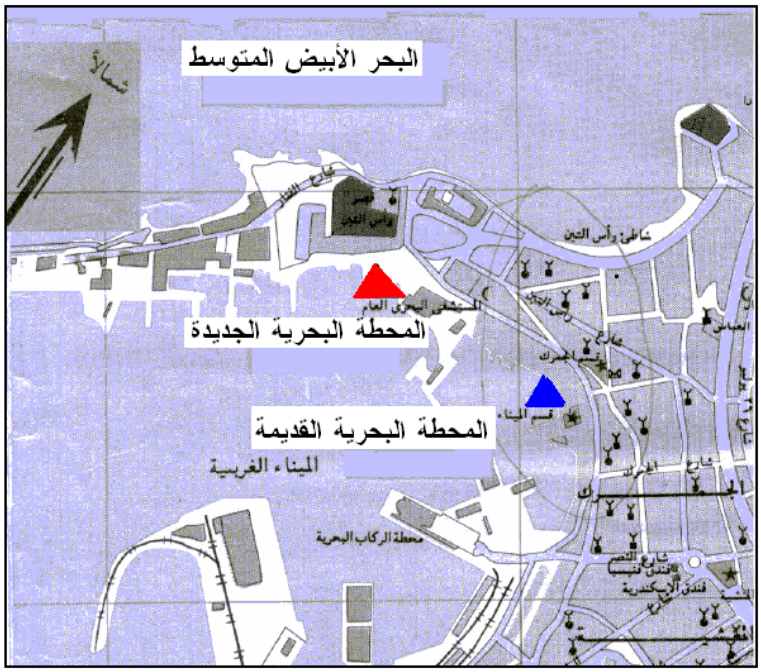
٧-١ المنسوب والارتفاع

لتحديد البعد الرأسي (الارتفاع أو الانخفاض) لمجموعة من النقاط يلزم سطح مرجعي أو مستوي مقارنه تنسب إليه جميع القياسات ، أي سطح عين يكون الارتفاع عنده مساويا للصفر. يتكون كوكب الأرض من مياه (بحار و محيطات) تغطي ٧٥% من إجمالي سطح الكوكب بينما تمثل اليابسة (القارات) الجزء المتبقي. لذلك أتخذ علماء المساحة منذ مئات السنين مستوي سطح البحر (وامتداده الوهمي تحت اليابسة) كسطح مرجعي لقياس الارتفاعات. بما أن مياه البحار و المحيطات تتأثر علي سطحها بالتيارات البحرية اليومية و تأثيرات المد و الجزر فأن مستوي المقارنة هو متوسط منسوب سطح البحر Mean Sea Level أو اختصارا MSL. فإذا تم قياس البعد الرأسي لأي معلم بدءا من أي مرجع فنطلق علي هذا القياس أسم "الارتفاع Height" بينما إذا تم القياس بدءا من متوسط منسوب سطح البحر MSL فنطلق علي هذا البعد أسم "المنسوب Level". أي أن المنسوب هو ارتفاع من نوع خاص تم قياسه أو تحديده بدءا من متوسط منسوب سطح البحر. يكون المنسوب موجبا إن كان أعلي من منسوب متوسط سطح البحر ، ويكون سالبا إن كان أقل منه.

قامت كل دولة بتحديد متوسط منسوب سطح البحر MSL في نقطة محددة ومن ثم تم اعتبار تلك النقطة هي أساس كل القياسات الرأسية (المناسيب) في هذه الدولة. مثلا في مصر فأن محطة تحديد متوسط منسوب سطح البحر كانت في ميناء الإسكندرية (علي ساحل البحر الأبيض المتوسط) في عام ١٩٠٧م ولذلك نجد في أسفل كل خريطة مصرية جملة "المناسيب مقاسة نسبة إلي متوسط منسوب سطح البحر عند الإسكندرية في عام ١٩٠٧م". أما في المملكة العربية السعودية فالنقطة الأساسية كانت في مدينة جدة (علي ساحل البحر الأحمر) في عام ١٩٦٩م. كانت هذه العملية تتم من خلال قياس و تسجيل ارتفاع مياه سطح البحر داخل بئر - قريب من ساحل البحر وتدخله مياه البحر عن طريق أنبوبة – كل ساعة علي مدار اليوم ولمدة زمنية طويلة تتجاوز عدة سنوات حتى يمكن حساب متوسط هذه القياسات وبالتالي تحديد النقطة (داخل هذا البئر) التي يكون عندها متوسط منسوب سطح البحر مساويا للصفر. في مصر تمت هذه القياسات للفترة ١٨٩٨م - ١٩٠٧م حتى تم تحديد MSL لمصر.



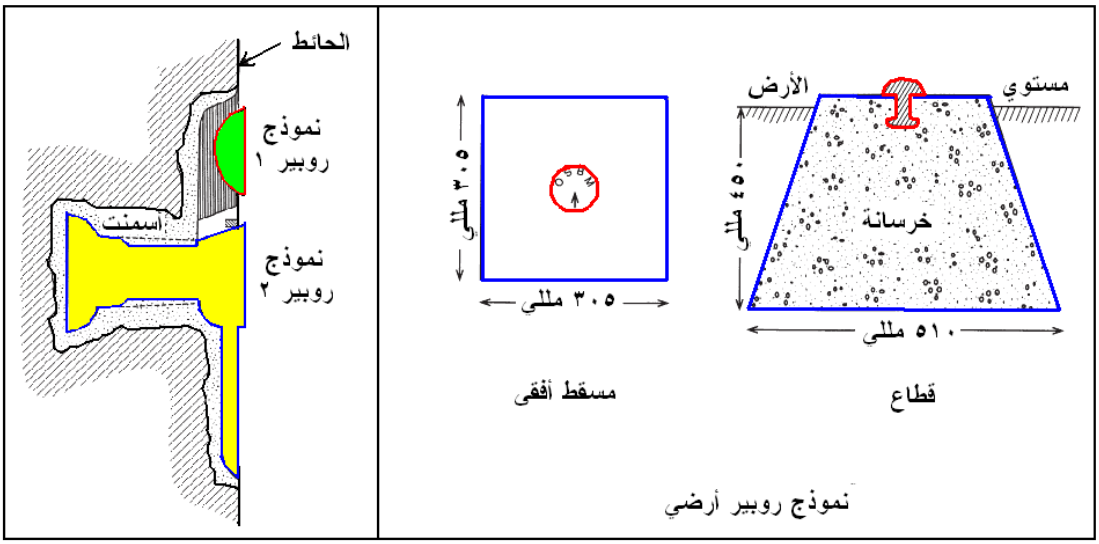
شكل (٧-١) الارتفاع و المنسوب



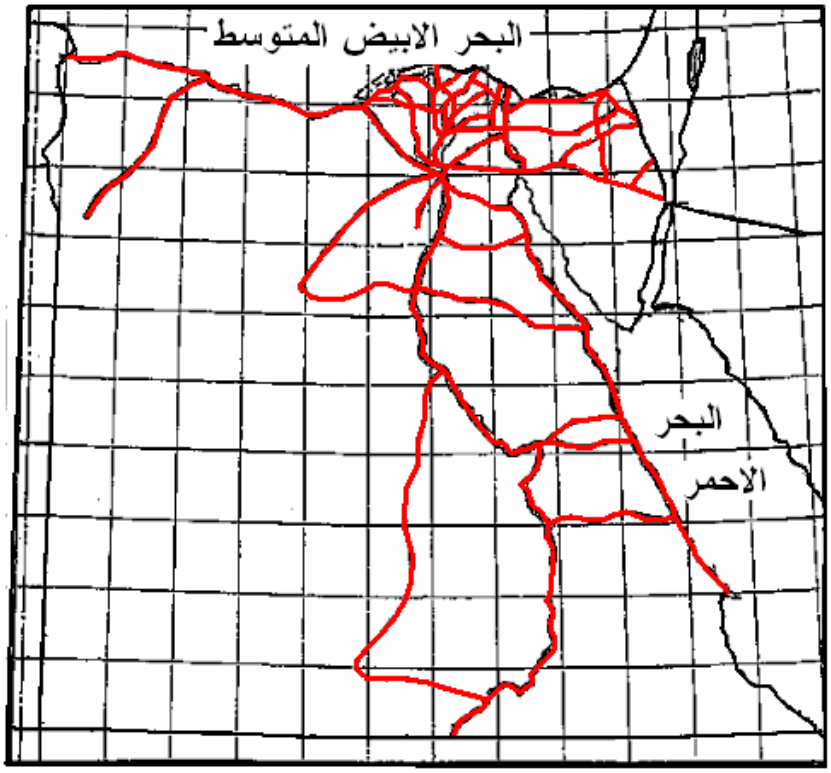
شكل (٧-٢) محطة قياس منسوب سطح البحر في مصر

بعد تحديد متوسط منسوب سطح البحر للدولة يتم بناء نقطة ثوابت (علامة أرضية) بالقرب من هذا البئر ويتم قياس ارتفاع هذه النقطة عن متوسط منسوب سطح البحر (أي يتم تحديد منسوب هذه النقطة). أطلق أسم Bench Mark أو اختصارا "BM" أو "الروبير" علي هذه النقطة وعلي كل نقطة معلومة المنسوب. وبطريقة معينة (الميزانية التي سنتحدث عنها لاحقا) تم بناء مجموعة من علامات BM الروبيرات بحيث تغطي كافة الأنحاء المعمورة من الدولة، وهذا ما يطلق عليه أسم شبكة الثوابت الرأسية أو شبكات الميزانية أو الشبكات المساحية الرأسية. وبالتالي فتكون فأن من مهام الجهة الحكومية المسئولة عن المساحة في الدولة (هيئة المساحة في مصر أو إدارة المساحة العسكرية في السعودية) توفير نقاط روبيرات داخل كل مدينة في هذه الدولة بحيث يمكن لأي مشروع هندسي أن يبدأ من نقطة BM معلومة المنسوب بالقرب من موقع المشروع. تكون الروبيرات أما مثبتة في حائط أي مبني (غالبا مبني حكومي) وتسمي روبيرات الحائط أو مثبتة في الأرض وتسمي روبيرات أرضية. ويتم الحصول علي معلومات

أي روبير (موقعه بالتحديد وقيمة منسوبة) من الجهة المسئولة عن أعمال المساحة في هذه المدينة أو هذه الدولة.



شكل (٧-٣) أنواع و نماذج روبيرات

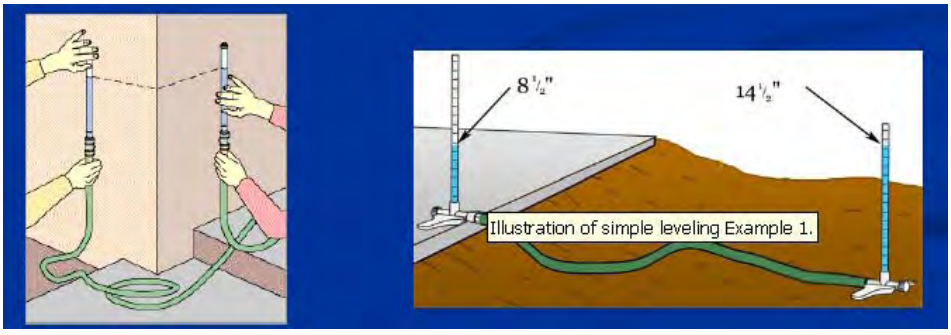


شكل (٧-٤) شبكة الروبيرات الأساسية في مصر

٧-٢ الميزانية Levelling

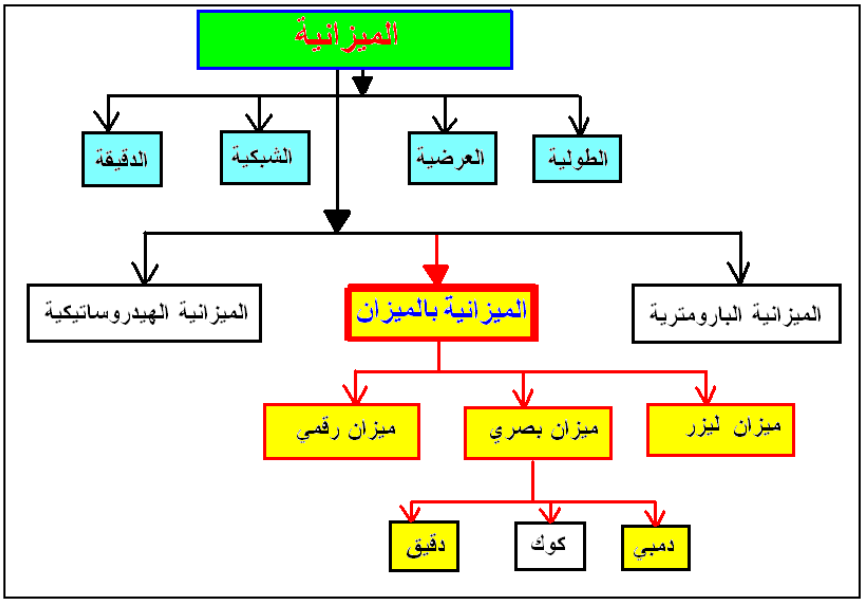
الميزانية هي العملية المساحية التي من خلالها يتم تحديد ارتفاع أي نقطة عن متوسط منسوب سطح البحر. تنقسم الميزانية إلي نوعين رئيسيان: (١) ميزانية مباشرة أو ميزانية هندسية Direct or Spirit Levelling وهي الموضوع الأساسي في هذا الفصل ، (٢) ميزانية غير مباشرة مثل الميزانية البارومترية و الميزانية الهيدروستاتيكية و الميزانية المثلثية. تعتمد الميزانية البارومترية علي مبدأ أن الضغط الجوي يتناسب عكسيا مع الارتفاع فوق مستوي سطح البحر ، فإذا تمكننا من قياس فرق الضغط الجوي بين نقطتين (باستخدام جهاز البارومتر) فيمكن تحويله حسابيا إلي فرق المنسوب بين هاتين النقطتين. تعد دقة الميزانية البارومترية دقة منخفضة ولا تستخدم إلا في أعمال الاستكشاف. تعتمد الميزانية الهيدروستاتيكية علي نظرية الأواني المستطرقة ، فإذا وضعنا أسطوانتين زجاجيتين مملوءتان بسائل (علي نقطتين) وبينهما أنبوب من المطاط ويوجد تدريج علي جدار كلا منهما فأن فرق قراءة هذين التدريجين يعبر عن فرق المنسوب بين كلتا النقطتين. ينحصر استخدام الميزانية الهيدروستاتيكية في المسافات القصيرة جدا حيث أن طول الأنبوب الواصل بين كلا الزجاجتين لا يكون طويلا بصفة عامة. تعتمد الميزانية المثلثية علي قياس الزاوية الرأسية بين نقطتين (باستخدام الثيودليت) وقياس المسافة المائلة بينهما (بالشريط أو باستخدام EDM) ثم حساب فرق الارتفاع بين هاتين النقطتين. حديثا أمكن قياس فرق الارتفاع بين النقاط باستخدام تقنية النظام العالمي لتحديد المواقع المعروف بأسم GPS ثم تحويله حسابيا إلي فرق المنسوب بين هذه النقاط.

شكل (٧-٥) أجهزة الميزانية البارومترية



شكل (٧-٦) الميزانية الهيدروستاتيكية

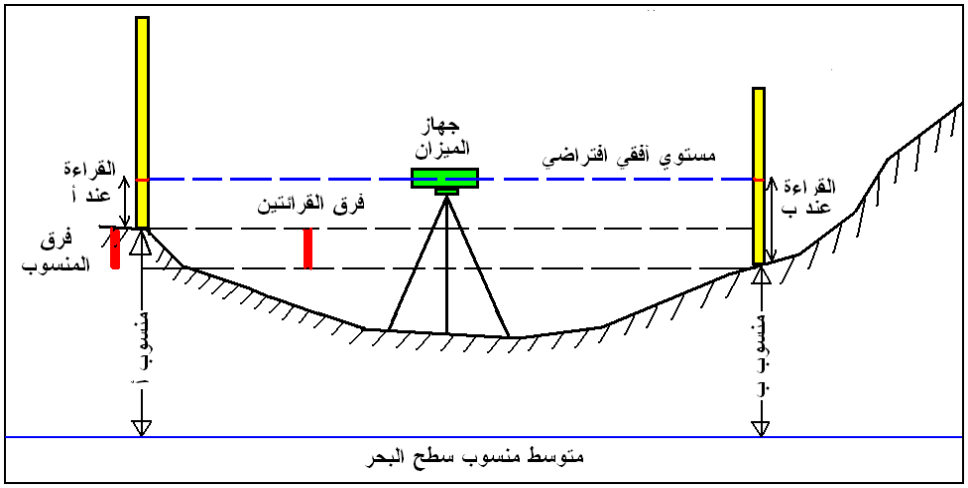
تنقسم الميزانية المباشرة من حيث أسلوب تنفيذها في الطبيعة إلي ميزانية طولية (في اتجاه طولي مثل محور طريق) و عرضية (مثل قطاعات عرضية علي المحور الأساسي للمشروع) و شبكية (تغطي منطقة من الأرض) ، وفي حالة الوصول لدقة عالية في تحديد فروق المناسيب (باستخدام أجهزة خاصة عالية الدقة) فتسمي الميزانية بالميزانية الدقيقة.

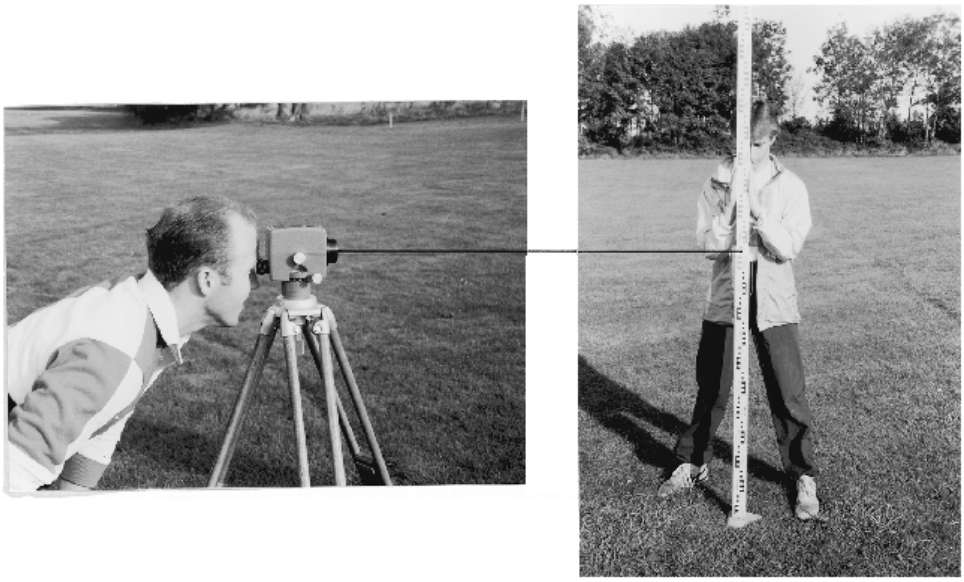


شكل (٧-٧) الميزانية

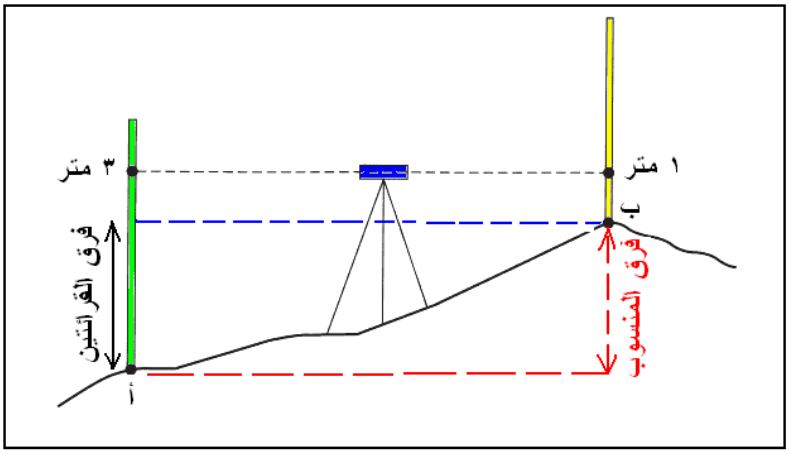
تعتمد فكرة الميزانية المباشرة (أو الميزانية الهندسية) علي وجود جهاز يحدد المستوي الأفقي بين نقطتين (يسمي جهاز الميزان) مع وجود مسطرة مدرجة (تسمي قامة) توضع رأسيا عند كل نقطة. فإذا تم تحديد تقاطع المستوي الأفقي مع المسطرة (القامة) عند كل نقطة وتسجيل هاتين القراءتين فأن فرق الارتفاع (فرق المنسوب) بين النقطتين هو فرق قراءتي القامتين. فإذا علمنا منسوب نقطة منهما أمكن حساب منسوب النقطة الثانية.

أذا أخذنا المثال التالي حيث وضعت القامة الأولي عند النقطة أ معلومة المنسوب ووضعت القامة الثانية عند النقطة ب المطلوب تحديد منسوبها. وضع جهاز الميزان بين النقطتين وكانت قراءة القامة عند أ تبلغ ٣ متر بينما قراءة القامة عند ب تبلغ ١ متر. إذن فرق القراءتين يساوي ٢ متر ، وهو نفس قيمة فرق المنسوب بين النقطتين أ و ب. فإذا علمنا منسوب النقطة أ (ارتفاعها عن منسوب متوسط سطح البحر) فيمكن حساب منسوب النقطة الثانية ب.





شكل (٧-٨) مبدأ الميزانية المباشرة



شكل (٧-٩) مثال للميزانية المباشرة

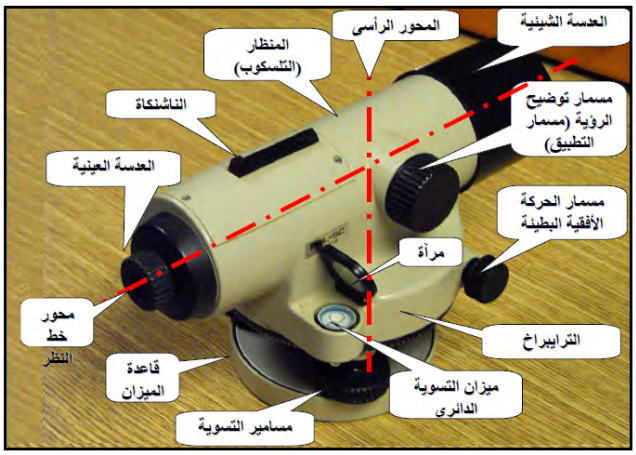
٧-٣ جهاز الميزان و ملحقاته

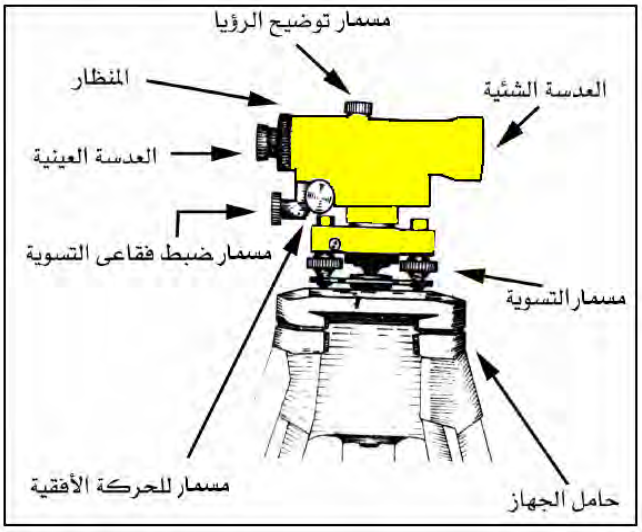
الميزان Level هو الجهاز المساحي المستخدم للحصول علي مستوي أفقي وهمي يوازي متوسط منسوب سطح البحر. تتكون أجهزة الميزان بصفة عامة من مجموعتين الميزان البصري والميزان الالكتروني أو الرقمي. تشمل أجهزة الميزان البصري فئتين: (أ) ميزان كوك Cook's Level (القديم غير المستخدم حاليا) والذي كان منظاره مركب علي طوقين أو حلقتين بحيث يمكن فك المنظار وعكس اتجاهه ثم تركيبه علي قاعدته مرة أخري ، (ب) ميزان دمبي Dumby's Level وهو الأحدث والشائع حاليا حيث منظاره غير قابل للعكس.

شكل (٧-١٠) أجهزة ميزان بصري من نوع دمبي

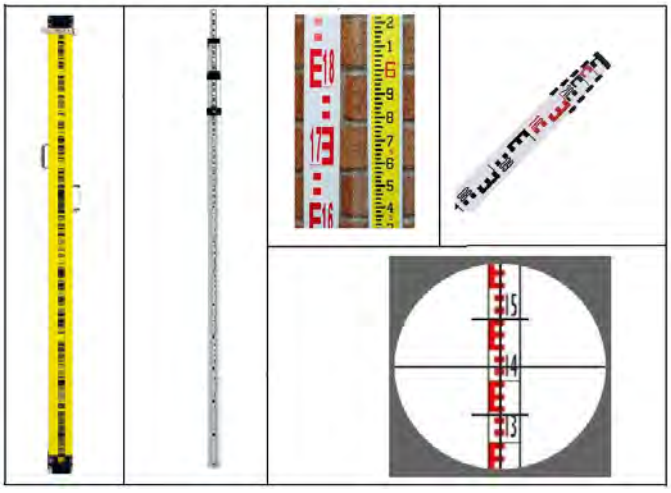
يتكون جهاز الميزان البصري من: المنظار أو التلسكوب ويوجد علي أحد طرفيه العدسة العينية وعلي الطرف الآخر العدسة الشيئية ومثبت أعلاه أداة التوجيه نحو الهدف (الناشنكاه) ومركب علي جانبه مسمار توضيح الرؤية المسمي مسمار التطبيق، علي التربراخ يوجد مسمار الحركة الأفقية البطيئة للميزان بالإضافة لميزان التسوية الدائري وثلاثة مسامير لضبط أفقية الجهاز. ويركب الميزان علي قاعدته التي توضع علي الحامل الثلاثي (الخشبي أو الألمونيوم) عند الرصد. بعض أجهزة الميزان بها مراه أعلي ميزان التسوية الدائري لكي يتمكن الراصد من التحقق من أفقية الجهاز باستمرار. أجهزة الميزان الحديثة يوجد بداخلها ميزان تسوية آخر يمكن رؤيته من داخل العدسة العينية لكي يتم الحصول علي أفقية تامة للجهاز عند كل رصدة. أيضا في بعض أجهزة الميزان يوجد أسفل التربراخ قرص (منقلة أو دائرة أفقية) مدرج لقياس الزوايا الأفقية ، بدقة الدرجة أو كسورها.

تعد القامة Staff أهم الأدوات المستخدمة مع جهاز الميزان لإجراء أعمال الميزانية (قياس فرق الارتفاع) في الطبيعة. القامة هي مسطرة مدرجة لأمتار وسنتيمترات يتراوح طولها بين ٣ و ٥ أمتار وان كان الطول الشائع للقامة هو ٤ أمتار. تصنع القامة إما من الخشب أو من الألمونيوم و توجد عدة أنواع من القامات فمنها: (أ) القامة المطوية التي تتكون من أكثر من قطعة متصلين و يمكن طيهم و عند الاستعمال تفرد القامة في استقامة واحدة ، (ب) القامة التلسكوبية أو المتداخلة حيث تتكون من ثلاثة (أو أربعة) أجزاء متداخلة تنزلق داخل بعضها وتتميز بصغر طولها عند عدم الاستخدام و ضمان عدم وجود ميل في أي جزء من أجزاء القامة ، (ج) القامة المنزلقة وتتكون من جزأين منفصلين أحداهما ينزلق و راء الآخر في مجرى صغير ، (د) القامة ذات القطعة الواحدة والتي غالبا لا يتجاوز طولها المترين حتى يسهل حملها. يتم استخدام قامتين (أو أكثر) مع كل ميزان لإتمام أعمال الميزانية أو التسوية وذلك لسرعة إتمام العمل الحقلي.





شكل (٧-١١) مكونات الميزان البصري

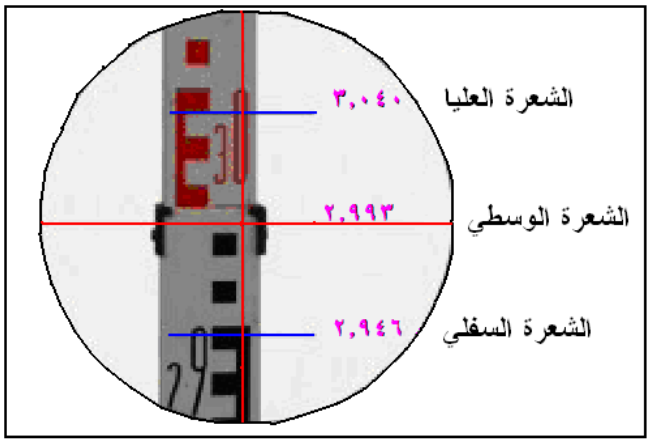


شكل (٧-١٢) القامة

تشمل أدوات الميزان المساعدة أيضا: (١) ميزان تسوية صغير يتم تثبيته خلف أو جانب القامة لضمان رأسية القامة ذاتها وعدم ميلها أثناء الرصد ، (٢) قاعدة حديدية توضع تحت القامة عند الرصد في الأراضي الرخوة أو الترابية أو الرملية ، (٣) دفتر الميزانية لتسجيل القراءات (أو الأرصاد) في الطبيعة.

شكل (٧-١٣) ميزان تسوية القامة

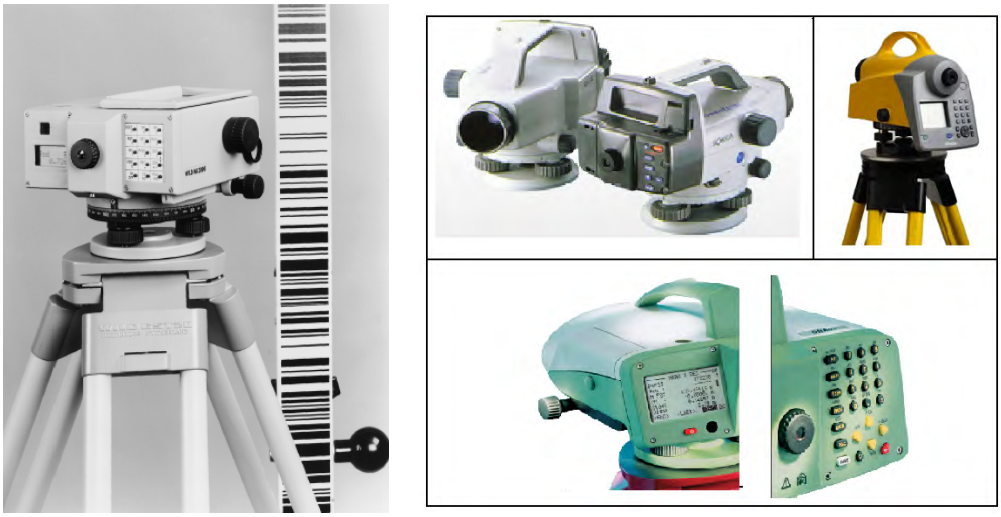
يوجد بالميزان حامل للشعرات يمكن الراصد من أخذ ٣ قراءات علي القامة: الشعرة الوسطي هي التي تحدد قراءة القامة المستخدمة في حساب فرق المنسوب ، بينما الشعرتين العليا و الوسطي (يطلق عليهم أسم شعرات الاستاديا) يتم استخدامهما في حساب المسافة الأفقية بين القامتين.



شكل (٧-١٤) القراءات علي القامة

تطورت أجهزة الميزان لتظهر مجموعة أخري منها تسمي الميزان الرقمي أو الالكتروني والذي يتميز بإمكانية تسجيل القراءات في ذاكرة الميزان (بدلا من استعمال دفتر الميزانية) وأيضا وجود لوحة مفاتيح علي الجهاز لتسجيل أية بيانات متعلقة بالمشروع. بعض الأجهزة الالكترونية تستخدم قامة من نوع خاص bar-code staff (ليست قامة مدرجة بالأرقام العادية) بحيث أن الميزان يحدد تقاطع المستوي الأفقي مع هذه القامة بصورة الكترونية ومنها يحس قيمة فرق الارتفاع بين الميزان و القامة. وبالتالي فيزيد سعر الميزان الرقمي عن سعر مثيله العادي. أيضا توجد بعض أنواع الميزان الالكتروني تسمي أجهزة ذاتية الضبط self-

levelling حيث يوجد داخل الميزان جهاز موازنة compensator يمكنه الحفاظ علي أفقية الميزان (بعد ضبطه أول مرة) ، فإذا مال الميزان قليلا يقوم جهاز الموازنة بإعادته مرة أخري للوضع الأفقي السليم. يستخدم الميزان ذاتي الضبط في المواقع الإنشائية التي تكثر بها حركة المعدات الثقيلة واهتزازات الأرض مما يؤثر علي أفقية الميزان كثيرا.



شكل (٧-١٥) أجهزة ميزان بصري رقمي أو الكتروني

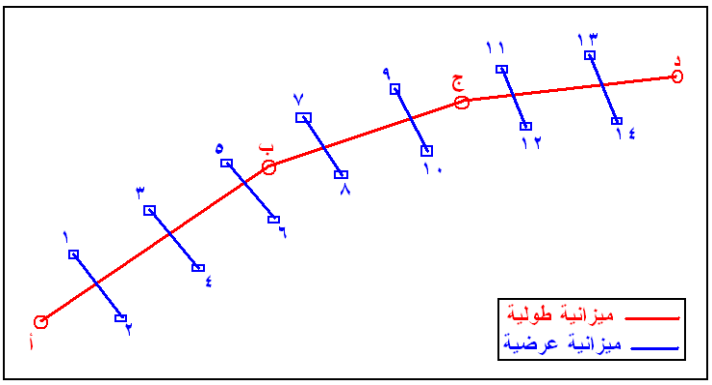
يعتمد ميزان الليزر علي مبدأ إطلاق أشعة ليزر في مستوي أفقي حتى تنعكس عند اصطدامها بقامة من نوع خاص وبالتالي يقوم جهاز مستقبل الليزر - الذي يتحرك علي القامة - بتحديد قراءة تدريج هذه النقطة الكترونيا ، ويتم تسجيل القياسات آليا داخل ذاكرة الجهاز. أي أن العمل بميزان الليزر لا يتطلب أي توجيه بصري إلي القامة وبالتالي فأن الراصد يتواجد مع القامة (وليس الميزان). يشيع استخدام أجهزة ميزان الليزر في أعمال التشييد والبناء لكن سعرها أغلي من أجهزة الميزان البصري.

شكل (٧-١٦) أجهزة ميزان ليزر

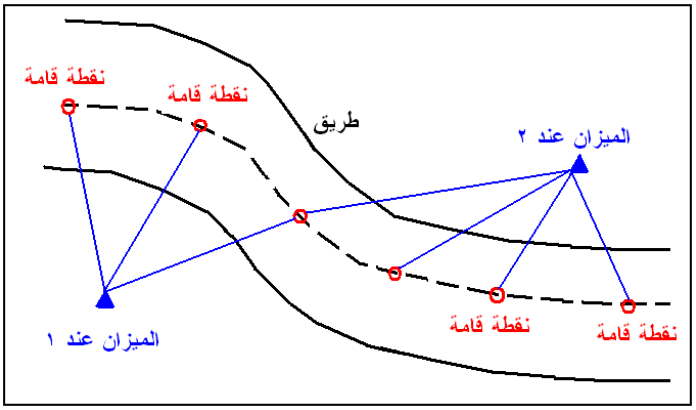
يتكون الضبط المؤقت لجهاز الميزان (استخدامه في الطبيعة) من ضبط أفقية الميزان باستخدام مسامير التسوية الثلاثة بنفس طريقة ضبط أفقية جهاز الثيودليت. استخدام الميزان لا يشمل أية عمليات تسامت حيث أن الميزان يتم استخدامه في أي مكان في الموقع ولا يتطلب احتلال نقطة معينة ، لكن عند بدء العمل فأن القامة توضع علي النقطة معلومة المنسوب BM.

٧-٤ أعمال الميزانية الطولية والعرضية

الميزانية الطولية هي عملية قياس فروق الارتفاعات (ثم حساب المناسيب) لمجموعة من النقاط علي خط واحد أي في الاتجاه الطولي للمشروع مثل الطرق و الجسور و الكباري. وبرسم ارتفاعات (أو مناسيب) هذه النقاط نحصل علي القطاع الطولي - تضاريس – للمشروع. أما الميزانية العرضية – كما هو واضح من أسمها – فهي قياس فروق الارتفاعات لمجموعة من النقاط العرضية أو العمودية علي محور المشروع لرسم القطاعات العرضية لتضاريس العمل.



شكل (٧-١٧) الميزانية الطولية و العرضية

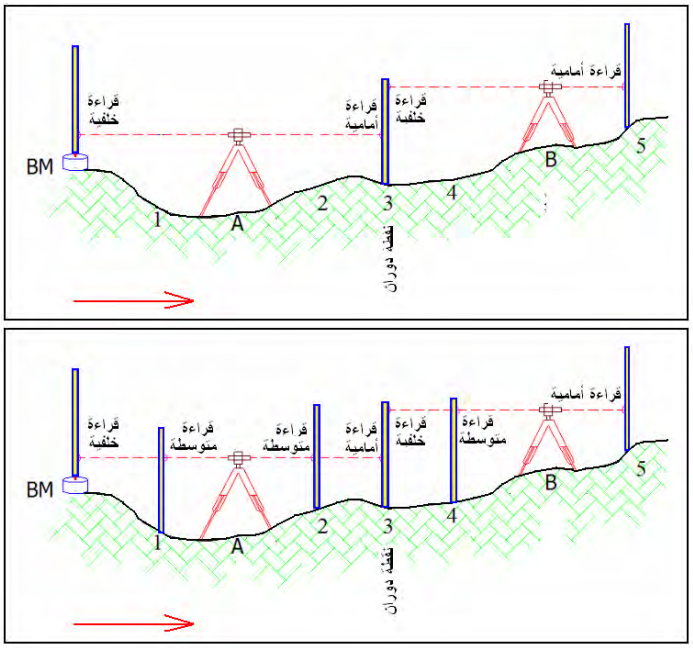


شكل (٧-١٨) الميزانية الطولية

عند إجراء الميزانية الطولية (وأيضا العرضية) يقف جهاز الميزان في عدد من النقاط ويكون هناك عدة أنواع من القراءات علي القامة:

القراءة الخلفية أو المؤخرة Back Sight or BS: أول قراءة تؤخذ علي القامة بعد تثبيت الميزان في أي نقطة.
القراءة الأمامية أو المقدمة For Sight or FS: آخر قراءة تؤخذ علي القامة قبل نقل الميزان إلي النقطة التالية.
القراءة المتوسطة Intermediate Sight or IS: كل قراءة تؤخذ علي القامة بين قراءتي الخلفية و الأمامية.

نقطة الدوران أو التحول Turning point: النقطة التي يؤخذ عندها علي القامة قراءة خلفية و قراءة أمامية.



شكل (٧-١٩) خطوات الميزانية الطولية

يبدأ العمل الحقلي بوضع الميزان عند أي نقطة اختباريه بالقرب من الروبير أو BM (نقطة A في الشكل) بينما يتم وضع القامة الأولي أعلي الروبير والقامة الثانية بعد الميزان في الاتجاه المطلوب إجراء الميزانية الطولية خلاله (نقطة ٣ في الشكل). يفضل أن يكون وضع الميزان في منتصف المسافة (بقدر الإمكان) بين كلتا القامتين. يتم ضبط أفقية الميزان باستخدام مسامير التسوية كما يتم ضبط رأسية كل قامة من خلال ميزان التسوية الجانبي. يتم تسجيل القراءة علي القامة الخلفية في دفتر الأرصاد (أو في ذاكرة الجهاز) ، ثم يدور الميزان أفقيا ويتم التوجيه علي القامة الثانية (القامة الأمامية) وتسجيل قراءتها أيضا. تظل القامة الثانية (الأمامية) في مكانها بينما تتحرك القامة الأولي (التي كانت خلفية) إلي موقع جديد (النقطة ٥ في الشكل)، وينقل الميزان أيضا لموقعه الجديد (النقطة B في الشكل). يتم ضبط أفقية الميزان ورأسية كلتا القامتين ثم تسجيل القراءة علي القامة الخلفية ثم القامة الأمامية. أي أن النقطة ٣ (في الشكل) أصبحت نقطة دوران حيث تم رصدها مرة كقراءة أمامية (من الميزان عند A) ومرة كقراءة خلفية (من الميزان عند B). يتم تكرار هذه الخطوات طوال المحور الطولي (الخط المطلوب للميزانية) حتى تصل القامة الأمامية لتحتل نقطة الهدف الأخيرة في هذا المحور.

أيضا يمكن تنفيذ ميزانية عرضية – أثناء إجراء ميزانية طولية – من خلال تطبيق النقاط المتوسطة ، سواء باستخدام احدي القامتين الرئيستين أو باستخدام قامة ثالثة. أثناء وقوف الميزان عند النقطة علي محور الميزانية الطولية (نقطة A في الشكل) يتم وضع قامة عند النقطة علي القطاع العرضي المطلوب (نقطة ١ في الشكل) وتسجيل قراءتها في دفتر الأرصاد، ثم تنقل هذه القامة للنقطة ٢ (في الشكل) وتسجل قراءتها أيضا ليصبح لدينا قراءتين متوسطتين يحددا فرق ارتفاع كلتا نهايتي القطاع العرضي المطلوب.

٧-٥ حسابات الميزانية المباشرة

توجد طريقتين لحساب فرق المنسوب بين نقطتين تم إجراء ميزانية (طولية) بينهما باستخدام الميزان البصري العادي: طريقة سطح الميزان و طريقة الارتفاع و الانخفاض. أما الميزان الالكتروني أو الرقمي فلديه إمكانيات لإتمام الحسابات داخل برنامج الحاسب الآلي الخاص به. فإذا علمنا منسوب النقطة الأولي BM فيتم حساب منسوب النقطة (أو النقاط) المطلوبة. إن لم منسوب نقطة البداية معلوما فيمكن فرض قيمة له لتتم الحسابات بها (ما يطلق عليه أسم الصفر الخاص لهذا المشروع).

٧-٥-١ طريقة سطح الميزان

في هذه الطريقة يتم حساب منسوب نقطة القامة الأمامية كالآتي:

منسوب سطح الميزان = منسوب النقطة الخلفية (المعلومة) + قراءتها الخلفية (٧-١)

منسوب النقطة الأمامية = منسوب سطح الميزان - قراءتها الأمامية (٧-٢)

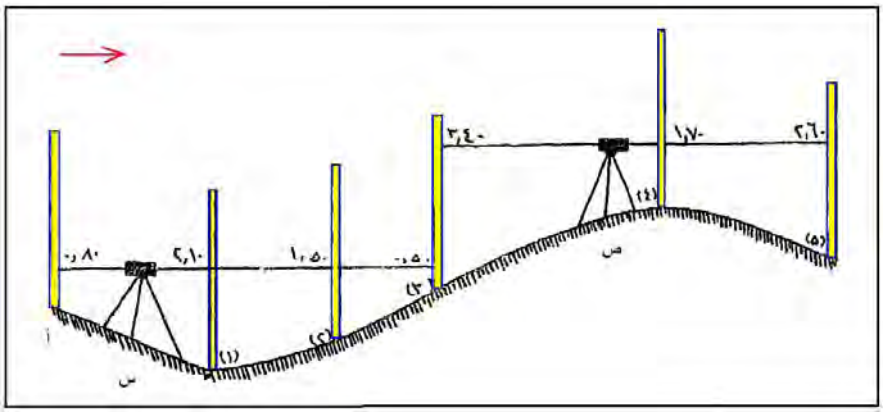
وبعد حساب منسوب النقطة الأمامية فتكون قد تحولت إلي نقطة معلومة المنسوب ويتم استخدامها كنقطة خلفية معلومة للنقطة التالية ، وهكذا.

التحقيق الحسابي في نهاية الميزانية:

منسوب آخر نقطة – منسوب أول نقطة = مجموع المؤخرات – مجموع المقدمات (٧-٣)

مثال:

بدأت ميزانية طولية من نقطة أ المعلوم منسوبها (١٠.٥٠ متر) ووضع الميزان عند نقطة س و أخذت القراءات ١ ، ٢ ، ٣ ثم أنتقل الميزان للنقطة ص ،أخذت القراءات عند ٣ ، ٤ ، ٥. أحسب مناسيب جميع النقاط.



شكل (٧-٢٠) مثال للميزانية طولية

منسوب سطح الميزان عند س = منسوب النقطة الخلفية (المعلومة) + القراءة الخلفية
= ١٠.٥٠ + ٠.٨٠ = ١١.٣٠ متر

منسوب النقطة الأمامية عند ١ = منسوب سطح الميزان - قراءتها الأمامية
= ١١.٣٠ – ٢.١٠ = ٩.٢٠ متر

منسوب النقطة الأمامية عند ٢ = منسوب سطح الميزان - قراءتها الأمامية
= ١١.٣٠ – ١.٥٠ = ٩.٨٠ متر

منسوب النقطة الأمامية عند ٣ = منسوب سطح الميزان - قراءتها الأمامية
= ١١.٣٠ – ٠.٥٠ = ١٠.٨٠ متر

الآن أصبحت النقطة ٣ معلومة المنسوب وأنتقل الميزان إلي النقطة ص:

منسوب سطح الميزان عند ص = منسوب النقطة الخلفية (٣) + القراءة الخلفية
= ١٠.٨٠ + ٣.٤٠ = ١٤.٢٠ متر

منسوب النقطة الأمامية عند ٤ = منسوب سطح الميزان - قراءتها الأمامية
= ١٤.٢٠ – ١.٧٠ = ١٢.٥٠ متر

منسوب النقطة الأمامية عند ٥ = منسوب سطح الميزان - قراءتها الأمامية
= ١٤.٢٠ – ٢.٦٠ = ١١.٦٠ متر

غالبا تتم حسابات الميزانية في الطبيعة وفي نفس دفتر تسجيل الأرصاد كالتالي:

النقطة	قراءات القامة			منسوب سطح الميزان	المنسوب	ملاحظات
	خلفية	متوسطة	أمامية			
أ	٠.٨٠			١١.٣٠	١٠.٥٠	نقطة روبير
١		٢.١٠			٩.٢٠	
٢		١.٥٠			٩.٨٠	
٣	٣.٤٠		٠.٥٠	١٤.٢٠	١٠.٨٠	نقطة دوران
٤		١.٧٠			١٢.٥٠	
٥			٢.٦٠		١١.٦٠	
المجموع	٤.٢٠		٣.١٠			

التحقيق الحسابي في نهاية الميزانية:

منسوب آخر نقطة – منسوب أول نقطة = مجموع المؤخرات – مجموع المقدمات
منسوب آخر نقطة – منسوب أول نقطة = ١١.٦٠ – ١٠.٥٠ = ١.١٠ متر
مجموع المؤخرات – مجموع المقدمات = ٤.٢٠ – ٣.١٠ = ١.١٠ متر
إذن العمل سليم.

٧-٥-٢ طريقة الارتفاع و الانخفاض

تعتمد هذه الطريقة علي مقارنة كل نقطة بالنقطة السابقة لها (في الميزانية الطولية) ومعرفة قيمة الارتفاع أو الانخفاض عنها. كلما زادت قراءة القامة كان ذلك دليلا علي انخفاض النقطة عن النقطة السابقة لها وكلما قلت قراءة القامة دل ذلك علي ارتفاع النقطة المقارنة.

فرق الارتفاع بين نقطتين = قراءة القامة الخلفية – قراءة القامة الأمامية (٧-٤)

منسوب النقطة الأمامية = منسوب النقطة الخلفية + فرق الارتفاع (٧-٥)

التحقيق الحسابي في نهاية الميزانية:

مجموع الارتفاعات = مجموع الانخفاضات
= منسوب آخر نقطة – منسوب أول نقطة
= مجموع المؤخرات – مجموع المقدمات (٧-٦)

في المثال السابق:
فرق الارتفاع بين النقطتين أ - ١ = ٠.٨٠ – ٢.١٠ = - ١.٣٠ متر

منسوب النقطة ١ = منسوب النقطة أ + فرق الارتفاع بينهما
= ١٠.٥٠ + (-١.٣٠) = ١٠.٥٠ - ١.٣٠ = ٩.٢٠ متر

فرق الارتفاع بين النقطتين ١ - ٢ = ٢.١٠ – ١.٥٠ = + ٠.٦٠ متر

منسوب النقطة ٢ = منسوب النقطة ١ + فرق الارتفاع بينهما
= ٩.٢٠ + ٠.٦٠ = ٩.٨٠ متر

فرق الارتفاع بين النقطتين ٢ - ٣ = ١.٥٠ – ٠.٥٠ = + ١.٠٠ متر

منسوب النقطة ٣ = منسوب النقطة ٢ + فرق الارتفاع بينهما
= ٩.٨٠ + ١.٠٠ = ١٠.٨٠ متر

فرق الارتفاع بين النقطتين ٣ - ٤ = ٣.٤٠ – ١.٧٠ = + ١.٧٠ متر

منسوب النقطة ٤ = منسوب النقطة ٣ + فرق الارتفاع بينهما
= ١٠.٨٠ + ١.٧٠ = ١٢.٥٠ متر

فرق الارتفاع بين النقطتين ٤ - ٥ = ١.٧٠ – ٢.٦٠ = - ٠.٩٠ متر

منسوب النقطة ٥ = منسوب النقطة ٤ + فرق الارتفاع بينهما
= ١٢.٥٠ + (- ٠.٩٠) = ١٢.٥٠ – ٠.٩٠ = ١١.٦٠ متر

ويكون جدول الأرصاد و الحسابات كالتالي:

النقطة	قراءات القامة			فرق الارتفاع	المنسوب	ملاحظات
	خلفية	متوسطة	أمامية			
أ	٠.٨٠				١٠.٥٠	نقطة روبير
١		٢.١٠		١.٣٠ -	٩.٢٠	
٢		١.٥٠		٠.٦٠ +	٩.٨٠	
٣	٣.٤٠		٠.٥٠	١.٠٠ +	١٠.٨٠	نقطة دوران
٤		١.٧٠		١.٧٠ +	١٢.٥٠	
٥			٢.٦٠	٠.٩٠ -	١١.٦٠	
المجموع	٤.٢٠		٣.١٠			

التحقيق الحسابي:

مجموع الارتفاعات - مجموع الانخفاضات =
= منسوب آخر نقطة – منسوب أول نقطة
= مجموع المؤخرات – مجموع المقدمات

مجموع الارتفاعات = ٠.٦٠ + ١.٠٠ + ١.٧٠ = ٣.٣٠ متر
مجموع الانخفاضات = ١.٣٠ + ٠.٩٠ = ٢.٢٠ متر
مجموع الارتفاعات – مجموع الانخفاضات = ٣.٣٠ = ٢.٢٠ = ١.١٠ متر
منسوب آخر نقطة – منسوب أول نقطة = ١١.٦٠ – ١٠.٥٠ = ١.١٠ متر
مجموع المؤخرات – مجموع المقدمات = ٤.٢٠ – ٣.١٠ = ١.١٠ متر
إذن العمل سليم.

٧-٥-٣ حساب خطأ الميزانية

توجد عدة طرق لتقدير قيمة الخطأ في أرصاد الميزانية الطولية ومقارنته بالحدود المسموح بها لقبول أو رفض (إعادة رصد) الميزانية. تشمل هذه الطرق: (١) قفل أو إنهاء الميزانية على نقطة معلومة المنسوب BM إن كان متوافرا بمنطقة العمل ، (٢) تنفيذ الميزانية مرتين أحدهما ذهابا والآخر ايابا في حالة عدم توافر روبير في نهاية الميزانية.

في حالة توافر روبير في نهاية الميزانية:

خطأ الميزانية = المنسوب المعلوم للروبير الأخير –
منسوبه المحسوب من أرصاد الميزانية (٧-٥)

في حالة عدم توافر روبير في نهاية الميزانية:

خطأ الميزانية = المنسوب المعلوم للروبير الأول –
منسوبه المحسوب من أرصاد الميزانية في خط الإياب (٧-٦)

أو يمكن حسابه بصورة أخري:

خطأ الميزانية = فرق الارتفاع بين طرفي خط الذهاب –
فرق الارتفاع بين طرفي خط الإياب (٧-٧)

أما الحدود المسموح بها في الميزانية العادية فتعتمد علي طول خط الميزانية. من أسهل طرق الحصول طول خط الميزانية إما باستخدام الشريط في قياس المسافة بين كل خلفية و أمامية ثم جمع هذه المسافات لحساب الطول الإجمالي للميزانية. أيضا يمكن حساب المسافة بين المايزان وأي قامة (سواء الخلفية أو الأمامية) في حالة تسجيل قراءة الشعرتين العليا و السفلي (شعرات الاستاديا) في كل قراءة قامة ثم حساب المسافة:

المسافة بين الميزان و القامة = (قراءة الشعرة العليا – قراءة الشعرة السفلي)
× ثابت الميزان (٧-٨)

حيث ثابت الميزان غالبا = ١٠٠ وان كان يجب التأكد من ذلك لكل ميزان مستخدم وذلك من الكتالوج الخاص به.

يتم حساب المسافة بين الميزان والقامة الخلفية و المسافة بين الميزان والقامة الأمامية عند كل وقفة ميزان ، ثم يتم جمع جميع المسافات للحصول علي الطول الكلي لخط الميزانية والذي يستخدم لحساب قيمة الخطأ المسموح به:

الخطأ المسموح به بالمليمتر = ن √ ك (٧-٩)

حيث:
ك طول خط الميزانية بالكيلومتر
ن ثابت يعتمد علي نوع و دقة الميزانية المطلوبة

تعتمد قيمة الثابت (ن) علي المواصفات الفنية التي تحددها الجهة المسئولة عن المساحة في بلد ما أو علي مواصفات المشروع المساحي ذاته. فعلي سبيل المثال فأن الهيئة العامة للمساحة المصرية تعتمد قيم الثابت (ن) كالتالي:

ن = ٤ لميزانية الدرجة الأولي (لحلقات الميزانية)
ن = ٥ لميزانية الدرجة الأولي (لخط الميزانية)
ن = ٨ لميزانية الدرجة الثانية
ن = ١٢ لميزانية الدرجة الثالثة

في المثال السابق تم قياس المسافات بالشريط وتسجيلها في دفتر الأرصاد كالتالي:

النقطة	قراءات القامة			فرق الارتفاع	المنسوب	المسافة بالمتر
	خلفية	متوسطة	أمامية			
أ	٠.٨٠				١٠.٥٠	صفر
١		٢.١٠		١.٣٠ -	٩.٢٠	٣٥
٢		١.٥٠		٠.٦٠ +	٩.٨٠	٣١
٣	٣.٤٠		٠.٥٠	١.٠٠ +	١٠.٨٠	١٩
٤		١.٧٠		١.٧٠ +	١٢.٥٠	٣٧
٥			٢.٦٠	٠.٩٠ -	١١.٦٠	٤٢
المجموع	٤.٢٠		٣.١٠			١٦٤ متر ٠.١٦٤ كيلومتر

فان كانت الميزانية في هذا المثال من الدرجة الأولي فأن:

الخطأ المسموح به بالمليمتر = ٥ √ ك = ٥ (√ ٠.١٦٤) = ٢.٠٢ مليمتر

وان كانت الميزانية في هذا المثال من الدرجة الثانية فأن:

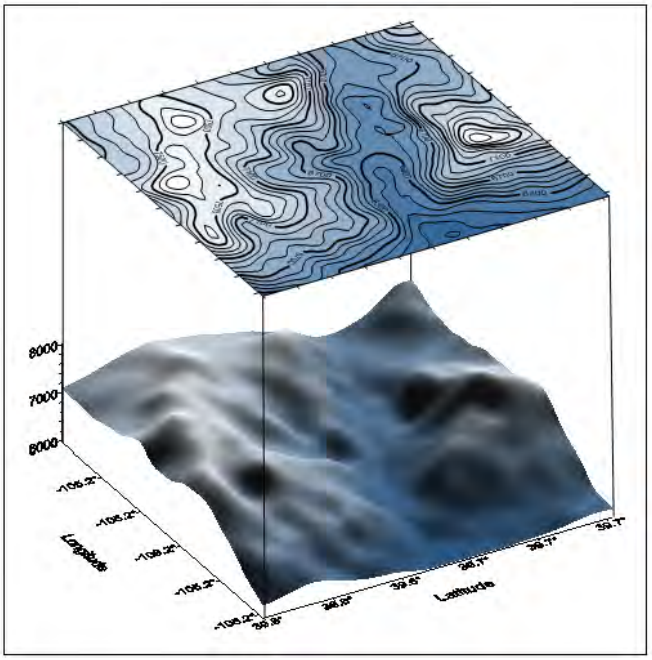
الخطأ المسموح به بالمليمتر = ٨ √ ك = ٨ (√ ٠.١٦٤) = ٣.٢٤ مليمتر

وان كانت الميزانية في هذا المثال من الدرجة الثالثة فأن:

الخطأ المسموح به بالمليمتر = ١٢ √ ك = ١٢ (√ ٠.١٦٤) = ٤.٨٦ مليمتر

٦-٧ الميزانية الشبكية

الهدف من الميزانية الشبكية هو تحديد مناسيب مجموعة من النقاط في منطقة جغرافية معينة ، أي أنها يمكن تخيلها أنها مجموعة من خطوط الميزانيات الطولية و العرضية التي تكون شبكة فيما بينها ومن هنا جاء اسم الميزانية الشبكية. من خلال قياس فروق المناسيب بين هذه النقاط يمكن رسم خريطة (أو خرائط) لتضاريس الأرض في هذه المنطقة لاستخدامها في حساب كميات الحفر أو الردم اللازمة لمشروع هندسي معين. أهم تلك الخرائط المساحية - الناتجة عن الميزانية الشبكية - هي المعروفة باسم الخريطة الكنتورية حيث خط الكنتور هو الخط الوهمي الذي يصل بين مجموعة من النقاط التي لها نفس المنسوب.



شكل (٧-٢١) خطوط الكنتور

توجد عدة برامج حاسب إلي software لعمل الخريطة الكنتورية مثل برنامج Surfer وبرنامج Global Mapper وأيضا إمكانيات الكنتور في برامج نظم المعلومات الجغرافية مثل برنامج Arc GIS.

يمكن تنفيذ الميزانية الشبكية باستخدام عدة أنواع من الأجهزة المساحية لكن سيتم في هذا الجزء فقط تناول كيفية استخدام الميزان. طريقة الرصد و الحساب في الميزانية الشبكية لا تختلف عن تلك في الميزانية العرضية لكن توجد عدة طرق حقلية لتنفيذ الجانب العملي للميزانية الشبكية ومنها:

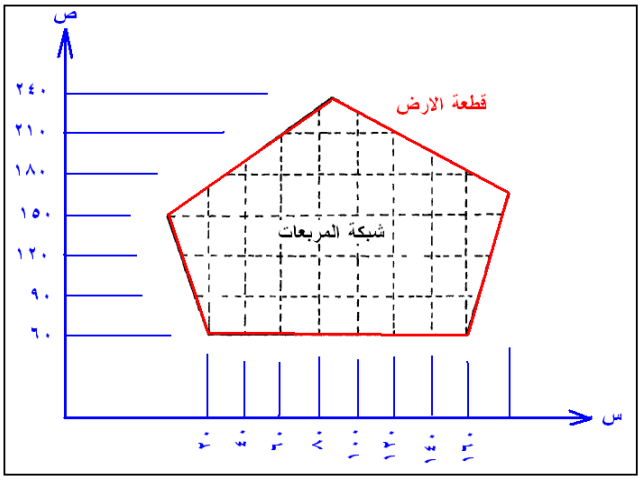
(أ) طريقة القطاعات الطولية و العرضية:

يتم تنفيذ عدة خطوط ميزانية طولية و عرضية تغطي منطقة العمل المطلوبة بنفس خطوات الميزانية الطولية العادية. يتم تحديد الإحداثيات الأفقية لبداية و نهاية كل خط ميزانية باستخدام الثيودليت كما في حالة إنشاء مضلع رئيسي السابق شرحها ، أما إحداثيات نقاط الميزانية علي مسار كل خط ميزانية طولية فيمكن توقيعها باستخدام المسافات المقاسة علي الميزانية الطولية من نقطة بدايتها إلي النقطة المرصودة. بهذه الطريقة سيمكن الحصول – في نهاية العمل الحقلي – علي الإحداثيات الأفقية و أيضا المنسوب لكل نقطة مما يمكننا من رسم الخريطة الكنتورية لاحقا.

(ب) طريقة المربعات أو المستطيلات:

المربعات هي أسهل طرق تنفيذ الميزانية الشبكية لقطعة أرض صغيرة المساحة ولا يوجد بها اختلافات كبيرة في مناسيبها أو تضاريسها. يتم تغطية الأرض بشبكة من المربعات (أو المستطيلات) في الحقل باستخدام مادة الجير الأبيض (تسمي هذه الخطوة في مصر باسم تجيير

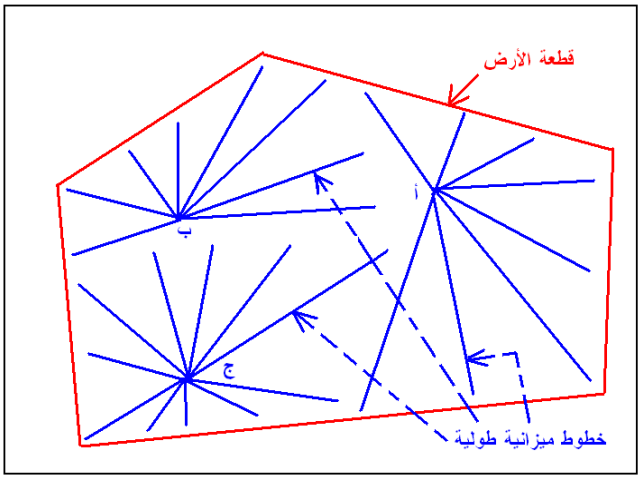
الأرض). لتحديد الإحداثيات الأفقية لرؤوس الشبكة يتم استخدام الثيودليت لإنشاء مضلع رئيسي – ترافرس – بدءا من نقطة معلومة الإحداثيات. في حالة عدم توفر نقطة ثوابت أرضية بالقرب من منطقة العمل فيمكن استخدام إحداثيات وهمية لرؤوس المربعات من خلال فرض قيم إحداثيات معينة (صفر ، صفر مثلا) لأحد أركان الشبكة ، ومن خلال معرفة طول ضلع المربع يتم استنتاج إحداثيات باقي نقاط الشبكة. يقوم جهاز الميزان بالوقوف في نقطة متوسطة من قطعة الأرض ثم يبدأ في رصد القامة المثبتة علي النقطة المعلوم منسوبها (في حالة توافر BM في منطقة العمل) ثم تتحرك القامة (أو مجموعة القامات) لرصد فرق ارتفاع جميع رؤوس مربعات الشبكة تباعا. في حالة أن حدود قطعة الأرض لا تنطبق تماما علي حدود شبكة المربعات فيتم رصد فرق المنسوب عند نقاط أركان الأرض أيضا. بهذا الأسلوب سينتج الإحداثيات الثلاثية (س ، ص ، المنسوب) لجميع نقاط شبكة المربعات والتي ستستخدم في إنشاء الخريطة الكنتورية. يعتمد تحديد طول ضلع المربع (أو أبعاد المستطيل) عند إنشاء الشبكة علي طبيعة تضاريس الأرض وأيضا علي قيمة الفترة الكنتورية اللازمة لإنشاء الخريطة الكنتورية.



شكل (٧-٢٢) الميزانية الشبكية بطريقة المربعات

(ج) طريقة الإشعاع:

تستخدم طريقة الإشعاع في المناطق المرتفعة أو التلال حيث يتم تنفيذ عدة ميزانيات طولية علي عدد من الخطوط الإشعاعية التي تبدأ من أعلي نقطة في منطقة العمل (قمة التل). لتحديد اتجاهات هذه الخطوط الإشعاعية يتم استخدام البوصلة لقياس الانحراف المغناطيسي لكل شعاع (حتى يمكن توقيعه لاحقا علي الخريطة). أيضا يمكن استخدام الثيودليت لتحديد الإحداثيات الأفقية لنقطة قمة التل و نقاط نهاية كل اتجاه شعاعي. بعد ذلك تبدأ خطوات الميزانية الطولية علي مسار كل اتجاه شعاعي من هذه الأشعة. في حالة أن نقطة قمة التل لا تغطي حدود كل منطقة العمل فيمكن نقل الميزان إلي أكثر من نقطة مع ربط هذه النقاط بمضلع حتى يمكن توقيعها علي الخريطة ، ونكون مجموعة من الأشعة عند كل نقطة حتى يتم تغطية كامل منطقة المشروع. يتعمد اختيار المسافات بين الخطوط الإشعاعية و كذلك المسافات بين النقاط في كل خط علي طبيعة تضاريس الأرض ، فكلما زاد انحدار الأرض نقلل من المسافة بين كل خط إشعاعي و آخر وكذلك نقلل المسافة بين النقاط المرصودة (نقاط القامة) علي مسار الخط حتى نحصل علي تمثيل جيد لطبيعة تضاريس الأرض بمنطقة العمل.



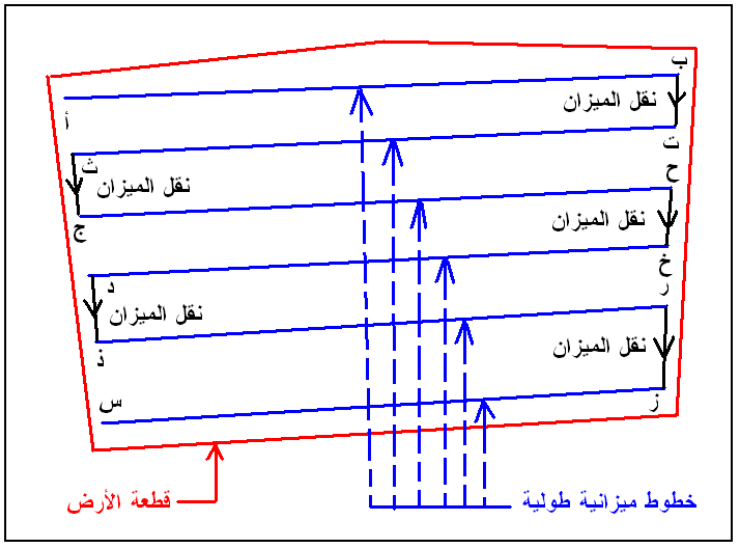
شكل (٧-٢٣) الميزانية الشبكية بطريقة الإشعاع

(د) طريقة النقاط المتفرقة:

تشبه طريقة النقاط المتفرقة (أو النقاط المبعثرة) طريقة الإشعاع حيث يتم رصد فروق المناسيب عند مجموعة من النقاط التي تغطي منطقة العمل دون الالتزام بمسار خط إشعاعي معين. طبقا لطبيعة تضاريس الأرض في منطقة المشروع يقوم الراصد بتحديد عدد و أماكن هذه النقاط المرصودة (نقاط القامة) بحيث يتم الحصول علي تمثيل جيد و دقيق لطبوغرافية سطح الأرض بالمنطقة ، أي أن طريقة النقاط المتفرقة تعتمد علي خبرة الراصد. تستخدم البوصلة (أو الثيودليت) في تحديد الإحداثيات الأفقية (س ، ص) لكل نقطة مرصودة (نقاط القامة). غالبا تستخدم طريقة النقاط المتفرقة عند استخدام أسلوب الرفع التاكيومتري سواء بجهاز الثيودليت أو بجهاز المحطة الشاملة (أنظر لاحقا).

(ذ) طريقة خط السير:

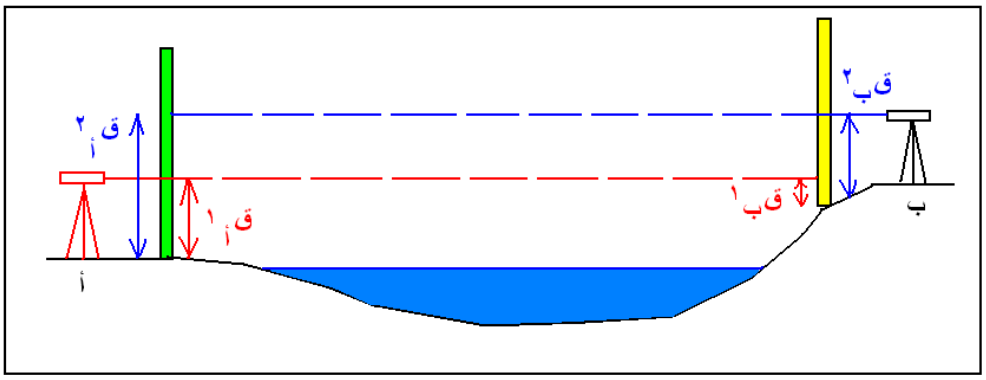
تعتمد هذه الطريقة علي تنفيذ عدد من خطوط الميزانية الطولية المتوازية بامتداد أحد أضلاع منطقة العمل ، خاصة إن كانت الأرض تأخذ شكل المستطيل تقريبا. يتم استخدام البوصلة أو الثيودليت لتوقيع خطوط السير (الإحداثيات الأفقية لبداية و نهاية كل خط) ، ويعتمد اختيار عدد الخطوط والمسافة بين نقاط القامة في كل خط علي طبيعة تضاريس و طبوغرافية منطقة المشروع ذاتها. في الشكل التالي يبدأ خط الميزانية الطولية الأول من نقطة أ إلي نقطة ب ثم ينتقل الميزان ليبدأ خط الميزانية الطولية الثاني الذي يبدأ من نقطة ت و يستمر حتى نقطة ث ثم ينتقل ليبدأ خط الميزانية الطولية الثالث الذي يبدأ من نقطة ج يصل إلي نقطة ح ... وهكذا حتى يتم الانتهاء من رصد جميع خطوط السير (خطوط الميزانية الطولية). إن كانت طبيعة الأرض لا تسمح بتنفيذ خطوط السير بحيث تكون متوازية فيمكن العمل في أية خطوط مع استخدام البوصلة أو الثيودليت لتحديد الإحداثيات الأفقية لبداية و نهاية كل خط سير.



شكل (٧-٢٤) الميزانية الشبكية بطريقة خطوط السير

٧-٧ الميزانية العكسية

من مواصفات إجراء الميزانية الطولية أن يكون الميزان – بقر الإمكان – في منتصف المسافة بين القامة الأمامية و القامة الخلفية. فان لم يتحقق هذا الشرط فأن الميزانية ستتعرض لتأثير أن خط النظر سيكون مائلا وأيضا ستتعرض لتأثير تكور سطح الأرض. في هذه الحالة ننفذ الميزانية العكسية والتي تتمثل في إجراء ميزانيتين مختلفتين في الاتجاه (ومن هنا جاء أسم الميزانية العكسية). من أمثلة هذا الوضع أننا نريد قياس فرق المنسوب بين نقطتين علي جانبي نهر أو مجري مائي حيث لا يمكن وضع الميزان في منتصف المسافة. نضع الميزان في أحد جاني النهر (أو أيا كان المشروع) ونأخذ قراءتي قامة أحداهما نفس جانب النهر و الأخرى علي الجهة المقابلة من النهر. ثم ننقل الميزان للضفة الأخرى من النهر ونكرر نفس العمل ونأخذ القراءات علي نفس القامتين (دون أن يتحركا من مكانهما). نحسب فرق المنسوب من كلا وضعي الميزان ثم نحسب متوسطهما ليكون هو فرق المنسوب بين النقطتين.



شكل (٧-٢٥) الميزانية العكسية

مثال:

أجريت الميزانية العكسية بين النقطتين أ ، ب. وضع الميزان قريبا من نقطة أ وكانت قراءة القامة عند أ تساوي ١.٤٨٣ مت وعند ب تساوي ٠.٧٦٤ متر. ثم وضع الميزان قريبا من نقطة ب فكانت قراءة القامة عند أ ١.٨٢٤ متر وعند ب ١.١١٢. أوجد منسوب نقطة ب إذا علمت أن منسوب أ يبلغ ١٢.٤٣٦ مترا.

فرق المنسوب من الوضع الأول = ١.٤٨٣ – ٠.٧٦٤ = ٠.٧١٩ متر

فرق المنسوب من الوضع الثاني = ١.٨٢٤ – ١.١١٢ = ٠.٧١٢ متر

فرق المنسوب المتوسط = (٠.٧١٩ + ٠.٧١٢) / ٢ = ٠.٧١٥٥ متر

منسوب نقطة ب = منسوب أ + فرق المنسوب المتوسط
= ١٢.٤٣٦ + ٠.٧١٥٥ = ١٣.١٥١٥ متر

٧-٨ الميزانية الدقيقة

الميزانية الدقيقة Precise Levelling هي ميزانية طولية عادية إلا أنها تهدف للوصول لدقة عالية في قياس فروق المناسيب بين نقطتين مما يجعل لها مواصفات خاصة في الأجهزة المستخدمة و أسلوب العمل الحقلي وخطوات الحساب. تستخدم الميزانية الدقيقة في إنشاء علامات روبير BM جديدة لتكون أساسا لتنفيذ أعمال الميزانية في منطقة المشروع ، كما تستخدم أيضا في مراقبة وقياس هبوط المنشئات الهندسية الضخمة مثل السدود و القناطر.

يسمي جهاز الميزان المستخدم في الميزانية الدقيقة بالميزان الدقيق Precise Level وهو ميزان لا يختلف في شكله أو تصميمه عن الميزان البصري العادي إلا أنه يختلف عنه في النقاط الجوهرية التالية:

- المنظار ذو قوة تكبير عالية (لا تقل عن ٤٠ ضعف) كما يكون قطر العدسة الشيئية كبيرا وكذلك البعد البؤري للعدسة وكل ذلك بغرض أن تكون صورة القامة واضحة جدا حتى من مسافات بعيدة.
- أقل وحدة قياس لا تزيد عن ٠.١ ملليمتر و دقة القياس لا تزيد عن ٠.٢ ملليمتر/كيلومتر.
- لا يكون المنظار مثبتا في المحور الرأسي بل يكون قابل للحركة بدرجة معينة بحيث يتم تحريك المنظار لأعلي أو لأسفل بدرجة بسيطة (من خلال مسمار التطبيق) لضمان أفقية الميزان بدقة ، أي أنه يسمح بإمالة خط النظر دون تغيير منسوب هذا الخط.
- يزود الميزان الدقيق بميكرومتر داخلي ذو لوح متوازي Micrometer with parallel plate وهو جهاز يسمح بقراءة القياس علي القامة بدقة ١ ملليمتر أو أقل.
- المنظار مزود بشعرات الاستاديا لإمكانية حساب المسافات بين الميزان و القامة.
- ميزان التسوية يحتوي فقاعة مائية طويلة (وليست دائرية) ومن نوع لا يتغير طولها باختلاف درجات الحرارة ، وأن يكون ذو حساسية عالية.
- تكون معظم الموازين الدقيقة من النوع ذاتي الضبط Self-Levelling.

شكل (٧-٢٦) ميزان دقيق

أما ملحقات الميزان الدقيق فلها أيضا بعض المواصفات الخاصة:

- تكون القامة المستخدمة في الميزانية الدقيقة من نوع خاص و غالبا فأن تدريج القامة لا يحفر علي خشب القامة لكن علي شريط من مادة الأنفار (تسمي قامة أنفار) التي تتميز بمعامل تمدد قليل جدا ثم يثبت هذا الشريط تماما من طرفيه علي القامة الخشبية ذاتها.
- تستخدم قاعدة معدنية ثقيلة توضع أسفل القامة – خاصة في الأرض الرخوة أو الترابية- بحيث لا تتعرض القامة ذاتها للهبوط أثناء دورانها بعد أخذ القراءة الأمامية عليها استعدادا لأخذ قراءتها الأمامية.
- يتميز الحامل الثلاثي (الخشبي) للجهاز بالثبات.
- تستخدم مظلة شمسية أثناء الرصد لتمنع أشعة الشمس من الوقوع علي الميزان الدقيق في الحقل.

للحصول علي دقة عالية في الميزانية الدقيقة فأن عملية الرصد لا بد أن تراعي الاشتراطات التالية:

- يتم رصد كل خط مرتين ذهابا وإيابا ويكون كلا منهما مستقلا عن الآخر.
- تكون المسافة بين الميزان و كلتا القامتين الخلفية و الأمامية متساوية بقدر الإمكان.
- العمل بقامتين علي الأقل وليس بقامة واحدة.
- تفادي أن يكون خط النظر قريبا من سطح الأرض بقدر الإمكان حتى لا يتأثر بالانكسار الضوئي القريب من سطح الأرض.

- سرعة أخذ القراءات (علي القامتين الخلفية و الأمامية) بحيث لا تزيد عن فترة دقائق معدودة حتى لا تتغير ظروف الطقس كثيرا بين كلتا القراءتين.
- في كل رصدة (كل قراءة قامة) يتم تسجيل قراءة الشعرات الثلاثة ثم نحسب الفرق بين قراءة الشعرة العليا والشعرة الوسطي وكذلك الفرق بين قراءة الشعرة الوسطي و الشعرة السفلي ونقارن كلا الفرقين ويجب أن يكونا بنفس القيمة.
- في كل وقفة نحسب المسافة بين الميزان و القامة الخلفية وبين الميزان و القامة الأمامية لضمان أن الميزان بقدر الإمكان يكون في منتصف المسافة بين القامتين ، ويجب ألا يزيد الفرق بين مسافة الميزان وكلتا القامتين عن خمسة أمتار.
- لحساب تأثير عوامل المناخ علي أرصاد الميزانية الدقيقة يتم استخدام أجهزة قياس درجة الحرارة و الضغط الجوي عند كل نقطة ميزان.
- في نهاية خط الميزانية الدقيقة نحسب مجموع مسافات أرصاد المقدمة (القراءات الأمامية) و مجموع مسافات أرصاد المؤخرة (القراءات الخلفية) ويجب ألا يزيد الفرق بين هذين المجموعين عن ٢٠ مترا.
- يجب أن يظلل الميزان الدقيق أثناء العمل الحقلي بمظلة شمسية حتى لا يتأثر الجهاز أو ميزان التسوية به بأشعة الشمس. ولا يترك الميزان أبدا في الشمس حتى أثناء عدم العمل به.
- عادة تكون المسافة بين الميزان وأيا من القامتين (الخلفية و الأمامية) في حدود ٣٠-٤٠ مترا وفي كل الأحوال يجب ألا تزيد عن ١٠٠ متر.
- بعض القامات يكون لها تدريجين وعند استخدام هذا النوع من القامات يجب قراءة و تسجيل كلا التدريجين في كل نقطة ميزان.
- عادة تتم أعمال الميزانية الدقيقة في الصباح الباكر وفترة ما قبل الغروب علي أن نتحاشى تماما الرصد في فترة الظهيرة (قبل وبعد الظهر بساعتين علي الأقل) ضمانا لتقليل تأثير الانكسار الجوي.

لضمان دقة الميزان الدقيق و القامة المستخدمة في الميزانية الدقيقة فيجب معايرتهم (الضبط الدائم في المصنع) بصفة دورية لا تزيد عن مرة في السنة.

٧-٩ الميزانية المثلثية

يعتمد هذا النوع من الميزانية علي قياس زاوية الارتفاع (أو الانخفاض) عن المستوي الأفقي بين نقطتين لحساب فرق المنسوب بينهما. حيث أن الميزانية المثلثية هي ناتج حسابي لقياس زوايا فأن جهاز المستخدم فيها هو جهاز الثيودليت (أو جهاز المحطة الشاملة) وليس جهاز الميزان ، وسنتناولها بالتفصيل في الفصل القادم.

الفصل الثامن

الرفع المساحي التاكيومتري

كلمة "التاكيومتري" معناها القياس السريع ، والمساحة التاكيومترية هي المساحة التي لا تعتمد علي القياس المباشر للكميات المطلوبة ، أو بمعني آخر فهي حساب - وليس قياس - المسافات و فروق الارتفاع ، أي بصورة غير مباشرة. تتميز المساحة التاكيومترية بسهولة وسرعة تنفيذ العمل الحقلي مقارنة بالطرق المساحية الأخرى (مثل قياس المسافات بالشريط أو قياس فروق المناسيب بالميزانية) ، إلا أن دقة المساحة التاكيومترية ليست عالية جدا ولذلك فهي لا تستخدم في الأعمال المساحية والهندسية التي تتطلب دقة عالية.

٨-١ نظرية و استخدامات المساحة التاكيومترية

تعتمد المساحة التاكيومترية علي حساب المسافات الأفقية و الرأسية بين النقاط من خلال قياس الزاوية الرأسية عند موقع الجهاز و المسافة المقطوعة علي الهدف (غالبا قامة) وذلك من خلال ثلاثة شعرات أفقية مركبين داخل حامل شعرات جهاز الثيودليت. الأساس الرياضي للمساحة التاكيومترية هو تكوين مثلثات في المستوي الرأسي يمكن منها حساب المسافة الأفقية وفرق الارتفاع بين نقطتين. تجدر الإشارة إلي أن قياس (أو رصد) الزوايا الرأسية لمسافات طويلة يجعل خط النظر يتأثر بالانكسار الجوي الناتج عن التأثيرات المناخية وبالتالي فأن استخدام هذه الزوايا الرأسية في حسابات المثلث الرأسي لن يكون بدقة عالية ، وهذا أهم عيوب المساحة التاكيومترية. حيث أن كل أجهزة الثيودليت البصري الحديثة مجهزة بهذه الشعرات فأن أي جهاز ثيودليت يصلح لاستخدامه في الرفع المساحي التاكيومتري.

تستخدم المساحة التاكيومترية في عدد من المشروعات الهندسية مثل:

- عمل خرائط كنتورية في الأراضي شديدة الوعورة حيث سيكون استخدام الميزانية صعب جدا و مكلف جدا.
- الرفع المساحي للمناطق المتسعة والتي لا تتطلب دقة عالية.
- التوقيع المبدئي للأعمال الهندسية (مثل الطرق والسكك الحديدية) في الطبيعة.
- حساب أطوال المضلعات (الترافرسات) كبديل عن استخدام الشريط في قياسها.
- تعيين معدلات انحدار المشروعات الطولية (مثل الطرق والمجاري المائية) الممتدة لمسافات طويلة.

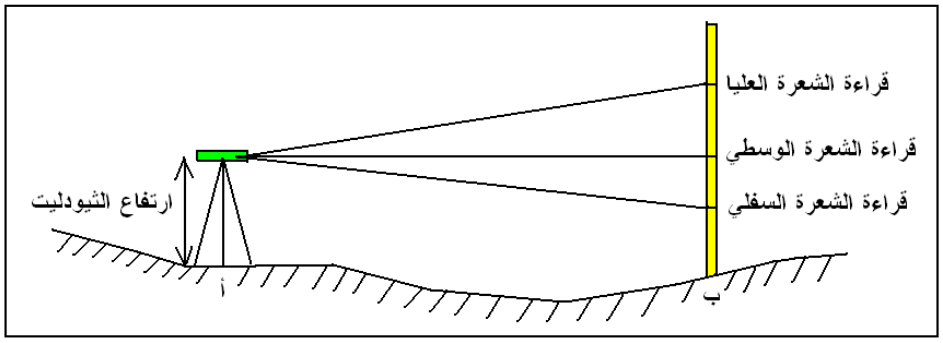
توجد عدة طرق مستخدمة في المساحة التاكيومترية مثل طريقة شعرات الاستاديا و طريقة الظلال ، كما توجد عدة أجهزة مستخدمة في المساحة التاكيومترية (مثل الثيودليت و قضيب الأنفار و منشور المسافة) إلا أننا سنقدم هنا فقط استخدام جهاز الثيودليت في هذا النوع من أنواع المساحة.

٨-٢ طريقة شعرات الاستاديا

هي أسهل و أسرع الطرق التاكيومترية للحصول علي المسافة الأفقية وفرق المنسوب بين نقطتين. يوضع جهاز الثيودليت عند أحد طرفي الخط بينما توضع قامة عند النقطة الأخرى ويقوم جهاز الثيودليت بقراءة و تسجيل الشعرات الثلاثة علي القامة. ولحساب المسافة الأفقية وفرق المنسوب بين طرفي الخط توجد حالتين:

حالة النظرة الأفقية:

فيها يكون المحور الأفقي للثيودليت في وضعه الأفقي تماما ، أي لا توجد زاوية ارتفاع أو انخفاض.



شكل (٨-١) شعرات الاستاديا في الوضع الأفقي

المسافة الأفقية = الفرق بين قراءتي شعرتي الاستاديا (العليا و السفلي) × الثابت التاكيومتري + الثابت الإضافي للجهاز (٨-١)

منسوب نقطة القامة = منسوب نقطة الثيودليت + ارتفاع الثيودليت – قراءة الشعرة الوسطي (٨-٢)

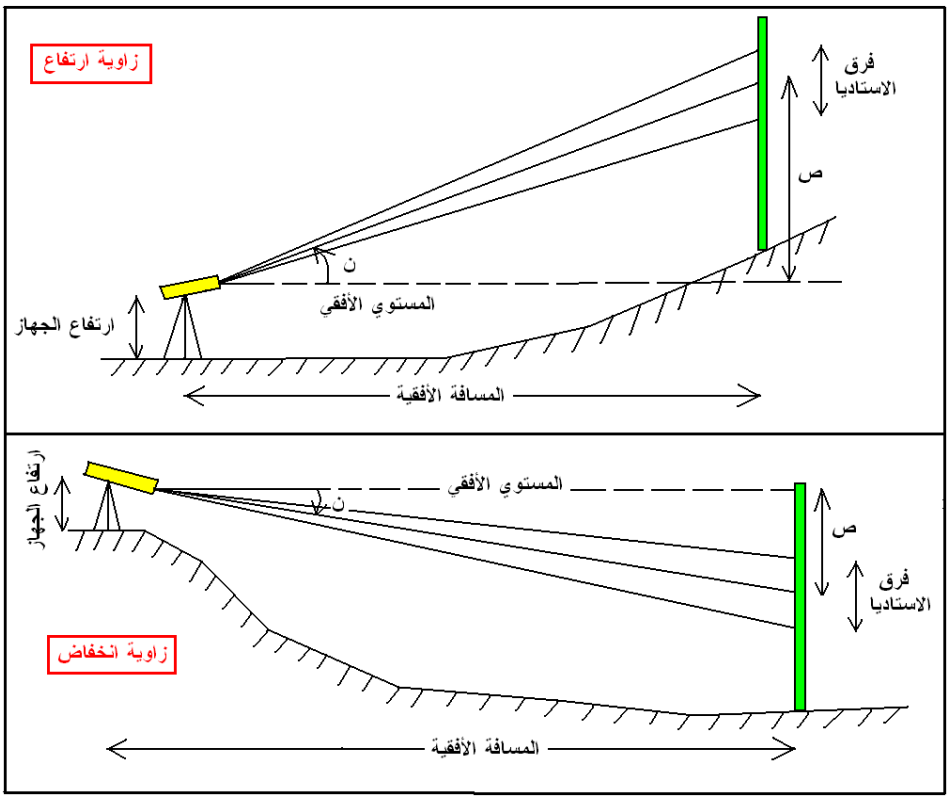
حيث:

الثابت التاكيومتري والثابت الإضافي للثيودليت هما قيمتين محددتان في كتالوج الجهاز ذاتها وان كانت أغلب أجهزة الثيودليت لها ثابت تاكيومتري = ١٠٠ و ثابت إضافي = صفر (لكن يجب التأكد من هذه القيم لكل ثيودليت قبل استخدامه).

إذا تم استخدام جهاز ميزان (مجهز بشعرات الاستاديا) في هذا القياس التاكيومتري فهذا ما يطلق عليه أسم "الميزانية المثلثية".

حالة النظرة المائلة:

فيها لا يكون المحور الأفقي للثيودليت في وضعه الأفقي ، أي توجد زاوية ارتفاع أو انخفاض.



شكل (٨-٢) شعرات الاستاديا في الوضع المائل

المسافة الأفقية = الفرق بين قراءتي شعرتي الاستاديا (العليا و السفلي) × الثابت التاكيومتري × جتا^{٢} ن + (الثابت الإضافي للجهاز × جتا ن) (٨-٣)

منسوب نقطة القامة في حالة زاوية الارتفاع = منسوب نقطة الثيودليت + ارتفاع الثيودليت – قراءة الشعرة الوسطي + ص (٨-٤)

منسوب نقطة القامة في حالة زاوية الانخفاض = منسوب نقطة الثيودليت + ارتفاع الثيودليت - قراءة الشعرة الوسطي - ص (٨-٤)

حيث:

ص = ٠.٥ فرق استاديا + جا ٢ ن + الثابت التاكيومتري × جا ن (٨-٥)

حيث:

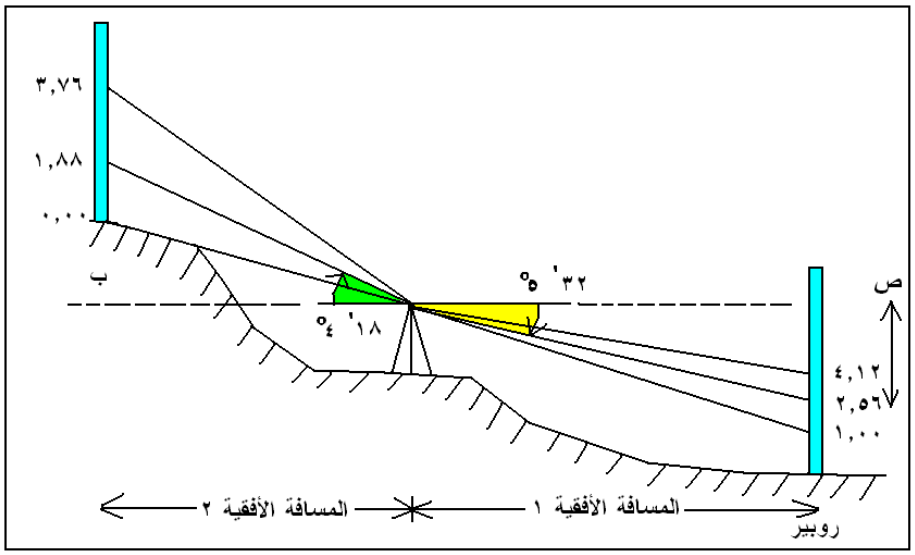
فرق استاديا = قراءة الشعرة العليل – قراءة الشعرة السفلي
ن = الزاوية الرأسية (ارتفاع أو انخفاض).

كما يمكن حساب فرق المنسوب – بعد حساب المسافة الأفقية - كالآتي:

فرق المنسوب بين النقطتين = المسافة الأفقية × ظا الزاوية الرأسية (٨-٦)

مثال:

رصدت قامة موضوعة فوق روبير BM يبلغ منسوبه ٨٠.٠٠ متر فكانت قراءات الشعرات علي التوالي: ١.٠٠ ، ٢.٥٦ ، ٤.١٢ متر وبلغت زاوية الانخفاض ٣٢' ٥° ، ثم نقلت القامة إلي نقطة ب فكانت قراءات الشعرات صفر ، ١.٨٨ ، ٣.٧٦ متر وبلغت زاوية الارتفاع ١٨' ٤°. أحسب المسافة الأفقية بين الجهاز و نقطة ب وكذلك منسوب ب إذا علمت أن الثابت التاكيومتري للجهاز يساوي ١٠٠ والثابت الإضافي له يساوي ٣٠ سنتيمتر.



شكل (٨-٣) مثال لطريقة شعرات الاستاديا في الوضع المائل

عند الرصد علي نقطة الروبير:

ص = ٠.٥ فرق استاديا + جا ٢ ن + (الثابت التاكيومتري × جا ن)
= ٠.٥ (٤.١٢ – ١.٠٠) جا ٢× ٣٢' ٥° + (٠.٣٠ × جا ٣٢' ٥°)
= ٠.٥ (٣.١٢) جا ٠٤' ١١° + (٠.٣ × جا ٣٢' ٥°)
= ٢٩.٩٤ + ٠.٠٢٩ = ٢٩.٩٧ متر

منسوب سطح الجهاز = منسوب الروبير + قراءة الشعرة الوسطي + ص
= ٨٠.٠٠ + ٢.٥٦ + ٢٩.٩٧
= ١١٢.٥٣ متر

المسافة الأفقية = الفرق بين قراءتي شعرتي الاستاديا × الثابت التاكيومتري × جتا^{٢} ن + (الثابت الإضافي للجهاز × جتا ن)
= (٣.٧٦ – صفر) × ١٠٠ × حتا^{٢} ٣٢' ٥°) + (٠.٣ × جتا ٣٢' ٥°)
= ٣٧٣.٨٩ + ٠.٢٩٩ = ٣٧٤.١٩ متر

عند الرصد علي نقطة ب:

فرق المنسوب بين النقطتين = المسافة الأفقية × ظا الزاوية الرأسية
= ٣٧٤.١٩ × ظا ١٨' ٤°
= ٢٨.١٣٥ متر

منسوب ب = منسوب سطح الجهاز + فرق المنسوب – قراءة الشعرة الوسطي
= ١١٢.٥٣ + ٢٨.١٣٥ – ١.٨٨
= ١٣٨.٧٨٥ متر

٨-٣ طريقة الظلال

طريقة مساحة تاكيومترية للحصول علي المسافة الأفقية وفرق المنسوب بين نقطتين باستخدام ثيودليت عادي (لا يوجد به شعرات الاستاديا). يوضع جهاز الثيودليت عند أحد طرفي الخط بينما توضع قامة عند النقطة الأخرى ويقوم جهاز الثيودليت بقراءة و تسجيل الشعرة الوسطي علي القامة مرتين مختلفتين (أي زاويتين رأسيتين مختلفتين). تعد طريقة الظلال أقل دقة من طريقة شعرات الاستاديا لكنها تناسب حالة عدم معرفتنا قيم الثابت التاكيومتري و الإضافي للجهاز المستخدم. ولحساب المسافة الأفقية وفرق المنسوب بين طرفي الخط توجد حالتين:

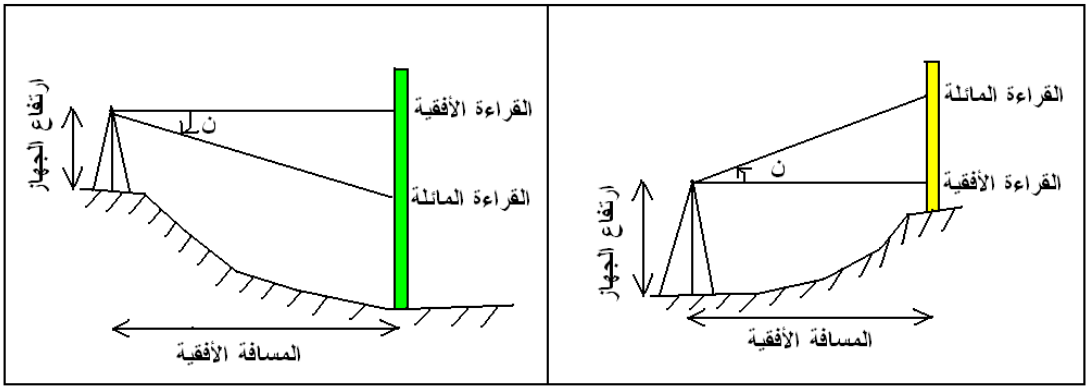
حالة إمكانية أخذ نظرة أفقية:

إذا سمحت طبيعة الأرض أن نأخذ قراءة الشعرة الوسطي في وضع الثيودليت أفقيا تماما بينما النظرة الثانية عندما يكون الثيودليت مائلا (سواء لأعلي أو لأسفل):

المسافة الأفقية = (القراءة الأفقية – القراءة المائلة) / ظا ن (٨-٧)

منسوب نقطة القامة = منسوب نقطة الجهاز + ارتفاع الجهاز - القراءة المائلة (٨-٨)

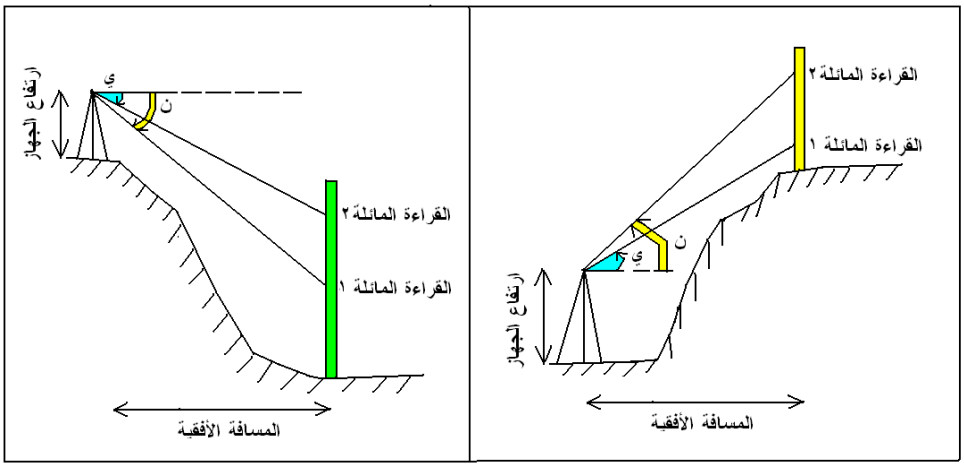
حيث:
ن = الزاوية الرأسية في الحالة المائلة.



شكل (٨-٤) طريقة الظلال في حالة أحد الوضعين يكون أفقيا

حالة عدم إمكانية أخذ نظرة أفقية:

إذا لم تسمح طبيعة الأرض بأخذ قراءة الشعرة الوسطي في وضع الثيودليت أفقيا تماما ، أي أن كلا النظرتين سيتمان و الثيودليت مائلا (أي زاويتين رأسيتين):



شكل (٨-٥) طريقة الظلال في حالة كلا الوضعين مائلين

المسافة الأفقية = (القراءة المائلة ٢ – القراءة المائلة ١) / (ظا ن – ظا ي) (٨-٩)

في حالة زاويتين ارتفاع:

منسوب نقطة القامة = منسوب نقطة الجهاز + ارتفاع الجهاز +
(المسافة الأفقية × ظا ن) - القراءة المائلة الأولي (٨-١٠)

وللتحقيق فأن:

منسوب نقطة القامة = منسوب نقطة الجهاز + ارتفاع الجهاز +
(المسافة الأفقية × ظا ي) - القراءة المائلة الثانية (٨-١١)

في حالة زاويتين انخفاض:

منسوب نقطة القامة = منسوب نقطة الجهاز + ارتفاع الجهاز -
(المسافة الأفقية × ظا ن) - القراءة المائلة الأولي (٨-١٢)

وللتحقيق فأن:

منسوب نقطة القامة = منسوب نقطة الجهاز + ارتفاع الجهاز -
(المسافة الأفقية × ظا ي) - القراءة المائلة الثانية (٨-١٣)

حيث:
ن = الزاوية الرأسية الأولي (الأكبر)
ي = الزاوية الرأسية الثانية (الأصغر).

مثال:

وضعت قامة علي نقطة ب وتم رصدها بثيودليت موجود عند ج فكانت زاويتي الارتفاع هما ١٤' ٥٢° و ظا ٣٦' ٥٥° عندما كانت قراءتي القامة ٠.٢٠ ، ١.٢٠ علي الترتيب. ما هي المسافة الأفقية ب ج و ما منسوب نقطة ب إذا كان منسوب ج يساوي ١٣٧.١٤ مترا وكان ارتفاع الجهاز يساوي ١.٥٠ مترا؟

المسافة الأفقية = (القراءة المائلة ٢ – القراءة المائلة ١) / (ظا ن – ظا ي)
= (١.٢٠ – ٠.٢٠) / (ظا ٣٦' ٥٥° – ظا ١٤' ٥٢°)
= ١٦.٩٣ متر

منسوب نقطة القامة = منسوب نقطة الجهاز + ارتفاع الجهاز +
(المسافة الأفقية × ظا ن) - القراءة المائلة الأولي
= ١٣٧.١٤ + ١.٥٠ + (١٦.٩٣ × ظا ١٤' ٥٢°) – ٠.٣٠
= ١٣٩.١٠ متر.

وللتحقيق فأن:

منسوب نقطة القامة = منسوب نقطة الجهاز + ارتفاع الجهاز +
(المسافة الأفقية × ظا ي) - القراءة المائلة الثانية
= ١٣٧.١٤ + ١.٥٠ + (١٦.٩٣ × ظا ٣٦' ٥٥°)– ١.٢٠
= ١٣٩.١٠ متر.

٨-٤ تعيين قيم لا يمكن رصدها

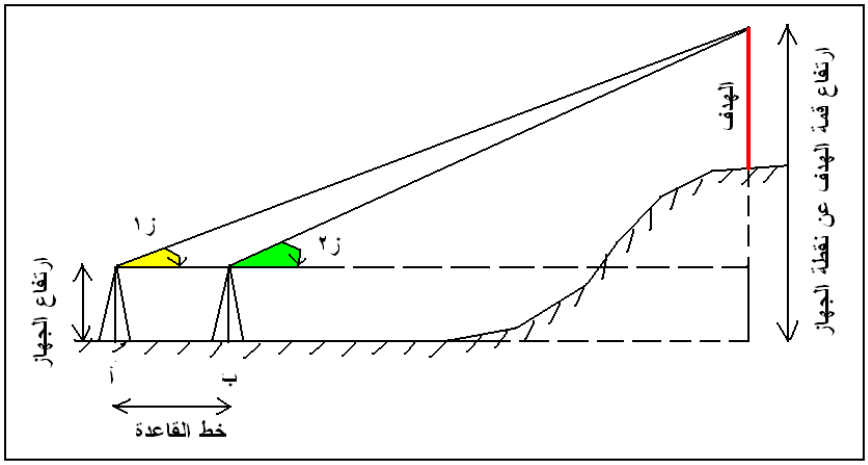
في بعض التطبيقات المساحية بجهاز الثيودليت يواجه الراصد حالات المطلوب فيها تعيين بعض القيم التي لا يمكن رصدها أو قياسها مباشرة في الطبيعة ، وهنا يمكن حسابها من أرصاد أخري.

٨-٤-١ تعيين ارتفاع هدف لا يمكن الوصول إليه

نختار خط قاعدة ونقيس طوله بدقة عالية ونرصد أيضا الزاويتين من كلتا نقطتي هذا الخط إلي قمة الهدف المطلوب:

حالة (١) خط القاعدة أفقي والهدف يقع علي امتداده:

ارتفاع قمة الهدف عن نقطة الجهاز = [طول خط القاعدة / (ظتا ز١ – ظتا ز٢)]
+ ارتفاع الجهاز (٨-١٤)

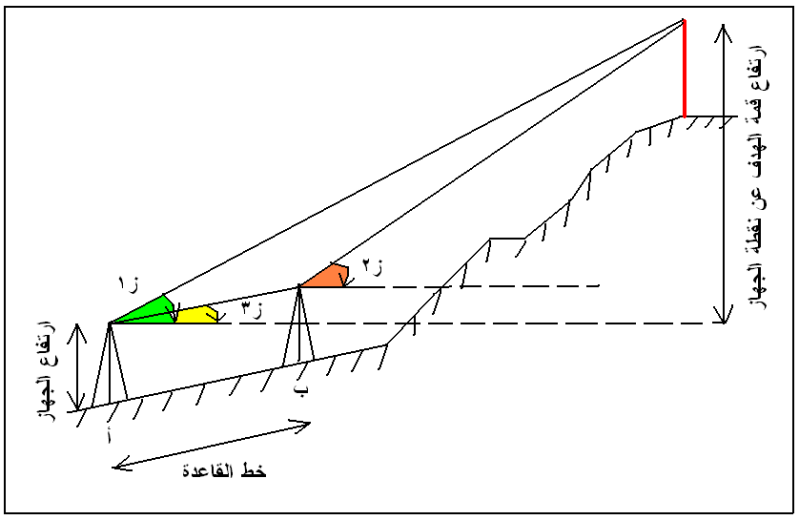


شكل (٨-٦) حساب ارتفاع هدف لا يمكن رصده (أرض أفقية)

ويمكن استخدام نفس المعادلة مع رصد نقطة قاع الهدف (وليس قمته) لنحسب ارتفاع قاع الهدف عن نقطة الجهاز ، ثم نستطيع حساب ارتفاع الهدف ذاته بطرح ناتج كلتا المحاولتين.

حالة (٢) خط القاعدة مائل والهدف يقع علي امتداده:

نختار خط قاعدة ونقيس طوله المائل بدقة عالية ونرصد:
عند نقطة أ: زاوية الهدف = ز١ ، زاوية النقطة الثانية لخط القاعدة = ز٣
عند نقطة ب: زاوية الهدف = ز٢

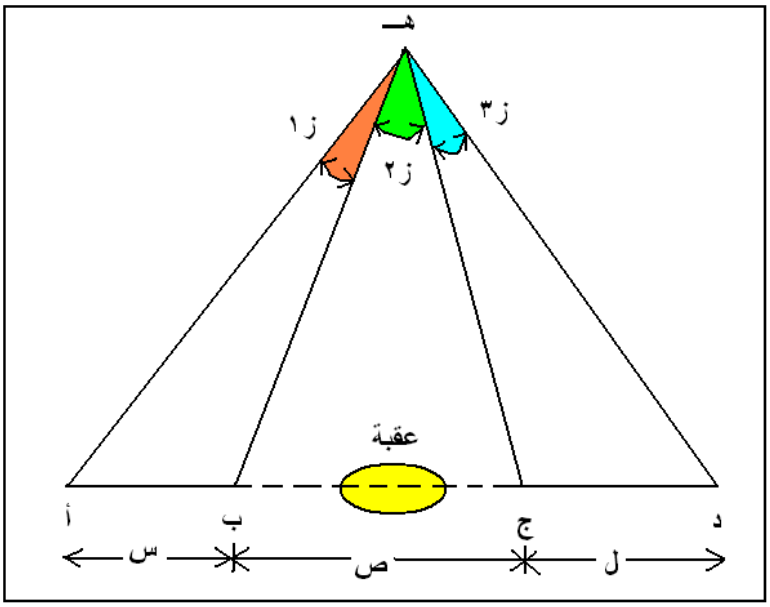


شكل (٨-٧) حساب ارتفاع هدف لا يمكن رصده (أرض مائلة)

ارتفاع قمة الهدف عن نقطة الجهاز =
طول خط القاعدة × جا (ز٢ – ز٣) × قتا (ز٢-ز١)) × جا (ز١)
+ ارتفاع الجهاز (٨-١٥)

٨-٤-٢ تعيين مسافة لا يمكن الوصول إليها

في حالة وجود خط يمكن قياس بعض أجزاؤه مباشرة لكن يوجد جزء منه لا يمكن قياسه (لوجود عائق به) ، نضع الثيودليت عن نقطة ويتم قياس الزوايا الأفقية الثلاثة ثم يتم حساب طول الجزء الناقص كالتالي:



شكل (٨-٨) حساب جزء من خط لا يمكن قياسه مباشرة

$$ص = -\frac{س + ل}{٢} + \sqrt{\left(\frac{س+ل}{٢}\right)^{٢} + س\,ل\left(١ - \frac{جا\,(ز١+ز٢)\,جا\,(ز٣+ز٢)}{جا\,ز١\,جا\,ز٣}\right)} \qquad (١٦-٨)$$

وأيضا:

$$ص = -\frac{س + ل}{٢} + \sqrt{\left(\frac{س+ل}{٢}\right)^{٢} + س\,ل\left(١ - \frac{جا\,(ز١+ز٢)\,جا\,(ز٣+ز٢)}{جا\,ز١\,جا\,ز٣}\right)} \qquad (١٧-٨)$$

مثال:

عند قياس خط قاعدة أ ب أعترض القياس عقبة. وللتغلب عليها اختيرت نقطتان ب ، ج على الخط أ د ثم أخذت أرصاد إليهما من نقطة هـ كما يلي:

- الزاوية أ هـ ب = ٢٠" ١٨ ' ٢٠ °
- الزاوية ب هـ ج = ٤٠" ١٩ ' ٤٥ °
- الزاوية ج هـ د = ٢٠" ٢٤ ' ٣٣ °
- طول أب = ٥٢٧.٤٣ متر ، طول ج د = ٦٨٥.٢٩ متر

أحسب طول الخط أ د.

ز١ = ٢٠" ١٨' ٢٠°
ز٢ = ٤٠" ١٩' ٤٥°
ز٢ = ٢٠" ٢٤' ٣٣°
س = ٥٢٧.٤٣ متر
ص = ٦٨٥.٢٩ متر

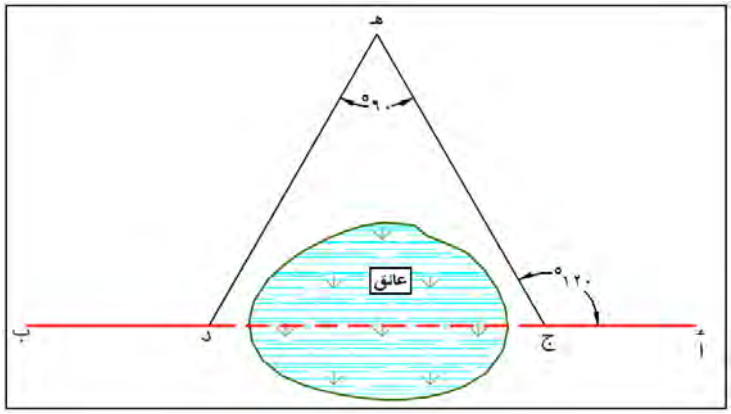
إذن:
ز١ + ز٢ = ٠٠" ٣٨' ٦٥°
ز٣ + ز٢ = ٠٠" ٤٤' ٧٨°
(س+ل)/٢ = ٦٠٦.٣٦ متر
(س-ل)/٢ = ٧٨.٩٣ متر

ص = - ٦٠٦.٣٦ + جذر [(٧٨.٩٣)^{٢} + (٥٢٧.٤٣ × ٦٨٥.٢٩ × جا ٠٠" ٣٨' ٦٥°
× جا ٠٠" ٤٤' ٧٨°) / (جا ٢٠" ١٨' ٢٠° جا ٢٠" ٢٤' ٣٣°)]
= - ٦٠٦.٣٦ + جذر (٦٢٣٠ + ١٧٩٠٠٥٧)
= -٦٠٦.٣٦ + ١٣٠٢.٤١٥ متر
= ٦٩٦.٠٥٥ متر

طول أ د = ٥٢٧.٤٣ + ٦٨٥.٢٩ + ٦٩٦.٠٥٥ = ١٩٠٨.٧٧٥ متر

حل عملي بالثيودليت و الشريط:

يمكن الحصول علي طول جزء الخط الذي يعترض القياس عمليا في الطبيعة (دون الحاجة للحسابات) باستخدام الثيودليت و الشريط بالاعتماد علي فكرة إنشاء مثلث متساوي الأضلاع بواسطة الخطوات العملية التالية:



شكل (٨-٩) قياس غير مباشر لجزء من خط لا يمكن قياسه مباشرة

- نقف بالثيودليت عند النقطة أ ونوجه إلي النقطة ب ثم نحدد النقطة ج علي الخط أ ب
- ننقل الثيودليت إلي النقطة ج ونوجه إلي النقطة أ ونجعل قراءة الدائرة الأفقية = صفر بالضبط

- ندير المنظار حتى تكون قراءة الدائرة الأفقية تساوي ١٢٠ درجة ، وعلي هذا الامتداد نحدد موقع مناسب للنقطة هـ (علي أن تتجاوز هذه النقطة العقبة التي تمنع القياس).
- نقيس بالشريط طول الخط ج هـ
- ننقل الثيودليت إلي النقطة هـ ونوجه إلي النقطة ج ونجعل قراءة الدائرة الأفقية تساوي صفر بالضبط ، ثم ندير المنظار حتى تكون الزاوية الأفقية تساوي ٦٠ درجة بالضبط وعلي هذا الاتجاه نقيس مسافة = طول الجزء ج هـ حتى نحدد موقع النقطة د ، ثم نقيس المسافة من د إلي ب.

الآن لدينا مثلث ج هـ د وهو مثلث متساوي الأضلاع ، أي أن طول الجزء ج د (المطلوب تحديده) = طول ج هـ = طول هـ د.

إذن الطول الكلي للخط أ ب = طول أ ج + طول ج د + طول د ب

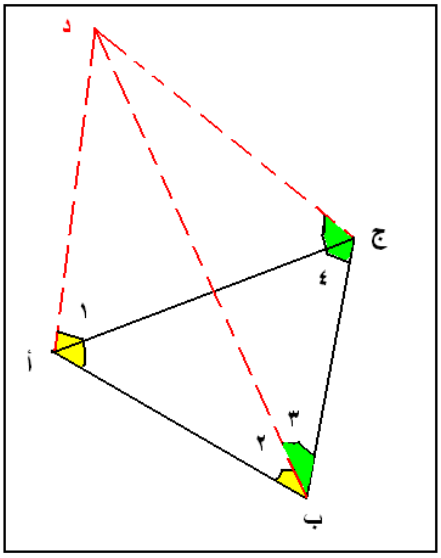
٨-٥ التقاطع الأمامي و العكسي

عملية التقاطع – كتطبيق مساحي – يتم استخدامها للحصول علي إحداثيات نقطة جديدة بدقة عن طريق رصدها من ثلاثة نقاط معلومة الإحداثيات. في حالة التقاطع الأمامي Intersection تكون النقطة الجديدة في موقع يصعب احتلاله بالجهاز (مثل مئذنة مسجد مثلا)، بينما إن كانت طبيعة منطقة العمل تسمح باحتلال هذه النقطة الجديدة بجهاز الثيودليت فهذه الحالة تسمي التقاطع العكسي Resection. تستخدم عملية التقاطع في تكثيف شبكات الثوابت الأرضية المساحية كما أنها تستخدم في المساحة البحرية.

٨-٥-١ التقاطع الأمامي

توجد عدة طرق تعتمد علي نوعية القياسات الحقلية ، إلا أن طريقة متوسط الإحداثيات تعد هي الأسهل. تستخدم هذه الطريقة في حالة أن النقطة الجديدة تري نقاط الثوابت المعلومة وأيضا النقاط المعلومة تري بعضها البعض ، وتكون الزوايا هي الأرصاد المساحية المطلوبة لحساب إحداثيات النقطة الجديدة.

- لتحديد إحداثيات نقطة د التي لا يمكن احتلالها فيتم رصد الزوايا إليها من ٣ نقاط معلومة هي أ ، ب ، ج (الزوايا ١ ، ٢ ، ٣ ، ٤).
- يتم حساب انحراف أي خط من الخطوط بين النقاط المعلومة (أ ب) من خلال الإحداثيات المعلومة لطرفيه.
- يتم حساب انحراف خطين من نقطتين معلومتين إلي النقطة الجديدة (انحراف أ د و انحراف ب د) باستخدام الزاويتين المقاستين ١ ، ٢.
- باستخدام قانون جيب الزاوية للمثلث أ ب د يتم حساب طول الضلعين أ د ، ب د (المعلوم له الزاويتين ١ ، ٢ والضلع أ ب).
- نحسب إحداثيات نقطة د بمعلومية طول و انحراف الضلع أ د والإحداثيات المعلومة للنقطة أ.
- للتحقيق نحسب – مرة أخري - إحداثيات نقطة د بمعلومية طول و انحراف الضلع بد والإحداثيات المعلومة للنقطة ب.



شكل (٨-١٠) التقاطع الأمامي بطريقة متوسط الإحداثيات

الاحداثي السيني (الشرقي) للنقطة المطلوبة:

س د = س أ + أ د × جا (انحراف أ د) (٨-١٨)

للتحقيق:

س د = س ب + ب د × جا (انحراف ب د)

الاحداثي الصادي (الشمالي) للنقطة المطلوبة:

ص د = ص أ + أ د × جتا (انحراف أ د) (٨-١٩)

للتحقيق:

ص د = ص ب + ب د × جتا (انحراف ب د)

إما إن كان كانت الزوايا المقاسة هي تلك الزوايا المحصورة بين خطوط الربط والنقطة الجديدة فأن إحداثيات هذه النقطة يمكن حسابها (بطريقة الزوايا) كالتالي:

س د = [س أ × ظتا ٢ + س ب × ظتا ١ + (ص أ – ص ب)] ÷
(ظتا ١ + ظتا ٢) (٨-٢٠)

ص د = [ص أ × ظتا ٢ + ص ب × ظتا ١ + (س أ – س ب)] ÷
(ظتا ١ + ظتا ٢) (٨-٢١)

مثال:

كانت قياسات عملية التقاطع الأمامي كالآتي:

زاوية ٤ = ٤٣" ٢١' ١٢٢°
زاوية ١ = ٣٦" ٢٠' ١٠٥°
زاوية ٣ = ٥٠" ٣٤' ٢٩°
زاوية ٢ = ١٦" ٠١' ٣٩°

وكانت إحداثيات نقاط الربط كالتالي:

النقطة	س	ص
ب	١٣٩٥.٤٥٤	١٠٧٨.٨٠٦
أ	١٢٦٨.٨٥٥	١٠٢٨.٤١٩
ج	١٣٠٩.٦٥٢	١١٧٠.٥٠٣

أحسب إحداثيات النقطة د بطريقة الزوايا؟

من المثلث ج ب د:

س د = [١٣٠٩.٦٥٢ × ظتا ١٦" ٠١' ٣٩° + ١٣٩٥.٤٥٤ × ظتا ٥٠" ٣٤' ٢٩°
+ (١٠٧٨.٨٠٦ – ١١٧٠.٥٠٣)] ÷
(ظتا ٤٣" ٢١' ١٢٢° + ظتا ٥٠" ٣٤' ٢٩°)
= ١١٨٠.١٥١ متر

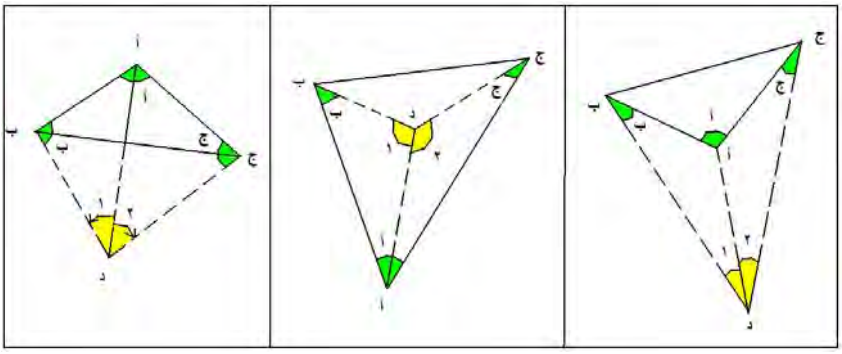
ص د = [١١٧٠.٥٠٣ × ظتا ٥٠" ٣٤' ٢٩° + ١٠٧٨.٨٠٦ × ظتا ٤٣" ٢١' ١٢٢° +
+ (١٣٠٩.٦٥٢ – ١٣٩٥.٤٥٤)] ÷
(ظتا ٤٣" ٢١' ١٢٢° + ظتا ٥٠" ٣٤' ٢٩°)
= ١١٤٥.٩٥١ متر

٨-٥-٢ التقاطع العكسي

في عملية التقاطع العكسي يتم حساب إحداثيات نقطة جديدة من خلال احتلالها بجهاز الثيودليت وإجراء قياسات إلي ٣ نقاط ثوابت أرضية معلومة الإحداثيات. يحتاج الراصد لهذه الطريقة عندما لا يمكن احتلال نقاط الثوابت الأرضية المعلومة ذاتها.

توجد عدة طرق لحل التقاطع العكسي لكن الطريقة التالية هي طريقة هيئة المساحة الأمريكية:

يتم احتلال النقطة الجديدة د وقياس الزاويتين ١ ، ٢ (في اتجاه دوران عقرب الساعة) إلي نقاط الربط المعلومة أ ، ب ، ج.



شكل (٨-١١) التقاطع العكسي

خطوات الحل:

(١) نحسب الزاوية ر:

ر = ب + ج = ٣٦٠ – (أ + ١ + ٢) (٨-٢٢)

(٢) نحسب الزاوية ج:

ظتا ج = ظتا ر + (أ ج جا ١ / أ ب جا ر) (٨-٢٣)

(٣) نحسب الزاوية ب:

ب = ر – ج (٨-٢٤)

(٤) نحسب المسافة أ د:

أ د = أ ج جا ج / جا ٢ (٨-٢٥)

أو:

أ د = أ ب جا ب / جا ١ (٨-٢٦)

(٥) نحسب الزاوية ج أ د = ١٨٠ – (١ + ٢) (٨-٢٧)

(٦) ومنها نحسب انحراف الخط أ د

(٧) باستخدام قاعدة الجيب نحسب المسافة ج د أو ب د (أو كلاهما).

(٨) نحسب إحداثيات النقطة د باستخدام انحراف وطول ضلع الخط أ د

(٩) للتحقيق:

نحسب إحداثيات النقطة د باستخدام انحراف وطول ضلع الخط ب د أو الخط ج د.

مثال:

إحداثيات النقاط المعلومة كالتالي:

النقطة	س	ص
ب	١٠٠٠٠.٠٠	٢٠٠٠٠.٠٠
أ	١٦٦٧٢.٥٠	٢٠٠٠٠.٠٠
ج	٢٧٧٣٢.٧٦	١٤٢١٥.٢٤

زاوية ١ = ٥٣" ٠٥' ٢٠°
زاوية ٢ = ٠٨" ٠٦' ٣٥°
الضلع أ ب = ٦٦٧٢.٥
الضلع أ ج = ١٢٤٨١.٧

من إحداثيات نقاط الربط (أ ، ب ، ج) يمكن حساب انحراف خطي المثلث أ ب ، أ ج ثم حساب الزوايا الداخلية أ:

زاوية أ = ٢٢" ٢٣' ١٥٢°

(١) نحسب الزاوية ر:
ر = ب + ج = ٣٦٠ – (أ + ١ + ٢)
= ٣٦٠ – (٢٢" ٢٣' ١٥٢° + ٥٣" ٠٥' ٢٠° + ٠٨" ٠٦' ٣٥°)
= ٣٧" ٢٤' ١٥٢°

(٢) نحسب الزاوية ج:
ظتا ج = ظتا ر + (أ ج جا ١ / أ ب جا ر)
= ظتا ٣٧" ٢٤' ١٥٢° +
(١٢٤٨١.٧ جا ٥٣" ٠٥' ٢٠° / ٦٦٧٢.٥ جا ٣٧" ٢٤' ١٥٢°
= ٠.٤٩٩٩٥٦٣٨

إذن الزاوية ج = ١٣" ٢٦' ٦٣°

(٣) نحسب الزاوية ب:
ب = ر – ج
= ٣٧" ٢٤' ١٥٢° - ١٣" ٢٦' ٦٣° = ٢٤" ٥٨' ٨٨°

(٤) نحسب المسافة أ د:
أ د = أ ج جا ج / جا ٢
= ١٢٤٨١.٧ جا ١٣" ٢٦' ٦٣° / جا ٠٨" ٠٦' ٣٥° = ١٩٤١٤.٦٩٣

للتحقيق:

أ د = أ ب جا ب / جا ١
= ٦٦٧٢.٥ جا ٢٤" ٥٨' ٨٨° / جا ٥٣" ٠٥' ٢٠° = ١٩٤١٤.٦٩٣

(٥) نحسب الزاوية ج أ د = ١٨٠ – (١ + ٢)
= ١٨٠ – (٥٣" ٠٥' ٢٠° +٠٨" ٠٦' ٣٥°)
= ٣٩" ٢٧' ٨١°

(٦) نحسب طول الخط أ د:
أ د = أ ج جا ج أ د / جا ٢
= ١٢٤٨١.٧ جا ٣٩" ٢٧' ٨١° / جا ٠٨" ٠٦' ٣٥°
= ٢١٤٦٥.٢٨٩

(٧) نحسب انحرافات الخطوط:

الخط	الزاوية	الانحراف	ملاحظات
أ ج		٣٨" ٣٦' ١١٧°	الانحراف الأمامي أ ج
	٣٩" ٢٧' ٨١°		الزاوية ج أ د
أ د		١٧" ٠٤' ١٩٩°	الانحراف الأمامي أ د
د أ		١٧" ٠٤' ١٩°	الانحراف الخلفي د أ
	٠٨" ٠٦' ٣٥°		الزاوية ٢
د ج		٢٥" ١٠' ٥٤°	الانحراف الأمامي د ج
		٢٥" ١٠' ٢٣٤°	الانحراف الخلفي ج د
	١٣" ٢٦' ٦٣°		الزاوية ج
ج أ		٣٨" ٣٦' ٢٩٧°	تحقيق = الانحراف الخلفي للخط أ ج

(٨) نحسب إحداثيات النقطة د باستخدام انحراف وطول ضلع الخط أ د وإحداثيات النقطة المعلومة أ:

س د = ١٠٣٢٨.٨ ، ص د = ١٦٥٠.٩

الفصل التاسع

جهاز المحطة الشاملة

يعد جهاز المحطة الشاملة أو المحطة المتكاملة Total Station أكثر الأجهزة المساحية استخداما و تكاملا ودقة في الوقت الراهن. يدل اسم الجهاز علي أنه يشمل داخله عدد من الأجهزة و الإمكانيات في إطار متكامل كجهاز واحد.

كما سبق الإشارة إلي أن الأجهزة المساحية قد تطورت في النصف الثاني من القرن العشرين الميلادي بصورة سريعة فقد تم ابتكار أجهزة قياس المسافات الكترونيا EDM لتصبح بديلا دقيقا و سريعا عن الشريط في قياس المسافات ، ثم تم ابتكار أجهزة الثيودليت الرقمي أو الالكتروني التي زادت من دقة قياس الزوايا الأفقية والرأسية وتجاوزت أخطاء الراصد في تسجيل القياسات يدويا ، ثم تلا ذلك ابتكار أجهزة المحطات الشاملة.

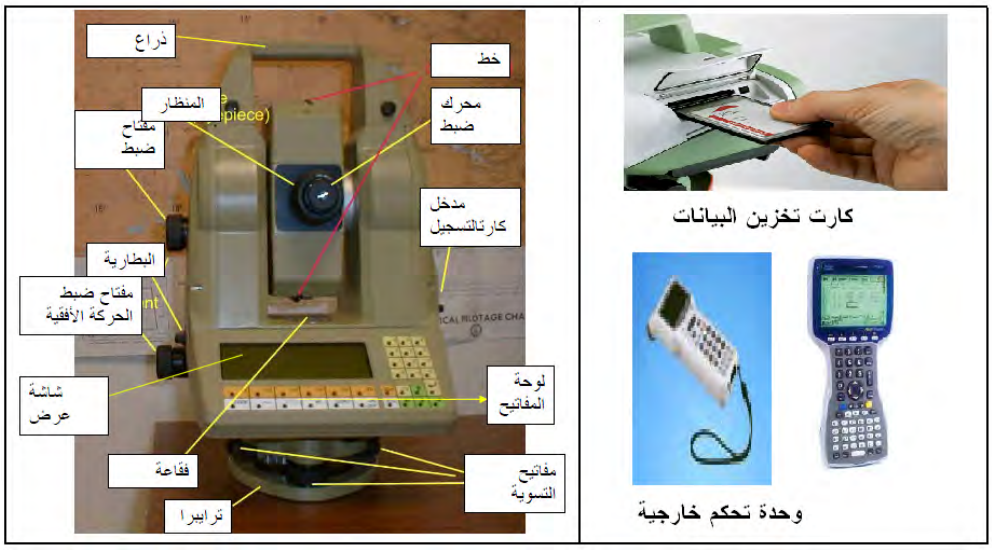
شكل (٩-١) تطور الأجهزة المساحية

حديثا تم دمج جهاز المحطة الشاملة مع جهاز النظام العالمي لتحديد المواقع بالرصد علي الأقمار الصناعية GPS لدمج تقنيتي المساحة الأرضية والمساحة الفضائية معا.

٩-١ مكونات و مميزات المحطة الشاملة

يتكون جهاز المحطة الشاملة من مجموعة من الأجهزة (تم جمعها في إطار واحد) تشمل:

١. جهاز ثيودليت رقمي.
٢. جهاز قياس المسافات الكترونيا EDM.
٣. ذاكرة الكترونية لتسجيل القياسات.
٤. وحدة كمبيوتر micro-processor لتشغيل البرامج الحسابية.
٥. أجهزة ملحقة مثل البطارية ومجموعة العواكس والحامل الثلاثي وكابل التوصيل بالكمبيوتر.



شكل (٩-٢) مثال لجهاز المحطة الشاملة

تتميز أجهزة المحطات الشاملة بالعديد من المميزات و المواصفات مثل:

١. الدقة في قياس الزوايا الأفقية والرأسية (قد تصل إلي ثانية واحدة).
٢. الدقة في قياس المسافات (عدة ملليمترات).
٣. الرصد لمسافات كبيرة (تتعدي كيلومترات).
٤. منظار له قوة تكبير عالية لإمكانية رصد المعالم البعيدة.
٥. تسمح وحدة الكمبيوتر بأداء الحسابات في الموقع والحصول علي الإحداثيات آنيا.
٦. إمكانية قياس المسافات بدون عاكس (بالليزر) لعدة مئات من الأمتار.
٧. سرعة في قياس المسافات الكترونيا (ثانية واحدة أو أقل).
٨. التحقق من أخطاء ضبط أفقية الجهاز وتعديلها (في حالة وجود موازن Compensator بالجهاز) أو تصحيح القياسات حسابيا.
٩. البطارية تمد الجهاز بالطاقة اللازمة لعدة ساعات.
١٠. نظام تشغيل مثل النوافذ windows لسهولة العمل (بعض الأجهزة تدعم اللغة العربية).
١١. ذاكرة تخزين كبيرة لتخزين القياسات بالجهاز (ذاكرة داخلية أو كارت تخزين).
١٢. بعض الأجهزة تسمح بتوصيل وحدة تحكم خارجية control unit أو وحدة تجميع البيانات Data Collector لسهولة العمل.
١٣. سهولة نقل البيانات للكمبيوتر (من خلال كابل أو وحدة بلوتوث).
١٤. القدرة علي تحمل ظروف الطقس المختلفة في الموقع (حتى حرارة تصل ٥٠ درجة مئوية).
١٥. بعض الأجهزة بها كاميرا رقمية داخلية لتصوير مواقع الرصد كنوع من أنواع توثيق بيانات المشروع.
١٦. صغر الحجم و خفة الوزن مما يسهل التنقل بها بين المواقع المختلفة.

الجدول التالي يقدم بعض مواصفات لأمثلة للمحطات الشاملة:

	شـــــركة Sokkia موديل Set210	شـــركة GeoMax موديل Zoom 30	شركة Leica موديل TPS1201
دقة قياس الزوايا	"٢	"٣	"١
قوة تكبير المنظار	X ٣٠	X ٣٠	X ٣٠
قياس المسافات (متر):			
بعاكس واحد	٢٧٠٠	٣٥٠٠	٣٠٠٠
بدون عاكس	١٢٠	٦٠٠	٤٠٠
دقة قياس المسافات:			
بالعاكس	٢ ملي ± ٢ ppm	٢ ملي ± ٢ ppm	١ ملي ± ١.٥ ppm
بدون عاكس	٣ ملي ± ٢ ppm	٣ ملي ± ٣ ppm	٢ ملي ± ٢ ppm
حجم الذاكرة	١٠ آلاف نقطة	١٠ آلاف نقطة	١٠٠ ألف نقطة
موازن	موجود	موجود	موجود
وزن الجهاز (كجم)	٥.٢	٥.١	٤.٨

٩-٢ تشغيل المحطة الشاملة

بصفة عامة فأن جهاز المحطة الشاملة يطلب البيانات التالية كمدخلات input عند تشغيله:

- وحدة قياس الزوايا (نظام ستيني أم مئوي).
- ثابت العاكس المستخدم.
- ارتفاع الجهاز (يتم قياسه عند كل محطة).
- ارتفاع العاكس المستخدم.
- أسم المشروع.
- أسم النقطة المحتلة وإحداثياتها.
- بعض الأجهزة تسمح بإدخال كود معين لكل نقطة مرصودة (نوع النقطة إن كانت شجرة أم مبني أم طريق ...الخ) بحيث يتم جمع النقاط من كل نوع بطريقة الطبقات layers عند تصدير النتائج إلي برامج الخرائط مثل AutoCAD أو برامج نظم المعلومات الجغرافية مثل Arc GIS.

تشمل مخرجات output عملية الرصد (عامة) الآتي:

- الزوايا الأفقية والرأسية.
- المسافات المائلة المقاسة و المسافات الأفقية المحسوبة وكذلك فروث الارتفاعات.
- الانحرافات (عند البدء بخط معلوم انحرافة أو بواسطة نقطتين معلومتين الإحداثيات).
- إحداثيات النقطة المرصودة (س ، ص ، ع).
- خطأ قفل المضلع – في حالة رصده – و قيم تصحيحاته.
- نتائج التقاطع الأمامي و العكسي.
- كما تستخدم أجهزة المحطة الشاملة في توقيع الأهداف المطلوبة setting out المعلوم إحداثياتها التصميمية مسبقا.

٩-٣ أنواع متقدمة من المحطة الشاملة

تقدمت تقنيات إنتاج المحطات الشاملة في السنوات الأخيرة لتظهر أنواع متقدمة من الأجهزة تناسب تطبيقات الرفع المساحي في مجالات متعددة من المشروعات الهندسية. ومن هذه الأجيال الحديثة من المحطة الشاملة ما يلي:

المحطة الشاملة المتحركة:

تقليديا كان الراصد هو الذي يقف بجوار جهاز المساحة ويقوم بالرصد وتسجيل القراءات بينما المساعد هو الذي يحمل الشاخص (أو العاكس) ويتحرك من نقطة لأخرى. مع ابتكار أجهزة قياس المسافات الكترونيا EDM زادت المسافة بين الراصد و مساعده (المسافة بين الجهاز و العاكس) حتى وصلت إلي عدة كيلومترات مما جعل التواصل بينهما يتطلب وجود أجهزة راديو لاسلكي مع كلا منهما. هذا المبدأ هو أساس تطوير المحطات الشاملة المتحركة Motorized or Robotic Total Station وهي جهاز محطة شاملة مركب علي قاعدة متحركة بموتور داخلي بحيث أن الجهاز يستطيع الدوران حول نفسه أفقيا ٣٦٠ درجة كاملة (مع ضمان بقائه في الوضع الأفقي الدقيق من خلال الموازن الداخلي به compensator). تتم حركة الجهاز من خلال وحدة تحكم control unit متصلة لاسلكيا بالمحطة الشاملة ذاتها. هذه الوحدة تكون مع الراصد ومن خلالها يمكنه التحكم في المحطة الشاملة ذاتها حتى إن كان يبعد عنه كيلومترات. تعتمد هذه التقنية علي مبدأ "التعرف الآلي علي الهدف" Automatic Target Recognition أو اختصارا ATR ، وهو إمكانية أن يتعرف جهاز المحطة الشاملة أثناء دورانه علي الهدف (العاكس) ويحدد موقعه. بالتالي أصبح الراصد هو من يحمل العاكس ويتحكم في الجهاز ويقوم بعملية الرصد و تسجيل القياسات آليا. بهذا أصبح العمل الحقلي أسرع في التنفيذ مما يقلل من تكلفة أعمال الرفع المساحي الميداني. يمكن تمييز جهاز المحطة الشاملة المتحركة من خلال راديو الاستقبال اللاسلكي المثبت أعلاه.

شكل (٩-٣) مثال لجهاز المحطة الشاملة المتحركة

المحطة الشاملة بالمسح الليزري:

يتطلب الرفع المساحي الطبوغرافي تحديد إحداثيات النقاط (س ، ص ، ع) بسرعة ودقة للعديد من المشروعات الهندسية ، وربما يتجاوز عدد النقاط المطلوب رصدها المئات في مشروع واحد. فعلي سبيل المثال إن كان هناك مشروع هندسي لقطع جزء من جبل صخري وعلي مهندس المساحة أن يتابع العمل لتحديد كمية الأحجار المقطوعة. في هذا المثال سيقوم الراصد بتحديد إحداثيات مئات من النقاط (علي هذا الجبل) لرسم خريطة كنتورية أو سطح مجسم له قبل بدء أعمال الحفر ، ثم سيقوم بإعادة هذا الرفع الطبوغرافي مرة أخري كل فترة زمنية لحساب حجم جزء الجبل الذي تم حفره. باستخدام المحطة الشاملة العادية فأن هذا الرفع المساحي سيستغرق وقتا طويلا في كل مرة. تم ابتكار جهاز المحطة الشاملة بالمسح الليزري Laser Scanner Total Station بحيث أن جهاز الليزر (الذي يقيس المسافة أوتوماتكيا ومن ثم يحسب إحداثيات نقطة الرصد) يستطيع الحركة أفقيا و رأسيا بصورة آلية. أي أن الراصد يبدأ بتحديد مجال الرؤية الذي يريد رفع معالمه مساحيا (الأركان الأربعة) كما يحدد المسافة المطلوبة للقياس بين كل نقطتين متتاليتين. يبدأ الجهاز في الرفع المساحي بالليزر آليا وبصورة مستمرة حتى يكتمل رفع جميع المعالم في مجال الرؤية المحدد ، ويتم تخزين هذه القياسات آليا في ذاكرة الجهاز. هذا النوع من المحطات الشاملة يعتمد علي مبدأ أن الموجة المرسلة من الجهاز ستنعكس عند اصطدامها بأي هدف (أي لا يستخدم عاكس مع الجهاز) مما يجعله مناسبا للرفع المساحي للمعالم التي لا يمكن الوصول إليها. وبهذا فأن ناتج المسح الليزري سيكون مجسم ثلاثي الأبعاد للمعالم المرفوعة. من أمثلة استخدامات المحطة الشاملة بالمسح الليزري: مشروعات الهندسية المدنية التي تحتاج تقدير كميات الحفر و الردم ، توثيق المواقع الأثرية في حالة نقلها من مكان لآخر حتى يمكن إعادة تركيبها بنفس أبعادها و مواقعها النسبية.

شكل (٩-٤) مثال لجهاز المحطة الشاملة بالمسح الليزري

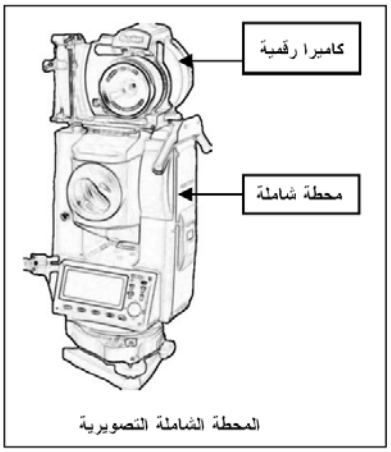
مواصفات جهاز Leica Scan Station C10 كمثال (فقط) للمحطة الشاملة بالمسح الليزري (الشكل السابق):

دقة قياس الإحداثيات:	٦ ملليمتر
دقة قياس المسافات:	٤ ملليمتر
دقة قياس الزوايا:	١٢"
طول موجة شعاع الليزر:	٥٣٢ نانومتر

مواصفات شعاع الليزر:	مرئي – لونه أخضر.
نوع شعاع الليزر:	3R (IEC 60825-1)
مدي الليزر:	٣٠٠ متر
معدل المسح الليزري:	٥٠ ألف نقطة في الثانية
عدد النقاط الممسوحة:	بحد أقصي ٢٠ ألف نقطة أفقيا و ٥ آلاف نقطة رأسيا في الرصدة الواحدة.
مجال الرؤية:	٣٦٠ درجة أفقيا ، ٢٧٠ درجة رأسيا
سعة تخزين البيانات:	٨٠ جيجابايت
أبعاد الجهاز:	٢٣٨ × ٣٥٨ × ٣٩٥ ملليمتر
وزن الجهاز:	١٣ كيلوجرام
البطارية:	داخلية ، وأخري خارجية.
فترة عمل البطارية:	٦ ساعات
درجة حرارة التي يعمل بها الجهاز:	من صفر إلي +٤٠ درجة مئوية.

المحطة الشاملة التصويرية:

تتكون نظم المحطة الشاملة التصويرية Photogrammetric Total Station Systems: PTTS من الدمج بين المحطة الشاملة و الكاميرا الرقمية لإنتاج جهاز يعتمد علي التكامل بين تقنيتي المسح الأرضي و المساحة التصويرية الأرضية. تعد تقنية المساحة التصويرية الأرضية Close-Range Photogrammetry من التقنيات المساحية التي تمكن من تحديد المواقع (الإحداثيات) من خلال صورة فوتوغرافية عالية الدقة سواء كانت صورة تقليدية (مطبوعة) أو صورة رقمية. كانت فكرة وضع كاميرا علي جهاز ثيودليت موجودة منذ السبعينات من القرن العشرين وكانت هناك أجهزة تسمي الثيودليت التصويري Photo-Thedolite مثل أجهزة Wild P30 and Ziess 19/1318. إلا أن هذه الأجهزة توقف إنتاجها بعد ذلك ، وفي بداية التسعينات عادت الفكرة للظهور مرة أخري لكن تم استخدام المحطة الشاملة بديلا عن الثيودليت وتم دمجها مع كاميرا رقمية عالية الدقة في جهاز واحد. تستخدم المحطة الشاملة التصويرية في تطبيقات عديدة مثل تقدير كميات الحفر و الردم في المشروعات الهندسية وكذلك أعمال الرفع الطبوغرافي و إنشاء الخرائط الكنتورية للمناطق الشاسعة ، حيث تتميز بتخفيض مدة و تكلفة العمل الحقلي.



شكل (٩-٥) المحطة الشاملة بالمسح التصويرية

الفصل العاشر

المنحنيات

تحتاج المشروعات الهندسية الطولية (مثل الطرق و السكك الحديدية و أنابيب المياه) لوجود المنحنيات لكي تتفادى بعض العقبات الطبيعية التي تعيق تنفيذ الخط المستقيم أفقيا أو لعبور العائق رأسيا (الكباري و الجسور). أحيانا تكون التكلفة الاقتصادية هي الداعي لتنفيذ المنحنيات بدلا من إزالة الحاجز الطبيعي الموجود والذي سيكون إزالته ذو تكلفته عالية.

شكل (١٠-١) المنحنيات في الطرق

تنقسم المنحنيات إلي منحنيات أفقية و منحنيات رأسية و منحنيات مركبة (منحنيات أفقية و رأسية معا).

١٠-١ أنواع المنحنيات الأفقية

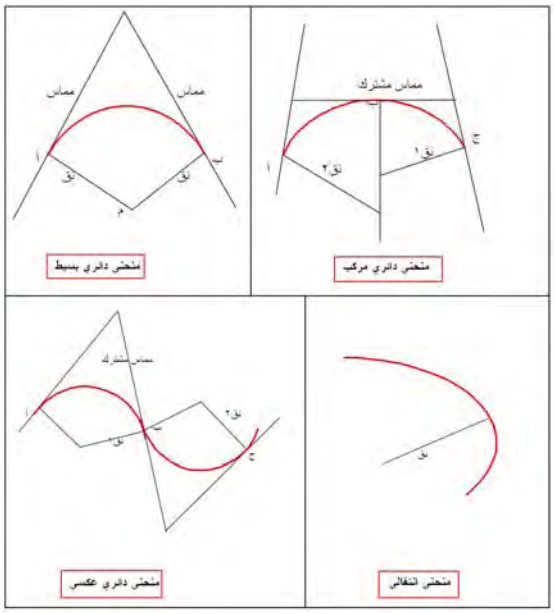
يستخدم المنحني الأفقي للتغيير من اتجاه خط مستقيم لخط مستقيم آخر ويكون المنحني مماسا لكلا منهما. وتنقسم المنحنيات الأفقية إلي أربعة أنواع:

(أ) المنحني الدائري البسيط Simple Curve: يتكون من قوس من دائرة نصف قطرها ثابت ويكون مماسا لها.

(ب) المنحني الدائري المركب Compound Curve: يتكون من قوسين من دائرتين مختلفتان في أنصاف أقطارهما ويقع مركزي الدائرتين في جهة واحدة من المنحني.

(ج) المنحني الدائري العكسي Reverse Curve: يتكون من قوسين من دائرتين يقع مركزيهما في جهتين مختلفتين من المنحني.

(د) المنحني الانتقالي Spiral Curve: يتكون من قوس ذي أنصاف أقطار متعددة تتراوح بين ما لا نهاية إلي نصف قطر معين.



شكل (١٠-٢) أنواع المنحنيات

١٠-١-١ تعريف المنحنى

يتم تعريف أي منحني إما بنصف القطر أو درجة المنحني ، والعلاقة الرياضية بينهما كالتالي:

جا د/٢ = ١٠ ÷ نق (١٠-١)

يمكن تبسيط المعادلة (٨-١) بدرجة تقريبية لأنصاف الأقطار الكبيرة لتصبح:

نق (متر) = ١١٣٦ ÷ د (١٠-٢)

حيث:
نق نصف قطر المنحني
د الزاوية المركزية (بالدرجات) المقابلة لوتر معلوم يسمي وتر القياس وغالبا يساوي ٢٠ متر.

مثال:
أحسب نصف قطر المنحني الذي درجته تساوي ٦° بالطريقة الدقيقة و الطريقة التقريبية؟

الطريقة الدقيقة:

جا د/٢ = ١٠ ÷ نق
جا ٢/٦ = ١٠ ÷ نق
نق = ١٩١.٠٦ متر

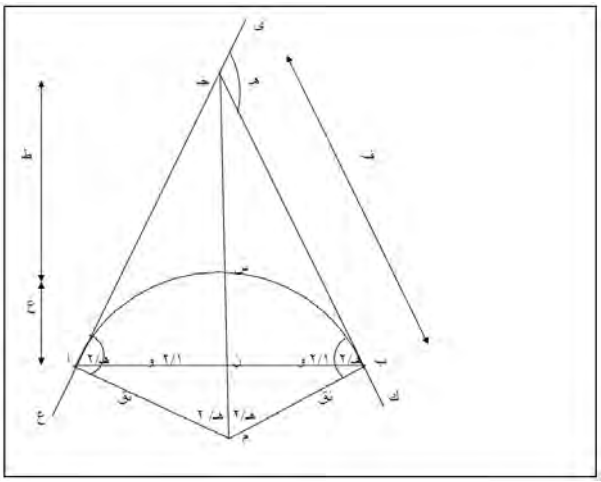
الطريقة التقريبية:

نق = ١١٣٦ ÷ د
= ١١٣٦ ÷ ٦ = ١٩١.٠٠ متر

١٠-١-٢ أجزاء المنحنى البسيط

تتكون أجزاء المنحني البسيط من (أنظر الشكل):

هـ°	زاوية تقاطع المماسين
هـ° = الزاوية ب م أ	الزاوية المركزية للمنحني
نق = أ م = ب م = س م	نصف قطر المنحني
ق = القوس أ س ب	طول المنحني
و = الخط الواصل بين نقطتي المماس	الوتر الكلي
ف = أ ج = ب ج	طول المماس الجزئي
ع = البعد العمودي بين قمة المنحني والوتر الكلي	السهم الداخلي
ط = البعد العمودي بين قمة المنحني ونقطة التقاطع	السهم الخارجي
نقطة التماس الأولي	نقطة بداية المنحني
نقطة التماس الثانية	نقطة نهاية المنحني



شكل (١٠-٣) أجزاء المنحني البسيط

١٠-١-٣ حساب أجزاء المنحنى البسيط

لحساب أجزاء المنحني البسيط يلزم معرفة قيم : (١) نصف القطر نق ، (٢) درجة المنحني د ، (٣) زاوية تقاطع المماسين هـ.

طول المماس الجزئي:

ف = نق ظا (هـ/٢) (١٠-٣)

طول الوتر الكلي:

و = ٢ نق جا (هـ/٢) (١٠-٤)

طول المنحني:

ق = ٠.٠١٧٤٥ هـ نق (١٠-٥)

حيث هـ بالدرجات.

طول السهم الداخلي:

ع = نق (١- جتا (هـ/٢)) (١٠-٦)

وأيضا:

ع = نق – جذر [نق^{٢}- و^{٢} ÷ ٤)] (١٠-٧)

طول السهم الخارجي:

ط = نق [قا (هـ/٢) – ١] (١٠-٨)

الفرق بين طول القوس و الوتر المقابل له:

ق – و = ق^{٣} ÷ ٢٤ نق^{٢} = و^{٣} ÷ ٢٤ نق^{٢} (١٠-٩)

١٠-١-٤ تعيين زاوية التقاطع ونصف قطر المنحنى في الطبيعة

لتعيين زاوية تقاطع المنحني في الطبيعة نمد المماسين ن ق ، ص س علي استقامتهما (باستخدام الشواخص و الشوك) ونضع شاخصين ج١ ، ج٢ علي امتداد ن ق ونشد بينهما شريط. نتحرك علي هذا الشريط حتى نعين نقطة ج علي امتداد ص س فتكون نقطة تقاطع المماسين ، ويؤخذ علي المماسين ج ل = ج ك بحيث يكون ك ل طولا مناسبا ثم يقاس طوله.

نحسب الزاوية س كالتالي:

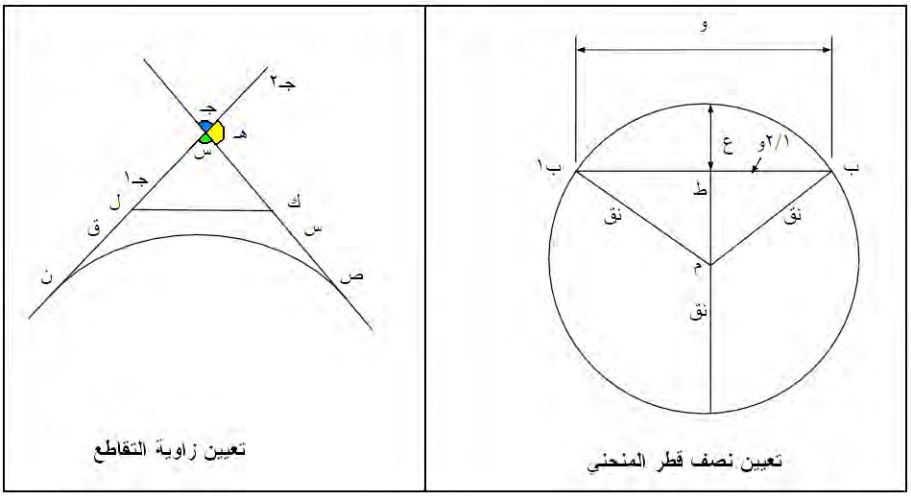
جا (س/٢) = (٠.٥ المسافة ك ل × المسافة ك ج) (١٠-١٠)

ومنها نحسب الزاوية هـ:

زاوية التقاطع هـ = ١٨٠^{o} – س (١٠-١١)

و لحساب نصف قطر المنحني (نق) – أنظر الشكل التالي - نقيس طول الوتر الكلي و (المسافة من ب إلي ب١) ، وطول السهم الداخلي ع (المسافة من ط إلي قمة المنحني):

نق = و^{٢} + ٨ ع (١٠-١٢)



شكل (١٠-٤) تعيين أجزاء المنحني البسيط في الطبيعة

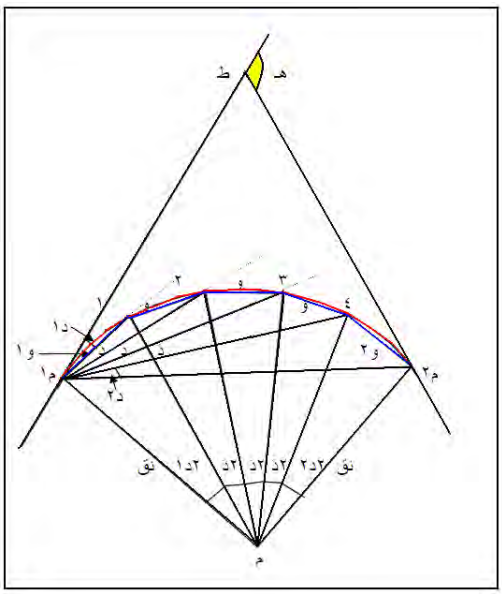
١٠-٢ توقيع المنحنيات الأفقية في الطبيعة

عملية توقيع (تحديد) مواضع عدة نقاط علي المنحني بغرض توقيعه في الطبيعة تسمي بعملية "تخطيط المنحني". يتم توقيع النقاط بحيث تناسب المسافات بينها علي الدقة المطلوبة بحيث أننا عند توصيل هذه النقاط بخطوط مستقيمة (أوتار المنحني) نحصل علي محور المنحني في الطبيعة. توجد عدة طرق لتوقيع المنحنيات الأفقية في الطبيعة ويعتمد اختيار الطريقة علي الأجهزة المساحية المتوفرة وأيضا علي الدقة المطلوبة.

١٠-٢-١ توقيع المنحنيات الأفقية بجهاز الثيودليت

يستخدم الثيودليت و الشريط (أو جهاز قياس المسافات الكترونيا EDM في حالة توافره) لتوقيع نقاط المنحني بطريقة تسمي طريقة زوايا الانحراف. في هذه الطريقة نحدد عدة أوتار جزئية للمنحني (و١ ، و٢ ، و٣ .... الخ) من خلال حساب قيم زوايا الانحراف المقابلة لهذه الأوتار (د١ ، د٢ ، د٣ ..... الخ) من خلال المعادلة:

د بالدرجات = (٩٠^{o} × و) ÷ (ط × نق) (١٠-١٣)



شكل (١٠-٥) توقيع المنحني الدائري بالثيودليت و الشريط بطريقة زوايا الانحراف

مثال:

منحني دائري بسيط نصف قطره ٣٠٠ مترا يصل بين محوري طريقين مستقيمين متقاطعين بزاوية انحراف قدرها ٣٠° وحطة نقطة التقاطع (ط) هي ٢٢٥٦.٥٩ متر. أحسب كل المعلومات اللازمة لتوقيع هذا المنحني مع عمل التحقيق الحسابي.

(١) طول المماس:

ف = نق ظا (هـ/٢) = ٢٠٠ ظا (٣٠°/٢) = ٥٣.٥٩ متر

(٢) طول المنحني:

ل = ط نق هـ ÷ ١٨٠° = ط × ٢٠٠ × ٣٠° / ١٨٠° = ١٠٤.٧٢ متر

(٣) محطة م١ = محطة نقطة التقاطع ط – طول المماس ف
= ٢٢٥٦.٥٩ – ٥٣.٥٩ = ٢٢٠٣.٠٠ متر

(٤) محطة م٢ = محطة م١ + طول المنحني ل
= ٢٢٠٣.٠٠ + ١٠٤.٧٢ = ٢٣٠٧.٧٢ متر

(٥) نختار طول واحد مناسب للأوتار الجزئية الوسطي (و) بحيث يكون:

و : أقل من أو يساوي (نق / ٢٠) (١٠-١٤)

حيث أن نق/٢٠ = ٢٠٠/٢٠ = ١٠ أمتار

إذن نختار و = ١٠ أمتار

(٦) حساب محطات المنحني:

محطة النقطة الأولي علي المنحني (نقطة ١) = أول رقم لمضاعفات العشرة (التي هي قيمة و) بعد محطة م١

حيث أن م١ = ٢٢٠٣.٠٠ متر

إذن نقطة ١ = ٢٢١٠ متر

وبذلك فأن نقطة ٢ = ٢٢٢٠ متر

نقطة ٣ = ٢٢٣٠ متر .... وهكذا.

محطة النقطة الأخيرة علي المنحني = آخر رقم لمضاعفات العشرة (التي هي قيمة و) قبل محطة م٢

حيث أن م٢ = ٢٣٠٧.٧٢ متر

إذن النقطة الأخيرة = ٢٣٠٠ متر

بذلك فأن محطات نقاط المنحني بداية من نقطة م١ إلي نقطة م٢ ستكون:

٢٢٠٣.٠٠ ، ٢٢١٠ ، ٢٢٢٠ ، ٢٢٣٠٩ ، ٢٢٤٠ ، ٢٢٥٠ ، ٢٢٦٠ ، ٢٢٧٠ ، ٢٢٨٠ ، ٢٢٩٠ ، ٢٣٠٠ ، ٢٣٠٧.٧٢ متر

(٧) حساب أطوال الأوتار الجزئية:

طول الوتر الجزئي الأول:
و١ = محطة النقطة الأولي علي المنحني – محطة م١
= ٢٢١٠.٠٠ – ٢٢٠٣.٠٠ = ٧.٠٠ متر

طول الوتر الجزئي الأوسط = و = ١٠ متر

طول الوتر الجزئي الأخير = محطة م٢ – محطة الوصول الأخيرة علي المنحني
= ٢٣٠٧.٧٢ – ٢٣٠٠.٠٠ = ٧.٧٢ متر

عدد الأوتار الجزئية:
ن = (محطة النقطة الأخيرة – محطة النقطة الأولي) ÷ و (١٠-١٥)

= (٢٣٠٠ – ٢٢١٠) ÷ ١٠ = ٩ أوتار

عدد النقاط علي المنحني = عدد الأوتار الجزئية + ١
= ٩ +١ = ١- نقاط

(٨) حساب زوايا الانحراف الجزئية:

باستخدام المعادلة ١٠-١٣:
د بالدرجات = (٩٠° × و) ÷ (ط × نق)

زاوية الانحراف الأولي: د١= (٩٠° × و١) ÷ (ط × نق)
= (٩٠° × ٧) ÷ (ط × ٢٠٠) = ١٠" ٠٠' ١°

زاوية الانحراف الوسطي: د= (٩٠° × و) ÷ (ط × نق)
= (٩٠° × ١٠) ÷ (ط × ٢٠٠) = ٥٧" ٢٥' ١°

زاوية الانحراف الأخيرة: د٢= (٩٠° × و٢) ÷ (ط × نق)
= (٩٠° × ٧.٧٢) ÷ (ط × ٢٠٠) = ٢١" ٠٦' ١°

التحقيق الحسابي:

مجموع د١ + (ن×د) + د٢ = هـ /٢ (١٠-١٦)

مجموع د١ + (ن×د) + د٢ = ١٠" ٠٠' ١° + (٩ × ٥٧" ٢٥' ١° + ٢١" ٠٦' ١°)
= ٠٤" ٠٠' ١٥°

هـ / ٢ = ٣٠° / ٢ = ١٥°

الفرق = ٠٤" ٠٠' ١٥° - ٠٠" ٠٠' ١٥° = ٠٤"

وهو فرق بسيط نتيجة التقريب ، وبذلك فأن التحقيق الحسابي سليما.

نكون الجدول التالي لسهولة توقيع نقاط المنحني في الطبيعة حيث سيكون العمود الأخير في الجدول عبارة عن المجموع التراكمي لزوايا الانحراف الجزئية ، وهذا لتسهيل العمل بجهاز الثيودليت بحيث يتم تصفير الدائرة الأفقية (جعلها = صفر بالضبط) عند التوجيه علي النقطة ط ثم نبدأ في أخذ قراءات الدائرة عند هذه القيم لتوقيع نقاط المنحني.

نقطة المنحني	محطة النقطة	طول الوتر الجزئي (متر)	زاوية الانحراف الجزئية	زاوية الانحراف الكلية (قراءة الدائرة الأفقية)
١	٢٢١٠	٧.٠	١٠" ٠٠' ٠١°	١٠" ٠٠' ٠١°
٢	٢٢٢٠	١٠	٥٧" ٢٥' ٠١°	٠٧" ٢٦' ٠٢°
٣	٢٢٣٠	١٠	٥٧" ٢٥' ٠١°	٠٤" ٤٢' ٠٣°
٤	٢٢٤٠	١٠	٥٧" ٢٥' ٠١°	٠١" ١٨' ٠٥°
٥	٢٢٥٠	١٠	٥٧" ٢٥' ٠١°	٥٨" ٤٣' ٠٦°
٦	٢٢٦٠	١٠	٥٧" ٢٥' ٠١°	٥٥" ٠٩' ٠٨°
٧	٢٢٧٠	١٠	٥٧" ٢٥' ٠١°	٥٢" ٢٥' ٠٩°
٨	٢٢٨٠	١٠	٥٧" ٢٥' ٠١°	٤٩" ٠١' ١١°
٩	٢٢٩٠	١٠	٥٧" ٢٥' ٠١°	٤٦" ٢٧' ١٢°
١٠	٢٣٠٠	١٠	٥٧" ٢٥' ٠١°	٤٣" ٥٣' ١٣°
م٢	٢٣٠٧.٧٢	٧.٧٢	٢١" ٠٦' ٠١°	٠٤" ٠٠' ١٥°

١٠-٢-٢ توقيع المنحنيات الأفقية بجهاز المحطة الشاملة

يمكن توقيع المنحني بجهاز المحطة الشاملة بعدة طرق إلا أن أسهل الطرق هي طريقة زوايا الانحراف و الأطوال. يتم حساب قيم زوايا الانحراف كما في طريقة الثيودليت ، ثم يتم حساب أطوال الإضلاع من نقطة المحطة الشاملة حتى آخر نقطة تماس:

هـ ١ بالدقائق = ١٧١٨.٩ × ل ÷ نق (١٠-١٧)

طول الضلع رقم ١ = ل جا (١٨٠ – هـ ١) ÷ جا هـ ١ (١٠-١٨)

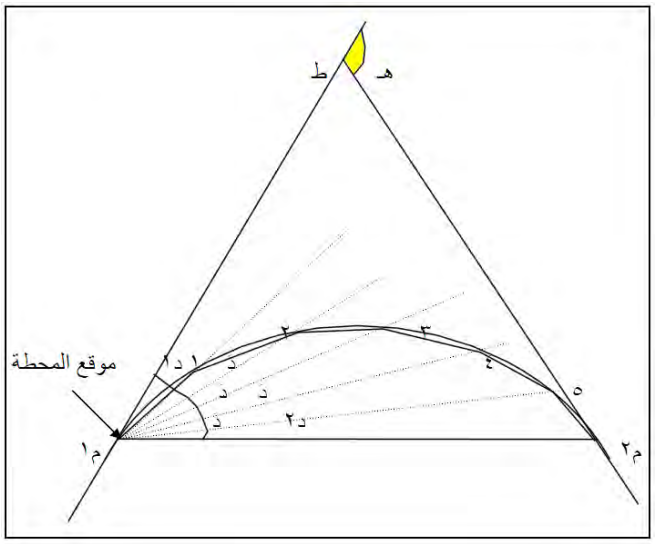
طول الضلع رقم ٢ = ل جا (١٨٠ – ٢ هـ ١) ÷ جا هـ ١ (١٠-١٩)

وهكذا.

ثم نكون الجدول اللازم للبيانات المطلوب توقيعها في الطبيعة.

يتكون العمل الحقلي من الخطوات التالية:
- نختار موقع جهاز المحطة الشاملة وغالبا يكون هو نقطة التماس الأولي أ.
- يتم توجيه خط النظر مع خط التماس الواصل من النقطة المحتلة (أ) ونقطة تقاطع المماسين ويتم تصفير الجهاز عندها.
- يتم التوجيه إلي النقطة المطلوب توقيعها بزاوية = هـ ١
- يتحرك المساح بالعاكس علي اتجاه خط النظر ونرصد المسافة بالمحطة الشاملة (من الجهاز إلي العاكس) فنحدد إن كان العاكس سيتحرك للأمام أم للخلف حتى يكون علي البعد المطلوب المسجل في الجدول.

– نكرر الخطوات السابقة لباقي نقاط المنحني المطلوب توقيعها.



شكل (١٠-٦) توقيع المنحني الدائري بجهاز المحطة الشاملة

مثال:

عين المقادير اللازمة لتخطيط منحني نصف قطره ٦٠٠ مترا بأوتاد متساوية كلا منها ٢٠ مترا علما بأن زاوية تقاطع المماسين تبلغ ٣٦" ٢٤' و تدرج نقطة تقاطع المماسين تساوي ٧٣.٧٧ طرحة شريط.

ف = نق × ظا (هـ/٢) = ٦٠٠ ظا (٣٦" ٢٤' /٢) = ١٣٠٨ متر
= ٢٠/١٣٠٨ = ٦.٥٤ طرحة شريط.

تدريج نقطة التماس الأولي = ٧٣.٨٨ – ٦.٥٤ = ٦٧.٣٤ طرحة شريط

طول الوتر الجزئي الأول = ٦٨ – ٦٧.٣٤ = ٠.٦٦ طرحة = ١٣.٢ متر

هـ ج = ١٧١٨.٩ × ١٣.٢ ÷ ٦٠٠ = ٣٧.٨١

هـ ١ = ١٧١٨.٩ × ٢٠ ÷ ٦٠٠ = ٥٧.٣٠

طول المنحني ق = ٠.٠١٧٤٥ × هـ × نق
= ٠.٠١٧٤٥ × ٣٦" ٢٤' × ٦٠٠ = ٢٥٧.٥٦ متر

طول الضلع رقم ١ = ٢٠ × جا (١٨٠ – ٣٧.٨١) ÷ جا ٥٧.٣٠ = ١٣.٢ متر

طول الضلع رقم ٢=٢٠ ×جا (١٨٠– ٣٧.٨١ + ٢×٥٧.٣٠)÷جا ٥٧.٣٠=٣٣.٢ متر

طول الضلع رقم ٣=٢٠ ×جا (١٨٠– ٣٧.٨١ + ٣×٥٧.٣٠)÷جا ٥٧.٣٠=٥٣.١٨ متر

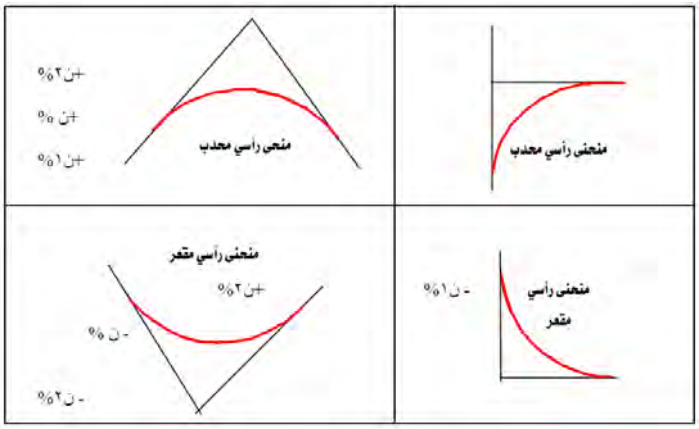
وهكذا حتى الضلع رقم ١٣.

طول الضلع الأخير = ٢٠ جا (١٨٠ – (هـ/٢)) ÷ جا هـ = ٢٥٥.٦٣ متر

النقطة	طول الوتر	زاوية الانحراف	طول الضلع من المحطة الشاملة للنقطة المطلوبة
١	٢٠	٥٠٠ '٣٧ "٤٨.٦	١٣.٢
٢	٢٠	٥٠١ '٣٥ "٦.٦	٢٣.٢
٣	٢٠	٥٠٢ '٣٢ "٢٤.٦	٥٣.١٨
٤	٢٠	٥٠٣ '٢٩ "٤٢.٦	٧٣.١٥
٥	٢٠	٥٠٤ '٢٧ "٠٦	٩٣.١٠
٦	٢٠	٥٠٥ '٢٤ "١٨.٦	١١٣.٠٣
٧	٢٠	٥٠٦ '٢١ "٣٦.٦	١٣٢.٩٣
٨	٢٠	٥٠٧ '١٨ "٥٤.٦	١٥٢.٧٩
٩	٢٠	٥٠٨ '١٦ "١٢.٦	١٧٢.٦٠
١٠	٢٠	٥٠٩ '١٣ "٣٠.٦	١٩٢.٣٧
١١	٢٠	٥١٠ '١٠ "٤٨.٠	٢١٢.٠٩
١٢	٢٠	٥١١ '٠٨ "٦.٦	٢٣١.٧٤
١٣	٢٠	٥١٢ '٠٥ "٢٤.٦	٢٥١.٣٣
١٤	٢٠	٥١٢ '١٨ "٠٠ = هـ / ٢	٢٥٥.٦٣

١٠-٣ المنحنيات الرأسية

تنقسم المنحنيات الرأسية إلي نوعين: محدبة و مقعرة. بصفة عامة يعتمد طول المنحني علي عدة عوامل مثل: معدل التغير في الانحدار بيم جزئي الطريق ، معدل السرعة علي الطريق ، طبوغرافيا الأرض ، درجة الطريق و نوعه ، مسافة الرؤية.



شكل (١٠-٧) أنواع المنحنيات الرأسية

الأجزاء الرئيسية للمنحني الرأسي:

- طول المنحني (ل) وهو الطول الأفقي بين نهايتي المنحني الرأسي.
- معدلا الانحدار (ن١ ، ن٢) كل ١٠٠ متر وتكتبا في صورة نسبة مئوية أو في صورة قيم معلومة لكل مسافة أفقية وبإشارة محددة ، وأحيانا يعبر عن معدلا الانحدار بزاوية فرق الانحدار بين الخطين المستقيمين.
- معدل التغير في الانحدار (م)
- بداية و نهاية المنحني الرأسي هـ ، و
- قمة المنحني ب

طول المنحني:

ل = (ن١ – ن٢) ÷ معدل التغير (م) × ١٠٠ (١٠-٢٠)

مع مراعاة إشارات الانحدار: موجبة لأعلي و سالبة لأسفل.

مثال:

يراد توصيل انحدار إلي أعلي قدره ٢.١% و انحدار إلي أسفل قيمته – ٠.٤% بمنحني رأسي بمعدل تغير في الانحدار قيمته ٠.١. فما طول هذا المنحني الرأسي؟

ل = [(ن١ – ن٢) ÷ معدل التغير (م)] × ١٠٠
= [(٢.١ – (-٠.٤)) ÷ ٠.١] × ١٠٠ = ٢٥٠٠ متر

معادلة القطع المكافئ لأي محورين متعامدين (س،ص) هي:

ص = أ س^{٢} + ب س + ج (١٠-٢١)

حيث:

أ = تفلطح المنحني فان كانت موجبه فأن المنحني مقعرا وان كانت سالبة فأن المنحني محدبا.

معدل تغير الانحدار:

م = د^{٢} ص ÷ د^{٢} س = ٢ أ = (ن١ – ن٢) ÷ ل (٩-٢٢)

الفرق بين منسوب نقطة علي المنحني الرأسي و منسوب النقطة المقابلة لها علي المماس = المقدار الثابت (أ) × مربع المسافة الأفقية للنقطة من نقطة التماس:

ص ي = أ س^{٢} ي
= ص هـ ((س ي)^{٢} ÷ (٠.٥ ل)^{٢})
= (س^{٢} ي (ن١ – ن٢) ÷ ٢ ل (١٠-٢٣)

ينصف المنحني الخط الرأسي الواصل بين نقطتي تقاطع المماسين و منتصف الوتر الواصل بين نقطتي التماس:

و ك = ٢ د ج (١٠-٢٤)

إذا كانت هـ نقطة الابتداء تعتبر كنقطة الأصل فأن المعامل ج في معادلة القطع (المعادلة ٩-٢١) سيساوي صفر:

معادلة القطع بالنسبة لنقطة التماس:

ص = أ س^{٢} + ب س (١٠-٢٥)

العلاقة بين ن١ ، ن٢ ، ل ، ص هـ هي:

ص هـ = (ن١ - ن٢) × (ل÷ ٨) (١٠-٢٦)

مثال:

منحني رأسي يصل بين انحدارين ن١ = - ١% ، ن٢ = + ١ متر لكل ٣٠٠ متر. فإذا كان منسوب المنحني عند منصف طوله يبلغ ١١٩.٣٥٠ متر ومنسوب نقطة تقاطع الانحدارين يساوي ١١٨.٩٥ متر. أحسب طول المنحني؟

ص هـ = - ١١٩.٣٥٠ + ١١٨.٩٥٠ = - ٠.٤٠ متر.

من المعادلة (٩-٢٦):

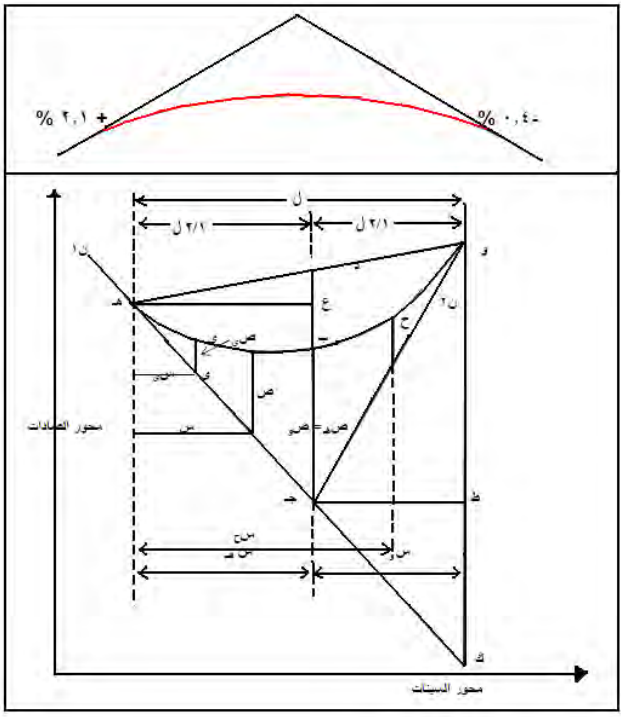
ص هـ = (ن١ - ن٢) × (ل÷ ٨)

أي أن:

ل = ٨ ص هـ ÷ (ن١ - ن٢)
= ٨ × (- ٠.٤) ÷ (-١ – ٣/١) (عبرنا عن ن٢ بقيمة ٣/١ بمئات الأمتار)
= (- ٣.٢٠) ÷ (-١.٣٣٣٣٣٣)
= ٢.٤ بمئات الأمتار
= ٢٤٠ متر

لحساب مناسيب نقاط المنحني (أنظر الشكل التالي):

١. نوجد منسوب أول وآخر نقطة (هـ ، و) علي المنحني بمعلومية معدل الانحدارين (ن١،ن٢) ومنسوب و
٢. نأتي بمنسوب د:
منسوب د = ٠.٥ (منسوب هـ + منسوب و)
٣. منسوب ب (علي المنحني) = ٠.٥ (منسوب د + منسوب نقطة التقاطع ج)
٤. المسافة ص هـ = منسوب ج – منسوب ب
٥. لحساب منسوب أي نقطة علي المنحني: ص هـ = أ س^{٢} هـ = أ (ل^{٢}/٤)
٦. يقسم المنحني إلي أقسام متساوية بحيث تكون نقطة ج نهاية أحد الأقسام وفي منتصف المنحني ، فإذا أعتبرنا هذه الأقسام هي وحدات الاحداثي السيني فيمكن الحصول علي المقدار الثابت أ.
٧. بالتعويض بالقيم المختلفة للمقدار (س) في المعادلة ص = أ س^{٢} نحصل علي قيم ص المقابلة ، وبطرح هذه القيم من مناسيب خط الانحدار نحصل علي مناسيب النقاط المختلفة علي المنحني الرأسي ، كما يمكن تحقيق هذه القيم بإيجاد منسوب نقطة هـ.



شكل (١٠-٨) أجزاء المنحني الرأسي

لتعيين أعلي نقطة أو أدني نقطة علي المنحني:

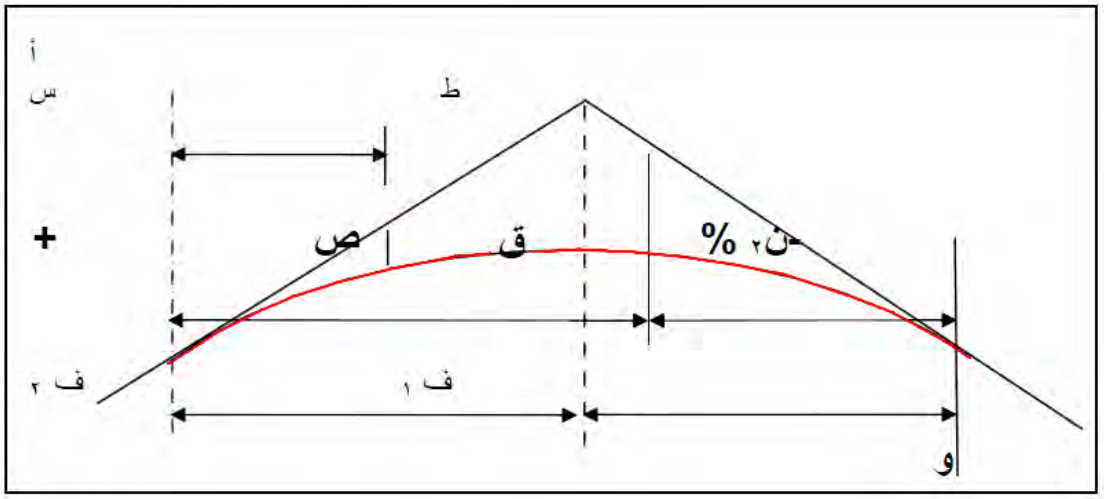
المسافة من أول المنحني حتى أعلي أو أدني نقطة:

ف = (ل ن١) ÷ (ن١ – ن٢) (١٠-٢٧)

المسافة من نهاية المنحني حتى أعلي أو أدني نقطة:

ف = (ل ن٢) ÷ (ن١ – ن٢) (١٠-٢٨)

منسوب قمة المنحني = منسوب ط (علي المماس) – ص ق (١٠-٢٩)



شكل (١٠-٩) إيجاد أعلي نقطة علي المنحني الرأسي

مثال:

لو كان انحدار المماسين لمنحني رأسي هما + ٣.٠٠% ، - ٢.٠٠% وطول المنحني ٤٠٠ متر ، أوجد أعلي نقطة علي هذا المنحني.

ف = (٤ × ٣) ÷ (٣ – (-٢)) = ٢.٤ بمئات الأمتار

ف١ = (٤ × ٢) ÷ (٣ – (-٢)) = ١.٦ بمئات الأمتار.

مثال لتخطيط المنحني الرأسي:

أوجد مناسيب النقاط المختلفة كل ٥٠ متر والواقعة علي المنحني الرأسي الذي يصل بين انحدارين +٣.٢% ، -٢.٥% علما بأن منسوب نقطة تقاطع الانحدارين هو ١٧١.٤٠ متر و طول المنحني ٤٠٠ متر.

منسوب نقطة التماس أ = ١٧١.٤٠ – ((١٠٠/٣.٢) × ٢٠٠) = ١٦٥.٠٠ متر

منسوب نقطة التماس ج = ١٧١.٤٠ – ((١٠٠/٢.٥) × ٢٠٠) = ١٦٦.٤٠ متر

نحسب مناسيب النقاط (من ١ إلي ٨) التي تقع علي المماس أ ب أو امتداده وعلي مسافات ملا منها يبلغ ٥٠ مترا ، أي النقاط التي تقع مباشرة فوق نقاط المنحني المراد إيجاد مناسبها.

منسوب أول نقطة علي المماس = ١٦٥.٠٠ + (١٠٠/٣.٢) × بعد النقطة عن أ
= ١٦٥.٠٠ + (١٠٠×٣.٢) × ٥٠ × عدد المحطات للنقطة
= ١٦٥.٠٠ + ١.٦ × عدد المحطات للنقطة

وهذا هو العمود ٢ في الجدول التالي.

منسوب نقطة د (منتصف الوتر أ ج) = ٠.٥ (١٦٥.٠٠ + ١٦٦.٤٠) = ١٦٥.٧٠ متر

منسوب نقطة هـ (منتصف المنحني) = ٠.٥ (١٧١.٤٠ + ١٦٥.٧٠) = ١٦٨.٥٥ متر

كما يمكن (للتحقيق) إيجاد منسوب هـ كالتالي:

ص هـ = ((٣.٢ – (-٢.٥) × ٤) / ٨ = ٢.٨٥ متر

منسوب هـ = ١٧١.٤٠ – ٢.٨٥ = ١٦٨.٥٥ متر

نحسب قيمة الثابت أ:

١٧١.٤٠ – ١٦٨.٥٥ = أ × (٤)^{٢}

وذلك باعتبار أم ل / ٢ = ٤ فترات كلا منها تساوي ٥٠ متر.

إذن: أ = ٠.١٧٨١

نحسب ص = أ س^{٢} للنقاط (العمود ٣ من الجدول التالي) وقد تم إعطاء كل إحداثي إشارة سالبة حيث أنها سوف تطرح من منسوب النقطة المقابلة علي المماس لكي تنتج مناسيب النقاط علي المنحني (العمود ٤).

التحقيق الحسابي:

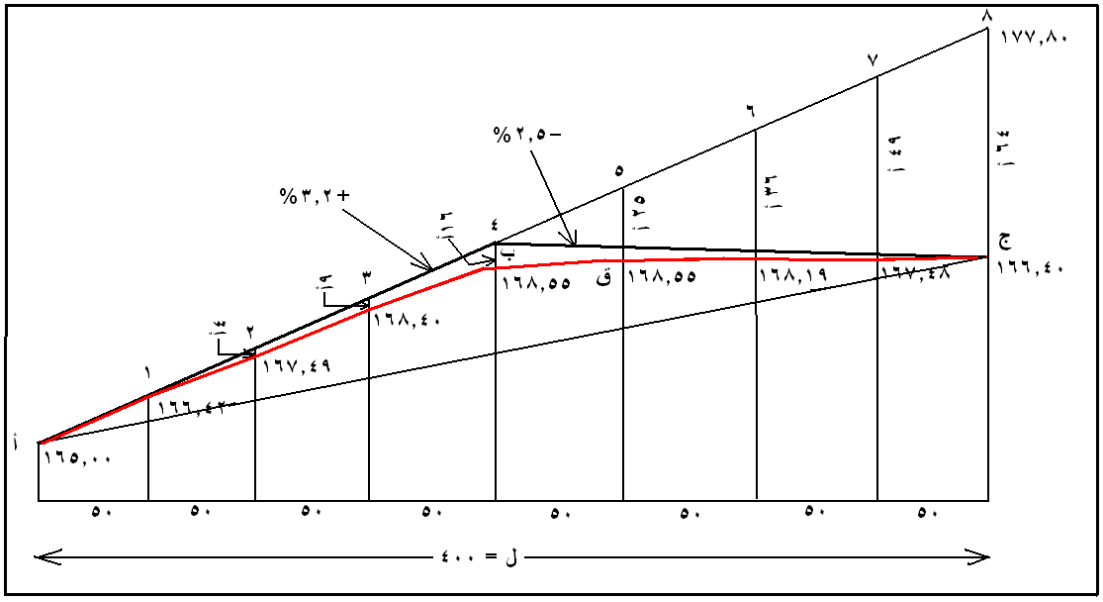
تحت الفروق الثانية (العمود ٥) يجب أن تكون متساوية ويجب مراعاة الإشارات عند إيجاد هذه الفروق.

المسافة الأفقية:

ف = ٤٠٠ × ٣.٢ / (٣.٢ + ٢.٥) = ٢٢٤.٦ متر

منسوب قمة المنحني:

ق = ١٦٥.٠٠ + ((١٠٠/٣.٢) × ٢٢٤.٦) – (٠.١٧٨١ × (٢٣٤.٦)^{٢} / (٥٠)^{٢})
= ١٦٥.٠٠ + ٧.١٩ – ٣.٥٩
= ١٦٨.٦٠ متر



شكل (١٠-١٠) مثال للمنحني الرأسي

نقطة	المسافة	المناسيب علي المماس	الاحداثي ص = أس^{٢}	المناسيب علي المنحني	فروق المناسيب	
					الأولي	الثانية
صفر	صفر	١٦٥.٠٠		١٦٥.٠٠		
		١.٦٠	٠.١٧٨ × (١)^{٢}		١.٤٣	
١	٥٠	١٦٦.٦٠ -	٠.١٧٨	١٦٦.٤٢		٠.٣٥
		١.٦٠	٠.١٧٨ × (٢)^{٢}		١.٠٧	
٢	١٠٠	١٦٨.٢٠ -	٠.٧١٢	١٦٧.٤٩		٠.٣٦
		١.٦٠	٠.١٧٨ × (٣)^{٢}		٠.٧١	
٣	١٥٠	١٦٩.٨٠ -	١.٦٠٢	١٦٨.٢٠		٠.٣٦
		١.٦٠	٠.١٧٨ × (٤)^{٢}		٠.٣٥	
٤	٢٠٠	١٧١.٤٠ -	٢.٨٤٨	١٦٨.٥٥		٠.٣٥
		١.٦٠	٠.١٧٨ × (٥)^{٢}		٠.٠٠	
٥	٢٥٠	١٧٣.٠٠ -	٤.٤٥١	١٦٨.٥٥		٠.٣٦
		١.٦٠	٠.١٧٨ × (٦)^{٢}		٠.٣٦	
٦	٣٠٠	١٧٤.٦٠ -	٦.٤٠٨	١٦٨.١٩		٠.٣٥
		١.٦٠	٠.١٧٨ × (٧)^{٢}		٠.٧١	
٧	٣٥٠	١٧٦.٢٠ -	٨.٧٢٢	١٦٧.٤٨		٠.٣٦
		١.٦٠	٠.١٧٨ × (٨)^{٢}		٠.٠٧	
٨	٤٠٠	١٧٧.٨٠ =	١١.٣٩٢	١٦٦.٤١		

الباب الثالث

المساحة الجيوديسية و النظام العالمى لتحديد المواقع

Geodetic Surveying and GPS

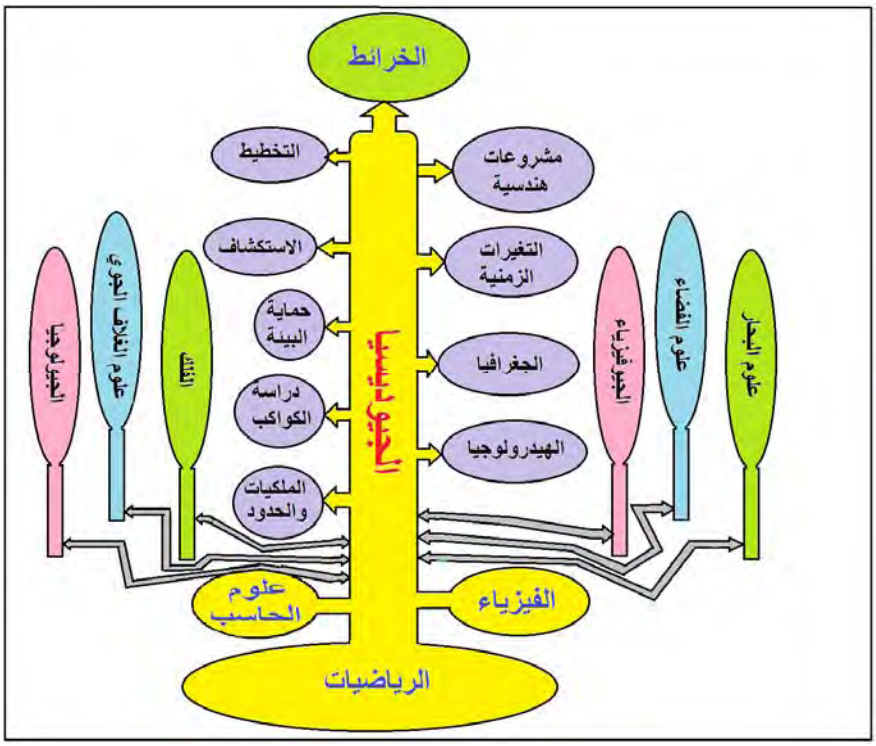
الفصل الحادى عشر

علم الجيوديسيا

كلمة الجيوديسيا Geodesy هي كلمة لاتينية مكونة من مقطعين: جيو Geo بمعني الأرض و ديسيا Desy بمعني القياس ورسم الخرائط، وبالتالي فأن الترجمة الحرفية لمصطلح "جيوديسيا" أنه علم القياس ورسم الخرائط لسطح الأرض.

مازال هذا التعريف البسيط ساريا حتى الآن مع أن الجيوديسيا أصبحت تتعلق بعدة أنواع من القياسات، فحيث أن سطح الأرض يتكون من الماء و اليابسة فأن الجيوديسيا تهتم بالقياس علي سطح الأرض اليابسة وأيضا بالقياس في أعماق البحار و المحيطات. أيضا الأرض في حد ذاتها كوكب متحرك في إطار المجموعة الشمسية، مما ينتج عن حركتها قوي جاذبية بينها و بين الكواكب الأخرى وهذه القوي تؤثر في القياسات علي الأرض مما يستلزم أن يمتد علم الجيوديسيا ليدرس أيضا قوة الجاذبية و تأثيراتها. بل أن الجيوديسيا – في السنوات الأخيرة – أصبحت تهتم أيضا بالقياس علي أسطح الأجرام السماوية الأخرى مثل القمر ليضاف إليها فرع جديد يسمي جيوديسيا الأجرام السماوية. مع انطلاق عصر الأقمار الصناعية في سبعينات القرن العشرين الميلادي واستخدامها في القياسات الجيوديسية فقد نتج عن ذلك فرع آخر من فروع الجيوديسيا وهو جيوديسيا الأقمار الصناعية.

يصنف علم الجيوديسيا في قائمة علوم الأرض Geo-Sciences كما أنه يصنف أيضا في قائمة العلوم الهندسية لتطبيقاته المتعددة في أعمال الهندسة المدنية و إنشاء المشروعات. ويرتبط علم الجيوديسيا ارتباطا وثيقا بعدد كبير من العلوم الأخرى كما هو موضح في الشكل التالي.



شكل (١١-١) العلاقة بين علم الجيوديسيا والعلوم الأخرى

١١-١ الجيوديسيا و المساحة

يتساءل الكثيرون عن العلاقة بين علم المساحة و علم الجيوديسيا، فكلاهما في تعريفة البسيط هو علم القياس وإنتاج الخرائط علي سطح الأرض. يري البعض أن المساحة هي جزء أو فرع من فروع علم الجيوديسيا. فعلم الجيوديسيا ينظر إلي كوكب الأرض بكامله أو علي الأقل لأجزاء كبيرة منه (قارة أو دولة) ويضع القوانين الرياضية و المعادلات التي تعتمد علي القياس علي الشكل الكامل أو الحقيقي لهذه الأرض. بينما علم المساحة يتعامل – غالبا – مع أجزاء صغيرة من الأرض بحيث من الممكن منطقيا أن نري هذا الجزء البسيط كأنه مستوي وليس كوكبا مجسما وبالتالي يتم تبسيط المعادلات الرياضية و طرق الحساب. ومن هنا يمكننا القول أن المساحة هي تبسيط لطرق القياس في جزء صغير من الأرض بدلا من الطرق و النظريات الجيوديسية التي تتعامل مع مجسم الأرض كله. بينما يري البعض الآخر أن علم المساحة (القياس في مساحة صغيرة من الأرض) قد عرفته البشرية أولا ثم تلاه ظهور علم الجيوديسيا لاحقا (القياس في مساحة كبيرة من الأرض) حيث يمكن القول أن المساحة الجيوديسية هي أحد أفرع علم المساحة. وكلا الرأيين جدير بالاحترام طالما كانت الفروق النظرية و الرياضية واضحة عند تطبيق كلا من المساحة و الجيوديسيا.

قديما كانت الفروق واضحة بين أجهزة الرصد المساحية و أجهزة الرصد الجيوديسية. فعلي سبي المثال كانت هناك أجهزة الثيودليت (أجهزة قياس الزوايا) المخصصة للعمل المساحي لعدة كيلومترات وأجهزة ثيودليت أخري مخصصة للعمل الجيوديسي الذي يصل مداه لعدة عشرات من الكيلومترات. حديثا زاد انتشار تطبيقات التقنيات التي تعتمد علي الأقمار الصناعية في القياس علي سطح الأرض وخاصة تقنية النظام العالمي لتحديد المواقع المعروف باسم الجي بي أس. هذه التقنيات (أو الأجهزة) تستطيع القياس علي سطح الأرض لمسافات صغيرة جدا (عدة أمتار) أو لمسافات كبيرة جدا (عدة آلاف من الكيلومترات)، أي أنها تصلح للعمل المساحي و للعمل الجيوديسي أيضا. من هنا أصبح هناك كثير من المستخدمين يتعاملون مع هذه التقنيات باعتبارها تقنيات مساحية مع أنهم في أحيان كثيرة يقومون بقياسات جيوديسية دون أن يدروا ذلك! الفرق بين القياسات المساحية و القياسات الجيوديسية يكون في مساحة منطقة الدراسة، فان كان المنطقة صغيرة (أقل من ٥٠ كيلومتر مربع) فيكون الافتراض الأساسي للمساحة مازال منطقيا ومن الممكن أن نعتبر أننا نقيس علي سطح مستوي. أما إن كانت منطقة الدراسة أو المشروع أكبر من هذه القيمة فنحن ننتقل من علم المساحة و نظرياته و معادلاته إلي علم الجيوديسيا و نظرياته و معادلاته. إن لم يكن المستخدم مدركا لهذه الحقيقية فسيقع في مشاكل تقنية تؤثر بشدة علي النتائج النهائية للمشروع (القياسات و الخرائط). من هنا أصبح لزاما علي كل مساح أو مهندس مساحة (خاصة من يتعامل مع أجهزة الرصد بالأقمار الصناعية مثل تقنية الجي بي أس) أن يعرف و يدرس أساسيات ونظريات علم الجيوديسيا حتى يستطيع أن يصل للدقة المطلوبة لمشروعه.

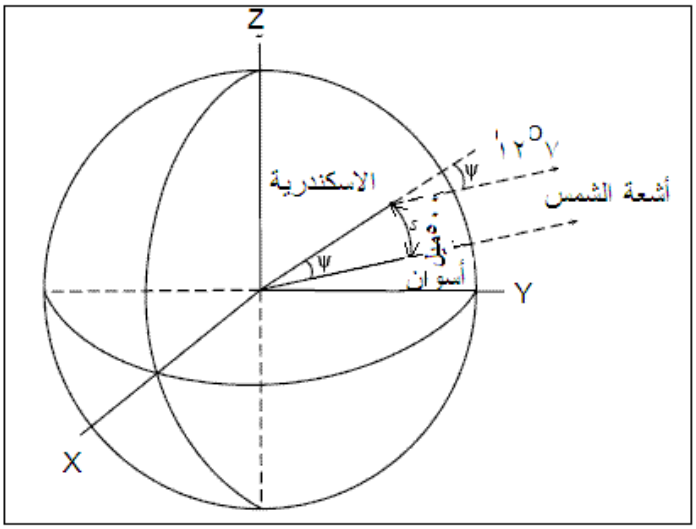
أيضا فأن دراسة أنواع الارتفاعات يعد من أهم مبادئ الجيوديسيا التي يجب علي مهندس أو أخصائي المساحة أن يلم بها. فعلي سبيل المثال فأن تقنية الجي بي أس تعطي نوع من الارتفاعات يسمي الارتفاعات الجيوديسية أي قياس ارتفاع النقطة المرصودة عن السطح الرياضي الذي يمثل كوكب الأرض. بينما في المساحة التقليدية والمشروعات المدنية والخرائط الطبوغرافية فأننا نتعامل مع المنسوب وهو ارتفاع النقطة المرصودة عن مستوي سطح البحر. أي أن هناك نوعين مختلفين من الارتفاعات، وبالتالي يجب أن يعرف مهندس المساحة هذه الحقيقية ويعرف أسس و طرق التحويل بينهما. فان لم يعرف ذلك فأنه سيعتمد الارتفاع الناتج من تقنية الجي بي أس كأنه هو المنسوب مما ينتج عنه أخطاء قد تصل إلي عدة أمتار.

١١-٢ تاريخ علم الجيوديسيا

منذ أن خلق الله سبحانه و تعالي الإنسان وأنزله إلي الأرض كان التنقل من مكان إلي آخر والتعرف علي مواقع جديدة غريزة داخل النفس البشرية ، ومن هنا بدأت حاجة البشر لوسائل تمكنهم من السفر و الترحال بأمان دون أن يتيهوا في الصحراء و البيئة المحيطة. تمكن الإنسان في البداية أن يتخذ بعض الأماكن و الأجسام الأرضية الخاصة – مثل الجبال – كعلامات تمكنه من معرفة طريقه بالإضافة إلي مساعدة نهارية من الشمس و الظل ، وبالتالي أستطاع أن يسافر لعدة كيلومترات ويعود لموقعه الأصلي مرة أخري. ومن ذلك الوقت ظهر في القاموس البشري مصطلح جديد ألا و هو الملاحة Navigation وهي العملية التي بواسطتها يتنقل الإنسان بين موقعين والتي تساعده في معرفة موقعه في أي وقت. وفي المرحلة الثانية من المعرفة البشرية بدأ الاعتماد علي النجوم كعلامات مرجعية تمكن الإنسان من معرفة موقعه و اتجاهه أثناء السفر ليلا ، ومن ثم بدأ علم الفلك Astronomy . وعرفت الحضارات القديمة إقامة الفنارات Lighthouses منذ حوالي ألفي عام – و أشهرهم فنار الإسكندرية في مصر و فنار جزيرة رودس اليونانية - كعلامات ملاحية تعكس الضوء سواء ضوء الشمس نهارا أو ضوء مصدر آخر ليلا لإرشاد السفن المبحرة في البحار. لاحقا بدأ الإنسان في تسجيل ملاحظاته الملاحية والطرق التي يسير فيها ومواقع تحركاته المتعددة في البيئة المحيطة به علي قطع من الورق (ورق البردي في الحضارة المصرية القديمة كمثال) لتظهر للوجود "الخرائط" Maps. وبالتزامن مع ظهور الخرائط بدأ ظهور علم المساحة Surveying وهو علم تحديد المواقع – بأبعاد ثلاثة – للمعالم الطبيعية و البشرية علي أو تحت سطح الأرض. وتعد مصر أول من استخدم علم المساحة بصورة موسعة منذ حوالي ١٤٠٠ عام قبل الميلاد وذلك في تحديد الملكيات الزراعية وحساب الضرائب المستحقة عليها. وفي المرحلة العلمية التالية تطور علم جديد ليكون أكثر تخصصا وتعمقا في عملية تحديد المواقع ألا و هو علم الجيوديسيا (أو الجيوديزيا).

بدأت المعرفة البشرية لتكوين فكرة عن شكل كوكب الأرض بأن الأرض عبارة عن قرص يطفو فوق سطح الماء. ومن العلماء والفلاسفة الأوائل الذين قالوا بذلك كلا من فيثاغورث (٥٨٠-٥٠٠ قبل الميلاد) و أرسطو (٣٨٤-٣٢٢ قبل الميلاد)، واستمرت هذه النظرية سارية لعدة قرون.

من أولي بدايات التفكير الإنساني العلمي و التجريبي في معرفة شكل و حجم الأرض تلك التجربة الرائدة التي قام بها العالم الإغريقي أراتوستين Eratosthenes (٢٧٦-١٩٦ ق.م) والذي كان يشغل منصب أمين مكتبة الإسكندرية التي كانت تعتبر أرقي معهد علمي في العالم في ذلك الوقت. لاحظ أراتوستين أن الشمس في يوم ٢١ يونيو (حزيران) من كل عام تكون مرئية في مياه بئر بمدينة أسوان ، أي أنها تكون عمودية تماما في هذا الموقع ، وبعد ذلك أفترض أن الإسكندرية تقع إلي الشمال مباشرة من أسوان. ثم قام بقياس زاوية ميل أشعة الشمس عند الإسكندرية ووجدها ٧.٢ درجة ، وقدر أن هذا الجزء – بين الإسكندرية و أسوان – يعادل ١/٥٠ من الدائرة التي تمثل الأرض (شكل ١-٢). وبعد ذلك قام بقياس المسافة بين كلا المدينتين فكانت حوالي ٥٠٠٠ استاديا (وحدة قياس المسافات في ذلك الوقت) أي ما يعادل ٥٠٠ ميل أو ٨٠٠ كيلومتر، ومن ثم تمكن هذا العالم من حساب محيط الأرض (٥٠ ضعف المسافة المقاسة بين أسوان و الإسكندرية) ليكون في تقديره حوالي ٢٥٠٠٠ ميلا. ومن المذهل أن نعرف أن هذه التجربة الجيوديسية في ذلك الزمن البعيد و باستخدام آلات بدائية لم تكن بعيدة إلا قليلا عن طول محيط الأرض الذي نعرفه اليوم وهو ٢٤٩٠١ ميلا.



شكل (١١-٢) تجربة العالم أراتوستين لتقدير محيط الأرض

استمرت نظرية أن الأرض كروية الشكل (لها نصف قطر ثابت في جميع الاتجاهات) عشرات القرون حتى القرن السابع عشر الميلادي حينما طور اسحق نيوتن (١٦٤٣-١٧٢٧) نظرية تفلطح شكل الأرض، أي أن الأرض شبه كروية مفلطحة قليلا عن القطبين الشمالي و الجنوبي وليست كروية تماما.

١١-٣ تطبيقات علم الجيوديسيا

يصنف بعض العلماء علم المساحة على أنه التطبيق العملي لعلم الجيوديسيا لتحديد المواقع (الإحداثيات) اللازمة لإنشاء الخرائط. إلا أن دور الجيوديسيا في التطبيقات الهندسية لا ينحصر فقط في إنشاء الخرائط وخاصة في العقود الماضية حيث تستخدم الجيوديسيا في العديد من المجالات منها:

- إنشاء الخرائط: أول الأعمال المطلوبة لإنشاء الخرائط هو إقامة شبكة مثلثات جيوديسية مكونة من عدد من المحطات الجيوديسية وتحديد إحداثياتها الأفقية والرأسية.
- المساحة الجوية والاستشعار عن بعد: تستخدم الطرق الجيوديسية في تحديد إحداثيات نقط التحكم الأساسية التي تلعب الدور الأساسي في الحصول على خرائط وبيانات مساحية من تقنيات التصوير الجوى والأقمار الصناعية المخصصة لدراسة الموارد الطبيعية.
- المشروعات الهندسية: عند إقامة أية مشروعات هندسية (مثل الطرق ، الكباري ، السدود ، الترع ، المصانع ... الخ) فانه من الضروري تحديد مواقعها بدقة عن طريق تحديد إحداثيات العناصر المختلفة للمشروع. وتستخدم هذه الإحداثيات في التخطيط للمشروع وكذلك في متابعة التنفيذ طوال مراحل المشروع.
- نظم المعلومات الجغرافية: الإحداثيات الجيوديسية هي العامل المشترك الأساسي الذي يمكن من خلاله الربط بين المصادر المختلفة للمعلومات لإنشاء نظم المعلومات الجغرافية.
- الملاحة الجوية والبحرية: تعتمد الطائرات والسفن على الإحداثيات الجيوديسية للوصول إلى الهدف طبقا لخط السير المحدد.

- التخطيط العمراني : تساعد الجيوديسيا في تعيين الإحداثيات اللازمة لأعمال التخطيط العمراني والبحث عن المصادر والثروات الطبيعية ٠
- تعيين الحدود: تلعب الجيوديسيا الدور الأساسي في تحديد وتوثيق إحداثيات العلامات الحدودية بين الدول أو الحدود الإدارية بين المحافظات داخل الدولة٠
- دراسة تحركات القشرة الأرضية: تستخدم الأرصاد الجيوديسية المتكررة في الحصول على قيم دقيقة لتحركات القشرة الأرضية في المناطق الغير مستقرة ديناميكيا (مناطق الفوالق تحت سطح الأرض المسببة للزلازل) وخاصة حول المنشئات الهندسية الضخمة كالسدود والخزانات٠
- علوم البيئة : تلعب الجيوديسيا دورا مؤثرا في دراسة المتغيرات البيئية عن طريق تحديد إحداثيات المناطق ذات التغير المستمر في التركيب البيئى٠
- علوم الفضاء: تحديد إحداثيات محطات إطلاق المركبات الفضائية وكذلك إحداثيات الأقمار الصناعية في الفضاء طبقا لمدارها المحدد٠
- دراسة البحار: تستخدم الأرصاد الجيوديسية في تحديد معدلات ارتفاع سطح البحار لتجنب غرق المناطق الساحلية ٠
- الجيولوجيا: يعتمد علم الجيولوجيا على الإحداثيات الجيوديسية لإعداد الخرائط الجيولوجية٠

١١-٤ أقسام الجيوديسيا

توجد عدة تقسيمات أو تصنيفات لأفرع علم الجيوديسيا بناءا علي وجهة النظر في التقسيم ذاته.

فإذا قسمنا الجيوديسيا بناءا علي منطقة العمل أو حدود منطقة القياسات الجيوديسية فنجد ثلاثة أقسام:

(أ) الجيوديسيا العالمية Global Geodesy

الفرع المسئول عن تحديد شكل و حجم ومجال جاذبية الأرض.

(ب) المساحة الجيوديسية الوطنية National Geodetic Surveys

الفرع المسئول عن تحديد شكل ومجال جاذبية دولة معينة، وذلك عن طريق إنشاء شبكات من العلامات (الثوابت) الأرضية المعلومة الإحداثيات و قيمة الجاذبية الأرضية لها. وفي هذا القسم من أقسام علم الجيوديسيا يجب أخذ كروية الأرض في الاعتبار و مالها من تأثيرات علي القياسات والأرصاد.

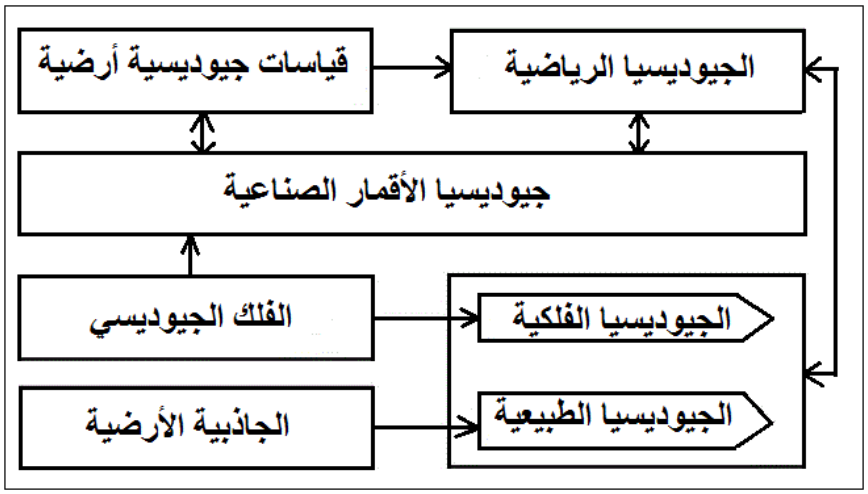
(ج) المساحة المستوية Plan Surveying

الفرع المسئول عن القياسات التفصيلية اللازمة للرفع التفصيلي و الرفع الطبوغرافي و الأعمال الهندسية لمساحة صغيرة من الأرض.

العلاقة قوية بين هذه الفروع الثلاثة لعلم الجيوديسيا فالجيوديسيا العالمية تحدد عناصر شكل و مجال جاذبية الأرض ككل، ومن ثم تبدأ الجيوديسيا الوطنية في اعتماد هذه القيم في عمل

شبكات جيوديسية (ثوابت) لكل دولة ثم تبدأ المساحة المستوية في الاعتماد علي هذه الثوابت لقياس تفاصيل معالم سطح الأرض لإنتاج الخرائط.

أما من حيث طبيعة العمل (القياسات) الجيوديسية ذاتها فيمكن تقسيم علم الجيوديسيا إلي خمسة أقسام رئيسية وان كان لا توجد حدود فاصلة أو قطعية بين كل قسم و آخر (شكل ١-٣):



شكل (١١-٣) أقسام الجيوديسيا الرئيسية

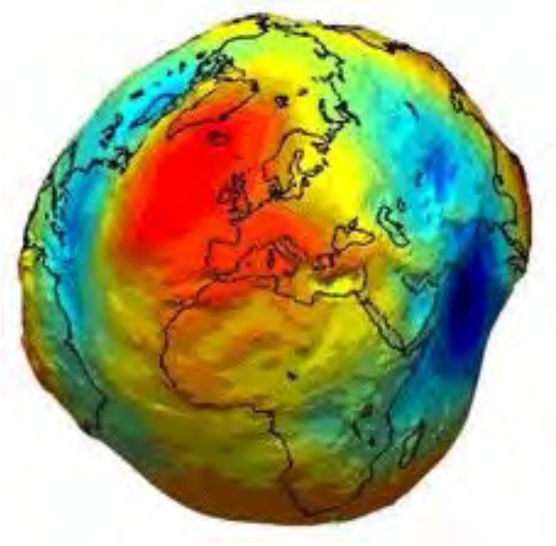
١- الجيوديسيا الأرضية أو الهندسية Terrestrial Geodesy

يتم فيها إجراء القياسات الجيوديسية (الزوايا الأفقية و الرأسية والمسافات و فروق المناسيب) بهدف إنشاء شبكات الثوابت الأرضية وحساب الإحداثيات ثلاثية الأبعاد (س،ص،ع) لكل نقطة منها لإنشاء الهيكل الجيوديسي للدولة الذي ستعتمد عليه جميع أعمال المساحة و إنشاء الخرائط.

شكل (١١-٤) جهاز الثيودليت الشهير Wild T2 للقياسات الأرضية

٢- الجيوديسيا الطبيعية أو الفيزيقية Physical Geodesy

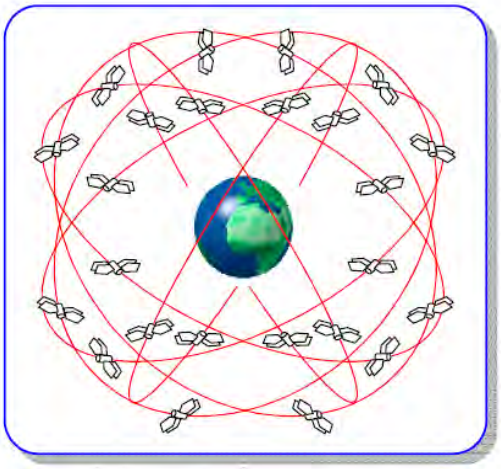
يتم فيها قياس و تحديد مجال الجاذبية الأرضية ومن ثم تحديد تأثيرها علي القياسات الجيوديسية وأيضا تحديد الشكل الحقيقي للأرض (الجيويد) وعلاقته بالشكل الهندسي المستخدم في إنشاء الخرائط (الاليبسويد). تتم هذه العمليات إما باستخدام أرصاد الجاذبية الأرضية أو باستخدام الأرصاد الفلكية أو حديثا باستخدام القياسات علي الأقمار الصناعية.



شكل (١١-٥) الشكل الحقيقي للأرض (الجيويد)

٣- جيوديسيا الأقمار الصناعية Satellite Geodesy

تشمل الأرصاد و القياسات الجيوديسية المعتمدة علي الأقمار الصناعية التي بدأت في الظهور منذ عام ١٩٥٧م. تستخدم تطبيقات جيوديسيا الأقمار الصناعية في الجيوديسيا الهندسية وأيضا الجيوديسيا الطبيعية و الفلكية.



شكل (١١-٦) استخدام الأقمار الصناعية في تحديد المواقع

٤- الجيوديسيا الفلكية Astronomical Geodesy

يتم فيها قياس الإحداثيات الفلكية (خط الطول الفلكي و دائرة العرض الفلكية) لنقاط شبكات الثوابت الأرضية بالإضافة للانحراف الفلكي لخطوط شبكات الثوابت الأرضية للدولة من خلال الرصد علي النجوم. يعد هذا النوع من أقسام الجيوديسيا من أقدم الأنواع الجيوديسية وكان مهم جدا في الماضي لتوجيه الشبكات الجيوديسية وتحديد موقعها بدقة علي سطح الأرض، وان كان الاعتماد علي الأرصاد الفلكية قد قل كثيرا في الوقت الراهن بعد انتشار تطبيقات الرصد علي الأقمار الصناعية.

شكل (١١-٧) استخدام الرصد الفلكي في تحديد المواقع

٥- الجيوديسيا الرياضية Mathematical Geodesy

فرع الجيوديسيا الذي يهتم بالنظريات الرياضية و المعادلات و طرق الحسابات وتحليل الأرصاد المستخدمة في كافة أفرع الجيوديسيا الأخرى.

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_K \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & & & G_1 \\ & X_2 & & G_2 \\ & & \ddots & \vdots \\ & & X_K & G_K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_K \\ c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_K \end{bmatrix}$$

شكل (١١-٨) نموذج لمعادلات الجيوديسيا الرياضية

حديثا ظهرت مصطلحات أخري في الجيوديسيا مثل الجيوديسيا المتكاملة Intenerated Geodesy حيث يتم تطبيق عدة أقسام من الأقسام التقليدية لعلم الجيوديسيا في إطار واحد متكامل. أيضا يري البعض استبدال مسمي جيوديسيا الأقمار الصناعية بمسمي الجيوديسيا الفضائية Spatial Geodesy حيث لم تعد الأرصاد الجيوديسية قاصرة فقط علي الأقمار الصناعية بل امتدت إلي الرصد علي القمر الطبيعي و الكواكب الأخرى بل أيضا الرصد علي الأجرام السماوية خارج المجموعة الشمسية.

شكل (١١-٩) نموذج لهوائي استقبال إشارات الأجرام السماوية

أما الأرصاد أو القياسات الجيوديسية ذاتها فيمكن أيضا تقسيمها إلي أربعة أنواع طبقا للهدف منها:

أ- الأرصاد الجيوديسية الأفقية أو ثنائية الأبعاد Horizontal 2D

قياسات الزوايا الأفقية والرأسية والمسافات و الانحرافات التي تهدف إلي تحديد الموقع الأفقي (خط الطول و دائرة العرض) لنقاط الثوابت الأرضية. قديما ومع استخدام الأجهزة المساحية التقليدية (مثل جهاز الثيودليت) بإمكانياتها البسيطة كانت هذه النقاط تقام علي رؤوس الجبال و المرتفعات ليسهل رصد الزوايا علي مسافات كبيرة ولم يكن من السهل رصد فروق المناسيب بين هذه النقاط المرتفعة، ومن هنا كانت شبكات الثوابت الجيوديسية شبكات أفقية فقط Two-Dimensional or 2D منفصلة عن الشبكات الجيوديسية الرأسية.

ب- الأرصاد الجيوديسية الرأسية أو أحادية البعد Vertical 1D

قياسات فروق المناسيب بين مجموعة من النقاط التي تحدد البعد الثالث (المنسوب) لشبكة جيوديسية تغطي الدولة One-Dimensional or 1D. أي أن الشبكة الجيوديسية الرأسية (شبكة الروبيرات) كانت منفصلة عن الشبكة الجيوديسية الأفقية.

ج- الأرصاد الجيوديسية ثلاثية الأبعاد 3D

مع دخول عصر جيوديسيا الأقمار الصناعية أصبح من الممكن تحديد الإحداثيات ثلاثية الأبعاد (خط الطول و دائرة العرض و الارتفاع) Three-Dimensional or 3Dمجموعة من النقاط التي تكون شبكة جيوديسية ثلاثية الأبعاد تغطي الدولة.

د- الأرصاد الجيوديسية رباعية الأبعاد (الجيوديسيا الديناميكية Dynamic 4D Geodesy)

حيث أن مجال جاذبية الأرض غير ثابت وأيضا بسبب حركة الصفائح الجيولوجية التي يتكون منها كوكب الأرض فأن إحداثيات أي نقطة لن تكون ثابتة مع مرور الزمن. تهتم الجيوديسيا الديناميكية برصد ودراسة التغير في الإحداثيات ثلاثية الأبعاد مع مرور الزمن (الذي يعد البعد الرابع) بحيث يتم تعريف إحداثيات أي نقطة جيوديسية (س،ص،ع) عند لحظة زمنية معينة وليست كإحداثيات مطلقة ثابتة Four-Dimensional or 4D.

الفصل الثاني عشر

شكل الأرض والمراجع الجيوديسية ونظم الإحداثيات

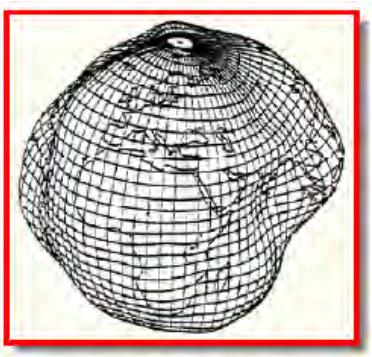
١٢-١ مقدمة

إن تحديد المواقع علي سطح الأرض يعني بداية أن نعرف ما هو الشكل الدقيق لهذا الكوكب الذي نعيش فوقه ، و ما هو المرجع الذي يمكننا أن نفترض أنه الأنسب لتمثيل الأرض رياضيا و خرائطيا. كما أن تحديد الموقع يكون من خلال قيم رياضية تعبر عنه وهي القيم التي نطلق عليها مصطلح "الإحداثيات Coordinates" علي اختلاف أنواعها و نظمها. لذلك يجب علي دارس الجيوديسيا أن يلم بأساسيات هذه الموضوعات الثلاثة ، وهو ما سنقوم بعرضه في هذا الفصل.

١٢-٢ شكل الأرض

في بدايات المعرفة البشرية ظن الإنسان أن الأرض هي قرص صلب يطفو فوق سطح الماء ، إلي أن تطور التفكير العلمي للبشر قليلا وجاء العالم اليوناني فيثاغورث Pythagoras في القرن السادس قبل الميلاد وافترض أن الأرض كروية الشكل. وكانت أولي محاولات العلماء لتقدير حجم أو محيط هذه الكرة هي تجربة العالم الإغريقي أراتوستين التي سبق الإشارة إليها في الفصل الأول. وفي القرنين الخامس عشر و السادس عشر أيد كلا من الرحالة كولومبوس Columbus و ماجلان Magellan فكرة كروية الأرض من خلال رحلاتهما الشهيرة بالدوران حول الأرض. في عام ١٦٨٧ طور العالم الشهير نيوتن Newtown عدة مبادئ نظرية علمية وكان أهمها: أن الشكل المتوازن لكتلة مائعة متجانسة خاضعة لقوانين الجذب و تدور حول محورها ليس هو شكل الكرة كاملة الاستدارة لكنه شكل مفلطح قليلا باتجاه القطبين. وفي عام ١٧٣٥ قامت أكاديمية العلوم الفرنسية بتنظيم بعثتين لإجراء القياسات اللازمة للتأكد من هذه الفرضية وأثبتت النتائج فعلا أن الأرض مفلطحة وليست كروية الشكل تماما.

إننا نعيش علي سطح كوكب الأرض وعندما نريد أن نحدد أي موقع علي الأرض فنحن بحاجة إلي أن نقوم بتعريف هذا السطح – شكله و حجمه – لكي يمكننا من معرفة في أي مكان نحن نقع بالضبط. إن شكل السطح الطبيعي للأرض كما خلقه الله تعالي بما يضمه من قارات و محيطات و جبال و أودية و بحار ليس شكلا سهلا وليس منتظما لكي يمكن التعبير عنه بسهولة.



شكل (١٢-١) الأرض غير منتظمة الشكل

بحث العلماء عن شكل افتراضي آخر للأرض يكون أقل تعقيدا واهتدوا إلي فكرة أنه طالما أن مساحة الماء في المحيطات و البحار تشكل حوالي ٧٠% من مساحة الأرض فأن شكل الأرض يكاد يكون هو الشكل المتوسط لسطح الماء (إذا أهملنا حركة سطح الماء بسبب التيارات البحرية و المد و الجزر) Mean Sea Level والمعروف اختصارا بأحرف MSL، وإذا قمنا بمد هذا السطح تحت اليابسة لنحصل علي شكل متكامل فأن هذا الشكل سيكون أقرب ما يكون للشكل الحقيقي للأرض. وتم إطلاق اسم الجيويد أو الجيوئيد Geoid علي هذا الشكل الافتراضي [يجب ملاحظة أن هناك فرق في حدود متر واحد فقط بين كلا من MSL و الجيويد إلا أنه في معظم التطبيقات الهندسية تتغاضي عن هذا الفرق و نعتبر أن كلا الشكلين أو المصطلحين يشيرا لنفس الجسم]. ولكن طبقا لمبدأ نيوتن السابق فأن شكل هذا الجيويد لن يكون منتظما لان سطح الجيويد يتعامد مع اتجاه قوة الجاذبية الأرضية وأيضا يخضع لقوة الطرد المركزية الناتجة عن دوران الأرض حول محورها ، وكلا القوتين تختلفان من مكان لآخر علي سطح الأرض بسبب عدم توزيع الكثافة بشكل منتظم (يختلف سمك القشرة الأرضية من ٦ إلي ٦- كيلومتر) . وبذلك نخلص إلي أن الجيويد هو الشكل الحقيقي للأرض إلا أنه شكل معقد أيضا و يصعب تمثيله بمعادلات رياضية تمكننا من رسم الخرائط و تحديد المواقع عليه.

شكل (١٢-٢) الجيويد: الشكل الحقيقي للأرض

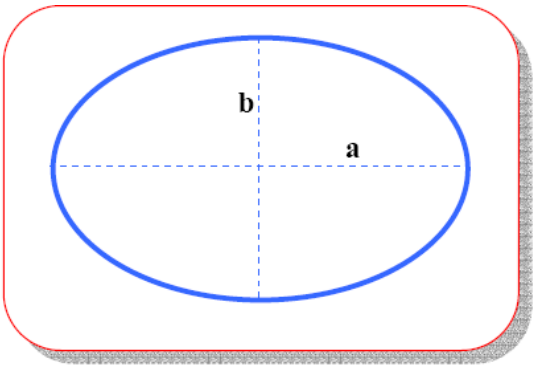
لتعقد الجيويد وصعوبة تمثيله بمعادلات رياضية أتجه العلماء إلي البحث عن أقرب الأشكال الهندسية المعروفة ووجدوا أن القطع الناقص أو الاليبس Ellipse هو الأقرب ، فإذا دار هذا الاليبس حول محوره فسينتج لنا مجسم القطع الناقص أو الاليبسويد أو الشكل البيضاوي Ellipsoid or Ellipsoid of Revolution ويعرف أيضا باسم الاسفرويد Spheroid (لكن اسم الاليبسويد هو الأكثر انتشارا وهو الذي سنستخدمه في هذا الكتاب). ربما يتبادر إلي الأذهان الآن سؤال: ما هو الفرق بين الاليبس و الدائرة أو بمعني آخر ما هو الفرق بين الاليبسويد و الكرة؟ بالنظر لشكل ١٢-٣ نجد أن الاليبسويد مفلطح قليلا عند كلا القطبين بعكس الكرة التي تكون كاملة الاستدارة تماما ، أيضا الكرة لها قطر و احد له نفس القيمة في جميع الاتجاهات بينما نجد الاليبسويد له محورين مختلفين. للتعبير عن الاليبسويد يلزمنا معرفة عنصرين (لاحظ أن الكرة يعبر عنها بعنصر واحد فقط هو نصف قطرها):

- نصف المحور الأكبر (المحور في مستوي خط الاستواء) ويرمز له بالرمز a
- نصف المحور الأصغر (المحور بين كلا القطبين) ويرمز له بالرمز b

ويقوم البعض بالتعبير عن الاليبسويد بطريقة أخري من خلال العنصرين:

- نصف المحور الأكبر (المحور في مستوي خط الاستواء) ويرمز له بالرمز a
- معامل التفلطح flattening ويرمز له بالرمز f ويتم حسابه من المعادلة:

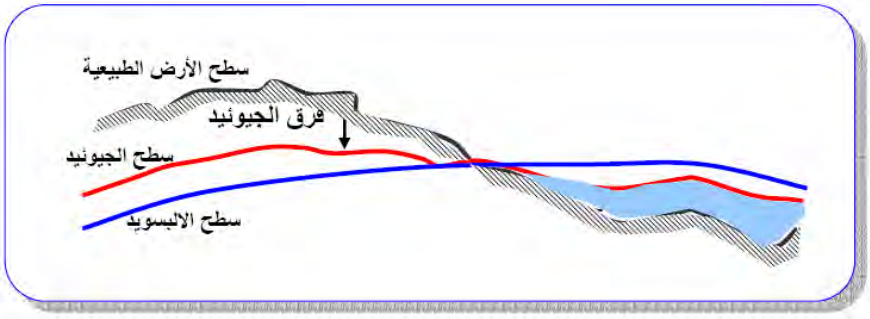
$$f = (a - b) / a \quad \text{or} \quad f = 1 - (b / a) \qquad (12\text{-}1)$$



شكل (١٢-٣) الاليبسويد

ويتميز شكل الاليبسويد بعدة خصائص مثل (شكل ١٢-٤):

أ- سهولة إجراء الحسابات علي سطحه (حيث أنه شكل هندسي معروف).
ب- لا يختلف سطح الاليبسويد الرياضي عن سطح الجيويد الفيزيقي كثيرا (أكبر فرق بين كلاهما لا يتعدي ١٠٠ متر فقط. لاحظ أن الفرق بين الجيويد و الكرة يصل إلي ٢١ كيلومتر تقريبا).



شكل (١٢-٤) العلاقة بين الجيويد و الاليبسويد

١٢-٣ المراجع

لكي يمكن تحديد المواقع علي سطح الأرض يلزمنا اختيار شكل رياضي يعبر عن شكل و حجم الأرض ذاتها وهو ما نطلق عليه اسم الشكل المرجعي Reference Surface. أحد هذه الأشكال المرجعية من الممكن أن يكون الكرة والتي كانت مستخدمة لفترة طويلة لتحديد المواقع التي لا تتطلب دقة كبيرة ولرسم الخرائط التي لا يزيد مقياسها عن ١ : مليون. أيضا للمساحات الصغيرة جدا (أقل من ٥٠ كيلومتر مربع) من الممكن اعتبار المستوي Plane شكلا مرجعيا

وخاصة في تطبيقات المساحة المستوية Plane Surveying. أما لتحديد المواقع بدقة عالية أو لرسم الخرائط الدقيقة فأن الاليبسويد هو الشكل المرجعي المستخدم.

طوال القرنين الأخيرين تعددت محاولات علماء الجيوديسيا لتحديد أنسب اليبسويد يعبر عن شكل الأرض بأقرب صورة ممكنه. وكلما تجمعت قياسات جيوديسية جديدة لدي أحد العلماء أو الجهات الدولية تم حساب قيم جديدة لعناصر تعريف الاليبسويد (سواء a , b أو a , f) مما أدي لوجود العديد من نماذج الاليبسويد ، ويعرض الجدول ١٢-١ بعضا من هذه النماذج.

كانت كل دولة عند بدء إقامة الهيكل الجيوديسي أو المساحي لها بغرض البدء في إنتاج الخرائط غالبا ما تختار أحدث اليبسويد – في ذلك الوقت – لتتخذه السطح المرجعي لنظام خرائطها. فإذا ظهر بعد عدة سنوات اليبسويد آخر لم يكن ممكنا – لأسباب تقنية و مادية – أن تقوم هذه الدولة بتغيير السطح المرجعي لها و إعادة إنتاج و طباعة كل خرائطها من جديد. لكن ما هو المرجع؟ من المعروف أن أي اليبسويد يكون أقرب ما يمكن لتمثيل سطح الأرض علي المستوي العالمي، أي أن الفروق بينه وبين الجيويد تختلف من مكان لمكان علي سطح الأرض لكنها أقل ما يمكن علي المستوي العالمي. لكن كل دولة عندما تعتمد اليبسويد معين تريد أن يكون الفرق بينه و بين الجيويد أقل ما يمكن في حدودها ولا تهتم إن كانت هذه الفروق كبيرة في مناطق أخري من العالم. لذلك كانت كل دولة تلجأ لتعديل وضع الاليبسويد المرجعي قليلا Re-Position لكي يحقق هذا الهدف. وفي هذه الحالة – أي بعد إجراء هذا التعديل البسيط – فلم يعد هذا الاليبسويد كما كان في الأصل لكنه صار في وضع مختلف ، وهنا نطلق عليه اسم مرجع أو مرجع جيوديسي أو مرجع وطني أو بيان A geodetic Datum, a local datum, or simply a datum. أي أن المرجع الوطني لأي دولة ما هو إلا اليبسويد عالمي قد تم تعديل وضعه بصورة أو بآخري ليناسب هذه الدولة ويكون أقرب تمثيلا لشكل الجيويد (الشكل الحقيقي للأرض) عند هذه الدولة. كما يجب الإشارة إلي أنه كلما قلت الفروق بين المرجع الوطني لدولة ما و الجيويد كلما زادت دقة الخرائط المرسومة اعتمادا علي هذا المرجع.

جدول (١٢-١) بعض نماذج الاليبسويد المستخدمة عالميا

اسم الاليبسويد	نصف المحور الأكبر a بالمتر	نصف المحور الأصغر b بالمتر	الدولة التي تستخدمه
Helmert 1906	٦٣٧٨٢٠٠	٦٣٥٦٨١٨	مصر
Clarke 1866	٦٣٧٨٢٧٤	٦٣٥٦٦٥١	أمريكا الشمالية
Bassel 1841	٦٣٧٧٣٩٧	٦٣٥٦٠٧٩	وسط أوروبا
Airy 1830	٦٣٧٧٥٦٣	٦٣٥٦٢٥٧	بريطانيا
WGS72	٦٣٧٨١٣٥	٦٣٥٦٧٥٠	عالمي
WGS84	٦٣٧٨١٣٧	٦٣٥٦٧٥٢	عالمي

ولتوضيح هذه النقطة الهامة أكثر سنأخذ مثال لجمهورية مصر العربية. عند بدء أعمال الجيوديسيا و إنشاء الخرائط في مصر في بداية القرن العشرين كان أحدث اليبسويد متاح في

ذلك الوقت هو اليبسويد هلمرت ١٩٠٦. تم اتخاذ القرار باختيار هذا الاليبسويد ليكون سطحا مرجعيا لمصر. وبعد ذلك تم إجراء عدد من التعديلات علي وضع هذا الاليبسويد ليتكون ما يعرف باسم المرجع الوطني المصري ١٩٠٧ Old Egyptian Datum أو اختصارا OED1970. أحد هذه التعديلات كان الفرض بأن الارتفاع عن سطح الاليبسويد = الارتفاع عن متوسط سطح البحر عند النقطة الأساسية المسماة F1 أو نقطة الزهراء بجبل المقطم. هذا الفرض يعني أننا افترضنا أن سطح اليبسويد هلمرت ١٩٠٦ ينطبق مع سطح الجيويد عند هذه النقطة (هذا غير حقيقي لكنه فرض أساسي لتسهيل بدء الحسابات الجيوديسية لشبكات الثوابت الأرضية المساحية). وبمعني آخر أننا قمنا برفع سطح اليبسويد هلمرت ١٩٠٦ عدة أمتار لينطبق مع سطح الجيويد عند هذه النقطة المحددة ، وبالتالي لم يعد هلمرت ١٩٠٦ هو ذلك الاليبسويد العالمي الذي تم تحديد شكله و حجمه ووضعه ليكون أقرب ما يمكن لتمثيل شكل الأرض علي المستوي العالمي ، إنما صار له وضع جديد يناسب المنطقة الجغرافية لجمهورية مصر العربية فقط. هنا لا نقول أنه اليبسويد أنما نطلق عليه اسم المرجع المصري.

كما يجب الإشارة في هذا السياق إلي وجود مراجع وطنية عديدة لدول مختلفة كلها تعتمد علي نفس الاليبسويد العالمي ، لكن كل مرجع منهم يعدل وضع هذا الاليبسويد بصورة مختلفة. كمثال فان المراجع الوطنية لكلا من السودان و تونس و المغرب و الجزائر و الإمارات و عمان تعتمد جميعها علي اليبسويد Clarke 1880 لكن كل مرجع له وضع مختلف.

المراجع التي تحدثنا عنها حتى الآن هي ما يمكن أن نطلق عليها اسم المراجع الأفقية Horizontal Datum وهي الخاصة بتحديد المواقع في المستوي الأفقي. أما عند التعامل مع الإحداثيات في المستوي الرأسي (أي الارتفاعات) فأننا نحتاج إلي نوع آخر من المراجع هي المراجع الرأسية Vertical Datum. ويعد الجيويد هو المرجع الرأسي المعتمد في العديد من دول العالم ، أي لتحديد هذا المرجع نحتاج لتحديد النقطة التي يكون عندها متوسط سطح البحر يساوي صفر. وكمثال في مصر فقد تم إنشاء محطة قياس المد و الجزر Tide Gauge في ميناء الإسكندرية وتم تسجيل قياساتها لمدة ٨ سنوات من عام ١٨٩٨ إلي عام ١٩٠٦ وأخذ متوسطها بحيث أن هذه القراءة (علي المسطرة المدرجة داخل المحطة) اعتبرت هي المنسوب المساوي للصفر أي هي النقطة التي تحدد موقع الجيويد. و انطلاقا من هذه النقطة المرجعية تم استخدام أسلوب الميزانية Leveling لإنشاء مجموعة من النقاط – تسمي الروبيرات أو Bench Marks: BM- المعلومة المنسوب و التي تغطي معظم أرجاء مصر. لذلك نقول أن المرجع الوطني الرأسي المصري Vertical Egyptian Datum هو قيمة متوسط سطح البحر MSL عند الإسكندرية في عام ١٩٠٦. وفي إطار هذا السياق تجب الإشارة إلي أن هذا المرجع الرأسي قد تغيرت قيمته نتيجة ارتفاع متوسط سطح البحر علي المستوي العالمي في المائة عام الأخيرة (بقيمة متوسطة تبلغ +١١.٦ سم وبمعدل ١.٧ ملليمتر/سنة في مصر).

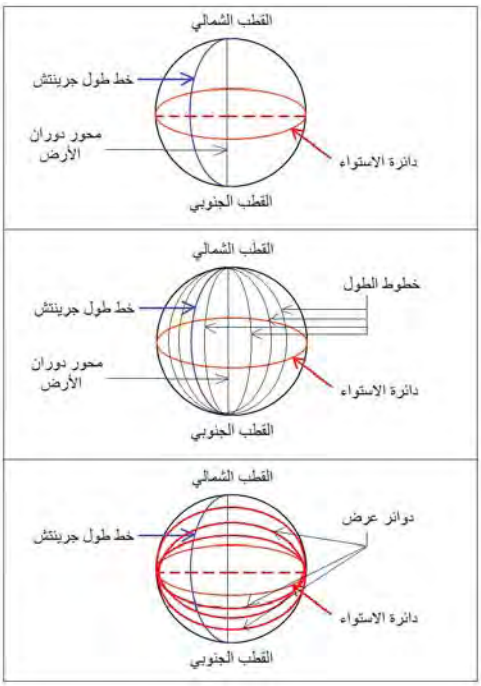
١٢-٤ نظم الإحداثيات

الإحداثيات Coordinates هي القيم التي بواسطتها نعبر عن موقع معين علي سطح الأرض أو علي الخريطة. وتتعدد أنظمة الإحداثيات تبعا لاختلاف السطح المرجعي الذي يتم تمثيل المواقع عليه. فعند اختيار المستوي كسطح مرجعي (مثل الخريطة) فأن الإحداثيات تكون إحداثيات مستوية أو مسقطة أو ثنائية الأبعاد Two-Dimensional (or 2D) Coordinates. ويرجع اسم ثنائية الأبعاد إلي أن كل نقطة – علي الخريطة مثلا – يلزمها قيمتين لتحديد موقعها وليكن مثلا س ، ص. بينما عند اعتماد الكرة أو الاليبسويد كسطح مرجعي فأننا نتعامل مع نوع الإحداثيات الفراغية أو الإحداثيات ثلاثية الأبعاد Three-

Dimensional (or 3D) Coordinates حيث يجب إضافة ارتفاع النقطة عن سطح المرجع كبعد ثالث لتحديد موقعها الدقيق ، أي نحتاج لمعرفة القيم الثلاثة س ، ص ، ع لكل موقع. وفي حالة الكرة تسمي الإحداثيات باسم الإحداثيات الكروية Spherical Coordinates بينما في حالة الاليبسويد تسمي بالإحداثيات الجيوديسية Geodetic Coordinates أو الإحداثيات الجغرافية Geographic Coordinates أو الإحداثيات الاليبسويدية Ellipsoidal Coordinates. كما توجد إحداثيات أحادية البعد One-Dimensional (or 1D) Coordinates وهي غالبا التي تعبر فقط عن ارتفاع النقطة من سطح الشكل المرجعي المستخدم. وفي التطبيقات الجيوديسية و الجيوفيزيقية عالية الدقة توجد إحداثيات رباعية الأبعاد Four-Dimensional (or 4D) Coordinates حيث يتم تحديد موقع النقطة في زمن محدد بحيث تكون إحداثياتها هي س ، ص ، ع ، ن حيث البعد الرابع "ن" يعبر عن زمن قياس هذه الإحداثيات لهذا الموقع. وسنستعرض بعض أنظمة الإحداثيات بالتفصيل في الأجزاء التالية.

منذ قرون مضت أبتكر العلماء طريقة لتمثيل موقع أي نقطة علي سطح الأرض (باعتبار أن الأرض كرة) وذلك عن طريق:

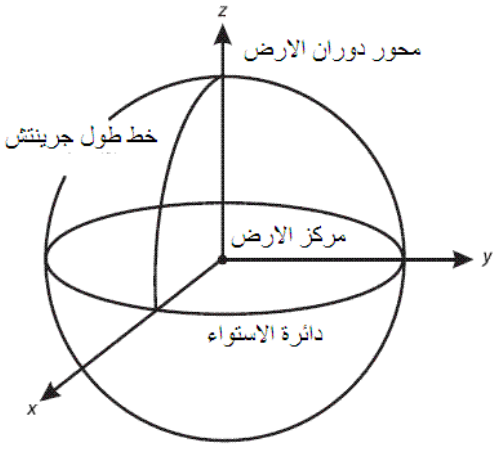
- تم اتخاذ الخط الأساسي الأفقي هو تلك الدائرة العظمي (أي التي تمر بمركز الأرض) والتي تقع في منتصف المسافة بين القطبين وسميت بدائرة الاستواء.
- أتخذ الخط الأساسي الرأسي ليكون هو نصف الدائرة التي تصل بين القطبين الشمالي و الجنوبي وتمر ببلدة جرينتش بانجلترا (شكل ٢-٥ أ).
- قسمت دائرة الاستواء إلي ٣٦٠ قسما متساويا و رسم علي سطح الأرض ٣٦٠ نصف دائرة (وهمية أو اصطلاحية) تصل بين القطبين وتمر بأحدي نقاط التقسيم علي دائرة الاستواء ، وكل نصف دائرة تسمي خط طول Longitude. ويتضح من ذلك أن الزاوية عند مركز الأرض بين نقطتي تقسيم متجاورتين تساوي ١ درجة (يرمز للدرجة بالرمز ^{o}١) لان ٣٦٠ درجة تقابل ٣٦٠ قسما. وتم ترقيم خط طول جرينتش بالرقم صفر وخط الطول المجاور له من جهة الشرق ^{o}١ شرق ، ثم ^{o}٢ شرق ، .... إلي ^{o}١٨٠ شرق وبنفس الطريقة للخطوط الواقعة غرب جرينتش من ^{o}١ غرب ، إلي ^{o}١٨٠ غرب. وتكون زاوية خط الطول (شكل ٢- ٥ ب) هي الزاوية الواقعة في مستوي دائرة الاستواء والمحصورة بين ضلعين يمر أحدهما بخط طول جرينتش بينما يمر الآخر بخط طول النقطة ذاتها.
- تم تقسيم خط الطول الأساسي (جرينتش) إلي ١٨٠ قسما متساويا ورسم علي الأرض دوائر صغري وهمية (الدائرة الصغرى هي التي لا تمر بمركز الأرض) توازي دائرة الاستواء وتمر كل دائرة منها بأحدي نقاط تقسيم خط طول جرينتش. وبذلك تكون الزاوية عند مركز الأرض بين نقطتين متجاورتين من نقاط التقسيم تساوي ^{o}١ لان ١٨٠ درجة تقابل ١٨٠ قسما ، وأطلق علي هذه الدوائر اسم دوائر العرض ومنهم ٩٠ دائرة شمال دائرة الاستواء و ٩٠ دائرة جنوبه. وبنفس الأسلوب تم ترقيم دائرة الاستواء بالرقم صفر ودائرة العرض المجاور لها من جهة الشمال ^{o}١ شمال ، ثم ^{o}٢ شمال ، .... إلي ^{o}٩٠ شمال وبنفس الطريقة للدوائر الواقعة جنوب دائرة الاستواء من ^{o}١ جنوب ، إلي ^{o}٩٠ جنوب. زاوية العرض Latitude هي الزاوية الواقعة في مستوي دائرة من دوائر الطول و رأسها عند مركز الدائرة و ضلعها الأساسي يمر في مستوي الاستواء و الضلع الآخر يمر في دائرة من دوائر العرض (شكل ٢-٥ ج).



شكل (١٢-٥) تحديد المواقع علي الكرة

١٢-٤-١ الإحداثيات الجغرافية أو الجيوديسية

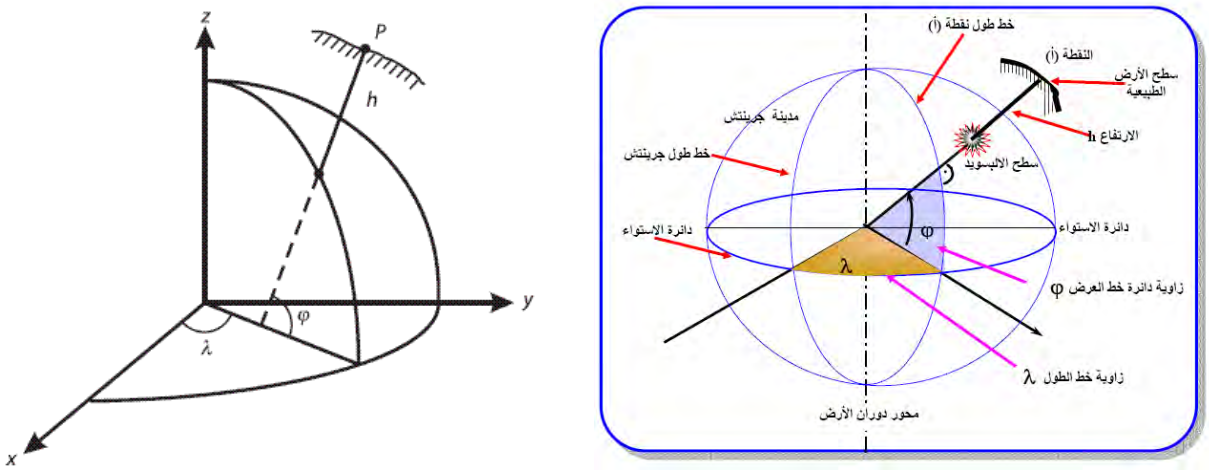
نظام الإحداثيات الجيوديسية هو أحد نظم الإحداثيات الذي مركزه هو مركز الأرض ومحاوره مثبته مع الأرض أثناء دورانها ولذلك يطلق عليه نظام مركزي أرضي ثابت Earth-Centered Earth-Fixed أو اختصارا ECEF. مركز النظام يقع في مركز جاذبية الأرض، وينطبق محوره الرأسي z مع محور دوران الأرض ، يتجه محوره الأفقي الأول x ناحية خط طول جرينتش بينما محوره الأفقي الثاني y يكون عموديا علي محور x (شكل ١٢-٦).



شكل (١٢-٦) نظام الإحداثيات الجغرافية أو الجيوديسية

يتم تمثيل موقع أي نقطة في هذا النظام بثلاثة قيم أو ثلاثة إحداثيات ، أي أن هذا النظام ثلاثي الأبعاد 3D (شكل ١٢-٧) :

- خط الطول Longitude ويرمز له بالرمز اللاتيني λ (ينطق لامدا) ، وهو الزاوية المقاسة في مستوي دائرة الاستواء بين خط طول جرينتش (وهو خط الطول الذي أصطلح دوليا أن يكون رقم صفر) و خط طول النقطة المطلوبة.
- دائرة العرض Latitude ويرمز له بالرمز اللاتيني ϕ (ينطق فاي) ، وهي الزاوية في المستوي الرأسي والتي يصنعها الاتجاه العمودي المار بالنقطة المطلوبة مع مستوي دائرة الاستواء (يلاحظ في الشكل أن الاتجاه العمودي علي سطح الاليبسويد لا يمر بمركز الاليبسويد عكس حالة الكرة حيث يمر العمودي علي سطح الكرة بمركزها).
- الارتفاع عن سطح الاليبسويد ويرمز له بالرمز h ويسمي الارتفاع الجيوديسي أو الارتفاع الاليبسويدي Geodetic or Ellipsoidal Height



شكل (١٢-٧) الإحداثيات الجغرافية أو الجيوديسية

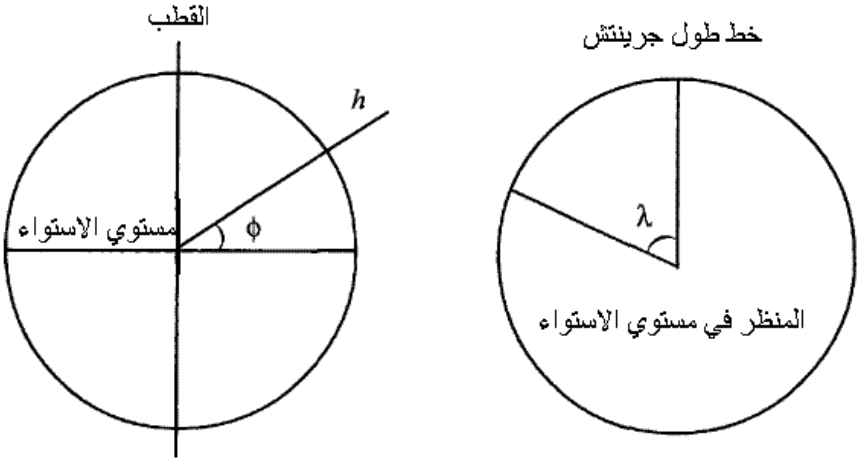
وتوجد عدة نظم للوحدات المستخدمة في التعبير عن خطوط الطول و دوائر العرض أشهرها نظام الوحدات الستيني ، وفيه يتم تقسم الدائرة الكاملة إلي ٣٦٠ درجة (رمز الدرجة هو °) ثم تقسم الدرجة إلي ٦٠ جزء كلا منهم يسمي الدقيقة (رمز الدقيقة هو ') ثم لاحقا تقسم الدقيقة الواحدة إلي ٦٠ جزء يسمي الواحد منهم بالثانية (رمز الثانية هو "). كمثال: خط الطول 30° 45' 52.3" يعني أن موقع هذه النقطة عند ٣٠ درجة و ٤٥ دقيقة و ٥٢.٣ ثانية.

تكون خطوط الطول أما شرق خط طول جرينتش (يرمز لها بإضافة حرف ق أو E) أو غرب جرينتش (يرمز لها بإضافة حرف غ أو W). أما بالنسبة لدوائر العرض فتكون أما شمال دائرة الاستواء (يرمز لها بإضافة حرف ش أو N) أو جنوب خط الاستواء (يرمز لها بإضافة حرف ج أو S).

١٢-٤-٢ الإحداثيات الكروية

يشبه نظام الإحداثيات الكروية Spherical Coordinates نظام الإحداثيات الجيوديسية أو الجغرافية ألا في اختلاف واحد فقط ألا وهو أن السطح المرجعي هنا هو الكرة و ليس

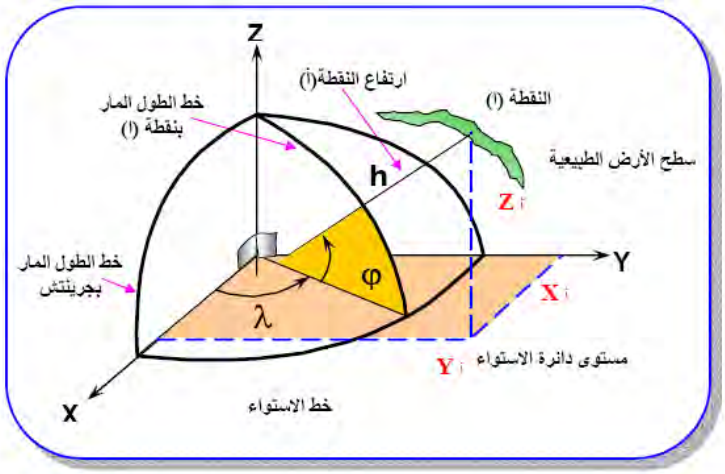
الاليبسويد (شكل ١٢-٨). يلاحظ في الشكل (خاصة لقياس دائرة العرض ϕ) أن الاتجاه العمودي علي سطح الكرة يمر بمركزها عكس حالة الاليبسويد حيث لا يمر العمودي علي سطح الاليبسويد بمركزه.



شكل (١٢-٨) الإحداثيات الكروية

١٢-٤-٣ الإحداثيات الجيوديسية الكارتيزية أو الفراغية أو الديكارتية

هو نظام إحداثيات مشابه تماما في تعريفه لنظام الإحداثيات الجيوديسية ألا أنه يتميز أن إحداثياته الثلاثة تكون طولية (أي بالمتر أو الكيلومتر) و ليس منحنية (بالدرجات) مما يجعله أسهل في التعامل وخاصة في الحسابات ، وقد أبتكره العالم الفرنسي ديكارت في القرن السابع عشر. نقطة الأصل لنظام الإحداثيات الجيوديسية الكارتيزية Cartesian Geodetic Coordinates هي مركز الأرض ومحوره الأول X ينشأ من تقاطع مستوي خط الطول المار بجرينتش مع مستوي دائرة الاستواء ومحوره الثاني Y هو العمودي علي محور X بينما المحور الثالث (الرأسي) Z هو محور دوران الأرض و الذي يمر بمركز الأرض وكلا القطبين. ويعبر عن موقع كل نقطة بثلاثة إحداثيات: X, Y, Z (شكل ١٢-٩).



شكل (١٢-٩) الإحداثيات الجيوديسية الكارتيزية

١٢-٤-٤ الإطار المرجعي الأرضي العالمي

نلاحظ أن المحور الرأسي في نظم الإحداثيات التي تحدثنا عنها حتى الآن كان يعرف علي أنه ينطبق مع محور دوران الأرض ، وهذا بافتراض أن محور دوران الأرض ثابت. هذا الأساس الفرضي ربما يكون مناسبا لمعظم تطبيقات تحديد المواقع – بما فيها التطبيقات الجيوديسية - التي تتطلب دقة سنتيمتر أو أكبر. لكن علماء الجيوديسيا أثبتوا منذ سنوات بعيدة أن محور دوران الأرض ليس ثابتا بصورة تامة ، لكنه يتحرك من عام لآخر في حركة أشبه بحركة النحلة (لعبة الأطفال الشهيرة!) ، وبالتالي فأن تعريف أو تحديد محور دوران الأرض يتغير من فترة زمنية لآخري ، ومع أن هذا التغير بسيط جدا جدا (سنتيمترات فقط) إلا أنه يجب أخذه في الاعتبار في حالة تحديد نظام إحداثيات عالي الدقة وخاصة للتطبيقات الجيوديسية التي تتطلب دقة ملليمترات (مثل متابعة و رصد حركة القشرة الأرضية). وبناءا عليه فقد تم تطوير فكرة الإطار المرجعي الأرضي العالمي International Terrestrial Reference Frame أو المعروف اختصارا باسم ITRF ، حيث تقوم احدي المنظمات الجيوديسية الدولية بتحديد محور دوران الأرض كل ٣ سنوات وذلك من خلال تجميع و تحليل القياسات الجيوديسية الدقيقة الموزعة علي جميع أنحاء الأرض. وبالتالي فأن هذا النظام من نظم الإحداثيات من الممكن اعتباره من الإحداثيات رباعية الأبعاد 4D حيث يتم تحديد ITRF طبقا لسنة epoch معينة. كمثال نجد: ITRF1990 , ITRF1995, ITRF2000, and ITRF2005.

١٢-٤-٥ التحويل بين الإحداثيات الجغرافية

يمكن باستخدام مجموعة المعادلات التالية تحويل الإحداثيات الجيوديسية أو الجغرافية (ϕ, λ, h) إلي الإحداثيات الجيوديسية الكارتيزية (X, Y, Z):

$$X = (c + h) \cos\phi \cos\lambda$$
$$Y = (c + h) \cos\phi \sin\lambda \qquad (12\text{-}2)$$
$$Z = [\, h + c\,(1 - e^2)\,] \sin\phi$$

حيث c يسمي نصف قطر التكور radius of curvature ، e تسمي المركزية الأولي first eccentricity ويتم حسابهما كالتالي:

$$c = \frac{a}{\sqrt{(1 - e^2 \sin^2\phi)}} \qquad (12\text{-}3)$$

$$e = [\, \sqrt{(a^2 - b^2)}\,] / a \qquad (12\text{-}4)$$

أما للتحويل من الإحداثيات الجيوديسية الكارتيزية (X, Y, Z) إلي الإحداثيات الجيوديسية أو الجغرافية (ϕ, λ, h) فأحد الحلول يتمثل في المعادلات التالية:

$$\tan\lambda = Y / X$$

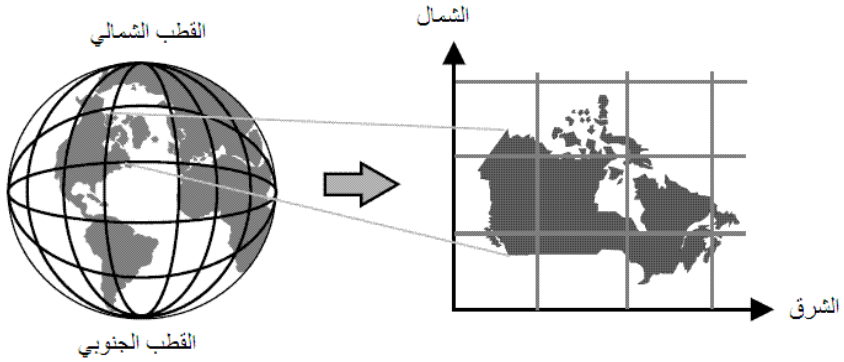
$$\tan \phi = \frac{Z \;/\; \sqrt{(X^2 + Y^2)}}{1 - e^2 \,(c \,/\, (c + h))} \qquad (12\text{-}5)$$

$$h = \frac{\sqrt{(X^2+Y^2)}}{\cos \phi} - c$$

نلاحظ في هذه المعادلات أننا نحتاج لمعرفة قيمة c لكي نستطيع حساب قيمة ϕ و h ، لكن لنحسب قيمة c من المعادلة ٢-٣ فأننا نحتاج لمعرفة قيمة ϕ ! ولذلك يتم حساب هذا النوع من التحويل بطريقة تكرارية Iterative ، حيث نبدأ باستخدام قيمة تقريبية لدائرة العرض ϕ ونحسب قيمة تقريبية لنصف قطر التكور c ثم نأخذ قيمة c هذه لنحسب منها قيمة جديدة ϕ وهكذا لعدد من المرات إلي أن نجد عدم وجود أي فرق جوهري Significant بين قيمتين متتاليتين لدائرة العرض ϕ.

١٢-٤-٦ إسقاط الخرائط

إسقاط الخرائط Map Projection هو العملية الرياضية التي تمكننا من تحويل الإحداثيات علي مجسم الأرض - سواء كان الشكل المرجعي الذي يمثل الأرض هو الكرة أو الاليبسويد- (أي إحداثيات ثلاثية الأبعاد) إلي إحداثيات ممثلة علي سطح مستوي وهو الخريطة (أي إحداثيات ثنائية الأبعاد أو إحداثيات شبكية Grid Coordinates). أو بمعني آخر: هو العملية التي تمكننا من تحويل قيم خط الطول و دائرة العرض لموقع إلي الاحداثي الشرقي و الاحداثي الشمالي المطلوبين لتوقيع هذا الموقع علي الخريطة (شكل ١٢-١٠). ويسمي الشكل الناتج عن عملية الإسقاط بالمسقط.



شكل (١٢-١٠) عملية إسقاط الخرائط

ولا يمكن بأي حال من الأحوال أن تتم عملية تحويل الشكل المجسم للأرض إلي شكل مستوي (خريطة) بصورة تامة ولكن سيكون هناك ما نسميه " التشوه Distortion" في أي طريقة من طرق إسقاط الخرائط. تحاول الطرق المختلفة لإسقاط الخرائط أن تحافظ علي واحدة أو أكثر من الخصائص التالية بين الهدف الحقيقي علي الأرض و صورته علي الخريطة(مرة أخري لا يمكن تحقيق كل الخصائص مجتمعة):

- تطابق في المساحات
- تطابق في المسافات
- تطابق في الاتجاهات
- تطابق في الزوايا
- تطابق في الأشكال

هناك بعض أنواع الإسقاط التي تحافظ علي المسافات وتسمي مساقط المسافات المتساوية Equidistance Projection وأنواع تحافظ علي الأشكال و الزوايا معا لكن في مساحات محدودة وتسمي مساقط التماثل Conformal Projection (وهي الأقرب للاستخدام في التطبيقات المساحية) وأنواع ثالثة تحافظ علي المساحات وتسمي مساقط المساحات المتساوية Equal-Area Projection.

تنقسم مساقط الخرائط إلي ٤ مجموعات رئيسية:

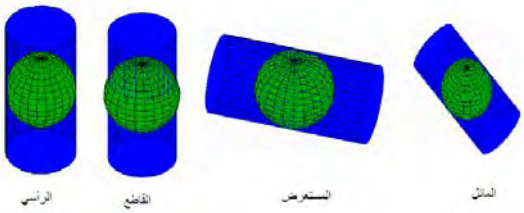
أ- المساقط الاسطوانية Cylindrical Projections: تنشأ من إسقاط سطح الأرض علي اسطوانة والتي أما تمس الأرض رأسيا أو تقطعها أو تمس الأرض عرضيا أو بصورة مائلة (شكل ١٢-١١).

ب- المساقط المخروطية Conical; Projection: تنشأ من إسقاط سطح الأرض علي مخروط والذي أما يمس الأرض رأسيا أو يقطعها (شكل ١٢-١٢).

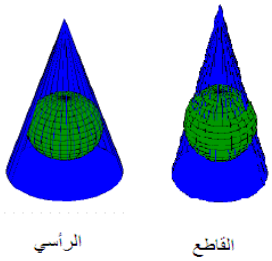
ت- المساقط السمتية أو المستوية أو الاتجاهية Azimuthal Projection: تنشأ من إسقاط سطح الأرض علي مستوي والذي أما يمس الأرض رأسيا عند نقطة محددة أو يقطعها في دائرة (شكل ١٢-١٣).

ث- مساقط أخري خاصة.

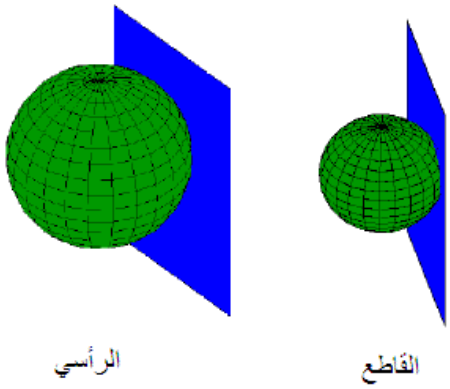
غالبا يلعب شكل المنطقة الجغرافية المطلوب إسقاطها دورا مهما في تحديد طريقة الإسقاط المناسبة ، فكمثال نختار طريقة إسقاط سمتية إذا كانت شكل المنطقة شبه دائري و طريقة إسقاط اسطوانية للمناطق شبه المستطيلة و طريقة إسقاط مخروطية للمناطق شبه المثلثية.



شكل(١٢-١١) طرق الإسقاط الاسطواني



شكل (١٢-١٢) طرق الإسقاط المخروطي

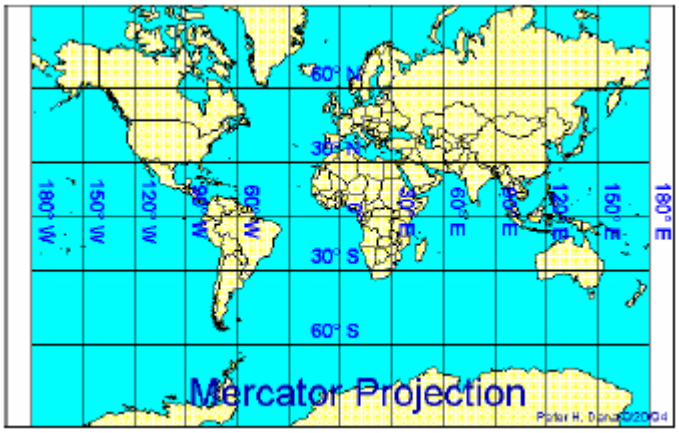


شكل(١٢-١٣) طرق الإسقاط السمتي أو المستوي

وفي الجزء التالي سنستعرض بعض نماذج مساقط الخرائط الشهيرة:

مسقط ميريكاتور Mercator Projection:

مسقط أسطواني يحقق شرط أن خطوط الطول و دوائر العرض تتقاطع في زوايا قائمة تماما. يكون المقياس scale صحيحا عند دائرة الاستواء أو عند دائرتي عرض قياسيتين Standard Parallels علي مسافات متساوية من الاستواء. غالبا يستخدم هذا المسقط في الخرائط البحرية (شكل ١٢-١٤).



شكل (١٢-١٤) مسقط ميريكاتور

مسقط ميريكاتور المستعرض Transverse Mercator Projection

ينتج هذا المسقط من إسقاط الأرض علي اسطوانة تمسها عند خط طول مركزي Central Meridian. وغالبا يستخدم هذا المسقط للمناطق التي تمتد في اتجاه شمال-جنوب أكبر من امتدادها في اتجاه شرق-غرب. يزداد التشوه (في المقياس و المسافة و المساحة) كلما ابتعدنا عن خط الطول المركزي ، ولذلك نلجأ إلي فكرة الشرائح عند استخدام هذا المسقط حيث يكون عرض الشريحة الواحدة – في اتجاه الشرق – ثلاثة أو أربعة درجات من خطوط الطول بحيث

لا يكون مقدار التشوه كبيرا عند أطراف الشريحة التي يقع خط طولها المركزي في منتصفها.
مسقط ميريكاتور المستعرض مستخدم في خرائط الكثير من دول العالم مثل مصر و بريطانيا.

مسقط ميريكاتور المستعرض العالمي Universal Transverse Mercator Projection

يعد أشهر أنواع مساقط الخرائط علي المستوي العالمي و يرمز له اختصارا بأحرف UTM.
كما زادت أهميته في السنوات الأخيرة بسبب أنه أحد المساقط المستخدمة في أجهزة تقنية النظام العالمي لتحديد المواقع GPS.

- يعتمد مسقط UTM علي إيجاد طريقة لرسم خرائط العالم كله وذلك عن طريق تقسيم الأرض إلي ٦٠ شريحة zones كلا منها يغطي **٦ درجات** من خطوط الطول بحيث يكون لكل شريحة مسقط UTM له خط طول مركزي Central Meridian يقع في مركز هذه الشريحة.

- تمتد شرائح مسقط UTM من دائرة العرض ٨٠ جنوبا إلي دائرة العرض ٨٤ شمالا.

- ترقم الشرائح من رقم ١ إلي رقم ٦٠ بدءا من خط الطول ١٨٠° غرب ، بحيث تمتد الشريحة الأولي من ١٨٠° غرب إلي ١٧٤° غرب ويكون خط طولها المركزي central meridian عند ١٧٧° غرب.

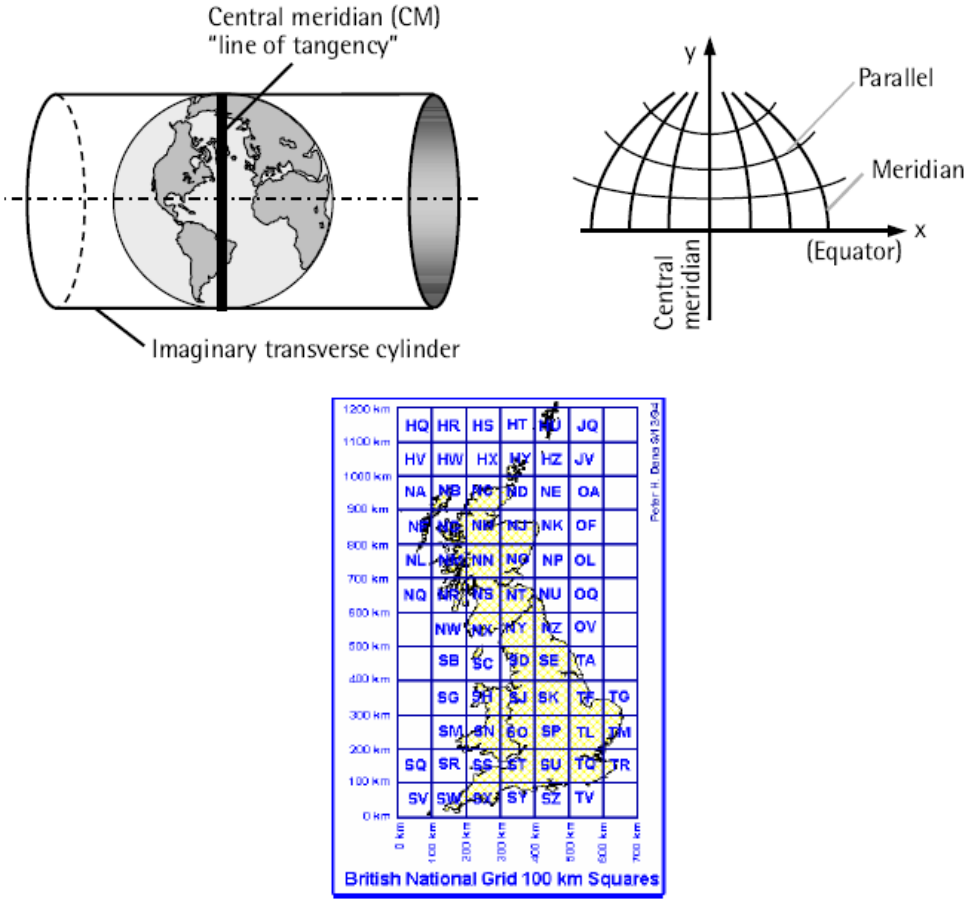
- تقسم كل شريحة طولية إلي مربعات كل **٨ درجات** من دوائر العرض.

- يكون هناك حرف خاص – كاسم - لكل مربع من هذه المربعات ، وتبدأ الحروف من حرف **C** جنوبا إلي حرف X شمالا مع **استبعاد** حرفي I و O (لقرب الشبه بينهما وبين الأرقام الانجليزية!).

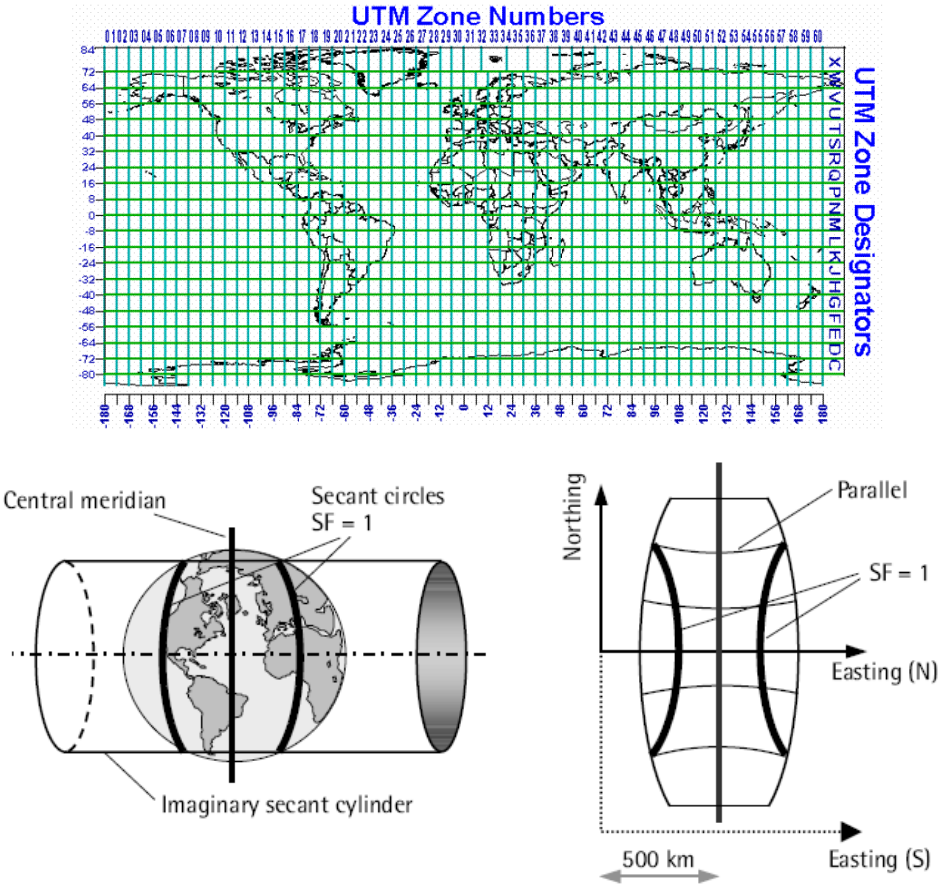
C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	2	3	4	5	6	-	7	8	9	10	11	-	12	13	14	15	16

- يكون معامل المقياس scale factor مساويا ٠.٩٩٩٦ عند خط الطول المركزي ، بحيث مع ازدياد التشوه كلما بعدنا عن خط الطول المركزي فأن أقصي قيمة لمعامل القياس عند أطراف الشريحة ستكون ١.٠٠٠٩٧ عند خط الاستواء أو ١.٠٠٠٢٩ عند دائرة عرض ٤٥° ش.

مسقط ميريكاتور المستعرض مستخدم في خرائط الكثير من دول العالم مثل مصر و بريطانيا (شكل ١٢-١٥).



شكل (١٢-١٥) مسقط ميريكاتور المستعرض



شكل (١٢-١٦) شرائح مسقط ميريكاتور المستعرض العالمي

لتحديد رقم شريحة UTM لأي موقع جغرافي:

$$\text{ترتيب الحرف} = \left(\frac{\text{دائرة العرض} + ٨٠}{٨}\right) + ١ \qquad (١٢-٦)$$

المعادلة السابقة لحالة أن الموقع الجغرافي يقع شمال دائرة الاستواء، أما إن كان الموقع يقع جنوب خط الاستواء فيتم استخدام معادلة أخري هي:

ترتيب الحرف = (دائرة العرض - ٨٠) ÷ ٨

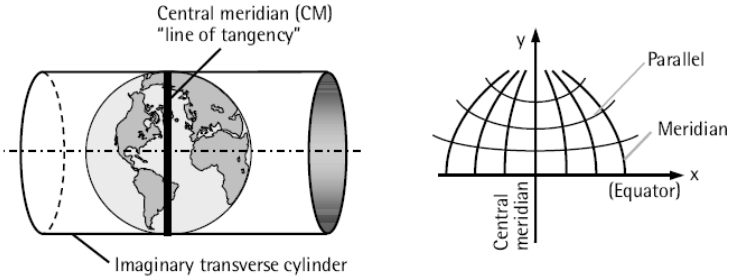
ولحساب رقم الشريحة:

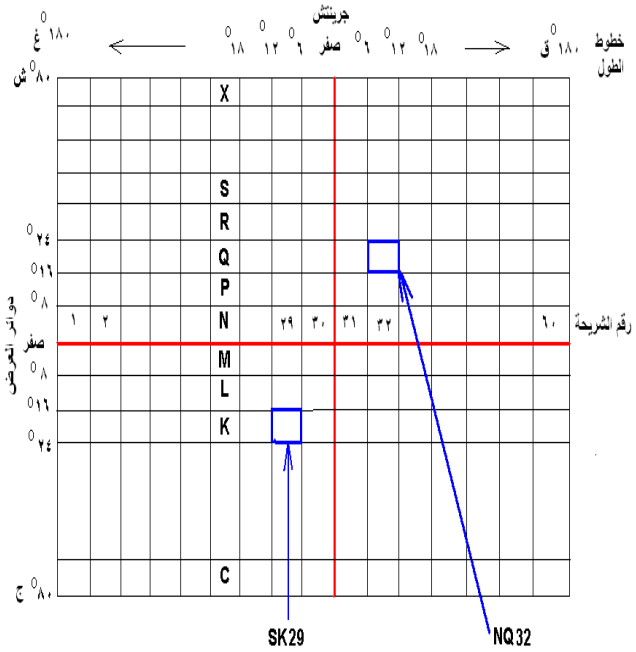
$$\text{رقم الشريحة} = \left(\frac{\text{خط الطول}}{٦}\right) + ٣١ \qquad (١٢-٧)$$

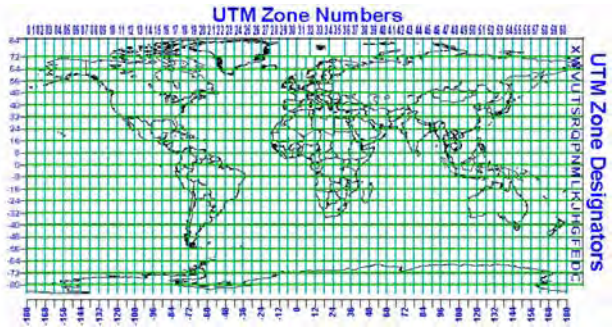
المعادلة السابقة لحالة أن الموقع الجغرافي يقع شرق جرينتش، أما إن كان الموقع يقع غرب جرينتش فيتم استخدام معادلة أخري هي:

رقم الشريحة = (خط الطول ÷ ٦) - ٣٠

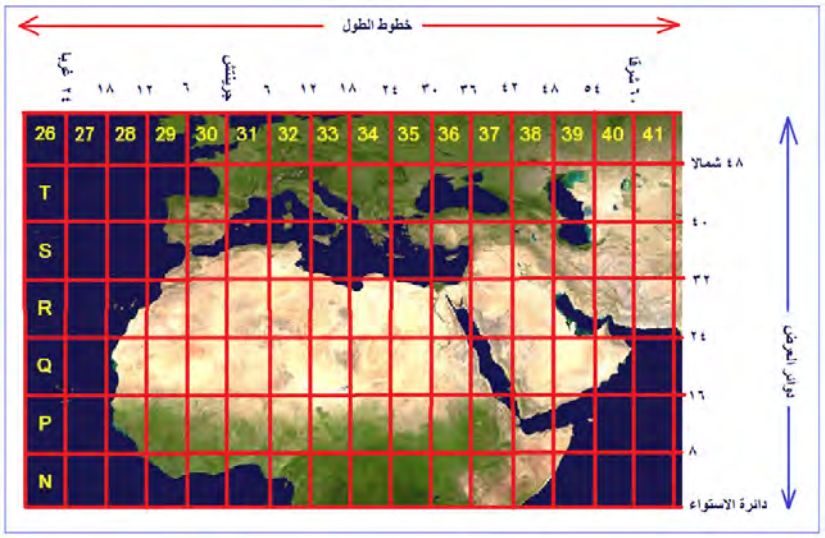
علي أن يتم في كلتا المعادلتين أخذ الرقم الصحيح للناتج فقط ودون تقريب (بخلاف طريقة حساب الخرائط المليونية).







شكل (١٢-١٧) مسقط ميريكاتور المستعرض



شكل (١٢-١٨) شرائح مسقط ميريكاتور المستعرض للدول العربية

مثال:

حدد رقم شريحة UTM التي تقع بها مدينة جدة: خط الطول ١٧" ١٠' ٣٩° شرقا و دائرة العرض ٥٥" ٢٩' ٢١° شمالا؟

أولا: نحول خط الطول و دائرة العرض إلي وحدات الدرجات ليسهل التعامل معها:

خط الطول = (١٧/٣٦٠٠) + (١٠/٦٠) + ٣٩ = ٣٩.١٧١ درجة
دائرة العرض = (٥٥/٣٦٠٠) + (٢٩/٦٠) + ٢١ = ٢١.٤٩٩ درجة

ثانيا: لتحديد الشريحة العرضية (الحرف):

ترتيب الحرف = ((دائرة العرض + ٨٠) ÷ ٨) + ١
= ((٢١.٤٩٩ + ٨٠) ÷ ٨) + ١
= (١٠١.٤٩٩ ÷ ٨) + ١
= ١٢.٧ + ١
= ١٣.٧

أي الحرف رقم ١٣ (مع إلغاء الكسر الناتج خلافا لطريقة الشرائح المليونية).

الحرف رقم ١٣ في الحروف الانجليزية (بدءا من حرف C مع استبعاد حرفي I, O) هو: **Q**

C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
1	2	3	4	5	6	-	7	8	9	10	11	-	12	13	14	15	16

ثالثا: لتحديد رقم الشريحة:

رقم الشريحة = (خط الطول ÷ ٦) + ٣١
= (٣٩.١٧١ ÷ ٦) + ٣١
= ٦.٥ + ٣١
= ٣٧.٥

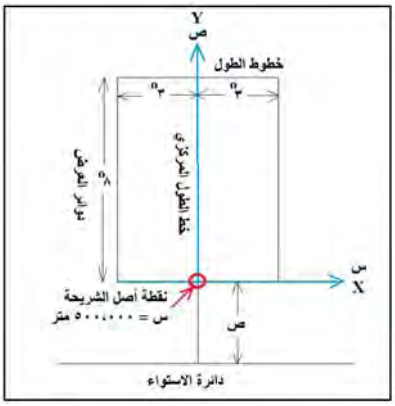
أي أنها الشريحة رقم **٣٧** (مع إلغاء الكسر الناتج خلافا لطريقة الشرائح المليونية).

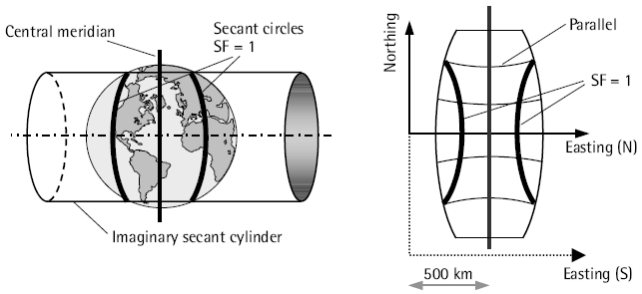
إذن:

رقم شريحة UTM لمدينة جدة هو : **Q37**

يتكون نظام الإحداثيات المسقطة في UTM من:

- نقطة الأصل (صفر ، صفر) للشريحة تقع في تقاطع خط الطول المركزي للشريحة مع دائرة الاستواء.
- الاحداثي السيني X في اتجاه الشرق.
- الاحداثي الصادي Y في اتجاه الشمال.
- تعطي قيمة إحداثيات شرقية زائفة False Easting لنقطة الأصل بقيمة ٥٠٠،٠٠٠ متر (لذلك فأن الاحداثي السيني لا يزيد عن ٦ خانات).
- لا تعطي أي قيمة إحداثيات شمالية زائفة False Easting لنقطة الأصل، أي أن قيمة الصفر في اتجاه الشمال تكون بالفعل عند دائرة الاستواء (وبذلك فأن الاحداثي الصادي قد يصل إلي ٧ خانات).





شكل (١٢-١٩) شرائح مسقط ميريكاتور المستعرض العالمي

لا يمكن ضم شريحتين من شرائح UTM في خريطة واحدة (أو في ملف رقمي واحد) والسبب في ذلك أن نقطة أصل كل شريحة تأخذ الاحداثي السيني المفروض وهو ٥٠٠،٠٠٠ متر، مما سيجعل الإحداثيات الشرقية X للمعالم (المختلفة) علي كلا الخريطتين تتكرر في كلا الشريحتين.

تتكون معادلات التحويل من الإحداثيات الجغرافية (خط الطول و دائرة العرض) إلي الإحداثيات المترية بنظام UTM من عدة معادلات ليست بسيطة ولا يمكن حسابها بآلة حاسبة بل تحتاج لبرنامج كمبيوتر لإتمامها. الشكل التالي يقدم هذه المعادلات بصورة شاملة دون الدخول في تفاصيلها الكاملة.

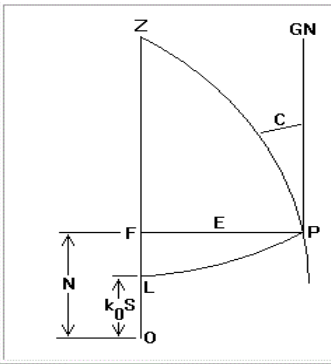
تجدر الإشارة لوجود بعض المواقع علي شبكة الانترنت التي تقدم خدمات آنية on-line لإجراء هذه الحسابات و تحويل الإحداثيات، ومنهم علي سبيل المثال:

http://www.rcn.montana.edu/resources/tools/coordinates.aspx

http://gis.dep.wv.gov/convert/llutm_conus.php

http://www.geod.nrcan.gc.ca/tools-outils/tools_info_e.php?apps=gsrug

http://home.hiwaay.net/~taylorc/toolbox/geography/geoutm.html



P = point under consideration
F = foot of perpendicular from P to the central meridian.
The latitude of F is called the *footprint latitude*.
O = origin (on equator)
OZ = central meridian
LP = parallel of latitude of P
ZP = meridian of P
OL = k_0S = meridional arc from equator
LF = ordinate of curvature
OF = N = grid northing
FP = E = grid distance from central meridian
GN = grid north
C = convergence of meridians = angle between true and grid north

Symbols

- lat = latitude of point
- long = longitude of point
- $long_0$ = central meridian of zone
  k_0 = scale along $long_0$ = 0.9996. Even though it's a constant, we retain it as a separate symbol to keep the
- numerical coefficients simpler, also to allow for systems that might use a different Mercator projection.
- e = SQRT(1-b^2/a^2) = .08 approximately. This is the eccentricity of the earth's elliptical cross-section.
  $e'^2 = (ea/b)^2 = e^2/(1-e^2)$ = .007 approximately. The quantity e' only occurs in even powers so it need only be
- calculated as e'^2.
- n = (a-b)/(a+b)
- rho = $a(1-e^2)/(1-e^2\sin^2(lat))^{3/2}$. This is the radius of curvature of the earth in the meridian plane.
  nu = $a/(1-e^2\sin^2(lat))^{1/2}$. This is the radius of curvature of the earth perpendicular to the meridian plane. It
  is also the distance from the point in question to the polar axis, measured perpendicular to the earth's
- surface.
- p = ($long-long_0$) **in radians** (This differs from the treatment in the Army reference)

Calculate the Meridional Arc

S is the meridional arc through the point in question (the distance along the earth's surface from the equator). All angles are in radians.

- S = A'lat - B'sin(2lat) + C'sin(4lat) - D'sin(6lat) + E'sin(8lat), where lat is in radians and
- A' = $a[1 - n + (5/4)(n^2 - n^3) + (81/64)(n^4 - n^5) ...]$
- B' = $(3 \tan S/2)[1 - n + (7/8)(n^2 - n^3) + (55/64)(n^4 - n^5) ...]$
- C' = $(15 \tan^2 S/16)[1 - n + (3/4)(n^2 - n^3) ...]$
- D' = $(35 \tan^3 S/48)[1 - n + (11/16)(n^2 - n^3) ...]$
- E' = $(315 \tan^4 S/512)[1 - n ...]$

The USGS gives this form, which may be more appealing to some. (They use M where the Army uses S)

M = $a[(1 - e^2/4 - 3e^4/64 - 5e^6/256 ....)lat$
$- (3e^2/8 + 3e^4/32 + 45e^6/1024...)\sin(2lat)$
$+ (15e^4/256 + 45e^6/1024 + ...)\sin(4lat)$

- $- (35e^6/3072 + ...) \sin(6lat) + ...)]$ where lat is in radians

This is the hard part. Calculating the arc length of an ellipse involves functions called *elliptic integrals*, which don't reduce to neat closed formulas. So they have to be represented as series.

Converting Latitude and Longitude to UTM

All angles are in radians.

y = northing = K1 + $K2p^2$ + $K3p^4$, where

- K1 = Sk_0,
- K2 = k_0 nu sin(lat)cos(lat)/2 = k_0 nu sin(2 lat)/4
- K3 = $[k_0$ nu sin(lat)$\cos^3$(lat)/24][(5 - $\tan^2$(lat) + $9e'^2\cos^2$(lat) + $4e'^4\cos^4$(lat)]

x = easting = K4p + $K5p^3$, where

- K4 = k_0 nu cos(lat)

شكل (١٢-٢٠) معادلات تحويل الإحداثيات من نظام UTM إلي النظام الجغرافي

(المرجع: http://www.uwgb.edu/dutchs/usefuldata/utmformulas.htm)

Converting UTM to Latitude and Longitude

In response to innumerable e-mails, you *cannot* use UTM grid coordinates without knowing your zone. There are sixty points on the earth's surface that have the same numerical UTM coordinates, 120 if you consider that northing is duplicated in both hemispheres.

y = northing, x = easting (relative to central meridian; subtract 500,000 from conventional UTM coordinate).

Calculate the Meridional Arc

This is easy: $M = y/k_0$.

Calculate Footprint Latitude

- $mu = M/[a(1 - e^2/4 - 3e^4/64 - 5e^6/256...)$
- $e_1 = [1 - (1 - e^2)^{1/2}]/[1 + (1 - e^2)^{1/2}]$

footprint latitude $fp = mu + J1\sin(2mu) + J2\sin(4mu) + J3\sin(6mu) + J4\sin(8mu)$, where:

- $J1 = (3e_1/2 - 27e_1^3/32 ..)$
- $J2 = (21e_1^2/16 - 55e_1^4/32 ..)$
- $J3 = (151e_1^3/96 ..)$
- $J4 = (1097e_1^4/512 ..)$

Calculate Latitude and Longitude

- $e'^2 = (ea/b)^2 = e^2/(1-e^2)$
- $C1 = e'^2\cos^2(fp)$
- $T1 = \tan^2(fp)$
- $R1 = a(1-e^2)/(1-e^2\sin^2(fp))^{3/2}$. This is the same as rho in the forward conversion formulas above, but calculated for fp instead of lat.
- $N1 = a/(1-e^2\sin^2(fp))^{1/2}$. This is the same as nu in the forward conversion formulas above, but calculated for fp instead of lat.
- $D = x/(N1k_0)$

$lat = fp - Q1(Q2 - Q3 + Q4)$, where:

- $Q1 = N1\tan(fp)/R1$
- $Q2 = (D^2/2)$
- $Q3 = (5 + 3T1 + 10C1 - 4C1^2 - 9e'^2)D^4/24$
- $Q4 = (61 + 90T1 + 298C1 + 45T1^2 - 3C1^2 - 252e'^2)D^6/720$

$long = long0 + (Q5 - Q6 + Q7)/\cos(fp)$, where:

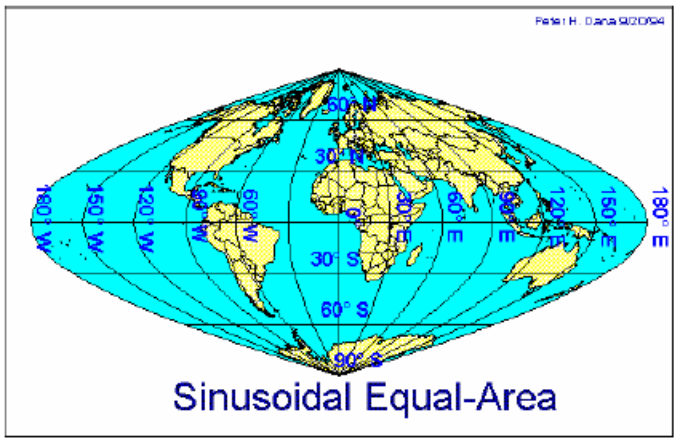
- $Q5 = D$
- $Q6 = (1 + 2T1 + C1)D^3/6$
- $Q7 = (5 - 2C1 + 28T1 - 3C1^2 + 8e'^2 + 24T1^2)D^5/120$

شكل (١٢-٢١) معادلات تحويل الإحداثيات من النظام الجغرافي إلي نظام UTM

(المرجع: http://www.uwgb.edu/dutchs/usefuldata/utmformulas.htm)

مسقط ساينسويدال متساوي المساحات Sinusoidal Equal-Area Projection

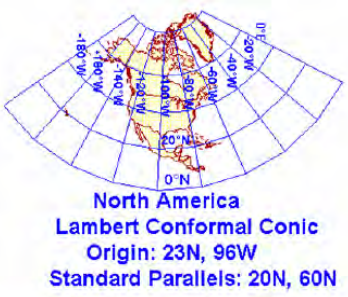
في هذا المسقط الذي يحافظ علي المساحات تتعامد دوائر العرض علي خط الطول المركزي فقط ، بينما مع باقي خطوط الطول فأن دوائر العرض تكون مقوسة بما يشبه منحني جيب الزاوية sin curves (من هنا جاء اسم هذا المسقط: المسقط الجيبي). ويكون مقياس الرسم صحيحا فقط عند خط الطول المركزي و دوائر العرض ، ويستخدم هذا المسقط (شكل ٢-٢٢) للمناطق التي تمتد في أنجاه شمال-جنوب.

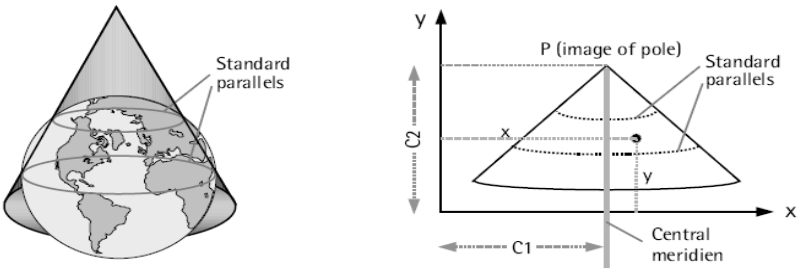


شكل (١٢-٢٢) مسقط ساينسويدال متساوي المساحات

مسقط لامبرت المخروطي المتماثل Lambert Conformal Conic Projection

يستخدم هذا المسقط المخروط (وليس الاسطوانة مثل المساقط السابقة) وفيه تكون المساحات و الأشكال متماثلة عند دائرتي العرض القياسيتين Standard Parallels ويزداد التشوه كلما ابتعدنا عنهما ، كما تكون الاتجاهات صحيحة في مناطق محدودة. وهذا المسقط مستخدم في أمريكا الشمالية (شكل ١٢-٢٣).

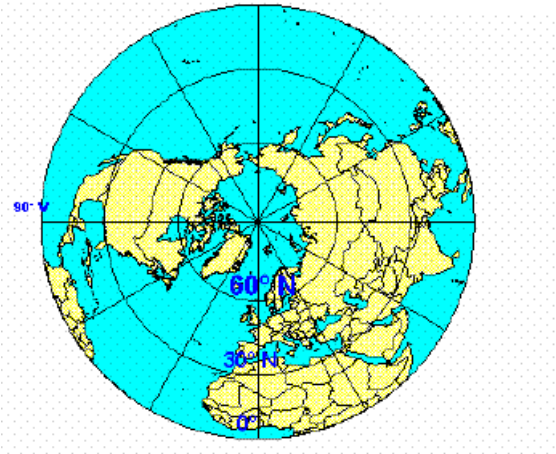




شكل (٢-٢٣) مسقط لامبرت المخروطي المتماثل

مسقط لامبرت السمتي متساوي المساحات Lambert Azimuthal Equal-Area Projection

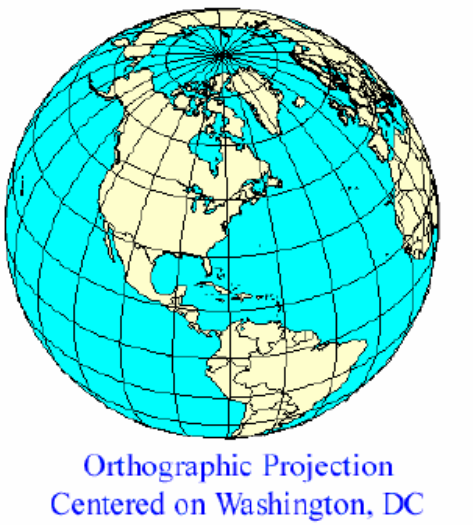
يستخدم هذا المسقط المستوي (وليس الاسطوانة أو المخروط) غالبا لرسم مناطق واسعة من المحيطات. وفيه يكون خط الطول المركزي خطا مستقيما بينما تكون باقي خطوط الطول منحنية (شكل ١٢-٢٤).



شكل (١٢-٢٤) مسقط لامبرت السمتي متساوي المساحات

المسقط الارثوجرافي أو المتعامد Orthographic Projection

مسقط سمتي أيضا (أي يستخدم المستوي في الإسقاط) يستخدم غالبا لإظهار صورة عامة أو منظور لنصف الكرة الأرضية (شكل ١٢-٢٥). وبه يوجد تشوه لكلا من المساحات و الأشكال وتكون المسافات صحيحة علي دائرة الاستواء ودوائر العرض الأخرى.



شكل (١٢-٢٥) المسقط المتعامد أو الارثوجرافي

١٢-٤-٧ نظم الإحداثيات المسقطة أو المستوية

الإحداثيات المسقطة Projected Coordinates هي الإحداثيات المستوية ثنائية الأبعاد 2D الناشئة عن تطبيق احدي طرق إسقاط الخرائط ، أي هي إحداثيات أي نقطة علي الخريطة وليس علي سطح الأرض. وغالبا يرمز لها بالاحداثي الشرقي Easting أو اختصارا E و الاحداثي الشمالي Northing أو اختصارا N (البعض يقع في غلطة و يستخدم الرمزين x, y الذين أصبح استخدامهما متعارفا عليه بصورة شائعة للدلالة علي الإحداثيات الجيوديسية الكارتيزية X, Y, Z). وحيث أن طرق إسقاط الخرائط متعددة بصورة كبيرة جدا فسنستعرض هنا مثاليين فقط لنظم إحداثيات مسقطة للتعرف علي كيفية التعامل مع هذه النظم و العناصر المطلوب معرفتها في كل نظام منهما. والمثاليين هما نظام الإحداثيات المصرية كأحد نظم الإحداثيات الوطنية لدولة عربية ، ونظام UTM العالمي المستخدم أيضا في بعض البلاد العربية مثل المملكة العربية السعودية.

نظم الإحداثيات المصرية

(أ) نظام الإحداثيات المصرية ETM

نظام إحداثيات الخرائط المصرية Egyptian Transverse Mercator أو اختصارا ETM هو نظام إسقاط ميريكاتور مستعرض. وحتى يمكن تقليل التشوه في الخرائط فقد تم تقسيم جمهورية مصر العربية إلي أربعة مناطق أو شرائح Zones وتسمي عاده باسم أحزمة Belts (٣ أحزمة). في هذا النظام تم اعتماد المرجع الجيوديسي Geodetic Datum المستخدم في خرائط الهيئة المصرية العامة للمساحة هو اليبسويد هلمرت ١٩٠٦ Helmert 1906.

توجد عدة عناصر يجب تعريفها لكل شريحة من شرائح مسقط ميريكاتور المستعرض ، وهذه العناصر تختلف قيمها من دولة لأخرى حتى لو استخدمت الدولتان نفس المسقط. هذه العناصر الخمسة (تسمي معاملات الإسقاط Projection Parameters) تشمل:

- موقع نقطة الأصل للإسقاط Origin والذي يحدد من خلال قيمتين: خط الطول المركزي Central Meridian ودائرة العرض القياسية Standard Parallel.
- لتفادي وجود إحداثيات سالبة (غير مستحبة في الخرائط) فيتم إعطاء قيم إحداثيات مفترضة أو زائفة لنقطة الأصل بدلا من إعطائها الإحداثيات صفر شرقا و صفر شمالا ، وذلك عن طريق تحديد عنصرين آخرين هما: الاحداثي الشرقي الزائف False Easting والاحداثي الشمالي الزائف False Northing.
- العنصر الخامس - من معاملات الإسقاط - المطلوب تحديده هو قيمة معامل مقياس الرسم عند خط الطول المركزي.

تجدر الإشارة إلي أنه في بعض برامج الكمبيوتر software يسمي هذا النظام Old Egyptian Datum 1907 أو اختصارا باسم OED 1907. يتميز هذا النظام بقيم عناصر الإسقاط تخص مصر. وتتغير قيم هذه العناصر مع كل حزام (منطقة) من الخرائط المصرية كالآتي:

١- الحزام الأحمر Red Belt:

يغطي هذا الحزام المنطقة الوسطي من مصر وذلك من خط طول ٢٩ شرقا إلي خط طول ٣٣ شرقا. وتكون قيم عناصر نظام ETM في هذا الحزام هي:

الاحداثي الشرقي المفترض	False Easting = 615 000 m
الاحداثي الشمالي المفترض	False Northing = 810 000 m
دائرة العرض	Latitude = 30° 0' 0"
خط الطول	Longitude = 31° 0' 0"
معامل مقياس الرسم	Scale on central Meridian = 1.00
عرض المنطقة	Zone width = 4° 0' 0"

٢- الحزام الأزرق Blue Belt:

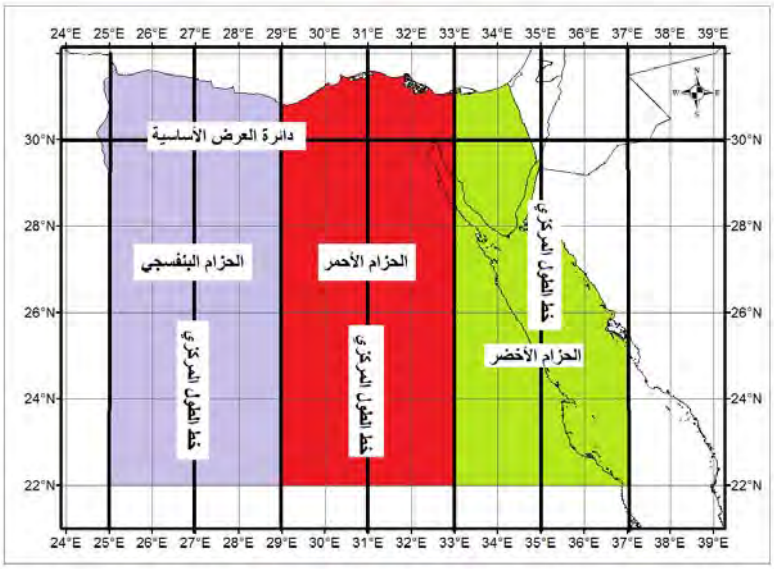
يغطي هذا الحزام المنطقة الشرقية من مصر وذلك من خط طول ٣٣ شرقا إلي خط طول ٣٧ شرقا. وتكون قيم عناصر نظام ETM في هذا الحزام هي:

الاحداثي الشرقي المفترض	False Easting = 300 000 m
الاحداثي الشمالي المفترض	False Northing = 110 000 m
دائرة العرض	Latitude = 30° 0' 0"
خط الطول	Longitude = 35° 0' 0"
معامل مقياس الرسم	Scale on central Meridian = 1.00
عرض المنطقة	Zone width = 4° 0' 0"

٣- الحزام البنفسجي Purple Belt:

يغطي هذا الحزام المنطقة الغربية في مصر وذلك من خط طول ٢٥ شرقا إلي خط طول ٢٩ شرقا. وتكون قيم عناصر نظام ETM في هذا الحزام هي:

الاحداثي الشرقي المفترض	False Easting = 700 000 m
الاحداثي الشمالي المفترض	False Northing = 200 000 m
دائرة العرض	Latitude = 30° 0' 0"
خط الطول	Longitude = 27° 0' 0"
معامل مقياس الرسم	Scale on central Meridian = 1.00
عرض المنطقة	Zone width = 4° 0' 0"



شكل (١٢-٢٦) شرائح نظام الإسقاط المصري ETM

تجدر الإشارة إلي وجود شريحة رابعة ثانوية تسمي امتداد الحزام الأحمر Extended Red Belt تغطي المنطقة جنوب مدينة أسوان. أتضح أن قيمة الاحداثي الشمالي المفترض (٨١٠ كيلومتر) لشريحة الحزام الأحمر سيتسبب في وجود إحداثيات شمالية سالبة في هذه المنطقة الجنوبية من الأراضي المصرية (أعتقد أنه لم يكن متخيلا منذ مائة عام أن تتم أي مشروعات مساحية أو إنتاج خرائط لهذه المنطقة أقصي جنوب مصر ولذلك تم اختيار قيمة ٨١٠ كيلومتر و هي تقريبا المسافة من القاهرة إلي أسوان!). وفي هذه الشريحة الرابعة يتم تغيير قيمة الاحداثي الشمالي المفترض من ٨١٠،٠٠٠ متر إلي ١,٠٠٠،٠٠٠ متر.

(ب) نظام الإحداثيات المصرية المطورة MTM

نظرا لانتشار استخدام تقنية GPS في الأعمال المساحية في مصر فقد أعلنت الهيئة المصرية العامة للمساحة منذ عدة أعوام عن تطوير نظام جديد للإحداثيات المستخدمة في الخرائط المصرية وعرف هذا النظام باسم: نظام ميريكاتور المستعرض المعدل Modified Transverse Macerator أو اختصارا باسم MTM (نفس النظام مطبق في بعض أجزاء من كندا أيضا). لم يتم التحول لهذا النظام بصورة رسمية بعد ، إلا أن خرائط بعض المشروعات الجديدة قد تم تطويرها اعتمادا عليه. وسيعتمد نظام MTM علي المرجع الجيوديسي أو اليبسويد WGS84 وليس اليبسويد هلمرت ١٩٠٦ كالنظام السابق.

مثل النظام السابق سيكون نظام MTM مستخدما لنوع إسقاط الخرائط من نوع ميريكاتور المستعرض ، لكن سيتم تقسيم مصر إلي ٥ شرائح (وليس ٣ فقط في النظام السابق) لتقليل قيمة التشوه إلي أقل ما يمكن للوصول لدقة عالية للخرائط.

توجد عدة عناصر مشتركة بين الشرائح الخمسة كالآتي:

الاحداثي الشرقي المفترض	False Easting = 300 000 m
الاحداثي الشمالي المفترض	False Northing = 0 m

دائرة العرض	Latitude = 0^o 0' 0"
معامل مقياس الرسم	Scale on central Meridian = 0.9999
عرض المنطقة	Zone width = 3^o 0' 0"

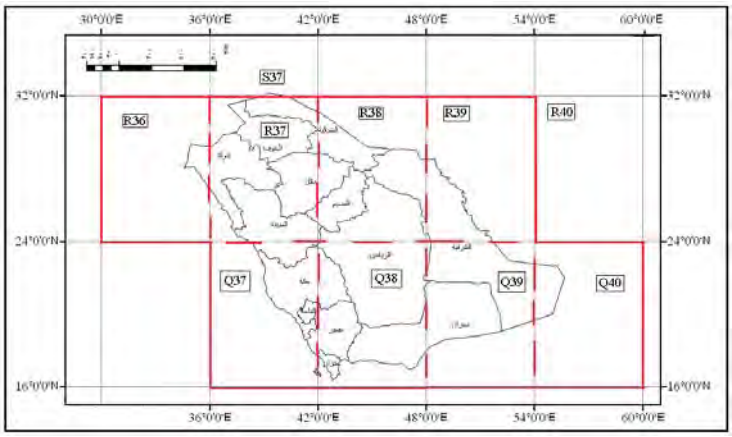
والقيمة الوحيدة التي تتغير من شريحة لآخري هي خط الطول كالآتي:

الشريحة رقم ١	Longitude = 25^o 30' 0"
الشريحة رقم ٢	Longitude = 28^o 30' 0"
الشريحة رقم ٣	Longitude = 31^o 30' 0"
الشريحة رقم ٤	Longitude = 34^o 30' 0"
الشريحة رقم ٥	Longitude = 37^o 30' 0"

نظم إحداثيات UTM

إضافة لما سبق ذكره في الأجزاء السابقة عن خصائص مسقط UTM فنضيف أيضا أنه لعدم وجود أي إحداثيات سالبة (الوضع غير المستحب في المساحة و الخرائط) فقد تم الأخذ بمبدأ المركز الزائف أو المفترض False Origin. في كل شريحة من شرائح مسقط UTM تقاس الإحداثيات الشرقية من خط الطول المركزي والذي يعطي له إحداثيات شرقية زائفة تساوي ٥٠٠ كم ، بينما تقاس الإحداثيات الشمالية مباشرة من دائرة الاستواء. وهذا الوضع يجعل من المهم جدا في أي خريطة UTM أن نعرف رقم الشريحة التي تعتمد عليها إحداثيات هذه الخريطة (حيث أن قيم الإحداثيات الشرقية ستتكرر من خريطة لآخري تقع معها علي نفس الامتداد من خطوط الطول).

تعد المملكة العربية السعودية من الدول التي تعتمد في خرائطها علي نظام UTM ، وقد اعتمدت الاليبسويد العالمي لعام ١٩٢٤ International Ellipsoid 1924 (حيث نصف المحور الأكبر = ٦٣٧٨٣٨٨ متر و التفلطح 1/f = ٢٩٧) كسطح مرجعي في مرجعها الجيوديسي الوطني المسمي عين العبد ١٩٧٠. وفي معظم برامج الكمبيوتر فمن الممكن الاكتفاء بتحديد رقم الشريحة (لمنطقة معينة) ويقوم البرنامج باستخدام معاملات و معادلات تحويل مسقط UTM المناسبة لهذه المنطقة ليتم تحويل الإحداثيات الجيوديسية أو الجغرافية إلي الإحداثيات المسقطة أو المستوية ، ويقدم شكل ١٢-٢٧ أرقام الشرائح التي تغطي المناطق الإدارية للمملكة.



شكل (١٢-٢٧) شرائح مسقط UTM للمملكة العربية السعودية

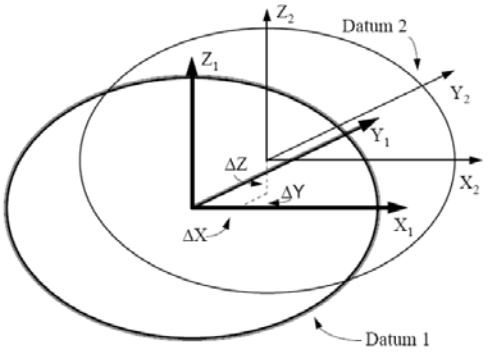
١٢-٤-٨ التحويل بين المراجع

إن تحويل الإحداثيات بين المراجع الجيوديسية المختلفة أصبح حلقة مهمة من حلقات العمل الجيوديسي في الآونة الأخيرة. فمع ازدياد التعاون التنموي و المشروعات المشتركة بين الدول المتجاورة ومع اختلاف المرجع الجيوديسي المستخدم في خرائط و قاعدة البيانات الجيوديسية لكل دولة ، أصبح لزاما توحيد الإحداثيات و الخرائط في مناطق الحدود ليمكن تنفيذ هذه المشروعات المدنية (مثل مد خطوط الكهرباء أو أنابيب نقل البترول أو إقامة الطرق). أيضا ومع انتشار تطبيقات التقنيات المساحية الحديثة (مثل الجي بي أس) ازدادت أهمية عملية التحويل بين المراجع. فكمثال: تعطي تقنية الجي بي أس إحداثيات النقاط المرصودة علي المجسم العالمي أو اليبسويد WGS84 فإذا أردنا توقيع هذه المواقع المرفوعة علي خرائط احدي الدول (التي تعتمد علي اليبسويد آخر أو مرجع جيوديسي محلي) فلا بد من تحويل هذه الإحداثيات من اليبسويد WGS84 إلي هذا الاليبسويد المحلي ، وإلا فأننا سنرتكب أخطاء قد تصل إلي مئات الأمتار عند توقيع هذه الإحداثيات دون تحويلها.

إن عملية التحويل (أي تحويل الإحداثيات) بين المراجع Datum Shift ليست جديدة في العمل الجيوديسي لكنها قد تمت دراستها منذ قرنين أو أكثر ، وقد تم ابتكار العديد من الحلول الرياضية لتنفيذها. وفي العقدين الأخيرين ظهرت طرق رياضية جديدة ربما تكون أكثر دقة من الطرق التقليدية القديمة.

الطرق التقليدية للتحويل بين المراجع

لنبدأ بمثال توضيحي بسيط في حالة التحويل بين نظامي إحداثيات مختلفين لكنهما متوازيين (شكل ١٢-٢٨). لاحظ أننا سنتعامل هنا مع نوع الإحداثيات الجيوديسية الكارتيزية (X,Y,Z) حيث أنها كإحداثيات طولية متعامدة ستكون أسهل من الإحداثيات الجغرافية (ϕ,λ,h) وحيث أن التحويل بين كلا نظامي الإحداثيات قد سبق تناوله في المعادلة (١٢-٢).



شكل (١٢-٢٨) التحويل بين مرجعين متوازيين

حيث أن محاور كلا نظامي الإحداثيات في كلا المرجعين متوازية فأن العلاقة بين المرجعين تتحدد بمعرفة موقع مركز المرجع الأول بالنسبة لموقع مركز المرجع الثاني ، أي تحديد فرق الإحداثيات بين موقع (أو إحداثيات) النقطة علي المرجع الأول وموقعها أو إحداثياتها علي المرجع الثاني. وهذا الفرق يتحدد من خلال ثلاثة مركبات $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ (ينطق الحرف اللاتيني Δ دلتا) والتي تسمي عناصر النقل Translation Parameters:

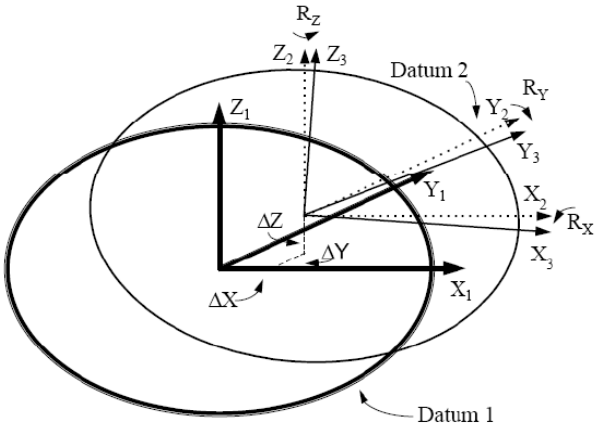
$$\Delta X = X2 - X1$$
$$\Delta Y = Y2 - Y1 \qquad (12\text{-}7)$$
$$\Delta Z = Z2 - Z1$$

فإذا علمنا إحداثيات نقطة واحدة علي المرجع الأول (X1,Y1,Z1) وإحداثياتها علي المرجع الثاني (X2,Y2,Z2) فيمكننا حساب فرق الإحداثيات باستخدام المعادلة السابقة. فإذا كان لدينا نقطة جديدة معلوم إحداثياتها علي المرجع الأول (X,Y,Z) فيمكن تحويلها إلي المرجع الثاني (X',Y',Z') بكل سهولة:

$$X' = X + \Delta X$$
$$Y' = Y + \Delta Y \qquad (12\text{-}8)$$
$$Z' = Z + \Delta Z$$

أي أن كل ما نحتاج إليه في هذه الحالة (الفرض بأن المرجعين متوازيي المحاور) هو معرفة إحداثيات نقطة واحدة علي الأقل في كلا النظامين.

لكن الحالة العامة للعلاقة بين أي مرجعين أو البسويدين أن وضعهما لن يكون متوازي المحاور، بل أن محاور أحدهما ستكون مائلة علي محاور الآخر. كما أن حجم الاليبسويد الأول ليس بالضرورة أن يكون مساويا لحجم الاليبسويد الثاني. وبالتالي فبدلا من وجود ثلاثة عناصر فقط مطلوب تحديدهم ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) كما في الحالة البسيطة السابقة فسينتج لدينا ٤ عناصر أخري: ثلاثة لتحديد فروق الميل بين المحاور الثلاثة في كل مرجع وتسمي عناصر الدوران Rotation Parameters ، بالإضافة لعنصر يحدد فرق الحجم بين كلا المرجعين ويسمي معامل القياس scale factor (شكل ١٢-٢٩).



شكل (٢-٢٩) التحويل بين أي مرجعين

وكما نري في هذا الشكل سنجد أن العناصر الجديدة المطلوبة هي:

- زاوية الدوران (أو الفرق) بين محوري X في كلا المرجعين ، ونرمز لها Rx
- زاوية الدوران (أو الفرق) بين محوري Y في كلا المرجعين ، ونرمز لها Ry
- زاوية الدوران (أو الفرق) بين محوري Z في كلا المرجعين ، ونرمز لها Rz

- بالإضافة للعنصر الرابع scale factor الذي يحدد فرق معامل القياس بين كلا المرجعين ونرمز له عادة بالرمز s.

أي أننا لتحديد العلاقة الفراغية (المكانية) بين أي مرجعين في الحالة العامة يلزمنا تحديد ٧ عناصر ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z, Rx, Ry, Rz, s$) وهي ما نطلق عليها اسم عناصر التحويل Transformation Parameters بين المراجع الجيوديسية. وفي هذه الحالة لا يمكننا الاعتماد علي توافر نقطة واحدة فقط معلومة (كما في الحالية البسيطة السابقة) لكن يلزمنا وجود ٣ نقاط – علي الأقل – معلوم إحداثياتهم في كلا المرجعين. فإذا كان لدينا معلومات لأكثر من ٣ نقاط زادت دقة الحل المطلوب لتحديد عناصر التحويل السبعة ، كما أن دقة تحديد العناصر تعتمد علي دقة إحداثيات النقاط المعلومة في كلا المرجعين. وهذين السببين وراء وجود أكثر من مجموعة منشورة و معلنة من عناصر التحويل بين مرجعين محددين ، فمعادلات التحويل ثابتة لكن عدد و جودة البيانات المستخدمة في الحساب ستؤدي لقيم متفاوتة لعناصر التحويل بين نفس المرجعين.

توجد عدة نماذج من المعادلات التي تسمح بالتحويل بين المراجع المختلفة و من أشهر هذه النماذج نموذج بورسا-وولف Bursa-Wolf ونموذج مولودينسكس-بادكس Molodenskii-Badekas. وتتمثل معادلات نموذج بورسا-وولف في:

$$\begin{vmatrix} X1 \\ Y1 \\ Z1 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{vmatrix} + s \begin{vmatrix} 1 & Rz & -Ry \\ -Rz & 1 & Rx \\ Ry & -Rx & 1 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X2 \\ Y2 \\ Z2 \end{vmatrix} \qquad (12\text{-}9)$$

حيث X1,Y1,Z1 تمثل إحداثيات النقطة في المرجع الأول ، X2,Y2,Z2 تمثل إحداثيات النقطة في المرجع الثاني ، $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ تمثل عناصر الانتقال بين المرجعين ، Rx, Ry, Rz تمثل زوايا الدوران أو عناصر الدوران بين المرجعين ، ويمثل s معامل القياس بينهما. أما نموذج مولودينسكس-بادكس فيضيف ٣ عناصر أخري (X_o, Y_o, Z_o) تتمثل في إحداثيات نقطة افتراضية يتم عندها دوران المحاور.

كما يمكن أن تتم عملية تحويل المراجع باستخدام الإحداثيات الجغرافية ، والمعادلات التالية تقدم طريقة التحويل من أي مرجع محلي إلي مرجع WGS84 العالمي المستخدم في أرصاد تقنية الجي بي أس:

$$\begin{aligned} \phi_{84} &= \phi_L + \Delta\phi \\ \lambda_{84} &= \lambda_L + \Delta\lambda \\ h_{84} &= h_L + \Delta h \end{aligned} \qquad (12\text{-}10)$$

حيث $\phi_{84}, \lambda_{84}, h_{84}$ تمثل الإحداثيات علي مجسم WGS84 ، ϕ_L, λ_L, h_L تمثل الإحداثيات علي المجسم المحلي.

$$\begin{aligned} \Delta\phi'' = \{ & -\Delta X \sin\phi \cos\lambda - \Delta Y \sin\phi \sin\lambda + \Delta Z \cos\phi + \\ & \Delta a (R_N e^2 \sin\phi \cos\lambda) / a + \Delta f [R_M (a/b) + \\ & R_N (b/a)] \sin\phi \cos\lambda \} / ([R_M + h] \sin 1'') \end{aligned} \qquad (12\text{-}11)$$

$$\Delta\lambda'' = [-\Delta X \sin\lambda + \Delta Y \cos\lambda] / [(R_N + h] \cos\phi \sin 1''] \quad (12\text{-}12)$$

$$\Delta h = \Delta X \cos\phi \cos\lambda + \Delta Y \cos\phi \sin\lambda + \Delta Z \sin\phi - \Delta a (a/R_N) + \Delta f (b/a) R_N \sin^2\phi \quad (12\text{-}13)$$

حيث:

a, b هما قيم نصف المحور الأكبر و نصف المحور الأصغر للمرجع المحلي ، f تفلطح المرجع المحلي ،

Δa, Δf هما الفرق بين نصف المحور الأكبر و التفلطح لمرجع WGS84 ناقص القيم المماثلة للمرجع المحلي ،

$$f - ١ = a / b \quad (12\text{-}14)$$

$$e^2 = 2f - f^2 \quad (12\text{-}15)$$

$$R_N = a / (1 - e^2 \sin^2\phi)^{1/2} \quad (12\text{-}16)$$

$$R_M = a(1- e^2) / (1 - e^2 \sin^2\phi)^{3/2} \quad (12\text{-}17)$$

توجد العديد من قيم عناصر التحويل المعلنة أو المنشورة وخاصة مع انتشار تطبيقات تقنية الجي بي أس التي تعتمد إحداثياتها علي المجسم العالمي WGS84. يقدم جدول (١٢-٢) قيم عناصر التحويل من بعض المراجع الوطنية في الدول العربية إلي مرجع WGS84:

جدول (١٢-٢) عناصر التحويل بين المرجع الجيوديسي العالمي WGS84 والمراجع الجيوديسية المحلية

الدولة	المرجع الوطني	الاليبسويد	عدد النقاط المستخدمة	عناصر التحويل (بالمتر)		
				D X	D Y	D Z
السودان	Adindan	Clark 1880	٢٢	١٦٦- (٥)	١٥- (٥)	٢٠٤ (٣)
تونس	Carthage	Clark 1880	٥	٢٦٣- (٦)	٦ (٩)	٤٣١ (٨)
	European 1950	International 1924	٤	١١٢- (٢٥)	٧٧- (٢٥)	١٤٥- (٢٥)
المغرب	Merchich	Clark 1880	٩	٣١ (٥)	١٤٦ (٣)	٤٧ (٣)
الجزائر	North Sahara 1959	Clark 1880	٣	١٨٦- (٢٥)	٩٣- (٢٥)	٣١٠ (٢٥)
	Voirol 1960	Clark 1880	٢	١٢٣- (٢٥)	٢٠٦- (٢٥)	٢١٩ (٢٥)
مصر	Old Egyptian 1906	Helmert 1906	١٤	١٣٠- (٣)	١١٠ (٦)	١٣- (٨)
البحرين	Ain El Abd 1970	International 1924	٢	١٥٠- (٢٥)	٢٥٠- (٢٥)	١- (٢٥)
السعودية	Ain El Abd 1970	International 1924	٩	١٤٣- (١٠)	٢٣٦- (١٠)	٧ (١٠)
الإمارات	Nahrwan	Clark 1880	٢	٢٤٩- (٢٥)	١٥٦- (٢٥)	٣٨١ (٢٥)
عمان	Nahrwan	Clark 1880	٢	٢٤٧- (٢٥)	١٤٨- (٢٥)	٣٦٩ (٢٥)
	Oman	Clark 1880	٧	٣٤٦- (٣)	١- (٣)	٢٢٤ (٩)
قطر	Qatar National	International 1924	٣	١٢٨- (٢٠)	٢٨٣- (٢٠)	٢٢ (٢٠)
العراق والكويت و الأردن و ولبنان و سوريا	European 1950	International 1924	؟	١٠٣-	١٠٦-	١٤١-

تـونس و الجزائر	Voirol 1874	Clark 1880	؟	-٧٣	-٢٤٧	٢٢٧

لكن يجب مراعاة الملاحظات التالية علي قيم هذا الجدول:

١. قيم العناصر المذكورة هي للتحويل من المرجع المحلي إلي مرجع WGS84 وللتحويل من WGS84 إلي المرجع المحلي يجب عكس جميع الإشارات الجبرية (موجب بدلا من سالب و العكس).
٢. القيم المذكورة لثلاثة عناصر فقط (وليس سبعة) وبالتالي فهي أقل دقة.
٣. الجدول يوضح أيضا عدد نقاط الثوابت المساحية التي تم استخدامها في حساب هذه العناصر لكل مرجع محلي.
٤. العدد المذكور بين القوسين هو مؤشر للدقة المتوقعة لقيمة كل عنصر من عناصر التحويل.
٥. القيم في آخر سطرين من الجدول تم حسابها بطرق أخري بخلاف رصد نقاط ثوابت مساحية وبالتالي فأن قيم الدقة المتوقعة غير متاحة.

الطرق غير التقليدية للتحويل بين المراجع

عابت الطرق التقليدية للتحويل بين المراجع الجيوديسية عدة نقاط تقلل من دقة عناصر التحويل التي يتم حسابها باستخدام هذه الطرق. أهم هذه العيوب أن نظريات تطوير هذه النماذج الرياضية تعتمد علي فرضية أن إحداثيات النقاط المعلومة في كلا المرجعين – المطلوب التحويل بينهما – هي إحداثيات دقيقة تماما و خاليا من أي مصدر من مصادر الأخطاء Error-Free. لكن هذا الوضع غير صحيح تماما ، فمن المعروف أن معظم الشبكات الجيوديسية المحلية بها عيوب عديدة من وجهة النظر التقنية نظرا لان معظم هذه الشبكات قد تم إقامتها في النصف الأول من القرن العشرين أو قبل ذلك حيث لم تكن الأجهزة المساحية بلغت مرحلة عالية من الدقة قبل بدء ثورة الملاحة بالأقمار الصناعية. كما أن عدم وجود حاسبات آلية متطورة في ذلك الوقت أدي لإتمام العمليات الحسابية و ضبط الشبكات بطريقة غير دقيقة بنسبة كبيرة. ذلك بالإضافة إلي أن دقة الشبكات الجيوديسية في أي مرجع وطني تختلف من منطقة جغرافية لآخري (حيث لم يمكن تغطية دولة كاملة بشبكات جيوديسية إلا مع مرور بضعة سنوات) وهذا أيضا يعد العامل الثالث الذي لا تأخذه الطرق التقليدية في الاعتبار. وإذا أخذنا مصر كمثال فسنجد أن دقة الإحداثيات الجيوديسية لشبكات المثلثات الوطنية ذات الدرجة الأولي كانت أكبر من ٠.٥ متر ، وهذه دقة متواضعة عند مقارنتها بدقة الإحداثيات الناتجة الآن من استخدام تقنية الجي بي أس والتي قد تصل إلي سنتيمترات وأحيانا ملليمترات. وبالتالي فأن استخدام الطرق التقليدية لحساب عناصر التحويل بين مرجع WGS84 – علي سبيل المثال - وأي مرجع محلي سيؤدي للحصول علي دقة ديسيمترات عند حساب عناصر التحويل بين هذين المرجعين. ومن هنا بدأ منذ سنوات البحث عن طرق جديدة غير تقليدية لتحويل الإحداثيات بين المراجع الجيوديسية ، أو البحث عن وسائل جديدة تتيح زيادة دقة النماذج الرياضية التقليدية. وهناك العشرات من الطرق والوسائل التي تم تطويرها في هذا المجال و سنستعرض هنا البعض منهم.

أولي هذه الطرق غير التقليدية هو تمثيل الفروق بين الإحداثيات علي المرجعين فراغيا spatial representation في صورة نموذج رياضي يغطي منطقة جغرافية معينة. وأهم

ما يميز هذا الأسلوب أنه يستخدم الإحداثيات علي كلا المرجعين (للنقاط المشتركة) كما هي وبالتالي فأن قيمة الفروق ستتغير من مكان جغرافي لآخر داخل المنطقة المطلوبة ولن تكون العلاقة الرياضية بين كلا المرجعين علاقة ثابتة علي امتداد هذه المنطقة كما كان الحال في الطرق التقليدية. وطبقت وزارة الدفاع الأمريكية هذا المبدأ في استنباط ما يسمي سطوح التحويل conversion surfaces بين مرجع WGS84 والمراجع الجيوديسية الوطنية لمعظم دول العالم. وتختلف طرق تمثيل الفروق باختلاف النماذج الرياضية المستخدمة ، وتعد طريقة ذات الحدود polynomial أكثر النماذج تطبيقا ، مع اختلاف عدد المعاملات في المتوالية الرياضية والتي تعتمد علي كم النقاط المشتركة المتاحة وذلك بتطبيق مبدأ الانحدار المتعدد Multiple Regression.

<u>التحويل بين المراجع ثلاثية و رباعية الأبعاد</u>

في معظم التطبيقات المساحية و الخرائطية باستخدام تقنية الجي بي أس فأننا نحصل علي إحداثيات ثلاثية الأبعاد 3D علي الاليبسويد العالمي WGS84 الذي يمثل شكل و حجم الأرض. لكن في التطبيقات الجيوديسية عالية الدقة (مثل مراقبة تحركات القشرة الأرضية ومراقبة هبوط المنشئات الضخمة) لا نكتفي بالتعامل مع الإحداثيات ثلاثية الأبعاد كقيم ثابتة لكن نحتاج لإطار مرجعي رباعي الأبعاد (متغير مع الزمن) لتنسب له هذه الإحداثيات. وأفضل مرجع رباعي الأبعاد هو الإطار المرجعي الأرضي العالمي ITRF. وتجدر الإشارة لوجود عدة تعريفات لالليبسويد WGS84 إلا أن آخر تعديل له هو المسمي G730 هو المستخدم في استنباط إحداثيات الجي بي أس ، وهذا التعديل متوافق مع إطار ITRF92 في حدود ١٠ سم. أما لتحويل الإحداثيات من اليبسويد WGS84(G730) إلي ITRF بتعريفاته الأحدث نستخدم المعادلات التالية:

$$\begin{vmatrix} XS \\ YS \\ ZS \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} T1 \\ T2 \\ T3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} D & -R3 & R2 \\ R3 & D & -R1 \\ -R2 & R1 & D \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \qquad (12\text{-}18)$$

حيث X, Y, Z تمثل الإحداثيات علي إطار ITRF2000 و XS, YS, ZS تمثل الإحداثيات علي WGS84.

ولحساب قيمة أي عنصر P عند الزمن t فأننا نستخدم المعادلة:

$$P(t) = P(EPOCH) + P' (t - EPOCH) \qquad (12\text{-}19)$$

حيث EPOCH هي سنة تعريف إطار ITRF المطلوب ، 'P تمثل معدل تغير هذا العنصر.

<u>أولا: التحويل من ITRF2000 إلي ITRF92:</u>

T1 = 1.47 cm, rate = 0.00 cm/year
T2 = 1.35 cm, rate = - 0.06 cm/year

T3 = -1.39 cm, rate = - 0.14 cm/year
D = 0.75 ppb, rate = 0.01 ppb/year (ppb = part per billion)
R1 = 0.00 " , rate = 0.00 "/year
R2 = 0.00 " , rate = 0.00 "/year
R3 = - 0.0018 " , rate = 0.0002 "/year
EPOCH = 1988.0

ثانيا: التحويل من ITRF2005 إلي ITRF2000:

T1 = 0.1 mm, rate = -0.2 mm/year
T2 = -0.8 mm, rate = 0.1 mm/year
T3 = -5.8 mm, rate = - 1.8 mm/year
D = 0.4 ppb, rate = 0.08 ppb/year (ppb = part per billion)
R1 = 0.000 " , rate = 0.000 "/year
R2 = 0.000 " , rate = 0.000 "/year
R3 = 0.000 " , rate = 0.000 "/year
EPOCH = 2000.0

كما توجد قيم منشورة لعناصر التحويل بين كل تعريفات ITRF في السنوات الأخيرة.

الفصل الثالث عشر

الجيوديسيا الأرضية وشبكات الثوابت

تعد الثوابت الأرضية الجيوديسية من أهم تطبيقات علم الجيوديسيا حيث يتم بناء علامات أرضية ثابتة Terrestrial Control Points ثم إجراء القياسات والأرصاد الجيوديسية بهدف تحديد مواقع (إحداثيات) هذه النقاط بدقة لتكون مرجعا جيوديسيا أو مساحيا لكافة المشروعات المدنية داخل الدولة. كل مجموعة من هذه النقاط (معلومة الموضع في الطبيعة و معلومة الإحداثيات أيضا) تكون فيما بينها شبكة يطلق عليها اسم شبكة الثوابت الأرضية الجيوديسية Geodetic Control Networks.

١٣-١ أنواع شبكات الثوابت الأرضية

يمكن تقسيم شبكات الثوابت الأرضية الجيوديسية بناءا علي عدد الإحداثيات المعلومة لكل نقطة من الشبكة إلي أربعة أنواع: شبكات الثوابت الأفقية ثنائية الأبعاد وشبكات الثوابت أحادية الأبعاد وشبكات الثوابت ثلاثية الأبعاد وشبكات الثوابت رباعية الأبعاد.

قديما ومع استخدام الأجهزة المساحية التقليدية (مثل جهاز الثيودليت) بإمكانياتها البسيطة كانت نقاط الثوابت الأرضية تقام علي رؤوس الجبال و المرتفعات ليسهل رصد الزوايا علي مسافات كبيرة ولم يكن من السهل رصد فروق المناسيب بين هذه النقاط المرتفعة. ومن هنا كانت هذه الشبكات تعد شبكات ثوابت أفقية فقط، أي أن الإحداثيات المعلومة لكل نقطة كانت في الأساس هي خط الطول و دائرة العرض. ومع أنه كان يتم حساب الارتفاع الجيوديسي لكل نقطة (الارتفاع عن سطح الاليبسويد) إلا أنه لم يكن مستخدما حيث أن نوع الارتفاع المستخدم في الخرائط و في مشروعات الهندسة المدنية هو المنسوب (الارتفاع عن مستوي سطح البحر). من هنا كانت تتم قياسات فروق المناسيب بين مجموعة من النقاط التي تحدد البعد الثالث (المنسوب) لشبكة جيوديسية أخري (تسمي شبكة الروبيرات) تغطي هذه الدولة. أي أن الشبكة الجيوديسية الرأسية أحادية البعد كانت منفصلة عن الشبكة الجيوديسية الأفقية ثنائية الأبعاد. أيضا تعد شبكات الجاذبية الأرضية من الشبكات الجيوديسية الأحادية الأبعاد حيث تكون قيمة الجاذبية الأرضية عند كل نقطة هي القيمة الأساسية للشبكة وليس من الضروري تحديد قيم الإحداثيات بدقة عالية. ومع دخول عصر جيوديسيا الأقمار الصناعية أصبح من الممكن تحديد الإحداثيات ثلاثية الأبعاد (خط الطول و دائرة العرض و الارتفاع) لمجموعة من النقاط التي تكون شبكة جيوديسية ثلاثية الأبعاد تغطي الدولة. أما في حالة تحديد أربعة إحداثيات لكل نقطة من نقاط الشبكة (مثلا خط الطول و دائرة العرض و المنسوب و قيمة الجاذبية الأرضية) فأن الشبكة الجيوديسية تسمي شبكة رباعية الأبعاد. الأجزاء التالية تستعرض تفاصيل الشبكات الجيوديسية الأفقية والرأسية بينما سيتم تناول شبكات الجاذبية الأرضية والشبكات ثلاثية الأبعاد في الفصول القادمة.

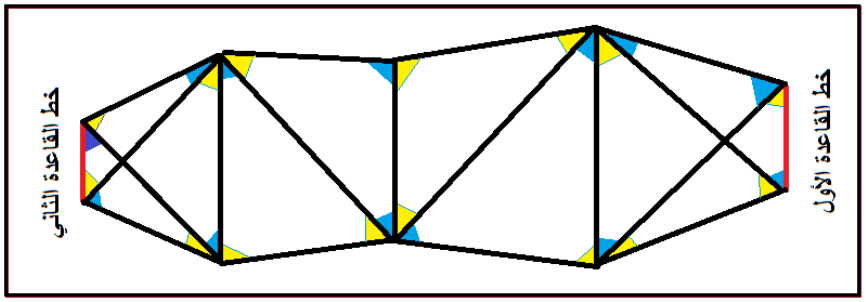
١٣-٢ شبكات الثوابت الأرضية الأفقية (شبكات المثلثات)

بدأت الدول في إنشاء شبكات من نقاط الثوابت الأرضية وتحديد إحداثيات كل نقطة منها لتكون مرجعا أساسيا لكل أعمال المساحة و الخرائط في كل دولة. وكانت الشبكات الجيوديسية تغطي كل أرجاء الدولة أو علي الأقل الجزء المعمور منها، ولذلك تتميز الشبكات الجيوديسية بالمسافات الكبيرة نسبيا بين كل نقطة و أخري. تعتمد شبكات المثلثات Triangulation

Networks علي إنشاء نقاط تكون فيما بينها مثلثات يمكن رصد زواياه الداخلية باستخدام الثيودليت (من هنا جاء اسم شبكات المثلثات). ولحساب إحداثيات هذه النقاط يلزم تحديد أطوال و انحرافات أضلاع المثلثات (كما في الترافرسات). وحيث أن قياس أطوال أضلاع تصل إلي عشرات الكيلومترات لم يكن متاحا قديما، فقد كان يتم إنشاء خط أساسي في بداية الشبكة (يسمي خط القاعدة Base Line) ويتم قياس طوله بكل دقة وكذلك يتم تحديد انحرافه من خلال الأرصاد الفلكية، ثم يستخدم هذا الخط مع قياسات زوايا المثلث في حساب انحرافات وأطوال أضلاع باقي أضلاع الشبكة. وفي نهاية الشبكة يتم إنشاء خط قاعدة آخر (ويتم قياس طوله و انحرافه أيضا) بحيث يكون تحقيقا للحسابات وإمكانية تحديد أخطاء الشبكة (سواء في الرصد أو الحسابات) حتى يمكن ضبط الشبكة وضمان دقة الإحداثيات المحسوبة لنقاطها.

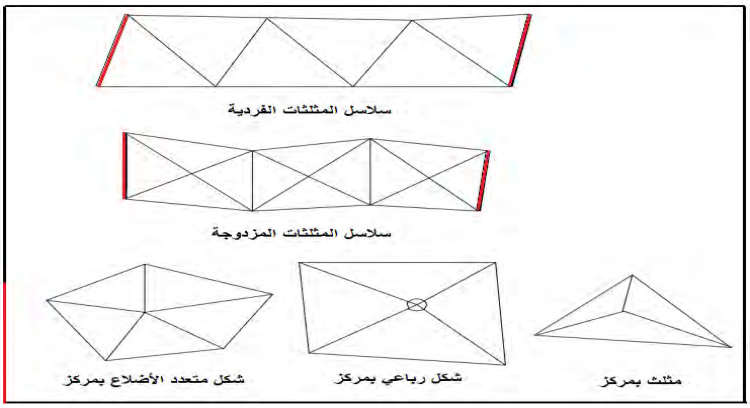
مع اختراع أجهزة قياس المسافات الكترونيا EDM أمكن قياس أطوال أضلاع الشبكة مما أدي لتطوير نوع آخر من الشبكات الجيوديسية مقاسة الأضلاع فقط Trilateration Networks، وأيضا نوع ثالث يسمي الشبكات المزدوجة Hybrid Networks التي كان يقاس فيها الزوايا و أطوال الأضلاع معا. لكن دقة شبكات المثلثات كانت أعلي من دقة الشبكات المقاسة الأضلاع وان كانت الأخيرة أسهل و أسرع في العمل الحقلي.

أما حساب الإحداثيات المسقطة Projected Coordinates أو (س،ص) علي الخرائط فكان يبدأ من نقطة تسمي نقطة الأساس Laplace Station، وهي نقطة غالبا تكون أحد طرفي خط قاعدة وتقاس عندها إحداثياتها الفلكية (خط الطول ودائرة العرض) وكذلك انحراف خط القاعدة هذا. فعلي سبيل المثال فأن نقطة الأساس التي بنيت عليها شبكات المثلثات في جمهورية مصر العربية كانت هي نقطة الزهراء F1 والتي تقع فوق جبل المقطم بالقاهرة وكانت طرف من طرفي خط قاعدة سقارة.



شكل (١٣-١) مثال لشبكات المثلثات

أما من حيث الشكل فأن أشكال شبكات المثلثات تتراوح بين: سلاسل المثلثات الفردية، سلاسل الأشكال الرباعية، سلاسل الأشكال ذات المركز ومنها المثلث بنقطة مركزية و الشكل الرباعي المركزي وأشكال متعدد الأضلاع بنقطة مركزية، الأشكال المتداخلة.



شكل (١٣-٢) أشكال شبكات المثلثات

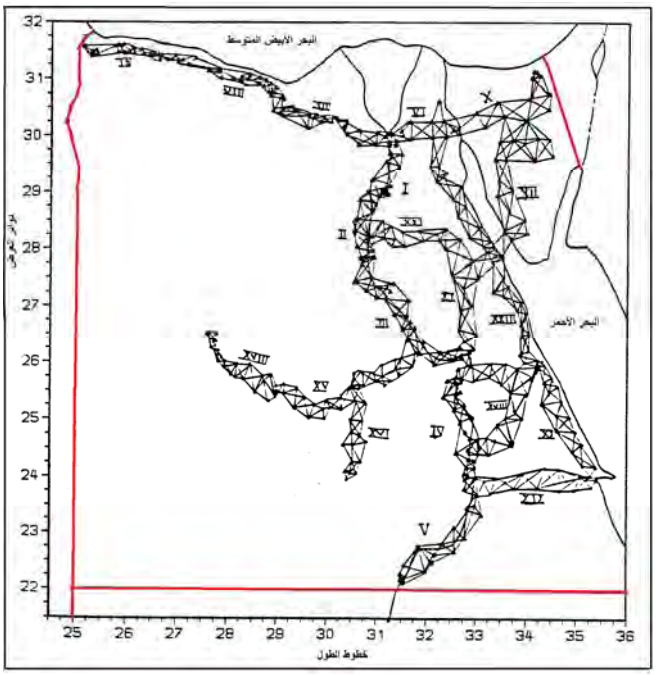
١٣-٢-١ درجات شبكات المثلثات

تقسم شبكات المثلثات من حيث دقتها إلي أربعة درجات وهي:

(أ) شبكات مثلثات الدرجة الأولي:

تسمى أيضا المثلثات الجيوديسية لأنها أدق أنواع المثلثات وتتراوح أطوال أضلاعها بين ٤٠ و ٥٠ كيلومتر في مصر بينما يؤخذ طول خط القاعدة في حدود ١٠ كيلومتر٠ والمثلثات الجيوديسية هي التي تبنى عليها باقي درجات المثلثات الأخرى ولذلك يجب مراعاة أقصى درجات الدقة في إجراء قياسات وحسابات هذا النوع من شبكات المثلثات٠ ويكون متوسط الخطأ المسموح به في قفل المثلث ١" بينما الحد الأقصى لقفل المثلث لا يزيد عن ٣"٠ وبالنسبة لقياس طول خط القاعدة فان الخطأ النسبي المسموح به لا يزيد عن ١: ١,٠٠٠,٠٠٠ ويتم رصد الزوايا بعدد ١٢ قوس باستخدام ثيودليت دقة ١" حيث يكون الحد الأقصى للخطأ المسموح به في أي قوس لا يزيد عن ٢"٠ كما يجب ألا يزيد متوسط قفل الأفق لعدد ٨-١٢ قوس أقل من ٠"٦

بدأ إنشاء شبكة المثلثات الجيوديسية المصرية في بداية القرن العشرين وبالتحديد في عام ١٩٠٧ ، وكان الهدف الرئيسي هو إنشاء نظام خرائط يغطى المناطق الزراعية في الدلتا ووادي النيل لخدمة أغراض الرى٠ وتم الانتهاء من الشبكة الأولى التي تتكون من عشرة حلقات في عام ١٩٤٥ ٠ وتنقسم هذه الشبكة إلي خمسة حلقات تغطى الدلتا ووادي النيل حتى أدندان على الحدود المصرية السودانية بينما الحلقات الخمسة الأخرى تغطى مناطق السواحل الشمالية من العريش وحتى السلوم٠ وتم إنشاء الشبكة الثانية في الفترة من عام ١٩٥٥ إلى عام ١٩٦٨ وتكونت من ثلاثة عشر حلقة : خمسة حلقات في الصحراء الشرقية ، خمسة حلقات على سواحل البحر الأحمر ، ثلاثة حلقات في الصحراء الغربية٠



شكل (١٣-٣) شبكة المثلثات الجيوديسية (الدرجة الأولى) في مصر

(ب) شبكات مثلثات الدرجة الثانية:

ويتم إنشاؤها وربطها على الدرجة الأولى وهى أقل منها في الدقة وأطوال الأضلاع حيث تتراوح أطوال أضلاعها بين ١٠ و ٤٠ كيلومتر (بمتوسط ٢٥ كيلومتر) بينما يكون طول خط القاعدة في حدود ٢-٥ كيلومتر٠ ويكون متوسط الخطأ المسموح به في قفل المثلث ٣" بينما الحد الأقصى لقفل المثلث لا يزيد عن ٥"٠ وبالنسبة لقياس طول خط القاعدة فان الخطأ النسبي المسموح به لا يزيد عن ١: ٥٠٠,٠٠٠ ويتم رصد الزوايا بعدد ٨ أقواس باستخدام ثيودليت دقة ١٠" حيث يكون الحد الأقصى للخطأ المسموح به في أي قوس لا يزيد عن ٦"٠ كما يجب ألا يزيد متوسط قفل الأفق لعدد ٦ أقواس أقل من ٢,٥ "٠

(ج) شبكات مثلثات الدرجة الثالثة:

ويتم إنشاؤها وربطها على الدرجة الأولى والثانية بغرض تقسيم المنطقة وتكثيف النقط٠ وتتراوح أطوال أضلاعها بين ٥ و ٨ كيلومتر في الأرياف ، وبين ١ و ٣ كيلومتر في المدن٠ و يكون طول خط القاعدة في حدود ٠,٥ -٣ كيلومتر ويكون متوسط الخطأ المسموح به في قفل المثلث ٥" بينما الحد الأقصى لقفل المثلث لا يزيد عن ١٠"٠ وبالنسبة لقياس طول خط القاعدة فان الخطأ النسبي المسموح به لا يزيد عن ١: ٢٠٠,٠٠٠ ويتم رصد الزوايا بعدد ٤ أقواس باستخدام ثيودليت دقة ٢٠" حيث يكون الحد الأقصى للخطأ المسموح به في أي قوس لا يزيد عن ١٥"٠ كما يجب ألا يزيد متوسط قفل الأفق لعدد ٤ أقواس أقل من ٥ "٠

(د) شبكات مثلثات الدرجة الرابعة:

وتستعمل في الأراضي الجبلية أو عندما يراد إنشاء نقط مثلثات جديدة وتنشأ بالربط على الدرجة الثالثة٠ وهذا النوع من المثلثات هو أقل الدرجات دقة وتختار أطوال أضلاعها طبقا لظروف

وطبيعة الارض٠ وفى الأراضي المستوية نستعيض عن مثلثات الدرجة الرابعة بالترافرسات الدقيقة ويكون متوسط الخطأ المسموح به في قفل المثلث ١٢" بينما الحد الأقصى لقفل المثلث لا يزيد عن ٣٠"٠ وبالنسبة لقياس طول خط القاعدة فان الخطأ النسبي المسموح به لا يزيد عن ١: ١٠٠,٠٠٠ ويتم رصد الزوايا بعدد قوسين٠

الجدول التالي يعرض – علي سبيل المثال - بعض مواصفات الشبكات الجيوديسية المستخدمة في مصر:

	الدرجة الأولي	الدرجة الثانية		الدرجة الثالثة	
		فئة ١	فئة ٢	فئة ١	فئة ٢
الدقة النسبية بين النقاط	١/١٠٠٠٠٠	١/٥٠٠٠٠	١/٢٠٠٠٠	١/٥٠٠٠	
المسافة بين النقاط (كم)	٢٥-١٥٠	١٠-٧٠	٥-٧٠	طبقا للحاجة	
دقة قياس خطوط القواعد	١/١٠٠٠٠٠٠	١/٩٠٠٠٠٠	١/٨٠٠٠٠٠	١/٥٠٠٠٠٠	١/٢٥٠٠٠٠
خطأ قفل المثلث	"٣-١	"٣-١.٢	"٥-٢	"٥-٣	"١٠-٥
دقة القياسات الفلكية	"٠.٤٥	"٠.٤٥	"٠.٦	"٠.٨	"٣.٠
دقة جهاز قياس الزوايا الأفقية	"٠.٢	"٠.٢	"١-٠.٢	"١	"١
عدد مرات قياس الزاوية الأفقية	١٦	١٦	١٢-٨	٤	٢

الجدول التالي يعرض – علي سبيل المثال - بعض مواصفات الشبكات الجيوديسية المستخدمة في تطبيقات سلاح المهندسين بالجيش الأمريكي:

الدرجة	قيمة الخطأ النسبي للنقطة في الشبكة الأفقية
الدرجة الثانية – فئة ١	١ : ٥٠ ٠٠٠
الدرجة الثانية – فئة ٢	١ : ٢٠ ٠٠٠
الدرجة الثالثة – فئة ١	١ : ١٠ ٠٠٠
الدرجة الثالثة – فئة ٢	١ : ٥ ٠٠٠
الدرجة الرابعة	من ١ : ٢٥٠٠ إلي ١ : ٢٠ ٠٠٠

١٣-٢-٢ خطوات إنشاء شبكات المثلثات

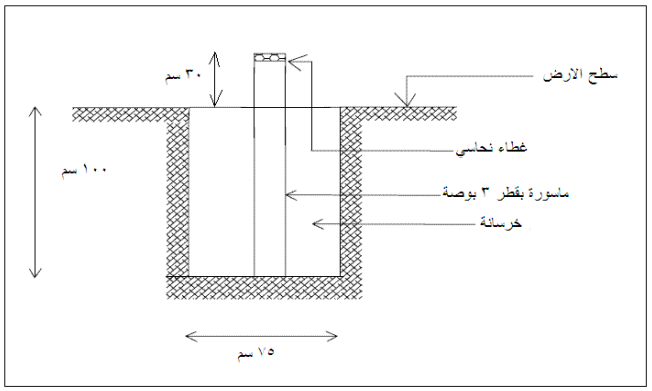
يعد الاستكشاف أول خطوة في إنشاء شبكة مثلثات وهو إن كان أشق عملية للمساحات الشاسعة إلا أن نجاح تشكيل الشبكة يعتمد علي دقة الاستكشاف. تهدف عملية الاستكشاف إلي اختيار مواقع نقاط المثلثات و مواقع خطوط القواعد وأيضا تحديد المعوقات (أية معوقات تمنع الرؤية وخط النظر بين النقاط) المطلوب إزالتها. يمكن الاعتماد علي الخرائط القديمة للمنطقة (أو المرئيات الفضائية الآن) في أعمال الاستكشاف و اختيار مواقع نقاط المثلثات.

عند اختيار مواقع نقاط المثلثات يجب مراعاة الآتي:

١. كل نقطة تري النقاط التي حولها بكل وضوح.
٢. أن تتراوح الزوايا بين أضلاع المثلثات (التي تكونها هذه النقاط) بين ٣٠ و ١٢٠ درجة بقدر الإمكان وتفضل المثلثات متساوية الأضلاع تقريبا.
٣. تجنب النقاط القريبة من سطح الأرض وذلك تفاديا لتأثير الانكسار الضوئي عند الرصد.
٤. اختيار مواقع النقاط في مواقع مرتفعة و مشرفة علي مناطق واسعة لسهولة رؤية الهدف من مسافات بعيدة.
٥. أن تكون مواقع النقاط في أماكن ثابتة غير معرضة للضياع أو للعبث بها.
٦. أن تكون أضلاع المثلثات متناسقة فلا توجد أضلاع طويلة جدا وأخري صغيرة جدا.
٧. أن تكون العقبات المراد إزالتها (تعيق خط النظر بين النقاط) أقل ما يمكن تفاديا لارتفاع تكلفة المشروع.

لإنشاء نقط المثلثات يتم بناء مواقع النقاط بعلامات خاصة تدل على النقطة وتساعد في سهولة الوصول اليها٠ وتختلف هذه العلامات طبقا لدرجة نقط المثلثات وطبيعة المكان المنشأة به، ومن هذه العلامات:

- البراميل الخراسانية بقطر ٦٠ سم وارتفاع ١١٠ سم وتستخدم في نقاط مثلثات الدرجة الاولى٠
- القضبان الحديدية التي يتراوح طولها بين ١٥٠ ، ٢٠٠ سم بقطر ٤ بوصة ويظهر منها حوالي ١٠ سم فوق سطح الأرض ويمكن صب جزء حرساني حول قاعدتها لضمان ثباتها٠ ويستخدم هذا النوع في مثلثات الارياف٠
- قطع الخشب المربعة ١٥×١٥ سم وبوسطها ثقب به مسمار نحاسي يحدد مركزها وتوضع أعلى أسطح المباني في المدن٠



شكل (١٣-٤) نموذج لبناء علامة مثلثات

١٣-٢-٣ متانة شبكات المثلثات

تعتمد حسابات شبكات المثلثات (في صورتها البسيطة) على استخدام القانون الرياضي لجيوب الزوايا حيث تبدأ الحسابات من خط القاعدة المقاس مع استخدام الزوايا الأفقية المرصودة ٠

ويدل هذا على أن قيمة الزوايا تؤثر على أطوال الأضلاع المحسوبة وبالتالي على الإحداثيات المستنتجة لنقاط الشبكة٠ ويقصد بمتانة الشبكة عدم تأثر دقة الأطوال المحسوبة نتيجة استخدام قاعدة الجيوب أو على الأقل أن يكون هذا التأثير في حدود مسموحا بها٠

للتعبير عن متانة شكل أو شبكة مثلثات يتم حساب قيمة عددية تسمى متانة الشكل أو الشبكة٠ وتعتمد متانة الشبكة على العوامل الآتية:

- دقة الأرصاد (الزوايا وأطوال خطوط القواعد)٠
- قيمة الزوايا (الأفضل أن تتراوح الزوايا بين ٣٠ ° و ١٢٠°)٠
- عدد الاتجاهات المرصودة٠
- عدد الشروط الهندسية بالشبكة٠
- عدد المثلثات المستخدمة بين قاعدتين٠

في حالة توافر أرصاد أكثر من العدد الفعلي للقياسات الضرورية لرسم شكل أو شبكة ، فيمكن القول أن هذا الشكل تتوافر به بعض الشروط الهندسية٠ فكمثال فان رسم مثلث يتطلب قياس ٣ كميات فقط (زاويتين وضلع أو ضلعين وزاوية ٠٠٠ الخ) ، فإذا توافرت رصده رابعة فنقول أن هناك شرط هندسي لابد من تحقيقه٠ وبذلك تكون القاعدة العامة لحساب عدد الشروط الهندسية (ش) لأي شكل أو شبكة :

ش = عدد الأرصاد الفعلية – عدد الأرصاد الضرورية لتوقيع الشكل أو الشبكة

مع ملاحظة أن:

عدد الأرصاد الضرورية لتوقيع أي شكل = ٢ (عدد نقط الشكل – ٢)
ويمكن حساب عدد الشروط الهندسية بطريقة أخرى من العلاقة التالية :

ش = (ع١ – ط١ + ١) + (ع – ٢ ط + ٣)

حيث:
ع١ = عدد الخطوط المرصودة من الطرفين
ع = عدد الخطوط جميعا
ط١ = عدد النقاط المحتلة
ط = عدد النقاط جميعا

يتم حساب معامل متانة الشبكة (ق) كالآتي :

ق = [(ن – ش) / ن] مجموع ($\delta^2_{أ}$ + $\delta_{أ}$ $\delta_{ب}$ + $\delta^2_{ب}$)

حيث :

ن = عدد الاتجاهات المرصودة – ٢
أو

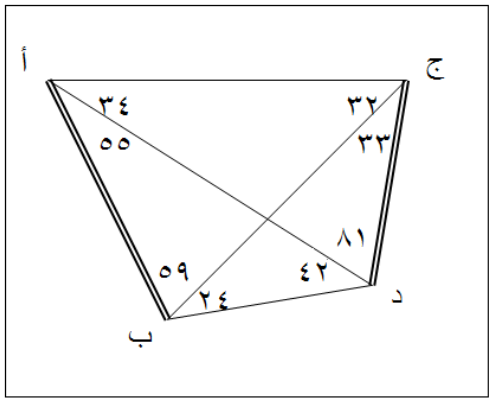
ن = (عدد الخطوط × ٢) – ٢

δ = معدل التغير في لوغاريتم جيب الزاوية المقابلة للضلع المعلوم لفرق قيمته ١" وذلك من سادس رقم عشري ، أي أن :

δ = (لو جا (أ+١") – لو جا أ) × ١٠ ^{٦}

تستخدم معاملات المتانة لمقارنة المسارات المختلفة للوصول إلى خط قاعدة في الشبكة بدءا من خط القاعدة الأول ، وذلك بهدف تحديد أدق (أمتن) مسار يتم استخدامه في حسابات أطوال الاضلاع٠ وعند مقارنة أكثر من مسار فأنه كلما قل معامل المتانة كلما كان المسار أدق في الحساب٠ وكقاعدة عامة فأن معامل المتانة المسموح به = ٨٠ للشكل الواحد ، ويتراوح بين ٨٠ ، ١١٠ في الشبكة٠

في المثال التالي (أنظر الشكل) مطلوب تحديد أدق مسار لحساب خط القاعدة ج-د من خط القاعدة المعلوم ا-ب٠



شكل (١٣-٥) مثال لحساب متانة المثلثات

ن = (عدد الخطوط × ٢) – ٢ = (٦ × ٢) – ٢ = ١٠

ش = (ع$_{١}$ – ط$_{١}$ + ١) + (ع – ٢ ط + ٣) = (٦ – ٤ +١) + (٦– ٢×٤ + ٣) = ٤

(ن – ش) / ن = ٠ر٦

المسار ١			المسار ٢		
المثلث	الزوايا أ ، ب	مقدار ما بين القوسين	المثلث	الزوايا أ ، ب	مقدار ما بين القوسين
أ-ب-د	٤٢ ٨٣	٦	أ-ب-ج	٣٢ ٥٩	١٧
أ-ج-ب	٦٥ ٣٤	١٤	أ-ج-د	٨٠ ٣٤	١١
المجموع		٢٠			٢٨
معامل المتانة		٢٠ × ٠ر٦ = ٠ر١٢		٢٨ × ٠ر٦ = ٨ر١٦	

أي أن المسار ١ أمتن وأدق من المسار ٢ ويكون هو الأحسن لحساب خط القاعدة٠

تجدر الإشارة لوجود جداول خاصة لحساب قيمة ($\delta^2_{أ} + \delta_{أ}\delta_{ب} + \delta^2_{ب}$) مباشرة:

	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90°
10°	428	359																					
12	359	295	253																				
14	315	253	214	187																			
16	284	225	187	162	143																		
18	262	204	168	143	126	113																	
20	245	189	153	130	113	100	91																
22	232	177	142	119	103	91	81	74															
24	221	167	134	111	95	83	74	67	61														
26	213	160	126	104	89	77	68	61	56	51													
28	206	153	120	99	83	72	63	57	51	47	43												
30	199	148	115	94	79	68	59	53	48	43	40	33											
35	188	137	106	85	71	60	52	46	41	37	33	27	23										
40	179	129	99	79	65	54	47	41	36	32	29	23	19	16									
45	172	124	93	74	60	50	43	37	32	28	25	20	16	13	11								
50	167	119	89	70	57	47	39	34	29	26	23	18	14	11	9	8							
55	162	115	86	67	54	44	37	32	27	24	21	16	12	10	8	7	5						
60	159	112	83	64	51	42	35	30	25	22	19	14	11	9	7	5	4	4					
65	155	109	80	62	49	40	33	28	24	21	18	13	10	7	6	5	4	3	2				
70	152	106	78	60	48	38	32	27	23	19	17	12	9	7	5	4	3	2	1				
75	150	104	76	58	46	37	30	25	21	18	16	11	8	6	4	3	2	2	1	1	1		
80	147	102	74	57	45	36	29	24	20	17	15	10	7	5	4	3	2	1	1	1	0	0	
85	145	100	73	55	43	28	23	19	16	14	10	7	5	3	2	2	1	1	0	0	0	0	
90	143	98	71	54	42	33	27	22	19	16	13	9	6	4	3	2	1	1	1	0	0	0	0
100	138	95	68	51	40	31	25	21	17	14	12	8	6	4	3	2	1	1	0	0	0		
105	136	93	67	50	39	30	25	20	17	14	12	8	5	4	2	2	1	1	0	0			
110	134	91	65	49	38	30	24	19	16	13	11	7	5	3	2	2	1	1	1				
115	132	89	64	37	29	23	19	15	13	11	7	5	3	2	2	1	1						
120	129	88	62	46	36	28	22	18	15	12	10	7	5	3	2	2	1						
125	127	86	61	45	35	27	22	18	14	12	10	7	5	4	3	2							
130	125	84	59	44	34	26	24	17	14	12	10	7	5	4	3								
135	122	82	58	43	33	26	21	17	14	12	10	7	5	4									
140	119	80	56	42	32	25	20	17	14	12	10	8	6										
145	116	77	55	41	32	25	21	17	15	13	11	9											
150	112	75	54	40	32	26	21	18	16	15	13												
152	111	75	53	40	32	26	22	19	17	16													
154	110	74	53	41	33	27	23	21	19														
156	108	74	54	42	34	28	25	22															
158	107	74	54	43	35	30	27																
160	107	74	56	45	38	33																	
162	107	76	59	48	42																		
164	109	79	63	54																			
166	113	86	71																				
168	122	98																					
170	143																						

شكل (٣-٦) جدول حساب متانة المثلثات

١٣-٢-٤ الاشتراطات في شبكات المثلثات

في حالة توافر أرصاد أكثر من العدد الفعلي للقياسات الضرورية لرسم شكل أو شبكة ، فيمكن القول أن هذا الشكل تتوافر به بعض الاشتراطات الهندسية٠ فكمثال فان رسم مثلث يتطلب قياس ٣ كميات فقط (زاويتين وضلع أو ضلعين وزاوية ٠٠٠ الخ) ، فإذا تم قياس الزاوية الثالثة فنقول أن هناك شرط هندسي لابد من تحقيقه (وهذا الشرط أن مجموع زوايا المثلث = ١٨٠^0)٠ وتسمى أرصاد الشبكة في هذه الحالة بالأرصاد الشرطية٠ بينما في حالة أن تكون الأرصاد مساوية للعدد الفعلي للقياسات الضرورية المطلوبة فتسمى بالأرصاد غير الشرطية وهى حالة غير مرغوب فيها في المساحة لعدم توافر الاشتراطات التي تساعد على عمل تحقيق واكتشاف أخطاء الرصد٠

أنواع الاشتراطات

يمكن تقسيم الاشتراطات في شبكات المثلثات إلى نوعين رئيسين وهما الاشتراطات الخارجية والاشتراطات الداخلية٠

الاشتراطات الخارجية ترتبط بربط شبكة المثلثات مع الشبكات المجاورة السابق ضبطها (تصحيحها) وهى:

- شرط طول خط القاعدة: طول خط القاعدة المحسوب من الزوايا المصححة يجب أن يساوى طول خط القاعدة المرصود٠
- شروط الانحراف: انحرافات أضلاع الشبكة المحسوبة من الزوايا المصححة يجب أن تساوى الانحرافات المرصودة ٠
- شروط خطى الطول والعرض: خطوط الطول والعرض المحسوبة لأحد طرفي خط القاعدة يجب أن تساوى خطوط الطول والعرض المرصودة فلكيا لهذا الطرف٠

الاشتراطات الداخلية وهى علاقات هندسية يجب تحقيقها لضمان دقة الإحداثيات المحسوبة لنقط المثلثات٠ وكلما زاد عدد الاشتراطات في الشبكة كلما زاد ضمان صحة الأرصاد ودقة العمل٠ وكما سبق الذكر فأن القاعدة العامة لحساب عدد الاشتراطات (ش) لأي شكل أو شبكة :

ش = عدد الأرصاد الفعلية – عدد الأرصاد الضرورية لتوقيع الشكل أو الشبكة

مع ملاحظة أن:

عدد الأرصاد الضرورية لتوقيع أي شكل = ٢ (عدد نقط الشكل – ٢)

أنواع الاشتراطات الداخلية

١- الشرط المحلي: ويسمى أيضا شرط قفل الأفق وهو أن مجموع الزوايا الأفقية المرصودة حول نقطة يجب أن يساوى ٣٦٠ ^{o} ٠

٢- الشرط المثلثي: وهو أن مجموع زوايا المثلث يجب أن يساوى ١٨٠ ^{o} (للمثلث المستوى)

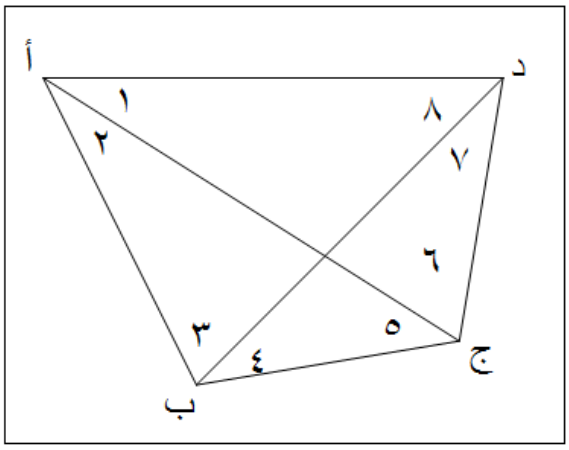
أو أن مجمـوع زوايـا المثلـث يجـب أن يـساوى ١٨٠ ° + ز (للمثلـث الجيوديسي) حيث ز = الزيادة الكرية٠

٣- الشرط الضلعي : لضمان ثبات أطوال الأضلاع المحسوبة بغض النظر عن المسار المتبع بدءا من الضلع المرصود٠ ويجب أولا تصحيح الزوايا المرصودة (أي تحقيق الشروط المحلية والمثلثية) قبل استخدام هذه الزوايا في تحقيق الشرط الضلعي ٠

ويمكن استخدام القوانين التالية لمعرفة عدد كل نوع من الشروط:

عدد الاشتراطات المثلثية = ل – ن + ١
عدد الاشتراطات الضلعية = ع – ٢ ن + ٣
عدد الاشتراطات المحلية = (ص + ن) – (ل + ع)
حيث:
ن = عدد نقط الشكل
ص = عدد الأرصاد
ل = عدد الأضلاع المرصودة من الاتجاهين
ع = عدد الأضلاع الكلية في الشكل

وتوجد العديد من الطرق لكتابة الشرط الضلعي سنتعرض لأبسطها في مثال الشكل الرباعي مرصود القطرين كما يلي :



شكل (١٣-٧) الشرط الضلعي للشكل الرباعي

عدد الأرصاد الضرورية لتوقيع الشكل الرباعي = ٢ (عدد نقط الشكل – ٢) = ٤
عدد الأرصاد الفعلية في الشكل الرباعي = ٨
عدد الاشتراطات = عدد الأرصاد الفعلية – عدد الأرصاد الضرورية = ٨ – ٤ = ٤
عدد الاشتراطات المحلية = صفر (لا يوجد قفل أفق في المثال)
عدد الاشتراطات المثلثية = ٣
عدد الاشتراطات الضلعية = عدد الاشتراطات الكلية – (الاشتراطات المحلية + الاشتراطات المثلثية) = ١

طريقة كتابة الشرط الضلعي:

١- نختار نقطة القطب (أي نقطة تمر بها أشعة إلى كل باقي نقط الشكل) مثلا نقطة ج
٢- نكتب جميع الأشعة المارة بهذه النقطة بالترتيب (سواء في اتجاه عقرب الساعة أو ضده) فتكون الأشعة في اتجاه عقرب الساعة هي: ج د ، ج ب ، ج أ
٣- نجعل حاصل ضرب هذه الأشعة بنفس ترتيبها بسطا لكسر اعتيادي
٤- نكتب ترتيب الأشعة مرة أخرى بعد أن نجعل أول شعاع يصبح آخر شعاع: ج ب ، ج أ ، ج د
٥- نجعل حاصل ضرب هذا الترتيب الجديد مقاما للكسر اعتيادي
٦- نساوى هذا الكسر بالواحد:

$$\frac{\text{ج د} \cdot \text{ج ب} \cdot \text{ج أ}}{\text{ج ب} \cdot \text{ج أ} \cdot \text{ج د}} = ١$$

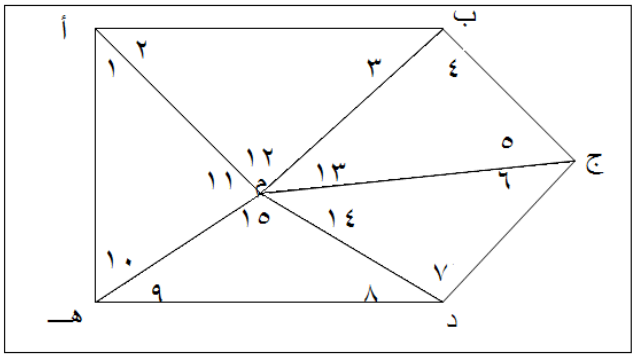
٧- نعوض عن كل شعاع بجيب الزاوية المقابلة له:

$$\frac{\text{جا (م٤)} \cdot \text{جا (م٢)} \cdot \text{جا (م٧+م٨)}}{\text{جا (م٧)} \cdot \text{جا (م٣+م٤)} \cdot \text{جا (م١)}} = ١$$

٨- نأخذ لوغاريتم هذه المعادلة فنحصل على الشرط الضلعي المطلوب :

لو جا (م٤)+ لو جا (م٢)+ لو جا (م٧+م٨) = لو جا (م٧)+ لو جا (م٣+م٤)+ لو جا (م١)

مثال آخر لكتابة الشرط الضلعي للشكل المركزي : في الشكل التالي لا توجد أي نقطة تصلح لاختيارها كقطب إلا نقطة المركز م وبإتباع الخطوات السابقة نحصل على الشرط الضلعي الآتي:

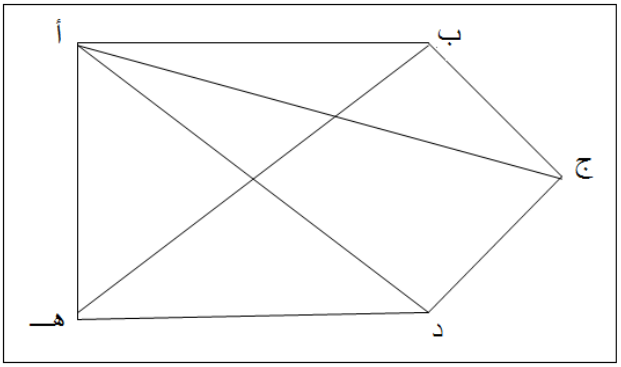


شكل (١٣-٨) الشرط الضلعي للشكل المركزي

$$\frac{م\,ه \times م\,أ \times م\,ب \times م\,ج \times م\,د}{م\,أ \times م\,ب \times م\,ج \times م\,د \times م\,ه} = ١$$

لو جا (م١) + لو جا (م٣) + لو جا (م٥) + لو جا (م٧ + لو جا (م٩) =
لو جا (م١٠) + لو جا (م٢) + لو جا (م٤) + لو جا (م٦) + لو جا (م٨)

مثال آخر لكتابة الشرط الضلعي: في الشكل التالي لا توجد أي نقطة تصلح لاختيارها كقطب إلا نقطة أ حيث أنها النقطة الوحيدة التي تمر بها أشعة إلى جميع نقط الشكل ٠



شكل (١٣-٩) مثال آخر للشرط الضلعي

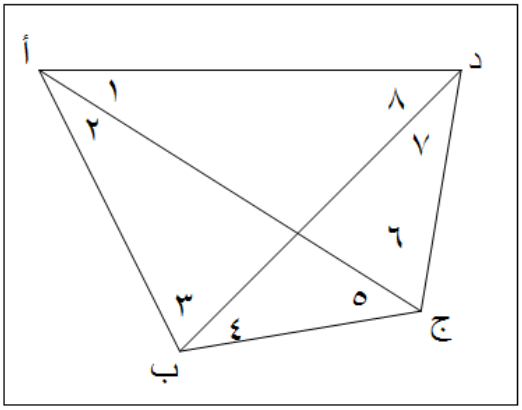
١٣-٢-٥ شروط ضبط شبكات المثلثات

من المعروف أن أية قياسات مهما بلغت دقتها تكون بها بعض الأخطاء مهما صغرت قيمتها٠ ولذلك فأن الهدف من إجراء عملية ضبط شبكات المثلثات هو تصحيح الزوايا المرصودة بحيث تحقق كافة الاشتراطات المتوفرة بالشبكة (الاشتراطات المحلية والمثلثية والضلعية)٠ وتوجد العديد من الطرق الرياضية لضبط الشبكات سنتعرض في هذا الباب لإحدى الطرق البسيطة٠

مثال لضبط الشكل الرباعي مرصود القطرين

يعرف الشكل الرباعي ذو القطرين بأنه من أمتن وأقوى الأشكال الهندسية المكونة لشبكات المثلثات وخاصة من الدرجة الأولى ، وفى هذا الشكل نجد أن :

عدد الأرصاد الضرورية لتوقيع الشكل الرباعي = ٢ (عدد نقط الشكل – ٢) = ٤
عدد الأرصاد الفعلية في الشكل الرباعي = ٨
عدد الاشتراطات = عدد الأرصاد الفعلية – عدد الأرصاد الضرورية = ٨ – ٤ = ٤
عدد الاشتراطات المحلية = صفر (إن لم يوجد قفل أفق)
عدد الاشتراطات المثلثية = ٣
عدد الاشتراطات الضلعية = عدد الاشتراطات الكلية – (الاشتراطات المحلية + الاشتراطات المثلثية) = ١



شكل (١٣-١٠) الشكل الرباعي المرصود القطرين

مثال لأرصاد الشكل الرباعي المرصود القطرين

الزاوية	قيمتها
١	٣٠ " ٤٢ ‘ ٥٧ °
٢	٤٩ ٥١ ٢٧
٣	٣٢ ٥٨ ٤١
٤	٣٤ ٤٢ ٥٧
٥	٠٧ ٢٧ ٥٢
٦	٤١ ٥٨ ٤١
٧	٣٣ ٥١ ٢٧
٨	٠٦ ٢٧ ٥٢
المجموع	٥٢ ٥٩ ٣٥٩

الشرط المثلثي الأول: مجموع الزوايا الثمانية = ٣٦٠ °

الخطأ = ٥٢ ٥٩ ٣٥٩ ــ ٣٦٠ = + ٨"

الشرط المثلثي الثاني : أي زاويتين متقابلتين بالرأس متساويتين

١ + ٨ = ٤ + ٥

١ + ٨ = ٣٦" ٠٩‘ ١١٠°

٤ + ٥ = ٤١" ٠٩‘ ١١٠°

الخطأ = ٥"

التصحيح لكل زاوية = ٥" / ٤ = ١ر٢٥" (للسهولة سنأخذ التصحيح = ١" على أن تصحح زاوية واحدة بمقدار ٢" لكي يكون مجموع تصحيحات الزوايا الأربع = ٥")٠ ويكون التصحيح بالجمع للزاويتين ١ ، ٨ وبالطرح للزاويتين ٤ ، ٥ ٠ ويجب استخدام الزوايا التي سبق تصحيحها للشرط المثلثي الأول ولا نستخدم الزوايا المرصودة٠

الشرط المثلثي الثالث : أي زاويتين متقابلتين بالرأس متساويتين

٢ + ٣ = ٦ + ٧

٢ + ٣ = ٢١ ٥٠ ٦٩ °

٦ + ٧ = ١٤ ٥٠ ٦٩ °
الخطأ = ٧"
التصحيح لكل زاوية = ٧" / ٤ = ١ر٧٥" (للسهولة سنأخذ التصحيح = ٢" على أن تصحح زاوية واحدة بمقدار ١" لكي يكون مجموع تصحيحات الزوايا الأربع = ٧")٠ ويكون التصحيح بالطرح للزاويتين ٢ ، ٣ وبالجمع للزاويتين ٦ ، ٧ ٠

جدول تصحيح الشروط المثلثية للشكل الرباعي المرصود القطرين

الزاوية	المرصودة	مجموع الزاويتين المتقابلتين بالرأس	الفرق	ضبط الفرق	ضبط ٣٦٠	الضبط الكلي	الزاوية نصف المصححة
١	٣٠ " ٥٥٧'٤٢			"١+	"١+	"٢+	٣٢ " ٥٥٧ '٤٢
٨	٥٢ ٢٧ ٠٦	٣٦ " ٥١١٠'٠٩	"٥	"٢+	"١+	"٣+	٥٢ ٢٧ ٠٩
٤	٥٧ ٤٢ ٣٤			"١-	"١+	-	٥٧ ٤٢ ٣٤
٥	٥٢ ٢٧ ٠٧	١١٠ ٠٩ ٤١		"١-	"١+	-	٥٢ ٢٧ ٠٧
٢	٢٧ ٥١ ٤٩			"١-	-	"١-	٢٧ ٥١ ٤٨
٣	٤١ ٥٨ ٣٢	٦٩ ٥٠ ٢١	"٧	"٢-	"١+	"١-	٤١ ٥٨ ٣١
٦	٤١ ٥٨ ٤١			"٢+	"١+	"٣+	٤١ ٥٨ ٤٤
٧	٢٧ ٥١ ٣٣	٦٩ ٥٠ ١٤		"٢+	-	"٢+	٢٧ ٥١ ٣٥
		٥٢" ٣٥٩ '٥٩		"٢+	"٦+	"٨+	٠٠" ٣٦٠ '٠٠ °

الشرط الضلعي : يمكن اعتبار نقطة تقاطع القطرين كأنها قطب للشكل (افتراضيا مع أنها غير محتلة) لسهولة تكوين معادلة الشرط الضلعي :

لو جا٨ + لو جا ٢ + لو جا ٤ + لو جا ٦ = لو جا ١ + لو جا ٣ + لو جا ٥ + لو جا ٧

وتكون الخطوات كالتالي:
١- نحسب قيمة لو جا الزوايا الفردية (ل ١) ، لو جا الزوايا الزوجية (ل ٢)
٢- نحسب الفرق (ل١ – ل٢)
٣- نحسب مجموع لو جا ١ " لجميع الزوايا (مج)
٤- معامل التصحيح = (ل١ – ل ٢) / (مج)
٥- نضيف معامل التصحيح للزوايا التي كان لها (لو جا) هو الأصغر ونطرح معامل التصحيح من الزوايا التي كان لها (لو جا) هو الأكبر ٠ ويلاحظ أن في حالة كون معامل التصحيح أقل من ١" فيمكن اعتباره ١" لتسهيل الحسابات٠

جدول تصحيح الشرط الضلعي للشكل الرباعي المرصود القطرين

الزاوية	نصف المصححة	لو جا الزاوية + ١٠	فرق لو جا ١" × ١٠ $^{-٦}$	ضبط الفرق	الزاوية المصححة
٨	٥٢ ٢٧ ٠٩	٩,٨٩٩١٩٠١٤٦	١٦,٢	"١-	٥٢ ٢٧ ٠٨
٢	٥٧ ٤٢ ٣٤	٩,٩٢٧٠٣٦٥٠٧	١٣,٣	"١-	٥٧ ٤٢ ٣٣
٤	٢٧ ٥١ ٤٨	٩,٦٦٩٦٥٥٣٩٥	٣٩,٨	"١-	٢٧ ٥١ ٤٧
٦	٤١ ٥٨ ٤٤	٩,٨٢٥٣٣٣١١	٢٣,٤	"١-	٤١ ٥٨ ٤٣

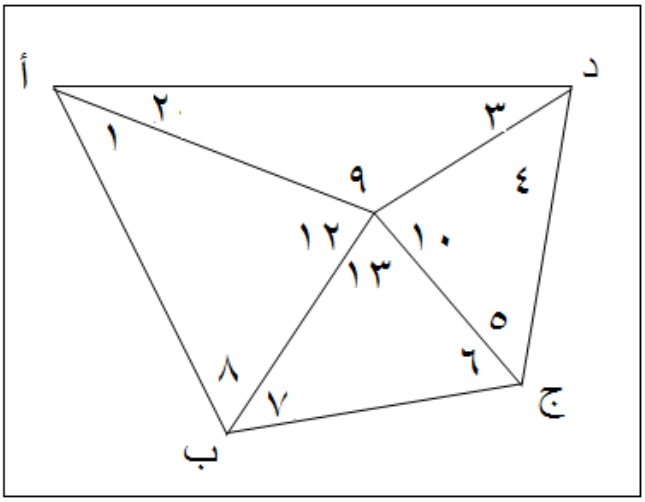
		ل١=٣٩,٣٢١٢١٥١٦			
١	٥٧ ٤٢ ٣٢	٩,٩٢٧٠٣٣٨٤٦	١٣,٣	"١+	٥٧ ٤٢ ٣٣
٣	٤١ ٥٨ ٣١	٩,٨٢٥٣٠٢٦٨٦	٢٣,٤	"١+	٤١ ٥٨ ٣٢
٥	٥٢ ٢٧ ٠٧	٩,٨٩٩١٨٦٩٠٩	١٦,٢	"١+	٥٢ ٢٧ ٠٨
٧	٢٧ ٥١ ٣٥	٩,٦٦٩٦٠٣٦١٥	٣٩,٨	"١+	٢٧ ٥١ ٣٦
		ل٢=٣٩,٣٢١١٢٧٠٦			
		(ل١ – ل٢) = ٨٨,١ × ١٠ $^{-٦}$	مج = ١٨٥,٤ × ١٠ $^{-٦}$		
معامل التصحيح = ٨٨,١ / ١٨٥,٤ = ٠,٤٧ " ≈ ١"					

مثال لضبط الشكل الرباعي ذو المركز

في الشكل الرباعي المركزي يوجد ٦ شروط :
شرط محلى واحد (مجموع الزوايا حول المركز = ٣٦٠)
أربعة شروط مثلثية (في كل مثلث: مجموع الزوايا = ١٨٠)
شرط ضلعي واحد٠

وتكون خطوات التصحيح كالآتي:

١- تصحيح زوايا كل مثلث ليكون مجموع الزوايا الثلاثة = ١٨٠
٢- تصحيح زوايا المركز ليكون مجموعها = ٣٦٠
٣- يضاف تصحيح زاوية المركز لكل مثلث بعكس إشارته على الزاويتين غير المركزتين في كل مثلث حتى نحافظ على الشرط المثلثي مرة أخرى٠
٤- تصحيح الشرط الضلعي (بنفس الأسلوب كما سبق في الشكل الرباعي مرصود القطرين)٠



شكل (١٣-١١) الشكل الرباعي المرصود القطرين

جدول تصحيح الشروط المثلثية والشرط المحلى للشكل الرباعي ذو المركز

الزاوية	المرصودة	زوايا المركز	الفرق	ضبط ١٨٠	ضبط ٣٦٠	الضبط الكلى	الزاوية نصف المصححة
٨	١٧ ١٠ ٤٠			-	+١	+١	١٨ ١٠ ٤٠
١	١٢ ٢٧ ٧٩		+١	-١	+١	-	١٢ ٢٧ ٧٩
١٢	٣٢ ٢٢ ٦٠	٣٢ ٢٢ ٦٠		-	-٢	-٢	٣٠ ٢٢ ٦٠
	٠١ ٠٠ ١٨٠						
٢	٢٨ ١٥ ٨٣			+٢	+١	+٣	٣١ ١٥ ٨٣
٣	٣٦ ٣٠ ٣٩		-٨	+٣	+١	+٤	٤٠ ٣٠ ٣٩
٩	٤٨ ١٣ ٥٧	٤٨ ١٣ ٥٧		**+٣**	-٢	+١	٤٩ ١٣ ٥٧
	٥٢ ٥٩ ١٧٩						
٤	٥٨ ٤٨ ٢٨			-	+١	+١	٥٩ ٤٨ ٢٨
٥	٥٢ ٢٢ ٤٠		+٥	-٣	+١	-٢	٥٠ ٢٢ ٤٠
١٠	١٥ ٤٨ ١١٠	١٥ ٤٨ ١١٠		**-٢**	-٢	-٤	١١ ٤٨ ١١٠
	٠٥ ٠٠ ١٨٠						
٦	٠٧ ٤١ ٢٧			-٢	+١	-١	
٧	٢٤ ٤٣ ٢٠		+٦	-٢	+٢	-	٠٦ ٤١ ٢٧
١١	٣٥ ٣٥ ١٣١	٣٥ ٣٥ ١٣١		**-٢**	-٣	-٥	٢٤ ٤٣ ٢٠
	٠٦ ٠٠ ١٨٠						٣٠ ٣٥ ١٣١
		١٠ ٠٠ ٣٦٠		"١-			
		"١٠	+١٠ " – ١ " = ٩ " توزع على زوايا المركز فقط				

جدول تصحيح الشرط الضلعي للشكل الرباعي ذو المركز

الزاوية	نصف المصححة	لو جا الزاوية + ١٠	فرق لو جا ١" × ١٠ -٦	ضبط الفرق	الزاوية المصححة
٨	٤٠ ١٠ ١٨	٩,٨٠٩٦١٣٦	٢٤	"١+	٤٠ ١٠ ١٩
٢	٨٣ ١٥ ٣١	٩,٩٩٦٩٨٧	٢	"١+	٨٣ ١٥ ٣٢
٤	٢٨ ٤٨ ٥٩	٩,٦٨٣٠٥٠١	٣٧	"١+	٢٨ ٤٩ ٠٠
٦	٢٧ ٤٠ ٠٦	٩,٦٦٦٨٤٧٩	٤٠	"١+	٢٧ ٤٠ ٠٧

		ل١=٣٩,١٥٦٤٩٩٥			
١	٧٩ ٢٧ ١٢	٩,٩٩٢٦٠٠٤	٤	"١-	٧٩ ٢٧ ١١
٣	٣٩ ٣٠ ٤٠	٩,٨٠٣٦١٢٧	٢٥	"١-	٣٩ ٣٠ ٣٩
٥	٤٠ ٢٢ ٥٠	٩,٨١١٤٨٢٢	٢٤	"١-	٤٠ ٢٢ ٤٩
٧	٢٠ ٤٣ ٢٤	٩,٥٤٨٨٢٦٢	٥٧	"١-	٢٠ ٤٣ ٢٣
		ل٢=٣٩,١٥٦٥٢١٥			
	(ل١ – ل٢) = ٢٢ × ١٠ -٦		مج = ٢١,٣ × ١٠ -٦		
معامل التصحيح = ٢٢ / ٢١,٣ = ١,٠٣ " ≈ ١"					

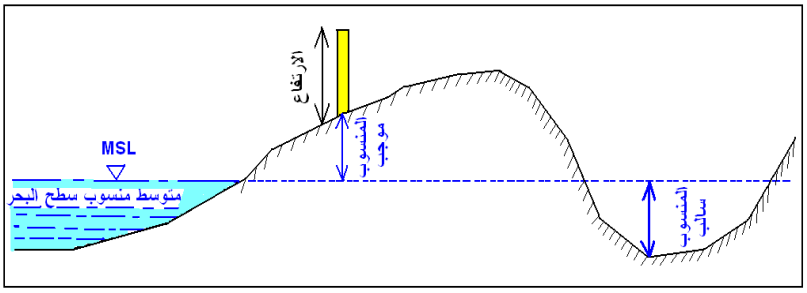
٣-١٣ شبكات الثوابت الأرضية الرأسية (شبكات الروبيرات)

تستخدم تطبيقات المساحة مثل الشريط و الثيودليت في تحديد مواقع (إحداثيات) المعالم الجغرافية في مستوي ، أي من خلال تحديد بعدين (س ، ص) لكل نقطة. إلا أن الأرض ليست مستوي إنما هي مجسم شبه كروي وسطحه ليس مستويا بل تتخلله الجبال و الوديان و المنخفضات ، ولتمثيل أي معلم علي الأرض يلزمنا ثلاثة أبعاد وليس أثنين فقط. هذا البعد الثالث (البعد الرأسي) هو الهدف الذي تسعي الميزانية لقياسه. الميزانية هي فرع المساحة الذي يبحث في الطرق المختلفة لقياس البعد الثالث (الارتفاعات) للمعالم الجغرافية علي سطح الأرض. الميزانية (أو التسوية) من أهم تطبيقات علم المساحة في كافة المشروعات المدنية و العسكرية علي الأرض، فهي أساس العمل المساحي في تنفيذ مشروعات البناء و الجسور و الكباري و الطرق و السكك الحديدية والترع و المصارف والسدود وتسوية الأراضي ... الخ.

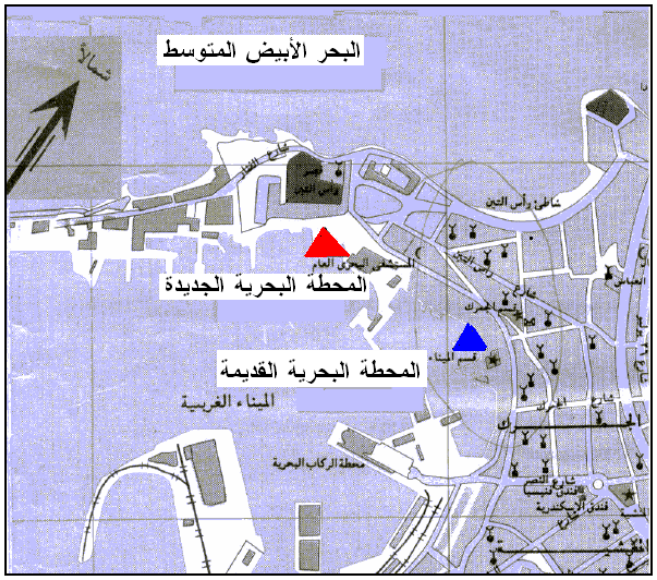
لتحديد البعد الرأسي (ارتفاع أو الانخفاض) لمجموعة من النقاط يلزم سطح مرجعي أو مستوي مقارنه تنسب إليه جميع القياسات ، أي سطح عين يكون الارتفاع عنده مساويا للصفر. يتكون كوكب الأرض من مياه (بحار و محيطات) تغطي ٧٥% من إجمالي سطح الكوكب بينما تمثل اليابسة (القارات) الجزء المتبقي. لذلك أتخذ علماء المساحة منذ مئات السنين مستوي سطح البحر (وامتداده الوهمي تحت اليابسة) كسطح مرجعي لقياس الارتفاعات. بما أن مياه البحار و المحيطات تتأثر علي سطحها بالتيارات البحرية اليومية و تأثيرات المد و الجزر فأن مستوي المقارنة هو متوسط منسوب سطح البحر Mean Sea Level أو اختصارا MSL. فإذا تم قياس البعد الرأسي لأي معلم بدءا من أي مرجع فنطلق علي هذا القياس أسم "الارتفاع

"Height" بينما إذا تم القياس بدءا من متوسط منسوب سطح البحر MSL فنطلق علي هذا البعد أسم "المنسوب Level". أي أن المنسوب هو ارتفاع من نوع خاص تم قياسه أو تحديده بدءا من متوسط منسوب سطح البحر. يكون المنسوب موجبا إن كان أعلي من منسوب متوسط سطح البحر ، ويكون سالبا إن كان أقل منه.

قامت كل دولة بتحديد متوسط منسوب سطح البحر MSL في نقطة محددة ومن ثم تم اعتبار تلك النقطة هي أساس كل القياسات الرأسية (المناسيب) في هذه الدولة. مثلا في مصر فأن محطة تحديد متوسط منسوب سطح البحر كانت في ميناء الإسكندرية (علي ساحل البحر الأبيض المتوسط) في عام ١٩٠٧م ولذلك نجد في أسفل كل خريطة مصرية جملة "المناسيب مقاسة نسبة إلي متوسط منسوب سطح البحر عند الإسكندرية في عام ١٩٠٧م". أما في المملكة العربية السعودية فالنقطة الأساسية كانت في مدينة جدة (علي ساحل البحر الأحمر) في عام ١٩٦٩م. كانت هذه العملية تتم من خلال قياس و تسجيل ارتفاع مياه سطح البحر داخل بئر - قريب من ساحل البحر وتدخله مياه البحر عن طريق أنبوبة – كل ساعة علي مدار اليوم ولمدة زمنية طويلة تتجاوز عدة سنوات حتى يمكن حساب متوسط هذه القياسات وبالتالي تحديد النقطة (داخل هذا البئر) التي يكون عندها متوسط منسوب سطح البحر مساويا للصفر. في مصر تمت هذه القياسات للفترة ١٨٩٨م - ١٩٠٧م حتى تم تحديد MSL لمصر.

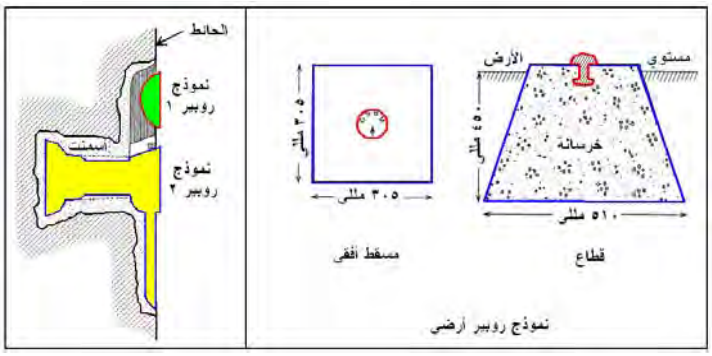


شكل (١٣-٥) الارتفاع و المنسوب

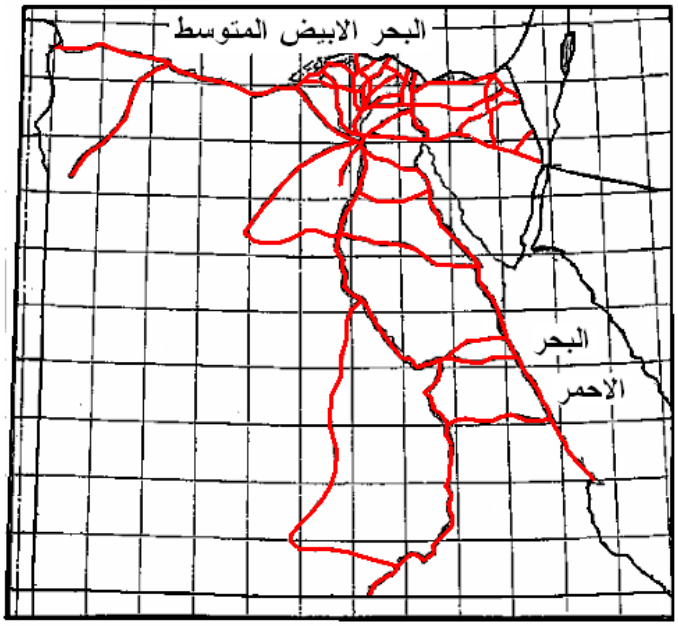


شكل (١٣-٦) محطة قياس منسوب سطح البحر في مصر

بعد تحديد متوسط منسوب سطح البحر للدولة يتم بناء نقطة ثوابت (علامة أرضية) بالقرب من هذا البئر ويتم قياس ارتفاع هذه النقطة عن متوسط منسوب سطح البحر (أي يتم تحديد منسوب هذه النقطة). أطلق أسم Bench Mark أو اختصارا "BM" أو "الروبير" علي هذه النقطة وعلي كل نقطة معلومة المنسوب. وبطريقة معينة (الميزانية التي سنتحدث عنها لاحقا) تم بناء مجموعة من علامات BM الروبيرات بحيث تغطي كافة الأنحاء المعمورة من الدولة، وهذا ما يطلق عليه أسم شبكة الثوابت الرأسية أو شبكات الميزانية أو الشبكات المساحية الرأسية. وبالتالي فتكون فأن من مهام الجهة الحكومية المسئولة عن المساحة في الدولة (هيئة المساحة في مصر أو إدارة المساحة العسكرية في السعودية) توفير نقاط روبيرات داخل كل مدينة في هذه الدولة بحيث يمكن لأي مشروع هندسي أن يبدأ من نقطة BM معلومة المنسوب بالقرب من موقع المشروع. تكون الروبيرات أما مثبتة في حائط أي مبني (غالبا مبني حكومي) وتسمي روبيرات الحائط أو مثبتة في الأرض وتسمي روبيرات أرضية. ويتم الحصول علي معلومات أي روبير (موقعه بالتحديد وقيمة منسوبة) من الجهة المسئولة عن أعمال المساحة في هذه المدينة أو هذه الدولة.



شكل (١٣-٧) أنواع و نماذج روبيرات

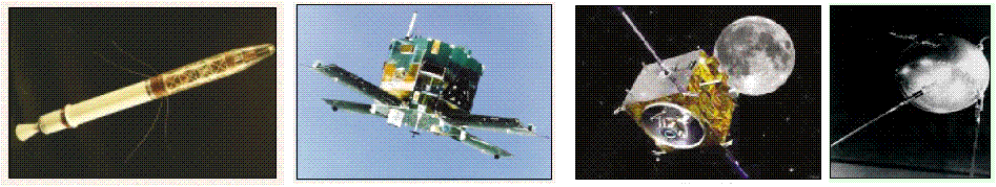


شكل (١٣-٨) شبكة الروبيرات الأساسية في مصر

الفصل الرابع عشر

جيوديسيا الأقمار الصناعية

مع بداية النصف الثاني من القرن العشرين الميلادي دخلت المعرفة البشرية منعطفا تقنيا جديدا حيث أستطاع الإنسان أن يرسل أجساما معدنية إلي خارج نطاق الغلاف الجوي لكوكب الأرض، وهي الأجسام التي أصطلح علي تسميتها بالأقمار الصناعية Satellites. يعد إطلاق القمر الصناعي الروسي الأول "سبوتنيك-١ Sputbik-1" في ٤ أكتوبر ١٩٥٧م هو إعلان دخول الإنسان لعصر الأقمار الصناعية. هذا و قد بدأ إطلاق الأقمار الصناعية و غزو الفضاء – بصفة عامة – بعد أن تطورت عدة تقنيات و خاصة الصواريخ و الرادار ، فالصاروخ هو الوسيلة لإيصال القمر الصناعي إلي الفضاء (كان أول صاروخ يطلق للفضاء بواسطة فريق علماء ألمان بقيادة براون في عام ١٩٣٤م) و الرادار مهم لتعقب القمر و معرفة موقعه ، كما ساهم التطور في الحاسبات الآلية و أنظمة الاتصالات في الإسراع بالدخول إلي عصر الفضاء.



شكل (١٤-١) بعض الأقمار الصناعية

يمكن تقسيم الأقمار الصناعية – بصفة عامة – إلي ثلاثة مجموعات أو أنواع:

أ- أقمار صناعية ملاحية Navigation Satellites يكون هدفها الأساسي تقديم تقنيات ووسائل دقيقة لعمليات الملاحة بين موقعين (سواء الملاحة الأرضية أو البحرية أو الجوية أو حتى الملاحة الفضائية) ، وتأتي في هذه المجموعة من الأقمار الصناعية نظم أو تقنيات مثل نظام الجي بي أس GPS و نظام جاليليو Galileo و نظام دوبلر Doppler و نظام جلوناس GLONASS.

ب- أقمار صناعية للاتصالات Communication Satellites وهي أقمار تساعد في نقل البيانات (مثل البث الإذاعي و التلفزيوني) وتوزيعها علي أجزاء كبيرة من سطح الأرض لتتغلب علي مشكلة كروية الأرض التي تعيق النقل المباشر الأرضي لهذه البيانات. ومن أمثلة هذه النوعية من الأقمار الصناعية: النيل سات و العرب سات المستخدمين في البث التلفزيوني.

ت- أقمار صناعية لدراسة موارد الأرض Earth Resources Satellites ومنها أقمار صناعية خاصة بدراسة البحار و أخري خاصة بدراسة الطقس و ثالثة مخصصة للتصوير الفضائي أو ما يعرف الآن بأقمار الاستشعار عن بعد Remote Sensing Satellites.

١٤-١ جيوديسيا الأقمار الصناعية

يهتم فرع جيوديسيا الأقمار الصناعية بطرق الرصد و الحساب التي تسمح بتقديم حلول للمشاكل الجيوديسية من خلال أرصاد (قياسات) دقيقة إلي أو من أو بين الأقمار الصناعية التي تكون غالبا قريبة من سطح الأرض.

من أساسيات جيوديسيا الأقمار الصناعية الإلمام بطبيعة و قوانين حركة الأجسام (الأقمار الصناعية هنا) داخل أو خارج نطاق الجاذبية الأرضية لكوكب الأرض والقوي المؤثرة علي هذه الأقمار في مداراتها وأيضا كيفية تحديد العلاقات الفراغية (المواقع) بين هذه الأقمار الصناعية والمحطات الأرضية (نقاط الثوابت الجيوديسية) في إطار (نظام إحداثيات) مناسب.

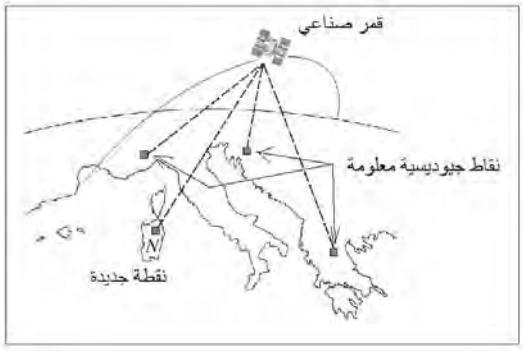
تستخدم جيوديسيا الأقمار الصناعية في عدة مجالات أساسية تشمل:

- التحديد الدقيق للإحداثيات ثلاثية الأبعاد بهدف إنشاء نقاط الثوابت الجيوديسية سواء علي المستوي العالمي أو القاري أو الوطني.
- تحديد مجال الجاذبية الأرضية للأرض ومن ثم تحديد شكل الأرض الحقيقي (الجيويد) بدقة.
- قياس و نمذجة التغيرات الديناميكية (التغيرات مع مرور الزمن أي رباعية الأبعاد) مثل تحركات القشرة الأرضية وحركة الصفائح التكتونية والتغير في عناصر دوران الأرض.

١٤-١-١ مميزات جيوديسيا الأقمار الصناعية

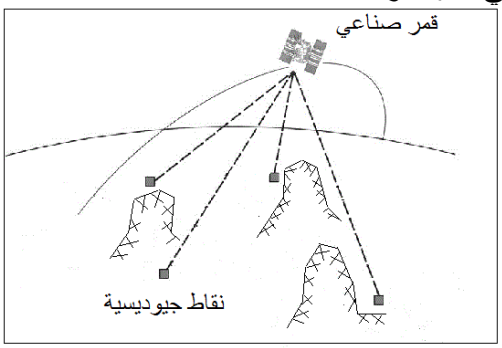
تأتي أهمية فرع جيوديسيا الأقمار الصناعية من عدة مبادئ أساسية تقدم حلولا مبتكرة للعمل الجيوديسي وطرق الرصد:

١. يمكن التعامل مع الأقمار الصناعية كأنها أهداف علي ارتفاعات عالية تكون مرئية من مسافات كبيرة جدا. أي أنها تعد كنقاط تحكم (ثوابت) control points يمكن رصدها في شبكة عالمية أو إقليمية، فإذا تم رصد القمر الصناعي (أنظر الشكل التالي) في نفس اللحظة من عدة نقاط أرضية - تبعد عن بعضها البعض مئات أو أحيانا آلاف الكيلومترات - فيمكن اعتبار القمر الصناعي كما لو كان هدف فقط (شاخص مثلا في المساحة الأرضية) دون الحاجة لمعرفة موقعه الدقيق ومن هذه الأرصاد يمكن حساب المسافات – مثلا - بين هذه النقاط الأرضية. هذه الخاصية أو المبدأ هو ما أنشأ الطريقة الهندسية Geometrical Method في جيوديسيا الأقمار الصناعية.

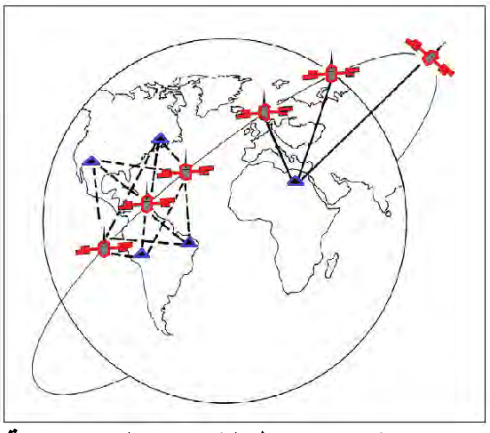


شكل (١٤-٢) استخدام الأقمار الصناعية كأهداف رصد عالية الارتفاع

٢. في الطرق الجيوديسية التقليدية (شبكات المثلثات) كان من الضروري للرصد توافر عنصر الرؤية المتبادلة بين نقاط الثوابت الأرضية حيث أن الرصد يعتمد علي الأجهزة البصرية (الثيودليت). ومن هنا كانت أطوال أضلاع شبكات المثلثات قصيرة نسبيا وكان العمل الحقلي صعبا ويتم في أوقات معينة يتوافر بها الطقس المناسب وصفاء الرؤية بين النقاط. هذا المبدأ تم تخطيه تماما في جيوديسيا الأقمار الصناعية حيث أن كل نقطة أرضية تستقبل إشارات الأقمار الصناعية فقط وليس هناك أي حاجة لرؤية النقاط الأخرى. وبالتالي زادت أطوال أضلاع الشبكات الجيوديسية لدرجة مئات الكيلومترات في الشبكات العالمية ولم يعد الرصد معتمدا علي الظروف المناخية وأيضا أصبح العمل الحقلي أسهل وأقل تكلفة.



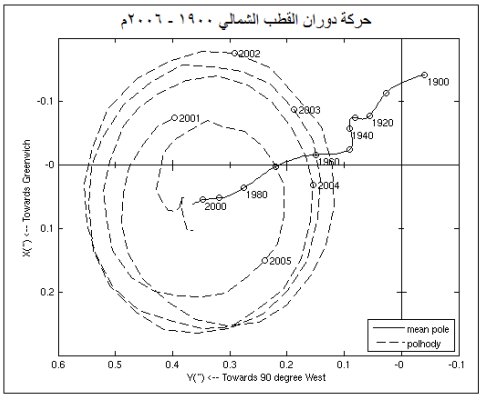
شكل (١٤-٣) انتفاء شرط الرؤية المبادلة بين نقاط الرصد الأرضية



شكل (١٤-٤) إنشاء و ربط الشبكات الجيوديسية العالمية

٣. يمكن اعتبار الأقمار الصناعية كمجسات أو أجهزة استشعار sensors لمجال الجاذبية الأرضية للأرض، ومن خلال متابعة و رصد القمر الصناعي في مدارة يمكن معرفة التغير في مجال الجاذبية الأرضية المؤثر علي القمر الصناعي لحظة بلحظة. وبالتالي تستخدم الأقمار الصناعية في رصد و قياس قيم الجاذبية الأرضية للأرض ومن ثم تحديد شكلها الحقيقي (الجيويد). هذه الخاصية أو المبدأ هو ما أنشأ الطريقة الديناميكية Dynamical Method في جيوديسيا الأقمار الصناعية.

٤. بالتكامل بين كلا من الطريقة الهندسية و الطريقة الديناميكية تمكنت جيوديسيا الأقمار الصناعية من رصد و متابعة و تحديد قيم التغيرات التي تحدث بمرور الزمن وخاصة في العناصر الأساسية للأرض مثل عناصر دوران الأرض و حركة القطب الشمالي polar motion.



شكل (١٤-٥) حركة دوران القطب الشمالي للأرض

١٤-١-٢ تاريخ جيوديسيا الأقمار الصناعية

يمكن تقسيم تاريخ جيوديسيا الأقمار الصناعية إلي عدة فترات تشمل:

(أ) من ١٩٥٧م إلي ١٩٧٠م:

مع إطلاق القمر الصناعي الأول في عام ١٩٥٧م والقمر الصناعي الثاني في عام ١٩٥٨م بدأت المرحلة العلمية لدراسة هذا التخصص الجديد من تخصصات الجيوديسيا. لم يمر عام واحد إلا وبدأت نتائج جيوديسيا الأقمار الصناعية في الظهور حيث قام العالم O'Keefe في عام ١٩٥٨م بتحديد قيمة تفلطح الأرض (1/f) بقيمة ٢٩٨.٣ من أرصاد الأقمار الصناعية. وفي عام ١٩٦٠م نشر العالم Kaula نظرية مدارات الأقمار الصناعية، وفي عام ١٩٦٢م قامت هيئة المساحة الفرنسية IGN بربط الشبكات الجيوديسية بين كلا من فرنسا و الجزائر من خلال أرصاد الأقمار الصناعية.

(ب) من ١٩٧٠م إلي ١٩٨٠م:

تميزت هذه الفترة بالمشروعات العلمية وتم ابتكار تقنيات جديدة مثل الرصد علي القمر الطبيعي وتقنية الرصد بالليزر علي الأقمار الصناعية SLR. كما بدأت الحكومة الأمريكية في تطوير

تقنية عالمية لتحديد المواقع تحت مسمي TRANSIT (أو تقنية الدوبلر) التي شاع استخدامها في أعمال المساحة و الجيوديسيا في عدة دول حول العالم. أيضا قام الاتحاد السوفيتي سابقا (روسيا حاليا) في إطلاق النظام العالمي لتحديد المواقع المعروف باسم جلوناس GLONASS. كما بدأت مرحلة تطوير نماذج عالمية أكثر دقة للجيويد.

(ج) من ١٩٨٠م إلي ١٩٩٠م:

تعد هذه المرحلة هي المرحلة التطبيقية لجيوديسيا الأقمار الصناعية علي نطاق عالمي واسع، وخاصة مع بدء تشغيل تقنية النظام العالمي لتحديد المواقع (الجي بي أس GPS) في منتصف الثمانينات. زادت دقة أرصاد و قياسات جيوديسيا الأقمار الصناعية كثيرا وبدأت في إحلال الطرق الجيوديسية التقليدية في أعمال المساحة و الخرائط.

(د) من ١٩٩٠م إلي ٢٠٠٠م:

تميزت هذه المرحلة بالأعمال و التطبيقات الجيوديسية علي المستوي العالمي، فظهرت المنظمة العالمية لدراسة دوران الأرض International Earth Rotation Service (اختصارا IERS) في عام ١٩٨٧م وظهر أيضا الإطار العالمي المرجعي الأرضي International Terrestrial Reference Frame (أو اختصارا ITRF) وكذلك المنظمة العالمي للجي بي أس International GPS Service (أو اختصارا IGS). وكل هذه المنظمات الدولية تعتمد علي تقديم خدمات تقنية لمستخدمي جيوديسيا الأقمار الصناعية علي المستوي العالمي وبدون مقابل مادي.

(ذ) من ٢٠٠٠م إلي الآن:

مازالت الانجازات العلمية لجيوديسيا الأقمار الصناعية مستمرة حيث زادت دقة الأرصاد بصورة كبيرة. مع إطلاق الأقمار الصناعية المخصصة لدراسة الجاذبية الأرضية (مثل القمر CHAMP والقمر GRACE والقمر GOCE) أمكن تطوير نماذج جيويد عالمية دقيقة. كما بدأت الحكومة الأمريكية في إطلاق الجيل الثاني من أقمار الجي بي أس وبدأ الاتحاد الأوروبي في إطلاق النظام الأوروبي لتحديد المواقع جاليليو، وكذلك الحكومة الصينية التي بدأت في تنفيذ نظامها الخاص لتحديد المواقع والذي سيكون متاحا للاستخدام العالمي أيضا.

٤-١-٣ تطبيقات جيوديسيا الأقمار الصناعية

في الجيوديسيا العالمية:

- تحديد الشكل العام للأرض و مجال جاذبيتها.
- تقدير أبعاد الاليبسويد الممثل للأرض.
- إنشاء إطار مرجعي أرضي عالمي.
- تحديد الجيويد الدقيق كإطار لتمثيل سطح الأرض.
- الربط بين المراجع الجيوديسية المختلفة.
- ربط المراجع الوطنية بالمراجع العالمية.

في شبكات الثوابت الأرضية:

- إنشاء شبكات الثوابت الأرضية الجيوديسية للدول.
- إنشاء الشبكات ثلاثية الأبعاد.
- تحديث وزيادة دقة الشبكات الجيوديسية القائمة.
- ربط الشبكات الجيوديسية بين اليابسة و الجزر.
- تكثيف الشبكات الجيوديسية القائمة.

في الجيوديسيا الديناميكية:

- إنشاء نقاط متابعة تحركات القشرة الأرضية.
- التحليل المستمر لحركة دوران الأرض.
- تحديد حركة دوران القطب الشمالي.

في الجيوديسيا التطبيقية:

- الرفع المساحي التفصيلي لمشروعات المساحة و الخرائط و التخطيط الإقليمي و تخطيط المدن و نظم المعلومات الجغرافية.
- إنشاء شبكات الثوابت الأرضية للمشروعات الهندسية.
- إنشاء نقاط الثوابت الأرضية للمساحة التصويرية و الاستشعار عن بعد.
- تحديد مواقع (إحداثيات) كاميرات التصوير الأرضي و الجوي.
- إنشاء نقاط الثوابت الأرضية لمشروعات الزراعة و الغابات والتعدين و الجيولوجيا ... الخ.

في الملاحة:

- الملاحة الدقيقة البرية و البحرية و الجوية.
- تحديد مواقع دقيقة لمشروعات المسح البحري و الهيدروجرافي والجيوفيزياء.
- ربط محطات قياس المد و الجزر (لقياس مستوي سطح البحر)
- توحيد المرجع الجيوديسي الرأسي بين الدول.

في مجالات أخري:

- تحديد مواقع القياسات الجيوفيزيقية مثل المسح المغناطيسي سواء في البر أو البحر.
- متابعة و رصد ذوبان الجليد في القطبين الشمالي و الجنوبي.
- تحديد مدارات الأقمار الصناعية علي اختلاف تطبيقاتها.
- دراسة طبقات الغلاف الجوي.

٤-٢ أنواع الارتفاعات

يستخدم الاليبسويد كأحسن شكل هندسي (معلوم المعادلات ويمكن إجراء الحسابات عليه) لتمثيل شكل الأرض. فان كانت الكرة تختلف عن شكل الأرض في حدود ٢١ كيلومتر فأن الاليبسويد لا يختلف عن شكل الأرض إلا في حدود مائة متر تقريبا فقط. هذا علي المستوي الأفقي (تحديد الإحداثيات الأفقية مثل خط الطول و دائرة العرض) بحيث يكون الاليبسويد هو المرجع الأفقي Horizontal Datum للأرض. لكن علي المستوي الرأسي (الارتفاع) فأن الاليبسويد غير مناسب لقياس الارتفاعات حيث أنه يختلف عن شكل الأرض الحقيقي (شكل أ).

حيث أن ثلاثة أرباع سطح الأرض مغطي بالمياه (في المحيطات و البحار) فأن شكل متوسط سطح البحر Mean Sea Level (أو اختصارا MSL) يكاد يمثل شكل الأرض الحقيقي. أما من ناحية مجال الجاذبية الأرضية للأرض فهو يتكون من آلاف الأسطح متساوية الجهد، وهناك أحد هذه الأسطح الذي يكاد يطابق شكل متوسط سطح البحر وقد أطلق علي هذا السطح أسم الجيويد Geoid. أي أن الجيويد هو سطح من أسطح مجال الجاذبية الأرضية الذي يكاد ينطبق مع سطح متوسط سطح البحر، وبالتالي فأنه الشكل الحقيقي لكوكب الأرض. وفي معظم دول العالم فقد تم الاعتماد علي الجيويد ليكون مستوي المقارنة أو المرجع الرأسي Vertical Datum لقياس الارتفاعات.

نظرا لعد انطباق سطح الجيويد مع سطح الاليبسويد فأن الاتجاه العمودي علي الجيويد (اتجاه خيط الشاغول plumb line في الأجهزة المساحية) لا ينطبق مع الاتجاه العمودي علي الاليبسويد عند أي نقطة، لكن توجد زاوية صغيرة بين كلا الاتجاهين ويطلق عليها اسم زاوية انحراف الرأسي Deflection of the Vertical ويرمز لها بالرمز اللاتيني θ (تنطق: ثيتا) كما في الشكل ب. يمكن تحليل زاوية انحراف الرأسي إلي مركبتين: η (تنطق: اكساي) و ξ (تنطق: ايتا). يمكن حساب قيمة مركبتي زاوية انحراف الرأسي من المعادلتين:

$$\xi = \Phi - \varphi \qquad (14\text{-}1)$$

$$\eta = (\Lambda - \lambda)\cos\varphi \qquad (14\text{-}2)$$

حيث:

Φ قيمة دائرة العرض الفلكية للنقطة
φ قيمة دائرة العرض الجيوديسية للنقطة
Λ قيمة خط الطول الفلكي للنقطة
λ قيمة خط الطول الجيوديسي للنقطة

إذا تم عمل أرصاد فلكية عند نقطة جيوديسية معينة واستطعنا قياس خط طولها الفلكي و دائرة العرض الفلكية (القيم الحقيقية علي الأرض) فيمكن حساب قيمة مركبتي زاوية انحراف الرأسي عند هذه النقطة من خلال معرفة خط طولها الجيوديسي و دائرة عرضها الجيوديسية (علي

الاليبسويد). وكانت هذه الطريقة تسمي الطريقة الفلك-جيوديسية astro-geodetic method.

قديما عند البدء في إنشاء الشبكات الجيوديسية لدولة ما كان يتم اختيار "أنسب" اليبسويد ليمثل سطح الأرض (غالبا كان هو الاليبسويد الأحدث في ذلك الوقت). عند النقطة الأساسية للشبكة الجيوديسية كان يتم فرض أن الاليبسويد ينطبق علي الجيويد في هذا الموضع، أي أنه كان يتم فرض أن قيمة مركبتي زاوية انحراف الرأسي η و ξ تساويان الصفر. وبالتالي نكون قد غيرنا من وضع الاليبسويد ذاته (عدلنا وضعه الفراغي لكي ينطبق مع الجيويد عند هذه النقطة) ومن ثم فلم يعد هو نفس الاليبسويد العالمي المعروف. هنا نطلق عليه أسم المرجع Datum للدولة.

في المستوي الرأسي فأن ارتفاع النقطة عن سطح الاليبسويد لا يساوي ارتفاعها عن سطح الجيويد حيث أن كلا السطحين لا ينطبقان. يسمي ارتفاع النقطة عن سطح الاليبسويد بالارتفاع الجيوديسي Geodetic Height ويرمز له بالرمز h، بينما يطلق اسم الارتفاع الأرثومتري علي ارتفاع النقطة عن سطح الجيويد ويرمز له بالرمز H (هو المعروف أيضا في المساحة باسم المنسوب). الفرق بين كلا من الارتفاع الجيوديسي و المنسوب هو ما يسمي حيود الجيويد Geoidal Undulation أو ارتفاع الجيويد Geoid Height ويرمز له بالرمز N. العلاقة بين هذه الأنواع الثلاثة للارتفاع تعبر عنها المعادلة:

$$h = H + N \qquad (14\text{-}3)$$

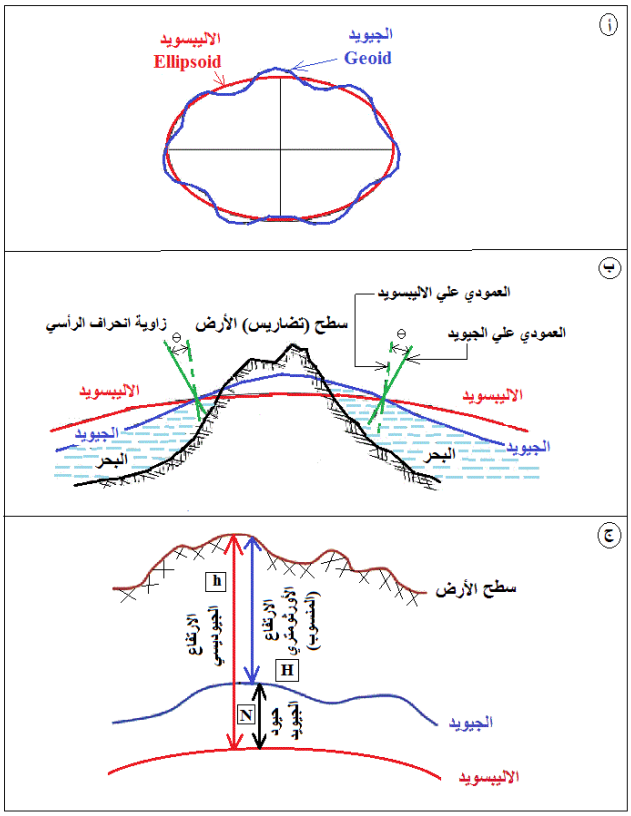
لاحظ أن المعادلة السابقة تفترض أن سطح الجيويد يقع أعلي من سطح الاليبسويد وهذه هي الحالة العامة. أما إن كان سطح الجيويد يقع أسفل سطح الاليبسويد فالمعادلة ستصبح: h=H-N.

المعادلة السابقة من أهم معادلات الجيوديسيا حيث منها يمكن تحويل الارتفاع الجيوديسي (المقاس بتقنيات جيوديسيا الأقمار الصناعية مثل الجي بي أس) إلي الارتفاع الأرثومتري أو المنسوب المستخدم في المساحة الأرضية والخرائط في معظم دول العالم. يتم ذلك من خلال معرفة قيمة حيود الجيويد عند هذه النقطة (توجد طرق عديدة لقياس وحساب حيود الجيويد كما سنري).

أيضا عند البدء في إنشاء الشبكات الجيوديسية لدولة ما فقد كان يتم فرض أن قيمة حيود الجيويد N عند النقطة الأساسية تساوي الصفر. وبالتالي نكون قد غيرنا من وضع الاليبسويد ذاته (عدلنا وضعه الرأسي أيضا لكي ينطبق مع الجيويد عند هذه النقطة) ومن ثم فلم يعد هو نفس الاليبسويد العالمي المعروف. هنا نطلق عليه أسم المرجع Datum للدولة.

أي أن لتغيير الاليبسويد العالمي إلي مرجع وطني (يناسب دولة معينة) فيتم عند النقطة الأساسية للشبكة الجيوديسية افتراض أن:

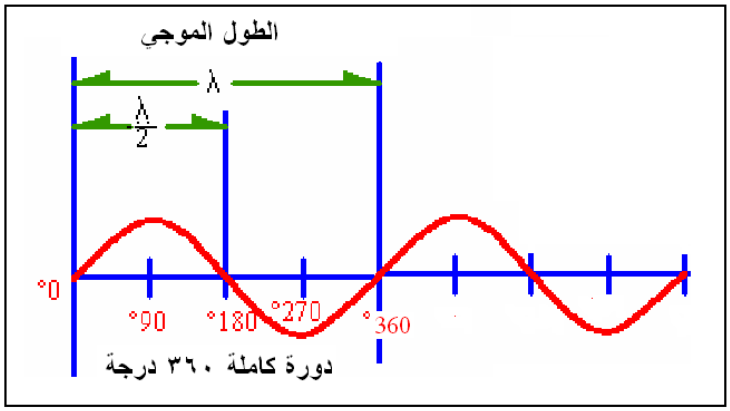
$\eta = 0$
$\xi = 0$
$N = 0$



شكل (١٤-٦) الجيويد و أنواع الارتفاعات

١٤-٣ إشارات الأقمار الصناعية

ينتشر الضوء (أي موجة كهرومغناطيسية) في الفراغ علي هيئة منحني أقرب ما يكون لمنحني جيب الزاوية sinusoidal curve المعروف، و الذي يحدد طول الموجة الواحدة wavelength (نرمز لها بالرمز λ) وزاوية الطور Phase angle التي تبلغ ٣٦٠° درجة للدورة الكاملة (نرمز لها بالرمز θ).



شكل (١٤-٥) انتشار الضوء

تعد المعادلة الأساسية للضوء هي:

$$v = \lambda \cdot f \qquad (14\text{-}4)$$

حيث:
v سرعة الموجة بوحدات المتر/ثانية.
λ طول الموجة بوحدات المتر.
f التردد بوحدات الهرتز (عدد الدورات في الثانية).

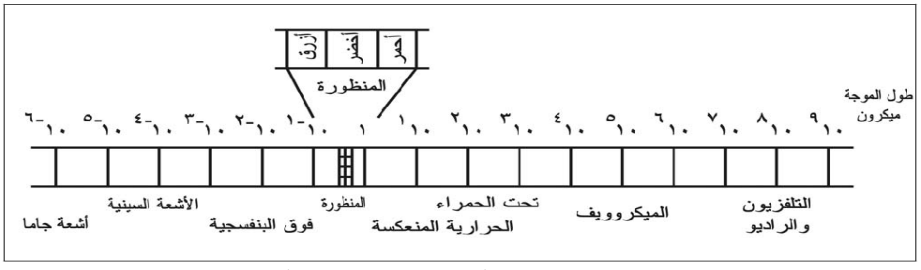
وبناءا علي طول الموجة فيمكن تقسيم الضوء إلي عدة أنواع منها علي سبيل المثال:

أشعة الراديو والتلفزيون: طول الموجة لها اكبر من ١ متر.
أشعة الميكروويف: يتراوح طول الموجة بين ١ – ١٠٠ سنتيمتر.
الضوء المرئي: يتراوح طول الموجة بين ٠.٣٨ – ٠.٧٢ ميكرومتر.
الأشعة الحمراء القريبة: يتراوح طول الموجة بين ٠.٧٢ – ١.٣٠ ميكرومتر.
الأشعة تحت الحمراء المتوسطة: يتراوح طول الموجة بين ١.٣٠ – ٣.٠٠ ميكرومتر.
الأشعة تحت الحمراء البعيدة: يتراوح طول الموجة بين ٣.٠٠ – ١٠٠٠ ميكرومتر.
الأشعة فوق البنفسجية: يتراوح طول الموجة بين ٠.١ – ٠.٤ ميكرومتر.
أشعة جاما: طول الموجه لها اصغر من ٠.٠٣ نانومتر
أشعة أكس: يتراوح طول الموجة بين ٠.٠٣ – ٣٠٠ نانومتر.

حيث:
ميكرومتر أو الميكرون = جزء من ألف مليون جزء من المتر ، أي ١×١٠^{-٩} متر.
النانومتر = جزء من ألف جزء من الميكرومتر ، أي ١×١٠^{-١٢} متر.

إما الضوء المرئي (الذي تستطيع عين الإنسان رؤيته) فينقسم إلي عدة ألوان هي:

البنفسجي: طول الموجة ٠.٣٨ – ٠.٤٥ ميكرون.
الأزرق: طول الموجة ٠.٤٥ – ٠.٥٠ ميكرون.
الأخضر: طول الموجة ٠.٥٠ – ٠.٥٨ ميكرون.
الأصفر: طول الموجة ٠.٥٨ – ٠.٥٩ ميكرون.
البرتقالي: طول الموجة ٠.٥٩ – ٠.٦٢ ميكرون.
الأحمر: طول الموجة ٠.٦٢ – ٠.٧٠ ميكرون.



شكل (١٤-٦) الطيف الكهرومغناطيسي

حتى يمكن قياس طور موجة القمر الصناعي بدقة فأن جهاز الاستقبال (مثلا مستقبل الجي بي أس) يقوم جهاز الاستقبال بتوليد موجة داخلية تعادل في ترددها تردد موجة القمر الصناعي ذاتها. ومن ثم يقوم الجهاز بمقارنة طور كلا الموجتين عن طريق قياس فرق الطور carrier phase or carrier beat phase والذي يكون دالة في المسافة بين القمر الصناعي و جهاز الاستقبال في لحظة الرصد. لكن هذا الفرق في الطور يتكون من جزأين: (١) العدد الصحيح integer للموجات الكاملة ، (٢) أجزاء الموجات عند كلا من جهاز الاستقبال و القمر الصناعي. وهنا تأتي أهم المشاكل التي تواجه نوع هذه الأرصاد: جهاز الاستقبال يستطيع وبكل دقة قياس أجزاء الموجات لكنه لا يستطيع تحديد عدد الموجات الكاملة. ومن ثم فأن العدد الصحيح للموجات الكاملة ويسمي الغموض الصحيح Integer Ambiguity أو اختصارا الغموض Ambiguity (N') يتم اعتباره قيمة مجهولة مطلوب حسابها أثناء إجراء حسابات تحديد المواقع.

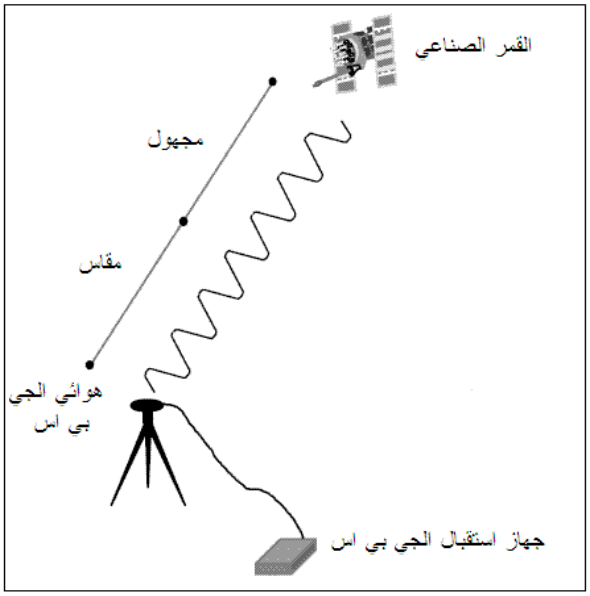
فرق الطور Φ_B عند جهاز الاستقبال B هو الفرق بين طور الإشارة الملتقطة من القمر الصناعي Φ_{CR} وطور الإشارة الثابتة المولدة في جهاز الاستقبال Φ_o:

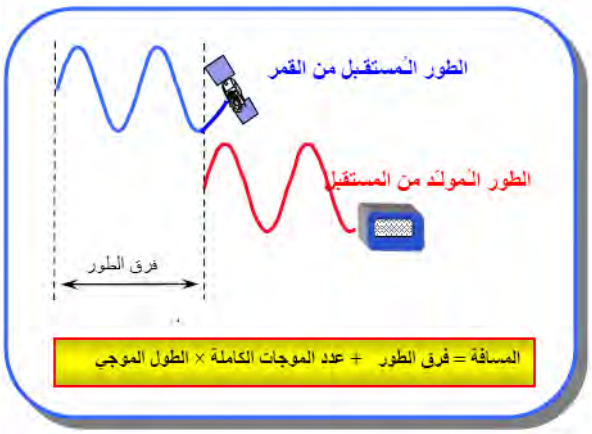
$$\Phi_B = \Phi_{CR} - \Phi_o \qquad (14\text{-}5)$$

والذي يمكن كتابته بصورة أخري كالآتي:

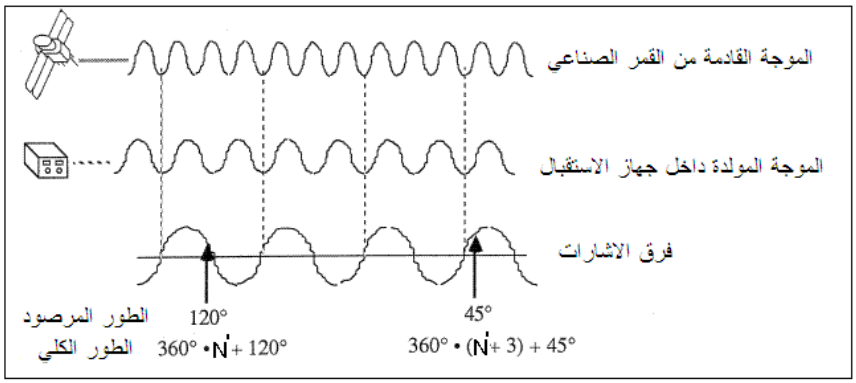
$$\Phi_{CR} = (2\pi / \lambda') (| X_i - X_B | - N'_{Bi} \lambda + c\, dt_U) \qquad (14\text{-}6)$$

حيث:
X_i متجه vector موقع القمر الصناعي
X_B متجه vector موقع جهاز الاستقبال
λ' طول الموجة الحاملة.
c سرعة الضوء.
dt_u خطأ التزامن بين زمن نظام الجي بي أس و ساعة جهاز الاستقبال.
N' هو الغموض أو عدد الموجات الصحيحة.





شكل (١٤-٧) أرصاد فرق طور الموجة الحاملة



شكل (١٤-٨) كيفية قياس فرق طور الموجة الحاملة

١٤-٤ الغلاف الجوي

يتكون الغلاف الجوي للأرض من عدة طبقات تختلف في خصائصها الفيزيائية و الكيمائية وأيضا في تأثيراتها علي الموجات الضوئية المارة بها:

الارتفاع (كم)	الحرارة	التأين	المجال المغناطيسي	التأثير علي الموجات	التقسيم التقني
١٠٠٠ ٠٠٠	الثرمو سفير	البروتونو سفير	الماجنيتو سفير	الأيونو سفير	الغلاف الجوي الأعلى
١٠ ٠٠٠					
١٠٠٠		الأيونو سفير			
١٠٠	الميثو سفير		الدينامو سفير	التروبو سفير	الغلاف الجوي الأسفل
١٠	التروبو سفير	النيترو سفير			

من وجهة نظر جيوديسيا الأقمار الصناعية فأن التأثيرات علي الموجات المرسلة من الأقمار الصناعية تأتي غالبا من طبقتي:

طبقة التروبوسفير:

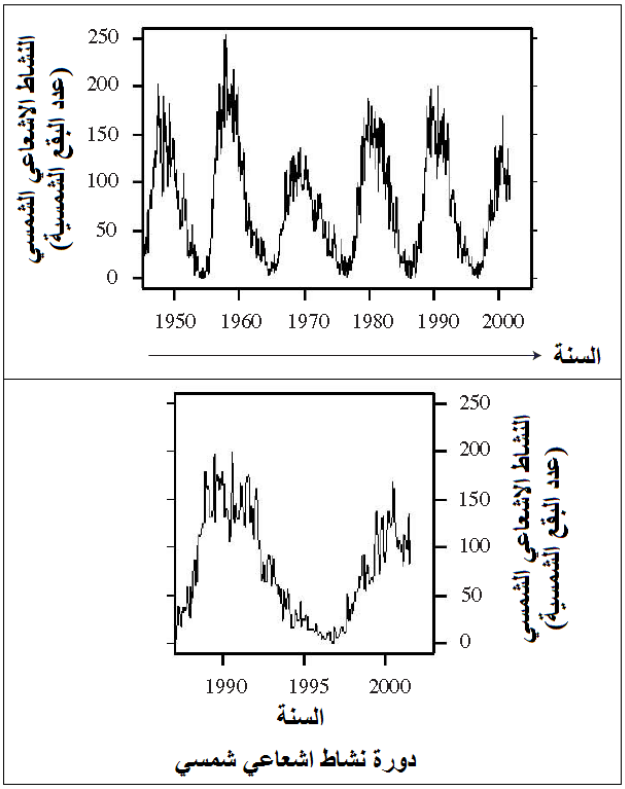
الجزء الأسفل من الغلاف الجوي والذي يمتد من سطح الأرض حتى ارتفاع ٤٠ كيلومتر تقريبا، إلا أن ما يقرب من ٩٠% من كتلة طبقة التروبوسفير موجود علي ارتفاع أقل من ١٦ كيلومتر. في هذه الطبقة تتأثر إشارات الأقمار الصناعية بناءا علي كم الرطوبة و درجة حرارة طبقة التروبوسفير، فعلي سبيل المثال فأن درجة حرارة الغلاف الجوي تنقص بمعدل ٦.٥ درجة مئوية لكل كيلومتر في الارتفاع.

طبقة الأيونوسفير:

الجزء العلوي من الغلاف الجوي والذي يمتد تقريبا بين ارتفاع ٧٠ و ١٠٠٠ كيلومتر من سطح الأرض. تؤثر هذه الطبقة علي إشارات الأقمار الصناعية من خلال إطلاق شحنات كهربائية (أيونات) حرة في الغلاف الجوي. يرجع السبب في وجود هذه الايونات (الشحنات) الحرة إلي شدة النشاط الإشعاعي للشمس والذي يختلف من وقت إلي آخر في اليوم وأيضا يختلف مع مرور الزمن. يمكن تقسيم طبقة الأيونوسفير إلي عدة طبقات فرعية طبقا لكثافة الأيونات الموجودة في كل طبقة:

الطبقة	الطبقة D	الطبقة E	الطبقة F1	الطبقة F2
الارتفاع (كم)	٦٠ - ٩٠	٨٥ - ١٤٠	١٤٠ - ٢٠٠	٢٠٠ - ١٠٠٠
كثافة الايونات في النهار (أيون/سم^3)	10^2 – 10^4	10^5	10×5^5	10^6
كثافة الأيونات في الليل (أيون/سم^3)	–	2×10^3	5×10^4	3×10^5

يتغير النشاط الإشعاعي الشمسي في دورة تبلغ تقريبا ١١ سنة، وكانت أقصي ذروة (أكبر قيمة) له في عام ٢٠١١م (في سنوات ذروة النشاط الإشعاعي يكون التأثير علي إشارات الأقمار الصناعية في أقصي قيمه أيضا):



شكل (١٤-٩) دورات النشاط الإشعاعي الشمسي

تأتي خطورة طبقة الأيونوسفير علي إشارات الأقمار الصناعية أن هذه الطبقة متغيرة علي مدار اليوم وعلي مدار السنة أيضا، مما يجعل نمذجة تأثير طبقة الأيونوسفير علي إشارات الأقمار الصناعية صعبة خاصة للمسافات الكبيرة (بين نقاط الرصد الجيوديسية) حيث ستتأثر الإشارات عند كل نقطة رصد بقيمة مختلفة عن الأخرى بسبب اختلاف طبيعة جزء طبقة الأيونوسفير الموجود أعلي كل نقطة. إلا أن المحاولات العلمية مستمرة لتطوير نماذج تصحيح تأثير الأيونوسفير علي إشارات الأقمار الصناعية بهدف زيادة دقة هذه النماذج و من ثم زيادة دقة الإحداثيات الأرضية (المواقع) المرصودة. فعلي سبيل المثال تنشر المنظمة العالمية للجي بي أس (منذ عام ١٩٩٦م) نماذج مستمرة عن تأثير الأيونوسفير علي أرصاد الجي بي أس علي المستوي العالمي، ويمكن الحصول علي هذه النماذج مجانا من موقع المنظمة علي الانترنت واستخدامها في حسابات أرصاد الجي بي أس.

١٤-٥ حركة الأقمار الصناعية

تعد دراسة حركة و ديناميكية الأجرام السماوية تخصصا علميا يجمع بين عدة أفرع أو علوم في إطار علوم الأرض بصفة عامة، إلا أن هذا الفرع يسمي الميكانيكا السماوية أو الفلكية Celestial Mechanics. تعود بداية هذا الفرع إلي العالم الكبير اسحق نيوتن عندما نشر كتابا في عام ١٦٨٧م يصف به قوانين الجاذبية الأرضية والحركة بين أي جسمين يتعرض كلا

منهما لقوة جاذبية الآخر طبقا لكتلته. أيضا شكل العالم يوهان كيبلر (١٥٧١-١٦٣٠م) قوانينه الثلاثة المعروفة باسمه (قوانين كيبلر للحركة Keplarian motion) التي تعطي وصفا رياضيا لحركة الكواكب بصورة مبسطة (عن نظرية نيوتن) حيث يمكن إهمال كتلة أي كوكب بالمقارنة بكتلة الشمس ذاتها. تستعمل قوانين كيبلر لوصف حركة الأقمار الصناعية أيضا حيث يمكن إهمال كتلة القمر الصناعي بالمقارنة بكتلة الأرض ذاتها.

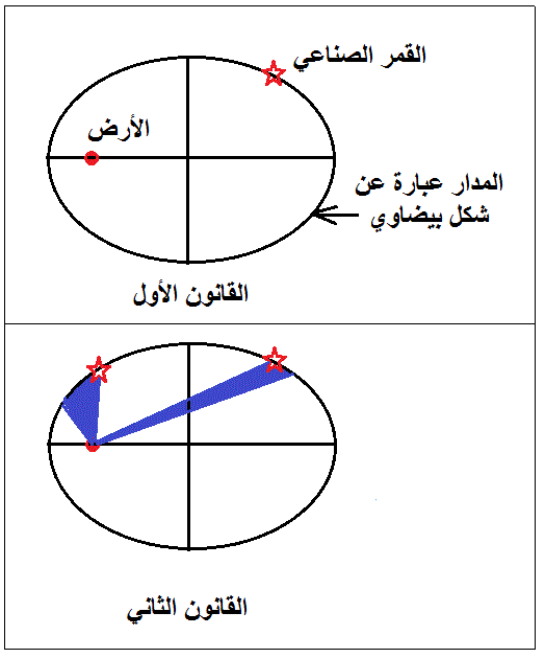
قانون كيبلر الأول:

أن مسار الكوكب (أو القمر الصناعي) هو قطع ناقص ellipse تقع الشمس (الأرض) في أحدي بؤرتيه. تأتي أهمية هذا القانون من أنه يحدد نوع المدار (قطع ناقص وليس دائرة) و من ثم المعادلات التي يمكننا استخدامها فيما بعد.

قانون كيبلر الثاني:

الخط الواصل من الشمس (الأرض) إلي أي كوكب (قمر صناعي) يقطع مساحات متساوية من الفضاء خلال أزمن متساوية، ولذلك يسمي هذا القانون بقانون المساحات. نستنتج من هذا القانون أن سرعة الكوكب (القمر الصناعي) ستزيد كلما أقترب من الشمس (الأرض) وتقل كلما أبتعد عنها. تأتي أهمية هذا القانون من أنه يمكننا من تحديد موقع أي قمر صناعي – في مدارة البيضاوي – في أي لحظة زمنية معينة.

قانون كيبلر الثالث:
أن مكعب أنصاف المحور الأكبر لمدارات الكواكب (الأقمار الصناعية) تتناسب مع مربع طور دوراناتها.



شكل (١٤-١٠) قوانين كيبلر لحركة الأقمار الصناعية

تشكل قوانين كيبلر الحالة العامة (النظرية) لحرمة الأقمار الصناعية في الفضاء بافتراض أن القمر الصناعي لن يتأثر بأي قوي خارجية أخري ويحافظ علي دورانه في المدار البيضاوي. لكن بالطبع فأن الواقع الحقيقي يختلف عن هذه الحالة المثالية (فمثلا قيمة مجال الجاذبية الأرضية تختلف من مكان لآخر كما تختلف شدة الإشعاع الشمسي من زمن لآخر) مما يخلق مدارات غير مثالية أو مدارات مضطربة قليلا Perturbed Orbits للأقمار الصناعية.

مصدر التأثير	قيمة التأثير علي مدار القمر الصناعي	
	في خلال ساعتين	في خلال ٣ أيام
تغير الجاذبية الأرضية	٢ كم	١٤ كم
جذب الشمس و القمر	٥٠-٨٠ متر	١٠٠-١٥٠٠ متر
المد و الجزر	-	٠.٥- ١.٠ متر
ضغط الإشعاع الشمسي	٥-١٠ متر	١٠٠-٨٠٠ متر

من هنا يأتي دور مراكز المراقبة و التحكم في كل منظومة من منظومات أو تقنيات جيوديسيا الأقمار الصناعية (مثل مركز المراقبة و التحكم الخاص بتقنية الجي بي أس) حيث يقوم المركز بمراقبة حركة ومدارات كل قمر صناعي – من خلال محطات المراقبة الأرضية – ليقدر و يحسب مدي شذوذ المدار الحقيقي للقمر الصناعي عن مداره المفترض. ويقوم مركز التحكم و السيطرة بإعادة حساب معاملات مدار القمر الصناعي ويرسل هذه البيانات للقمر نفسه لكي يعدل من حسابات موقعه في الفضاء في كل لحظة. هذه البيانات (المعروفة باسم المدارات الدقيقة للقمر الصناعي Precise Satellite Orbits) تكون متاحة للمستخدمين مجانا بعد عدة أيام. يمكن للمستخدم إعادة حسابات قياسات (أرصاد) العمل الجيوديسي الذي قام به باستخدام المدارات الدقيقة حيث سيزيد ذلك من دقة إحداثيات (مواقع) النقاط الجيوديسية الأرضية التي قام برصدها في مشروعه.

١٤-٦ ارتفاع مدارات الأقمار الصناعية

تختلف ارتفاعات الأقمار الصناعية عن سطح الأرض طبقا لوظيفة كل قمر صناعي، لكن بصفة عامة يمكن تقسيم ارتفاعات مدارات الأقمار الصناعية إلي عدة فئات تشمل:

(أ) المدارات قليلة الارتفاع حتى ٢٠٠٠ كم Low Orbits:

هذه المدارات تكون غالبا دائرية ومن أنواع الأقمار الصناعية التي تتبع هذه الفئة أقمار دراسة الجاذبية الأرضية مثل أقمار CHAMP و GRACE و GOCE التي تدور علي ارتفاع تقريبا ٤٠٠ كيلومتر. أما الأقمار غير الجيوديسية التي تنتمي لهذه الفئة فتكون مداراتها بيضاوية مثل أقمار الاستشعار عن بعد SPOT و LANDSAT و ERS التي تبلغ ارتفاعاتها ما بين ٨٠٠ إلي ١٠٠ كيلومتر. كما تنتمي أقمار الاتصالات إلي هذه الفئة من المدارات. في هذه الفئة تتراوح مدة دوران القمر الصناعي لدورة كاملة حول الأرض ما بين ٩٠ دقيقة و ساعتين. تتميز هذه المدارات قليلة الارتفاع بانخفاض تكلفة إطلاق الأقمار الصناعية وأيضا بقوة إشارة القمر الصناعي عند وصولها لسطح الأرض، لكن من أهم عيوبها أن فترة ظهور القمر الصناعي في أي منطقة علي الأرض تتراوح بين ١٥ و ٢٠ دقيقة مما لا يجعل هذه الأقمار مستخدمة في تحديد المواقع.

(ب) المدارات متوسطة الارتفاع من ٥٠٠٠ إلي ٢٠ ٠٠٠ كم Medium Orbits :

من أهم أنواع الأقمار الصناعية في هذه الفئة من المدارات أقمار تقنيات تحديد المواقع (مثل تقنيات الجي بي أس الأمريكي و الجلوناس الروسي والجاليليو الأوروبي) والتي تبلغ ارتفاعاتها حوالي ٢٠ ألف كيلومتر، وأيضا القمر LAGEOS-2 المستخدم في القياس بالليزر والذي يبلغ ارتفاعه حوالي ٢٤ ألف كيلومتر. تتميز هذه الفئة أن القمر الصناعي يظل مرئيا (متاحا) لعدة ساعات في نفس المنطقة الجغرافية علي الأرض، كما يقل تأثير طبقات الغلاف الجوي علي القمر الصناعي. لكن تكلفة إطلاق هذه الفئة من الأقمار الصناعية يكون أكبر من الفئة الأولي.

(ج) المدارات الثابتة مع الأرض حتى ٣٦ ٠٠٠ كم Geo-Stationary:

حتى يكون القمر الصناعي المخصص للاتصالات (مثل النايل سات و العربسات علي سبيل المثال) يغطي إرساله منطقة جغرافية محددة بصفة دائمة فأنه يتم وضع القمر الصناعي في مدار دائري ثابت مع الأرض. فإذا تم وضع القمر الصناعي في مدار علي ارتفاع ٣٥٨٠٠ كيلومتر و بزاوية ميل تساوي الصفر فأنه سيكمل دورة كاملة – في المدار – في فترة زمنية ٢٤ ساعة، وبالتالي فأنه يدور بنفس سرعة دوران الأرض مما يجعله كما لو كان ثابتا أعلي هذه المنطقة الجغرافية علي مدار اليوم. ويستطيع قمر صناعي واحد – علي هذا الارتفاع – أن يغطي حوالي ثلث سطح الأرض.

(د) المدارات المائلة علي الأرض Inclined Geo-Synchronous:

تماثل هذه الفئة الفئة السابقة من حيث أن مدة دوران القمر تبلغ ٢٤ ساعة إلا أنها تختلف في مقدار ميل المدار علي دائرة الاستواء. وجود زاوية ميل لمدار القمر الصناعي من هذا النوع يجعل إرساله يغطي بصورة أوضح المناطق القريبة من القطبين الشمالي و الجنوبي.

(ذ) المدارات شديدة الشكل البيضاوي Highly Elliptical:

هذه الفئة من مدارات الأقمار الصناعية تكون علي ارتفاع منخفض من سطح الأرض إلا أن مدارها البيضاوي يكون أكبر، والهدف من ذلك تغطية مجال اتصالات القمر الصناعي بصورة أوضح في الأجزاء القريبة من القطبين.

١٤-٧ شبكات الثوابت الأرضية ثلاثية الأبعاد (شبكات الجي بي أس)

ذكرنا في الفصل السابق أن الشبكات الجيوديسية كانت تنقسم إلي شبكات ثوابت أرضية أفقية وشبكات أخري رأسية، إلا أنه مع دخول عصر جيوديسيا الأقمار الصناعية فقد أمكن إقامة شبكات ثوابت أرضية ثلاثية الأبعاد 3D. في الشبكات ثلاثية الأبعاد يمكن تحديد الموقع الأفقي (خط الطول و دائرة العرض) والبعد الرأسي (الارتفاع أو المنسوب) لكل نقطة من نقاط الشبكة. تختلف مواصفات شبكات الثوابت ثلاثية الأبعاد عن مواصفات الشبكات الأفقية وذلك بسبب أن تقنيات جيوديسيا الأقمار الصناعية تعتمد علي مبدأ الدقة النسبية (وليست الدقة المطلقة). ففي الشبكات الأفقية كان يتم تحديد دقة إحداثيات نقطة بقيمة مطلقة، مثلا ± ٠.٥ متر. أما دقة أرصاد الأقمار الصناعية فتتكون من جزأين: جزء ثابت و جزء يعتمد علي طول خط القاعدة. الجزء الثابت يكون محصلة الأخطاء الثابتة مثل دقة الجهاز بينما يعتمد الجزء الثاني علي عناصر الأخطاء الأخرى المؤثرة علي الأرصاد مثل تأثير طبقات الغلاف الجوي علي إشارات

الأقمار الصناعية، وبالتالي فأن هذا الجزء يختلف بناءا علي طول خطوط القواعد في الشبكة. مثلا عندما تكون الدقة = ٠.٣ سم ± ١ جزء في المليون (part per million أو اختصارا ppm) فأن الدقة = ٠.٣ سم ± جزء من المليون من طول خط القاعدة (أي ١ ملليمتر لكل ١ كيلومتر من طول الخط). فإذا كان خط القاعدة يبلغ ٨ كيلومتر – مثلا – فأن الدقة ستصبح: ٠.٣ سم + (١ × ٨ ملليمتر) = ٠.٣ سم + ٨ ملليمتر = ١.١ سم. لذلك أصبحت مواصفات الشبكات الجيوديسية ثلاثية الأبعاد تعتمد علي مبدأ الدقة النسبية.

الجدول التالي – علي سبيل المثال – يقدم مواصفات دقة الشبكات الجيوديسية ثلاثية الأبعاد المعتمدة في الولايات المتحدة الأمريكية:

نوع العمل الجيوديسي	الدرجة	الخطأ الثابت (سنتيمتر)	الخطأ النسبي المتغير (المعتمد علي طول الخط)	
			جزء من المليون ppm	نسبة
تحركات القشرة الأرضية (عالميا أو إقليميا)	AA	٠.٣	٠.٠١	١ : ١٠٠،٠٠٠،٠٠٠
الشبكات الجيوديسية الأساسية: الدرجة الأولي	A	٠.٥	٠.١	١ : ١٠،٠٠٠،٠٠٠
الشبكات الجيوديسية: الدرجة الثانية	B	٠.٨	١	١ : ١،٠٠٠،٠٠٠
الشبكات الجيوديسية: الدرجة الثالثة (بدرجاتها المتعددة)	C: 1 2-I 2-II 3	 ١.٠ ٢.٠ ٣.٠ ٥.٠	 ١٠ ٢٠ ٥٠ ١٠٠	 ١ : ١٠٠،٠٠٠ ١ : ٥٠،٠٠٠ ١ : ٢٠،٠٠٠ ١ : ١٠،٠٠٠

الفصل الخامس عشر

الجاذبية الأرضية

يهدف فرع الجيوديسيا الطبيعية أو الفيزيقية Physical Geodesy لدراسة الخصائص الفيزيائية (وليست الهندسية) لشكل الأرض وخاصة خصائص مجال الجاذبية الأرضية وتأثيراته علي أعمال المساحة و إنشاء الخرائط.

١٥-١ الجاذبية (التثاقلية) الأرضية

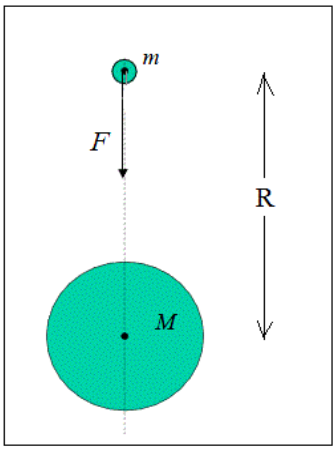
كوكب الأرض عبارة عن مجسم شبه كروي (سواء كرة أو اليبسويد) يوجد علي سطحه العديد من المعالم الطبيعية و البشرية، فلماذا لا تقع كل هذه الأشياء من علي سطح الأرض؟ السبب أن الخالق العظيم قد خلق قوة تربط بين كل ما علي سطح الأرض تجعلهم جميعا منجذبين لهذا الكوكب ولا يتناثرون منه إلي الفضاء الخارجي. هذه القوة – التي هي من أسباب الحياة علي الأرض – هي المعروفة باسم الجاذبية الأرضية أو التثاقلية الأرضية. أما عن سبب وجود هذه القوة فيرجع إلي ما أكتشفه العالم الكبير اسحق نيوتن من أن أي جسمين بينهما قوة جذب متبادل تعتمد علي كتلة كلا الجسمين و المسافة بينهما. فأنت تجذب الأرض و الأرض تجذبك أيضا، لكن بما أن كتلة جسمك لا تقارن بكتلة الأرض ذاتها فأن تأثير جذب الأرض هو الأقوى وهو المؤثر عليك. وحيث أن الأرض ما هي إلا كوكب من مكونات المجموعة الشمسية التي تضم العديد من الكواكب الأخرى و النجوم فأن هناك قوة جذب أخري بين الأرض وهذه الأجسام السماوية و خاصة الشمس و القمر.

تنص نظرية نيوتن علي أن قوة الجذب بين أي جسمين تتناسب طرديا مع كتلة كلا منهما (تزيد قوة الجذب كلما زادت أي كتلة من الاثنين) وتتناسب عكسيا مع مربع المسافة بين مركزي الثقل للجسمين (تقل قوة الجذب كلما زادت المسافة). تجدر الملاحظة أن النظرية تتحدث عن كتلة الجسم وليس وزنه، حيث أن وزن أي جسم يعتمد علي قوة جذب الأرض له ويتغير الوزن من مكان لآخر بينما كتلة الجسم تكون ثابتة في أي مكان. قام نيوتن بوضع نظريته في معادلة رياضية كالتالي:

$$F = G M m / R^2 \qquad (15\text{-}1)$$

حيث:

F قوة الجذب
M كتلة الأرض
m كتلة الجسم
R المسافة بين الجسمين
G معامل ثابت يسمي ثابت الجاذبية الأرضية = ٦.٦٧ × ١٠$^{-١١}$ م^{٣}/كجم/ث^{٢}



شكل (١٥-١) الجذب بين كتلتين

حيث أن كتلة أي جسم علي الأرض m ستكون صغيرة جدا بالمقارنة بكتلة الأرض ذاتها M فيمكن كتابة المعادلة السابقة بصورة أخري:

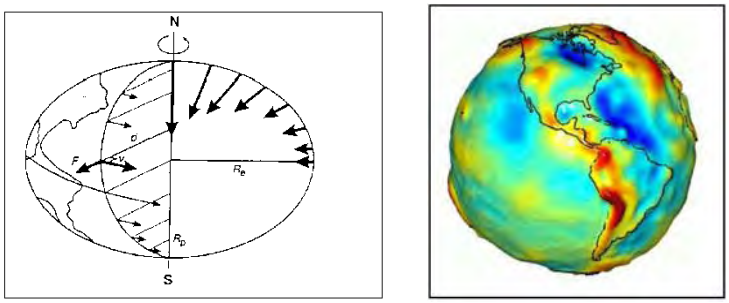
$$g = G M / R^2 \qquad (15\text{-}2)$$

حيث:

g معدل تسارع جذب الأرض (الجاذبية أو التثاقلية الأرضية).

إن كانت الأرض كرة تامة الاستدارة (حيث نصف قطرها يساوي ٦٣٧٠ كيلومترا) و كان توزيع المواد والكثافات داخل باطن الأرض توزيعا منتظما فان قوي الجاذبية ستكون متساوية في أي جزء من سطح الأرض (g في المعادلة السابقة)، وقد قدرها نيوتن بقيمة ٩.٨٢ متر/ثانية^2.

لكن لأن الأرض ليست كرة تامة (وإنما اليبسويد) وأيضا تختلف كثافات موادها تحت السطح فأن الجاذبية الأرضية لن تكون متساوية للأرض بأكملها، فهي تبلغ ٩.٧٨ متر/ثانية^2 عند خط الاستواء و تبلغ ٩.٨٣ متر/ثانية^2 عند القطبين. أي أن قيمة الجاذبية الأرضية تكون أكبر عند القطبين منها عند خط الاستواء ويرجع السبب في ذلك إلي أن سطح الأرض عند القطبين يكون أقرب لمركز الأرض بينما يكون أبعد من مركز الأرض عند خط الاستواء، أي أن الجاذبية الأرضية تزيد مع زيادة دوائر العرض. ومن هنا فيجب قياس قيم الجاذبية الأرضية عند منطقة العمل المطلوبة من سطح الأرض.



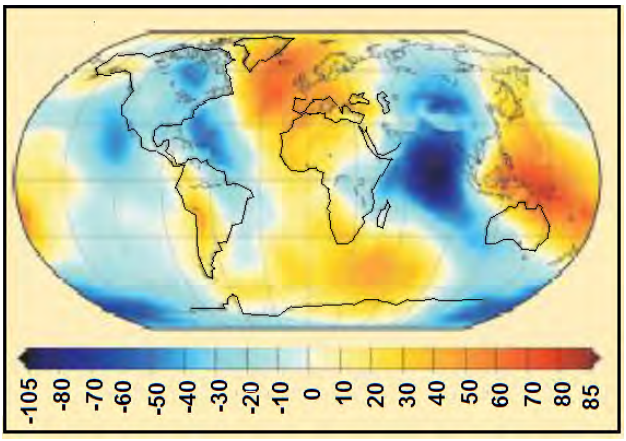
شكل (١٥-٢) عدم انتظام شكل الأرض ومجال جاذبيتها

١٥-٢ تطبيقات الجاذبية الأرضية

تستخدم قياسات الجاذبية الأرضية في العديد من التطبيقات منها:

١. تحديد شكل الأرض.
٢. البحث عن البترول.
٣. الدراسات الجيولوجية مثل التغير في سمك القشرة الأرضية وطبقاتها الجيولوجية وتحديد كثافات المادة الصخرية للطبقات.
٤. الكشف عن الرواسب المعدنية.
٥. الكشف عن الفجوات تحت السطحية.
٦. تحديد مواقع الوديان الصخرية المدفونة.
٧. تحديد سمك الطبقات الجليدية.
٨. مراقبة تذبذبات المد و الجزر.
٩. الكشف عن الآثار القديمة المدفونة.
١٠. الاستخدامات العسكرية مثل مسارات الصواريخ.
١١. مراقبة النشاطات البركانية.

ترجع أهمية قياسات الجاذبية الأرضية في تطبيقات المساحة إلي أن العمل المساحي الحقلي الذي يتم علي سطح الأرض يكون تحت تأثير هذه القوة. فعندما نضبط أفقية أي جهاز مساحي (ميزان أو ثيودليت أو محطة شاملة) فأن الجهاز يصبح عمودي علي اتجاه قوة الجاذبية الأرضية، وهكذا في النقطة التالية ثم النقطة التالية وهكذا. لكن اتجاه الجاذبية الأرضية عند أي نقطة ليس موازيا لاتجاهها عند النقطة التالية (لأن اتجاهات قوي الجاذبية تتجه نحو مركز الأرض) وبالتالي يكون هناك تأثيرا للجاذبية الأرضية علي كل القياسات المساحية التي تتم علي سطح الأرض. ثم أن الخرائط المساحية تعتمد علي شكل الاليبسويد في الحسابات وهو شكل مختلف عن شكل الأرض الحقيقي (الجيويد الذي لا يمكن استخدامه في الحسابات بسبب أنه متعرج ولا يمكن وصفه بمعادلات رياضية) حتى وان كان قريبا جدا منه. أي أننا نحتاج لمعرفة الفروق بين شكل الأرض الحقيقي (وهو الجيويد) وشكل الاليبسويد الذي تتم عنده الحسابات، وهذه الفروق يمكن تحديدها وقياسها من خلال قياس قيمة الجاذبية الأرضية. هذه الفروق تختلف من مكان لآخر علي سطح الأرض فتبلغ -١٠٥ متر في الهند بينما تبلغ +٧٣ متر عند غينيا الجديدة.



شكل (١٥-٣) الفروق بين الجيويد و الاليبسويد

١٥-٣ وحدات قياس الجاذبية الأرضية

تقاس قيم الجاذبية الأرضية بوحدة رئيسية تسمي "جال Gal" - تكريما للعالم الايطالي الكبير جاليليو الذي قام بأول تجربة لقياس عجلة الجاذبية الأرضية - حيث:

١ جال = ١/١٠٠ متر/ثانية^{٢}

أي أن:

١ جال = ١ سنتيمتر/ثانية^{٢}

وتتفرع منها وحدات فرعية منها:

مللي جال mGal = جزء من ألف من الجال، أي = جزء من مائة ألف متر/ثانية^{٢}.

ميكرو جال µGal = جزء من مليون من الجال، أي = جزء من مائة مليون متر/ثانية^{٢}. ويطلق أيضا علي الميكرو جال أسم وحدة الجاذبية gravity unit أو اختصارا g.u.

بمعني إذا قلنا أن الجاذبية الأرضية المتوسط للأرض = ٩.٨٢ متر/ثانية^{٢}، فهي تساوي ٩٨٢ جال، أو ٩٨٢٠٠٠ مللي جال.

١٥-٤ أجهزة قياس الجاذبية الأرضية

تنقسم أجهزة قياس الجاذبية الأرضية إلي مجموعتين:

(١) أجهزة قياس الجاذبية المطلقة Absolute Gravity Meters:

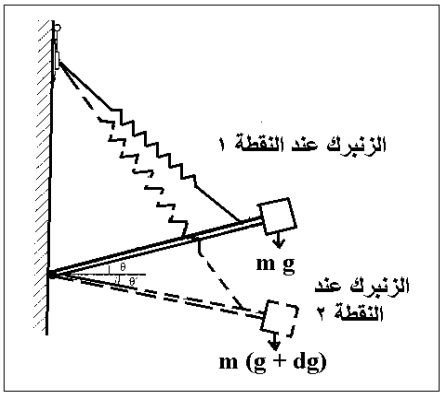
أجهزة تقيس قيمة الجاذبية المطلقة عند نقطة محددة. يعتمد تحديد الجاذبية الأرضية المطلقة علي طريقتين: طريقة الجسم الساقط وطريقة تأرجح البندول. في الطريقة الأولي يتم مراقبة ورصد حركة جسم (صغير جدا) يسقط لمسافة ١ -٢ متر في إطار معزول تماما عن أية مؤثرات، ومن خلال قياس الزمن و مسافة السقوط في هذا المسار يمكن حساب قيمة الجاذبية الأرضية في هذا الموقع. بينما الطريقة الثانية تعتمد علي تعليق مادة (صغيرة جدا) في خيط غير قابل للاستطالة وكتلته مهملة ويكون مرن تماما، ثم تتأرجح هذه المادة في مستوي رأسي باتساع صغير جدا ومن ثم يمكن حساب قيمة الجاذبية الأرضية المطلقة في هذا الموقع من خلال قياس الفترة الدورية لاهتزاز (تأرجح) البندول.

هذه الأجهزة ذات مواصفات تقنية عالية وبالتالي فأن سعرها باهظ للغاية، كما أنها تحتاج لتدريب كبير جدا وعدد آخر من المعدات المتصلة بها أثناء إجراء القياسات والتي قد تستمر لمدة ٢٤-٤٨ ساعة للنقطة الواحدة. ولذلك فأن عدد أجهزة قياس الجاذبية المطلقة يعد عددا بسيطا في العالم و لا تمتلك هذه الأجهزة إلا الجهات العالمية المتخصصة في الجاذبية الأرضية مثل هيئة المساحة الأمريكية مثلا. تصل دقة قياس الجاذبية المطلقة إلي ٠.١ ميكرو جال أو ما يعادل ٠.٠٠٠١ مللي جال.

حديثا بدأت شركات تصنيع الأجهزة في تطوير نوع جديد من أجهزة قياس الجاذبية المطلقة يتيح دقة أقل من الأجهزة التقليدية (ومن ثم سيكون أقل سعرا) ومن الممكن استخدامه في الأماكن المفتوحة أيضا. فمثلا قامت شركة Micro LaCoaste بإنتاج جهاز قياس الجاذبية المطلقة من موديل A-10 بدقة ١٠ ميكرو جال (أنظر http://www.microglacoste.com/a10.php).

(٢) أجهزة قياس الجاذبية النسبية Relative Gravity Meters:

أجهزة تقيس فرق الجاذبية بين نقطتين (مثل الميزان الذي يقيس فرق المنسوب بين نقطتين لكنه لا يقيس منسوب النقطة ذاته). من أشهر أجهزة قياس الجاذبية الأرضية النسبية جهاز الجرافيميتر Gravimeter (الاسم مكون من دمج كلمة Gravity أي الجاذبية مع كلمة Meter أي مقياس) والتي بدأت في الظهور تقريبا في عام ١٩٥٠م. تعتمد نظرية الجرافيميتر علي سلك زنبركي متعادل (متوازن) داخل إطار معزول تماما عن أية مؤثرات خارجية. يتغير توازن هذا الزنبرك بتأثير أي قوة إضافية مهما صغرت قيمتها، فإذا كانت القوة المؤثرة عند نقطة الرصد الأولي تساوي m g (حيث m كتلة المادة و g قسمة عجلة الجاذبية عند هذه النقطة) ثم انتقل الجرافيميتر لنقطة الرصد الثانية فأن القوة المؤثرة m (g +dg) حيث dg هي فرق الجاذبية بين النقطتين. يمكن قياس مقدار التغير الذي حدث للزنبرك بدقة عالية عند انتقاله من موقع إلي آخر، ومن ثم حساب قيمة التغير الذي حدث في الجاذبية الأرضية المؤثرة (dg) عند كلا موقعي الرصد.



شكل (١٥-٤) نظرية عمل جهاز الجرافيميتر

هذه المجموعة من الأجهزة هي الأرخص و الأشهر والمتوافرة بكثرة حول العالم، ومن أشهر الشركات المصنعة لها شركات LaCoaste and Romberg الأمريكية و شركة Scintrex الكندية. تتراوح دقة قياس الجاذبية النسبية بين ٠.٠١ و ٠.٠٠١ مللي جال أو ما يعادل ١٠ ، ١ ميكرو جال علي الترتيب.

شكل (١٥-٥) أجهزة قياس الجاذبية الأرضية

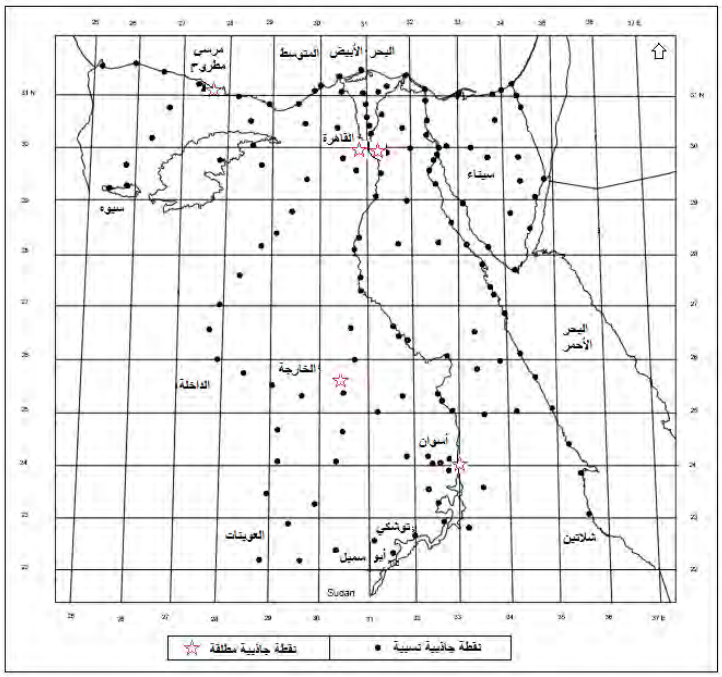
١٥-٥ شبكات الجاذبية الأرضية

تستخدم قياسات و بيانات الجاذبية الأرضية في عدة مجالات منها الكشف عن الموارد الطبيعية الموجودة تحت سطح الأرض مثل المياه الجوفية و البترول و الغاز و المعادن ...الخ. لذلك فأن كل دولة تقوم بإنشاء شبكة أساسية من نقاط الجاذبية الأرضية لتعد مرجعا أساسيا لقياسات الجاذبية الأرضية في أنحاء الدولة. ومن وجهة النظر المساحية فأن شبكات الجاذبية الأرضية تعد أحد أنواع الشبكات الجيوديسية المطلوبة للعمل المساحي مثلها مثل شبكات المثلثات و شبكات الروبيرات وشبكات الجي بي أس.

في جمهورية مصر العربية – علي سبيل المثال – تم إجراء أول قياس للجاذبية الأرضية في مرصد حلوان (جنوب القاهرة) في عام ١٩٠٨م واعتبرت هذه بمثابة نقطة الجاذبية الأرضية الرئيسية لمصر وكانت قيمة الجاذبية عندها تساوي ٩٧٩.٢٩٥ جال. ثم تلا – في نفس العام - ذلك قياس الجاذبية الأرضية عند ٧ مواقع أخري في كلا من مصر و السودان وتم ربطهم علي نقطة الجاذبية الأرضية في لندن. في الفترة من ١٩٢٢م إلي ١٩٥٠م بدأت شركات التنقيب عن البترول في إجراء عدة قياسات جاذبية أرضية خاصة في مناطق رأس غارب و خليج السويس ووادي النطرون. في عام ١٩٧١م تم البدء في إنشاء الشبكة العالمية للجاذبية الأرضية 1971 International Gravity Standardization Network of والمعروفة اختصارا باسم IGNS71. تكونت هذه الشبكة من ٤٧٣ نقطة أساسية و ١٣٩٨١٦ نقطة فرعية حول العالم. كجزء من هذه الشبكة تم قياس الجاذبية الأرضية عند ١١ محطة في مصر وتراوحت دقة الجاذبية الأرضية بين ٠.٠٢٤ و ٠.٠٣٥ مللي جال. أما أول شبكة وطنية مصرية للجاذبية الأرضية فقد تم إنشاؤها في الفترة ١٩٧٤-١٩٨٤م من خلال الشركة العامة للبترول وأطلق عليها اسم الشبكة الوطنية الأساسية للجاذبية الأرضية لعام ١٩٧٧ أو اختصارا

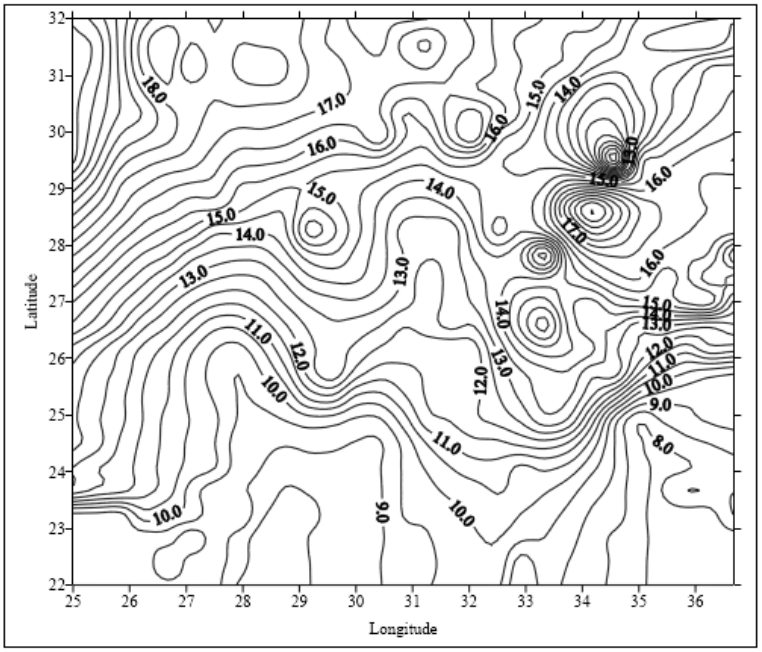
اسم NGSBN-77. تكونت هذه الشبكة الوطنية من ٦٦ محطة وتم ربطها علي الشبكة العالمية للجاذبية الأرضية عند محطات مطار القاهرة و مرصد حلوان و أسوان و الأقصر و بورسعيد.

قام معهد بحوث المساحة التابع للمركز القومي لبحوث المياه بوزارة الموارد المائية و الري في الفترة من ١٩٩٤م إلي ١٩٩٧م بإنشاء الشبكة القومية المصرية للجاذبية الأرضية Egyptian Gravity Standardization Network 1997 والمعروفة اختصارا باسم EGNSN97. تتكون الشبكة من عدد ١٥٠ نقطة تغطي تقريبا معظم أنحاء الدولة منهم ١٤٥ نقطة جاذبية نسبية بالإضافة إلي ٥ نقاط جاذبية مطلقة (تم قياسهم بالتعاون مع هيئة المساحة العسكرية الأمريكية التي تمتلك أحد أجهزة قياس الجاذبية المطلقة). تم رصد إحداثيات كل نقطة باستخدام تقنية الجي بي أس، كما تم رصد منسوب معظم النقاط باستخدام أسلوب الميزانية الدقيقة من أقرب روبير.



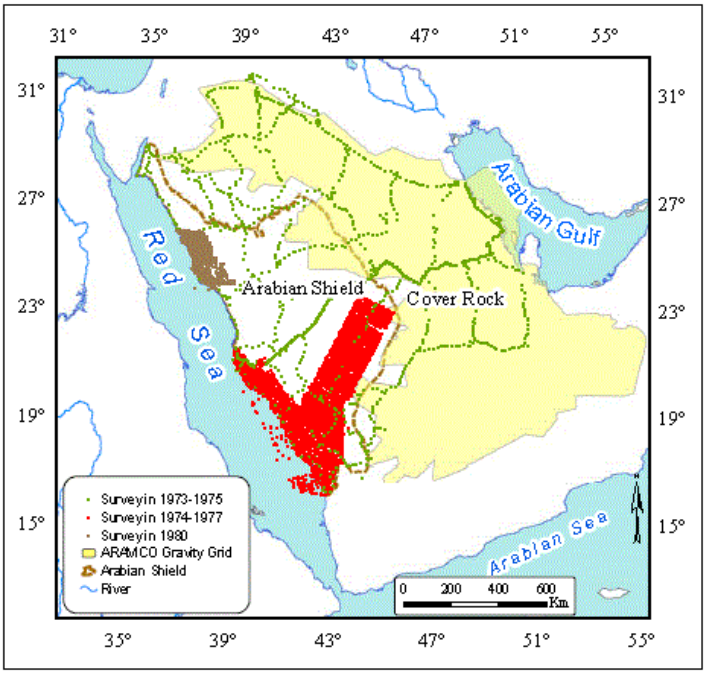
شكل (١٥-٦) الشبكة القومية المصرية للجاذبية الأرضية

بعد ضبط قياسات الجاذبية الأرضية للشبكة تبين أن دقة الجاذبية الأرضية تبلغ في المتوسط ٠.٠٢١ مللي جال، وأن أقل قيمة للجاذبية الأرضية في مصر تبلغ ٩٧٨٦٨٠ مللي جال عند الحدود المصرية السودانية في أقصي الجنوب، وأن أقصي قيمة بلغت ٩٧٩٥٠٥ مللي جال عند ساحل البحر الأبيض المتوسط. من الشبكة القومية للجاذبية الأرضية أمكن تطوير نموذج جيويد يحدد الفروق بين سطح الجيويد وسطح الاليبسويد في مصر بحيث يمكن استخدامه في تحويل الارتفاعات المقاسة بالجي بي أس إلي مناسيب أو ارتفاعات عن متوسط منسوب سطح البحر. تراوحت قيم هذه الفروق بين ٧ أمتار تقريبا في أقصي الجنوب عند الحدود مع السودان و ٢٢ متر في أقصي شمال مصر و بمتوسط يبلغ ١٥ متر تقريبا.



شكل (١٥-٧) الجيويد في مصر بناءا علي قياسات الجاذبية الأرضية

يعرض الشكل التالي قياسات الجاذبية الأرضية في المملكة العربية السعودية:



شكل (١٥-٨) قياسات الجاذبية الأرضية في المملكة العربية السعودية

١٥-٦ شذوذ الجاذبية الأرضية

يوجد نوعين من قيم الجاذبية الأرضية: الجاذبية الأرضية المقاسة أو المرصودة (ويرمز لها بالرمز g) والجاذبية النظرية Normal Gravity المحسوبة علي سطح الاليبسويد (ويرمز لها بالرمز اللاتيني جاما γ_o). والفرق بين كلتا القيمتين هو ما يطلق عليه اسم شذوذ الجاذبية Gravity Anomalies (يرمز لها بالرمز Δg)، أي أن:

$$\Delta g = g - \gamma \qquad (15\text{-}3)$$

يعتمد حساب قيمة الجاذبية النظرية علي عناصر الاليبسويد العالمي المستخدم كمرجع جيوديسي يمثل سطح الأرض سواء هندسيا أو فيزيائيا. أحدث وأدق مرجع عالمي مستخدم في حساب قيم الجاذبية النظرية هو ذلك المعروف باسم المرجع الجيوديسي العالمي لعام ١٩٨٠ Geodetic Reference System 1980 والمعروف اختصارا باسم GRS80 (وهو تقريبا ينطبق مع الاليبسويد العالمي WGS84 المستخدم في تقنية الجي بي أس) والذي تحدد خصائصه القيم الأربعة التالية:

نصف القطر الأكبر:	a = ٦٣٧٨١٣٧ متر
معامل التفلطح:	f = ٠.٠٠٣٣٥٢٨١٠٦٨١١٨
مربع معامل المركزية:	e^2 = ٠.٠٠٦٦٩٤٣٨٠٠٢٢٩٠
قيمة الجاذبية النظرية عند دائرة الاستواء:	g_e = ٩٧٨٠٣٢.٦٧٧١٥ متر/ث٢

يمكن حساب قيمة الجاذبية النظرية علي مجسم GRS80 عند أي نقطة بالمعادلة التالية:

$$\gamma_o = g_e \, (1+0.0019318513 53 * \sin^2 \phi) \; / \; \sqrt{(1 - e^2 \sin^2 \phi)} \qquad (15\text{-}4)$$

حيث ϕ تمثل دائرة العرض الجيوديسية للنقطة.

تكون الجاذبية النظرية محسوبة علي سطح الاليبسويد بينما تكون الجاذبية الحقيقية مقاسة علي سطح الأرض، أما شذوذ الجاذبية فمطلوب معرفته (أو حسابه) علي سطح الجيويد لكي يمثل مدي شذوذ مجال الجاذبية الأرضية للجيويد (الشكل الحقيقي للأرض) عن مجال الجاذبية الأرضية للاليبسويد (الشكل الرياضي المفترض للأرض). في هذه الحالة يجب أن ننظر للكتلة الموجودة فيما هو أعلي من سطح الاليبسويد حتى موقع النقطة المطلوبة. بناءا علي طريقة اعتبار مكونات هذه الكتلة فتوجد عدة طرق لحساب شذوذ الجاذبية منهم:

شذوذ الجاذبية للهواء الحر Free-Air Gravity Anomalies:

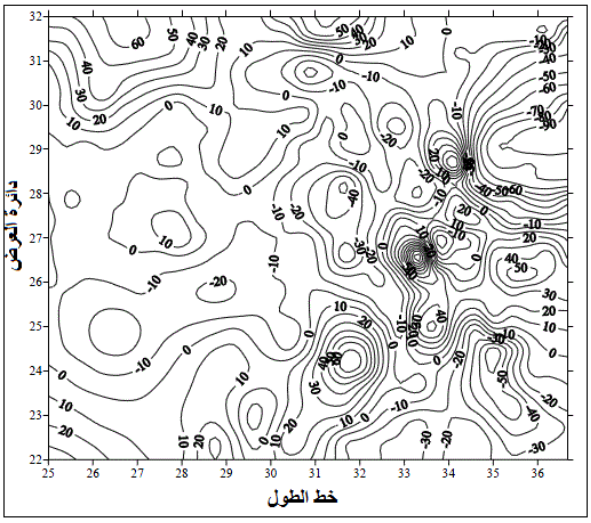
أسهل الطرق هو افتراض أن كل ما هو فوق سطح الاليبسويد ما هو إلا هواء ليس له أي كتله، أي أن النقطة المطلوبة ما هي إلا نقطة معلقة في الهواء (من هنا جاء اسم هذا النوع من شذوذ الجاذبية). يتم حساب قيمة شذوذ الجاذبية للهواء الحر كالآتي:

$$\Delta g_{FA} = g + 0.3086 \, H - \gamma_0 \qquad (15\text{-}5)$$

حيث:

Δg_{FA} شذوذ الجاذبية للهواء الحر
g الجاذبية الحقيقية المقاسة
γ_0 الجاذبية النظرية المحسوبة
H الارتفاع الأرثومتري (المنسوب) بالمتر

غالبا يستخدم شذوذ الجاذبية للهواء الحر في التطبيقات (الحسابات) المساحية و الجيوديسية مثل تحديد سطح الجيويد بسبب أنه لا يعتمد علي كتلة المواد الموجودة تحت سطح الأرض. لكن هذا النوع من شذوذ الجيويد لا يمثل الواقع الحقيقي بدقة حيث أنه قد أهمل تضاريس سطح الأرض وما يمكن أن يسببه من تأثير علي مجال الجاذبية الأرضية في هذا الموقع. لذلك فأن استخدام شذوذ الجاذبية الأرضية للهواء الحر في تحديد شكل الجيويد ينتج سطح يسمي شبيه الجيويد co-geoid or quasi-geoid وليس سطح الجيويد نفسه. لكن باستخدام تصحيحات إضافية (تعتمد علي معرفة قيم مناسيب سطح الأرض حول النقطة) يمكن تحويل سطح شبيه-الجيويد إلي سطح الجيويد نفسه. غالبا يكون الفرق بين هذين السطحين عدة ملليمترات في الأراضي المنبسطة، لكنه قد يكون أكبر في المناطق الجبلية شديدة التضرس.



شكل (١٥-٩) شذوذ الجاذبية الأرضية للهواء الحر في مصر

شذوذ جاذبية بوجير Bouguer Gravity Anomalies:

افتراض أن كل ما هو فوق سطح الاليبسويد ما هو إلا هواء ليس افتراضا حقيقيا يماثل الواقع، فهذه المسافة ممتلئة بمواد لها كتله تؤثر في حساب شذوذ الجاذبية. بناءا علي كيفية التعامل مع هذه المادة توجد عدة طرق لحساب شذوذ الجاذبية أشهرهم هي طريقة العالم بوجير Bouguer. يتم حساب قيمة شذوذ جاذبية بوجير كالآتي:

$$\Delta g_B = g + 0.3086\ H - 0.1119\ H - \gamma_0 + \delta g_T \qquad (15\text{-}6)$$

حيث:

Δg_B شذوذ جاذبية بوجير

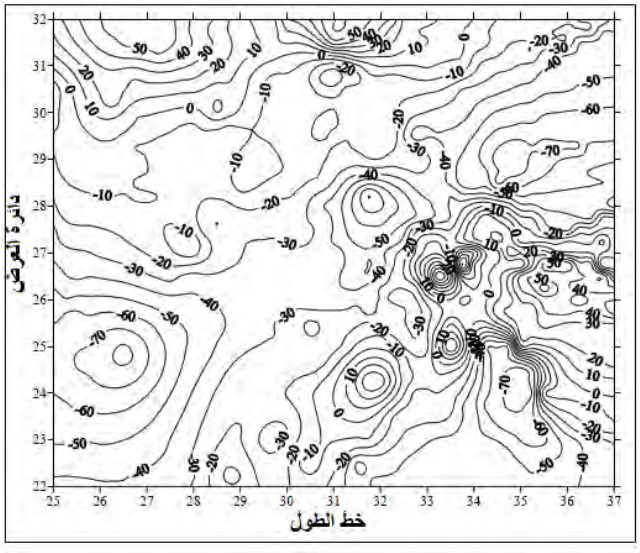
g الجاذبية الحقيقية المقاسة

γ_0 الجاذبية النظرية المحسوبة

H الارتفاع الأرثومتري (المنسوب) بالمتر

δg_T تصحيح التضاريس Terrain correction.

غالبا يستخدم شذوذ جاذبية بوجير في التطبيقات (الحسابات) الجيوفيزيائية مثل الكشف عن الموارد الطبيعية و المعادن الموجودة تحت سطح الأرض.



شكل (١٥-١٠) شذوذ جاذبية بوجير في مصر

١٥-٧ تأثير الجاذبية الأرضية على القياسات الأرضية

عند إجراء أية قياسات مساحية أو جيوديسية علي سطح الأرض فأننا نضبط أفقية الجهاز (من خلال ميزان الماء) ونضبط رأسية أو تسامت الجهاز علي النقطة المحتلة من خلال خيط الشاغول. بهاتين الخطوتين (الضبط المؤقت لجهاز المساحة) نكون قد جعلنا جميع القياسات أو الأرصاد ستتم بالنسبة لمجال الجاذبية الأرضية. لكن من المعلوم أن جميع الحسابات (الإحداثيات) وإنتاج الخرائط سيتم علي سطح الاليبسويد لأنه الشكل الرياضي أو الهندسي المعلوم والذي يمثل شكل الأرض. وكما في الشكل (٤-٦) فأن العمودي علي سطح الجيويد (اتجاه خيط الشاغول) لا ينطبق مع العمودي علي سطح الاليبسويد، بل توجد زاوية بينهما تسمي زاوية انحراف الرأسي. من هنا فأن جميع القياسات المساحية الأرضية (خاصة عند إنشاء الشبكات الجيوديسية) يجب أن يتم تصحيحها أو إسقاطها من سطح الأرض إلي سطح الاليبسويد. من أمثلة هذه التصحيحات:

تصحيح الانحراف الفلكي:

$$\alpha_{12} - A_{12} = - \eta_1 \tan \varphi_1 - (\xi_1 \sin \alpha_{12} - \eta_1 \cos \alpha_{12}) \tan v_{12} \qquad (١٥\text{-}7)$$

حيث:

A_{12} الانحراف الفلكي المقاس بين النقطة ١ و النقطة ٢.
α_{12} الانحراف الجيوديسي – علي سطح الاليبسويد - بين النقطة ١ و النقطة ٢.
v_{12} الزاوية الرأسية بين النقطتين.
φ_1 دائرة العرض الجيوديسية للنقطة ١.
ξ_1 , η_1 مركبتي زاوية انحراف الرأسي عند النقطة ١.

تصحيح الزاوية الرأسية:

$$v_{12} - V_{12} = - (\xi_1 \cos \alpha_{12} + \eta_1 \sin \alpha_{12}) \qquad (15\text{-}8)$$

حيث:

V_{12} الزاوية الرأسية المقاسة بين النقطة ١ و النقطة ٢.
v_{12} الزاوية الرأسية علي سطح الاليبسويد بين النقطة ١ و النقطة ٢.

تصحيح الاتجاهات الأفقية:

$$t_{12} = T_{12} + \Delta T_{12} \qquad (15\text{-}9)$$

$$\Delta T_{12} = - (\xi_1 \sin \alpha_{12} - \eta_1 \cos \alpha_{12}) \tan v_{12} + \varsigma [(h_2 / 2 M_m) e^2 \text{ Sin } 2\alpha_{12} \cos^2 \varphi_2] - \varsigma [(S_{12} / N_m)^2 (e^2 /12) \text{ Sin } 2\alpha_{12} \cos^2 \varphi_2] \qquad (15\text{-}10)$$

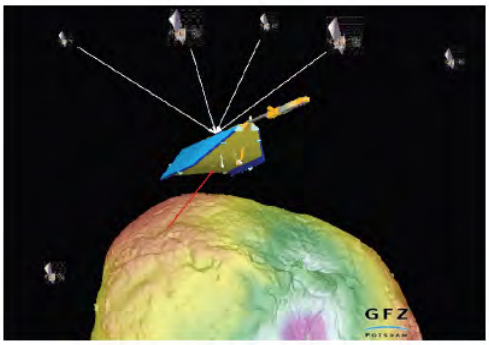
حيث:
ς = "٢٠٦٢٦٥
M_m نصف قطر تكور الاليبسويد في اتجاه مستوي خطوط الطول Meridian plane
N_m نصف قطر تكور الاليبسويد في اتجاه المستوي الرأسي Prime Vertical plane
S_{12} المسافة الجيوديسية بين النقطتين

٨-١٥ قياس الجاذبية الأرضية من الفضاء

إن مدارات الأقمار الصناعية في الفضاء تتأثر (تتغير عن المدار النظري) بالتغير في قيم الجاذبية الأرضية للأرض، ومن ثم فيمكن تقدير قيم الجاذبية الأرضية عالميا من خلال مراقبة ودراسة التغيرات في مدارات الأقمار الصناعية. بناءا علي هذا المبدأ بدأ إطلاق أقمار صناعية مخصصة لدراسة مجال الجاذبية الأرضية للأرض.

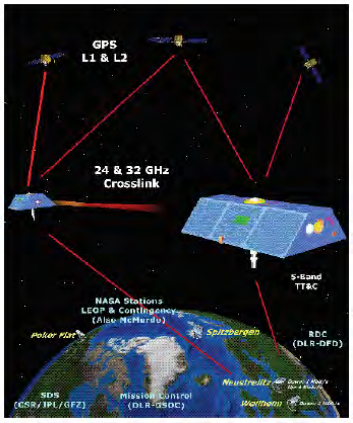
تم إطلاق القمر الصناعي الألماني CHAMP (اختصار جملة CHAllenging Minisatellite Payload أي القمر الصغير المتحدي) في يوليه من عام ٢٠٠٠م. المهمة الأساسية لهذا القمر هي قياس تغيرات مجال الجاذبية الأرضية من خلال عدة مجسات

sensors مركبة عليه، بالإضافة لأجهزة أخري مثل مستقبلات الجي بي أس لتحديد موقع القمر في الفضاء بدقة.



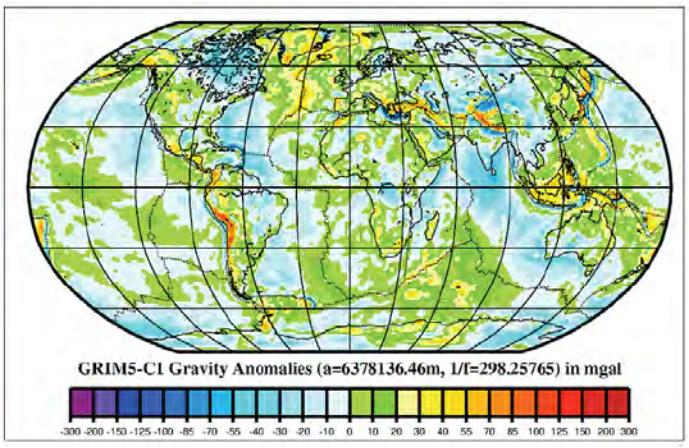
شكل (١٥-١١) القمر الصناعي CHAMP لقياس الجاذبية الأرضية

قامت وكالة الفضاء الأمريكية (ناسا) بإطلاق القمر الصناعي GRACE (اختصار جملة Gravity Recovery And Climate Experiment أي مهمة قياس الجاذبية الأرضية و الغلاف الجوي) في مارس من عام ٢٠٠٢م. يتكون هذا النظام من قمرين صناعيين يطيران علي ارتفاع ٥٠٠ كيلومتر من سطح الأرض والمسافة بينهما حوالي ٢٢٠ كيلومتر. يعتمد حساب الجاذبية الأرضية علي متابعة رصد المسافة بين القمرين من خلال أجهزة الجي بي أس، فالتغير في هذه المسافة يمكن ترجمته رياضيا إلي تغير في قيم الجاذبية الأرضية المؤثرة علي كل قمر منهما.



شكل (١٥-١٢) القمر الصناعي GRACE لقياس الجاذبية الأرضية

تسمح بيانات هذه الأقمار الصناعية من تطوير نماذج عالمية لمجال الجاذبية الأرضية، ومنهم علي سبيل المثال نموذج GRIM5-S1 الذي يحدد قيم شذوذ الجاذبية الأرضية علي المستوي العالمي ومنه أيضا يمكن تطوير نموذج جيويد عالمي.



شكل (١٥-١٣) شذوذ الجاذبية الأرضية علي المستوي العالمي

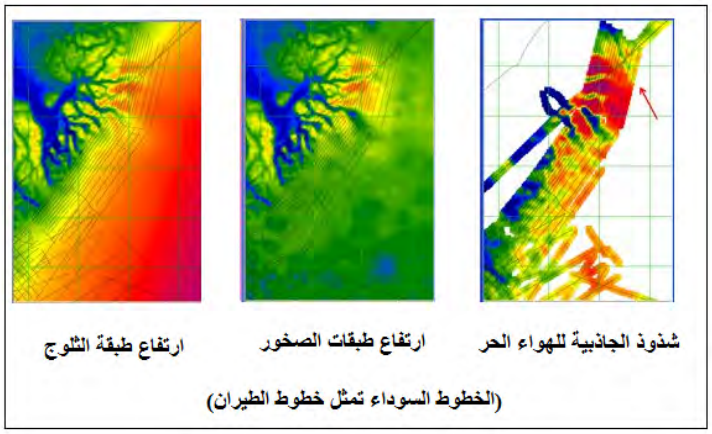
١٥-٩ قياس الجاذبية الأرضية من الجو

في الستينات من القرن العشرين الميلادي ظهرت فكرة استخدام الطائرات في قياس كلا من الجاذبية الأرضية والمغناطيسية الأرضية. في البداية لم تكن الدقة عالية لكن مع التطورات التقنية ومنذ تقريبا عام ١٩٩٥م أصبحت هذه التقنية (قياسات الجاذبية المحمولة جوا Airborne Gravimetry) أكثر دقة وتكاد تصل لمستوي دقة ١ مللي جال. تعتمد هذه التقنية علي وجود مقياس للتسارع accelerometer يقيس فرق العجلة أثناء الطيران والذي يتم وضعه بطريقة ثابتة بقدر الإمكان داخل الطائرة (من خلال ربطه مع جهاز جيروسكوب) بالإضافة لوجود جهاز جي بي أس لتحديد مواقع (إحداثيات) الطائرة في كل لحظة.

شكل (١٥-١٤) جهاز قياس الجاذبية الأرضية من الجو

تتميز هذه التقنية بأنها أسرع وربما أرخص تكلفة من القياسات الأرضية للجاذبية الأرضية، أما من حيث الدقة فالجاذبية الأرضية المحمولة جوا بالطبع ليست أدق من القياسات الأرضية لكنها أحسن دقة من قياسات الجاذبية الأرضية المستنتجة من الأقمار الصناعية فهي تعطي تفاصيل أكثر و أدق لمجال الجاذبية الأرضية في منطقة محددة. لذلك فأن الجاذبية الأرضية المحمولة جوا لا تستخدم في أعمال الجيوديسيا (التي تتطلب دقة عالية) لكنها مناسبة لتطبيقات الجيولوجيا و الجيوفيزياء الإقليمية (لدراسة منطقة كبيرة). فعلي سبيل المثال تم استخدام الجاذبية الأرضية

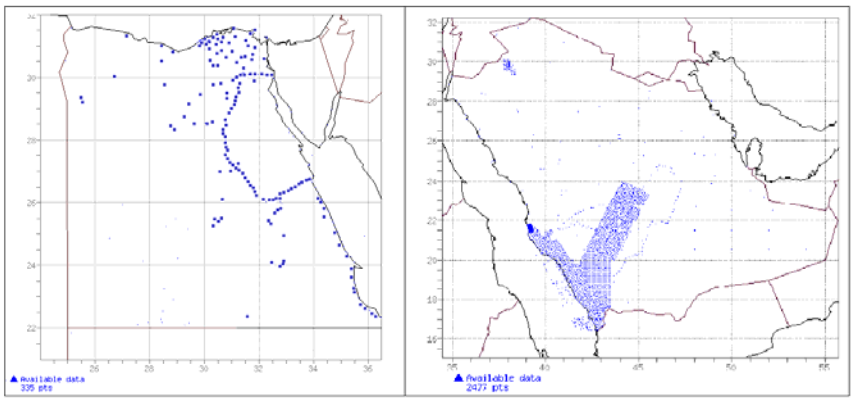
المحمولة جوا في تحديد ارتفاع طبقات الجليد و ارتفاع الطبقات الصخرية في منطقة شمال جرينلاند في عام ٢٠١١م.



شكل (١٥-١٥) تطبيقات الجاذبية الأرضية من الجو في منطقة جرينلاند ٢٠١١م

١٥-١٠ المنظمات العالمية في مجال الجاذبية الأرضية

توجد العديد من المنظمات الدولية المتخصصة في مجال الجاذبية الأرضية و تطبيقاتها، وتقد هذه الجهات خدمات علمية في هذا المجال. من أهم هذه الجهات المكتب العالمي للجاذبية الأرضية International Gravimetric Bureau (المعروف اختصارا باسم BGI وهي الحروف الثلاثة من الاسم الفرنسي للمكتب Bureau Gravimetrique International). يضم هذا المكتب قاعدة بيانات ضخمة لقياسات الجاذبية الأرضية حول العالم سواء القياسات الأرضية أو القياسات البحرية، وأيضا نماذج الجاذبية الأرضية المستنبطة من قياسات الأقمار الصناعية. يتيح المكتب بياناته مجانا عن طريق البريد الالكتروني للعاملين والمهتمين بالجاذبية الأرضية حول العالم. (http://bgi.obs-mip.fr/en/data-products/Gravity-Databases).



شكل (١٥-١٦) مواقع نقاط الجاذبية الأرضية لكلا من مصر و السعودية المتاحة في موقع المكتب العالمي للجاذبية الأرضية BGI

أيضا تعد المنظمة العالمية لخدمات مجال الجاذبية الأرضية International Gravity Field Service (اختصارا IGFS) من المنظمات الدولية المتخصصة في مجال الجيوديسيا و الجاذبية الأرضية (http://www.igfs.net/) والتي تعد العقل الاستراتيجي لتوحيد جهود الجهات المحلية و الإقليمية و الدولية المتخصصة. وتضم هذه المنظمة عدة منظمات أو خدمات متخصصة منها:

المنظمة الدولية لنماذج الجيويد International Geoid Service
http://www.iges.polimi.it/

المركز الدولي لنماذج المد و الجزر International Center for Earth Tides
http://www.upf.pf/ICET

المركز الدولي لنماذج الجاذبية الأرضية العالمية International Center for Global Gravity Earth Field Models
http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html

المنظمة الدولية لنماذج الارتفاعات الرقمية International DEM Service
http://www.cse.dmu.ac.uk/EAPRS/iag/index.html

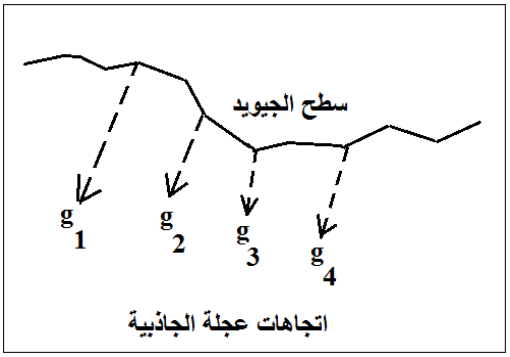
الفصل السادس عشر

الجيويد

كلمة جيويد geoid كلمة لاتينية مكونة من مقطعين: ge أي الأرض و oid أي شبيه، أي أن كلمة جيويد تعني شبيه الأرض. وظهرت هذه الكلمة لأول مرة علي يد العالم جاوس في القرن السابع عشر الميلادي.

١٦-١ سطح الجيويد

يتميز كوكب الأرض بمجال الجاذبية المؤثرة علي كل نقطة علي سطحه، ولكي نحدد الشكل الحقيقي للأرض يجب الاعتماد علي هذا المجال. أبسط تعريفات الجيويد أنه الشكل الحقيقي للأرض الذي يكون عموديا علي اتجاه الجاذبية عند كل نقطة. لكن – وهذه أول مشكلة – فأن قيمة عجلة الجاذبية الأرضية تختلف من نقطة لأخرى بناءا علي عدة عوامل (مثل دائرة العرض ونوع المواد تحت سطح الأرض وهكذا)، وبالتالي فأن شكل سطح الجيويد لن يكون منتظما بل سيكون شديد التعرج. ومن هنا ستنتج المشكلة الثانية وهي أن تعرج هذا الشكل لن يمكن معه وصف الجيويد بمعادلات رياضية (مثل معادلات الكرة أو الاليبسويد) وبالتالي فلن يمكن استخدامه في تحديد المواقع (حساب الإحداثيات) وإنشاء الخرائط. لكن مع كل ذلك فأن الجيويد هو الشكل الحقيقي للأرض.



شكل (١٦-١) الجيويد سطح متعرج

لتعريف الجهد Potential (أو جهد الجاذبية الأرضية Gravitational Potential) ننظر لحركة الكتلة الصغيرة (وحدة الكتلة) أثناء مسارها في المسافة بينها و بين الكتلة الكبرى (كتلة الأرض) في الشكل الذي يعبر عن قوة الجذب بين أي كتلتين (شكل ٦-١). نجد أن الكتلة m ستبذل شغل work لكي تتحرك مسافة صغيرة باتجاه الكتلة الكبرى M، وهذا الشغل W يبلغ:

$$W = F\, dr \qquad (16\text{-}1)$$

حيث: F تمثل قيمة عجلة الجذب بين الكتلتين، dr تمثل وحدة المسافة.

بتعويض المعادلة (٦-٢ بقيمة g الممثلة لعجلة الجذب):

$$W = (G M / r^2) dr \qquad (16\text{-}2)$$

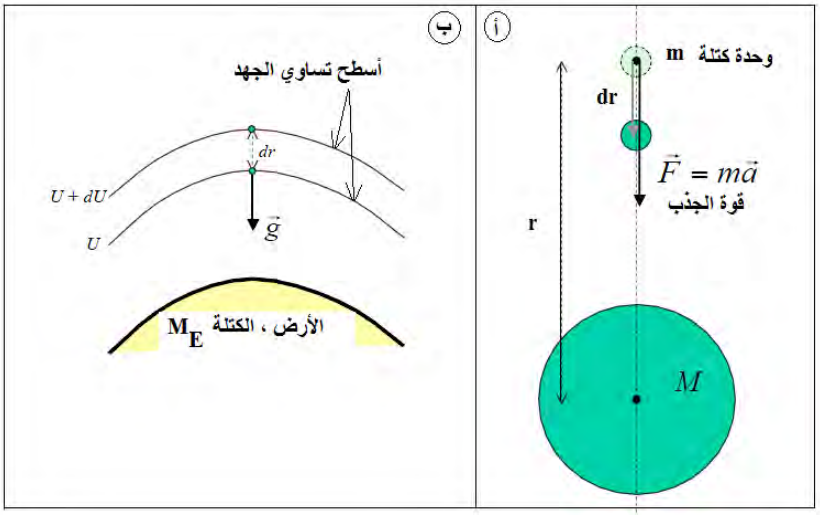
أما الجهد U فيعرف بأنه قيمة الشغل اللازم لانتقال الكتلة m من ما لا نهاية إلي المسافة المعلومة r (المسافة بين الكتلتين). أي أن الجهد هو تكامل لكل قيم الشغل المبذولة عند كل وحدة مسافة dr طوال المسافة المطلوبة r:

$$U = \int_{\infty}^{r} (M/r2) dr$$

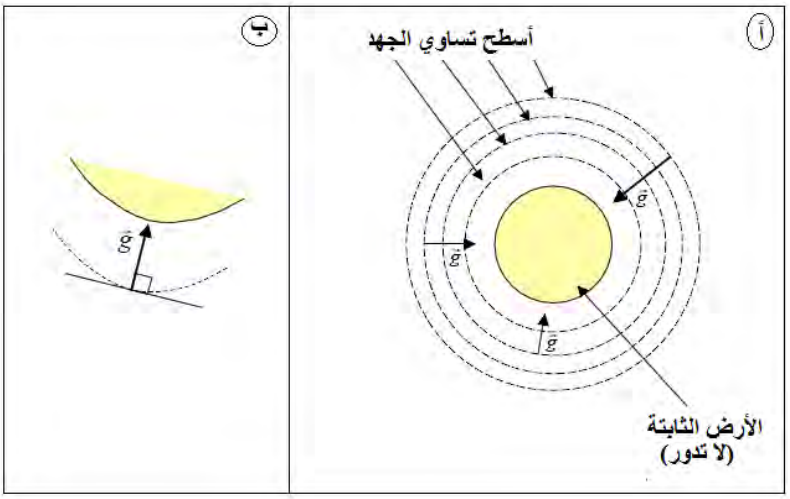
$$= - G M / r \qquad (16\text{-}3)$$

حيث G هو ثابت نيوتن للجاذبية الأرضية، والإشارة السالبة في المعادلة السابقة للدلالة علي أن الجهد يكون في اتجاه تناقص المسافة r.

يمكن النظر للجهد علي أنه انحدار gradient لعجلة الجاذبية الأرضية. فان كانت الأرض جسم ثابت (لا يدور) متساوي الكثافة فأن الخط الواصل بين قيم الجهد المتساوية سيسمي سطح تساوي الجهد equi-potential surface (يمكن تخيله كما لو كان خط كنتور يصل بين النقاط المتساوية المنسوب). وفي هذه الحالة ستوجد عدة سطوح من أسطح تساوي الجهد وستكون كلها متوازية حول الأرض، وسيكون اتجاه عجلة الجاذبية الأرضية هو الاتجاه العمودي علي أي سطح من هذه الأسطح.

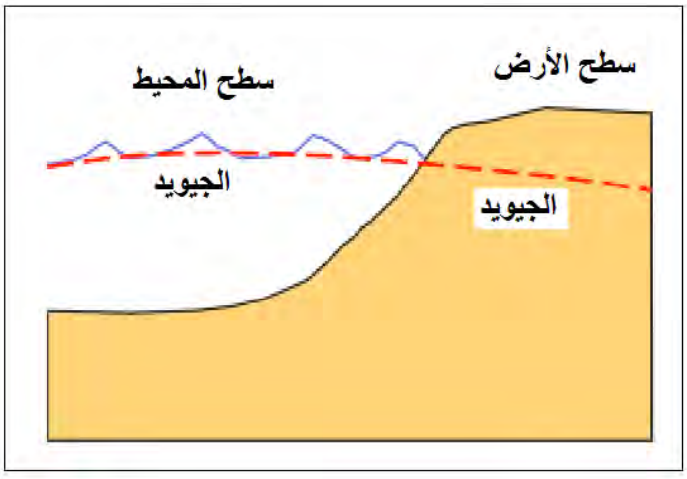


شكل (١٦-٢) أسطح تساوي الجهد (جهد الجاذبية الأرضية)

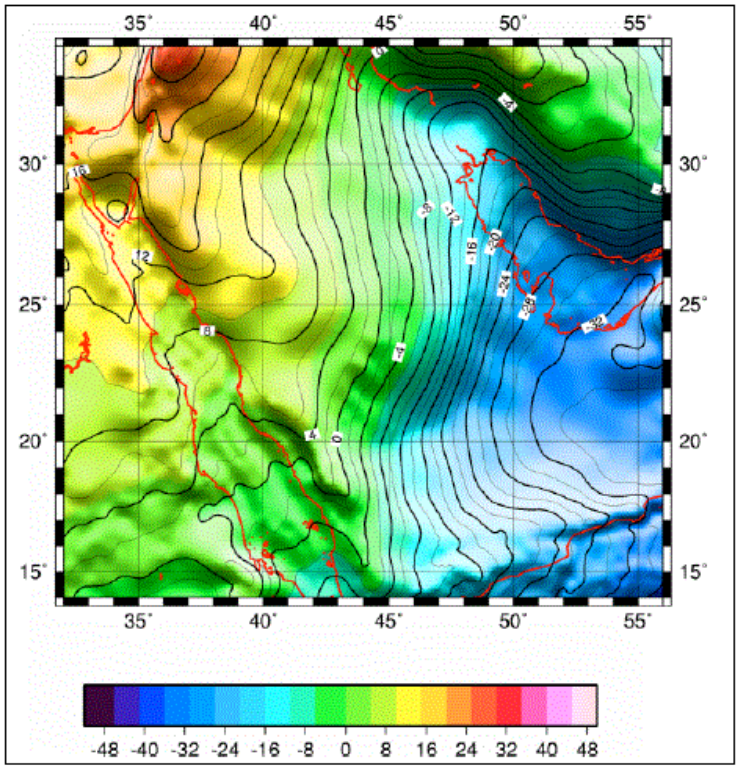


شكل (١٦-٣) توازي أسطح تساوي الجهد للأرض الثابتة

لكن الواقع الحقيقي للأرض أنها جسم يدور حول نفسه (غير ثابت) مما يجعل عجلة الجذب هب محصلة قوة الجذب و قوة الطرد المركزية، كما أن كثافة المادة داخل الأرض مختلفة وليست ثابتة. من هنا فأن أسطح تساوي الجهد في الحقيقية لن تكون متوازية. بالنظر إلي أن ثلاثة أرباع الأرض تقريبا مغطي بالماء، وأن سطح المياه ما هو إلا سطح متساوي الجهد (من وجهة نظر علم ديناميكا السوائل Fluid Dynamics) فسيكون هناك **سطح متساوي الجهد ينطبق مع سطح البحر**. تم اختيار (اعتبار) أن السطح متساوي الجهد الذي ينطبق مع متوسط سطح البحر هو الذي يمثل الشكل الحقيقي للأرض (بفرض امتداده تحت اليابسة أيضا) ، ومن ثم تم إطلاق اسم الجيويد علي هذا السطح. أي أن في البحار و المحيطات فأن متوسط سطح المياه (بافتراض عدم وجود أي تيارات أو أمواج) هو سطح الجيويد، أما في اليابسة فأن الجيويد سطح تخيلي أو افتراضي لا يمكن تحديده فيزيائيا بل يمكن حسابه من بعض القياسات.



شكل (١٦-٤) سطح الجيويد



شكل (١٦-٥) نموذج لسطح الجيويد في المملكة العربية السعودية

١٦-٢ النمذجة الكروية الهارمونية لمجال الجاذبية الأرضية

الجيويد هو أحد أسطح تساوي الجهد التي تعتمد علي خصائص مجال الجاذبية الأرضية للأرض، وهو سطح غير منتظم شديد التعرج بسبب أن مجال الجاذبية الأرضية ذاته يتغير من مكان لآخر. حاول علماء الجيوديسيا و الجاذبية الأرضية منذ عدة عقود في إيجاد معادلة رياضية (متعددة الحدود) لوصف مجال الجاذبية الأرضية للأرض. لكن إيجاد قيمة مجال الجاذبية الأرضية عند موقع (نقطة) محددة يتطلب إيجاد تأثير الجاذبية الأرضية في العالم كله حيث أن مجال الجاذبية هو مجال (أو سطح) متصل continuous surface وليس مجال متقطع discrete surface، بمعني أن عند أي نقطة علي الأرض فأن قيمة الجاذبية في هذا المكان تتأثر بمجال الجاذبية الأرضية كله، فالمناطق القريبة من هذه النقطة سيكون لها تأثير كبير بينما المناطق البعيدة عنها سيكون لها تأثير بسيط (لكنه موجود مهما صغرت قيمته).

يمكن تمثيل شذوذ الجهد T للأرض (الفرق بين الجهد علي الجيويد و الجهد علي الاليبسويد) باستخدام شذوذ الجاذبية (الفرق بين الجاذبية المقاسة و الجاذبية النظرية) Δg من خلال معادلة تكامل استوكس Stockes' integral التالية:

$$T = \frac{R}{4\Pi} \iint_{\sigma} \Delta g \; S(\Psi) \; d\sigma \qquad (16\text{-}4)$$

حيث:

R نصف قطر الأرض المتوسط

σ يمثل سطح الأرض كله

$S(\Psi)$ تسمي معامل استوكس

$$S(\Psi) = \frac{1}{\sin(\Psi/2)} - 6\sin(\Psi/2) + 1 - 5\cos(\Psi) - 3\cos(\Psi)\ln[\sin(\Psi/2) + \sin^2(\Psi/2)] \quad (16\text{-}5)$$

$$\sin^2(\Psi/2) = \sin^2((\varphi_p - \varphi)/2) + \sin^2((\lambda_p - \lambda)/2)\cos\varphi_p\cos\varphi \quad (16\text{-}6)$$

حيث:

Ψ المسافة الكروية بين النقطة المعلوم عندها قيمة الجاذبية الأرضية (إحداثياتها هي φ , λ) والنقطة المطلوب عندها حساب قيمة الجاذبية الأرضية (إحداثياتها هي φ_p, λ_p).

المعادلة التالية تمثل العلاقة بين شذوذ الجهد T وقيمة شذوذ الجيويد N (المسافة بين الجيويد و الاليبسويد) وقيمة الجاذبية النظرية γ (المحسوبة علي الاليبسويد):

$$T = \gamma N \quad (16\text{-}7)$$

بتعويض المعادلة (١٦-٧) في المعادلة (١٦-٤) ينتج:

$$N = \frac{T}{\gamma} = \frac{R}{4\Pi\gamma}\iint_{\sigma} \Delta g \; S(\Psi)\, d\sigma \quad (16\text{-}8)$$

تكمن مشكلة المعادلتين ١٦-٤ و ١٦-٨ في أنهما يتطلبان التكامل المزدوج (في كلا اتجاهي خطوط الطول و دوائر العرض) علي كافة أرجاء الأرض، أي أنهما يتطلبان معرفة شذوذ الجاذبية Δg في كل نقطة علي سطح الأرض، وهذا بالطبع غير ممكن. من هنا تم ابتكار أسلوب يعرف بالنمذجة الهارمونية لمجال الجاذبية الأرضية Spherical Harmonic Expansion (يمكن الرجوع للمراجع في نهاية الكتاب للقراءة التفصيلية عن هذا الأسلوب وتطبيقاته في مجال الجيويد، حيث أننا سنتعرض هنا للمبادئ العامة له فقط).

يمكن تمثيل الجهد الكروي V (جهد الأرض كما لو كانت كرة) Spherical Potential من خلال معادلة تقريبية باستبدال التكامل المزدوج بعملية جمع مزدوج لتسهيل الحسابات:

$$V = \frac{GM}{r}\left(1 + \sum_{n=2}^{n_{max}}\left(\frac{a}{r}\right)^n \sum_{m=0}^{n}\overline{P}_{nm}(\sin\phi)\left[\overline{C}_{nm}\cos m\lambda + \overline{S}_{nm}\sin m\lambda\right]\right) \quad (16\text{-}9)$$

حيث:

$\overline{C}_{nm}$ و $\overline{S}_{nm}$ معاملات يتم حسابها

r المسافة الكروية بين النقطة المطلوب حساب الجهد عندها (إحداثياتها هي φ ، λ) و مركز الأرض.

$\overline{P}_{nm}$ تسمي متعددة الحدود للعالم لاجاندار Lagendre associated polynomial والتي تحسب كالآتي:

$$P_\ell^m(\cos\theta) = (-1)^m(\sin\theta)^m \frac{d^m}{d(\cos\theta)^m}(P_\ell(\cos\theta)) \quad (16\text{-}10)$$

المعادلة ١٦-٩ تمثل نموذج هارموني كروي لوصف مجال جهد الجاذبية الأرضية للأرض كلها. لحل هذه المعادلة نحدد أولا قيمة درجة النموذج degree (n في المعادلة) لعملية الجمع الخارجية. مثلا معادلة الخط المستقيم لها درجة = ١ ، ومعادلة الدائرة لها درجة = ٢. أما عملية الجمع الثانية في المعادلة فأنها ستتكرر حسب قيمة نظام النموذج order (m في المعادلة). فعند كل قيمة للدرجة n سيتم تنفيذ عدد m من عمليات الجمع الداخلية. إذا حددنا درجة النموذج = ١٠٠ مثلا فهذا معناه أن هناك ١٠٠ عنصر مجهول في المعادلة ١٦-٩ من النوع $\overline{C}_{nm}$ و ١٠٠ عنصر مجهول آخر من النوع $\overline{S}_{nm}$، أي أن المعادلة ١٦-٩ سيكون بها ٢٠٠ عنصر مجهول في كل مرة من مرات حساب عملية الجمع الثانية، وبالتالي سيكون هناك حوالي ٢٠٠×١٠٠ = ٢٠ ألف عنصر مجهول لإتمام عمليتي الجمع الأولي و الثانية . ولكي يتم حساب هذه العناصر المجهولة يجب أن يكون لدينا (علي الأقل) ٢٠ ألف قيمة مقاسة للجهد V، أو بمعني آخر ٢٠ ألف قيمة مقاسة للجاذبية الأرضية ذاتها في كافة أنحاء الأرض. أما إذا حددنا قيمة درجة النموذج degree (n في المعادلة) لتبلغ ٣٦٠ فأن عدد العناصر المجهولة (المطلوب حسابها) سيصل إلي ١٣٠٣١٧ عنصرا.

لكن ماذا عند دقة هذا النماذج الهارمونية في تمثيل مجال الجاذبية الأرضية لسطح الأرض؟ يمكن حساب درجة وضوح أو طول الموجة لأي نموذج من خلال المعادلة:

طول موجة النموذج = ١٨٠ / درجة النموذج n (١١-١٦)

<u>مثال:</u>

لنموذج درجته n تساوي ١٠٠ فأن طول الموجة = ١٨٠ / ١٠٠ = ١.٨ درجة (من درجات خطوط الطول و دوائر العرض). حيث أن الدرجة = ١١٠ كيلومتر تقريبا، فأن درجة وضوح النموذج = ١٩٨ كيلومتر تقريبا.

و لنموذج درجته n تساوي ٣٦٠ فأن طول الموجة = ١٨٠ / ٣٦٠ = ٠.٥ درجة، أي أن درجة الوضوح للنموذج = ٠.٥ × ١١٠ = ٥٥ كيلومتر تقريبا. أي أن هذا النموذج سيحسب قيمة <u>متوسطة</u> للجيويد كل ٥٥ كيلومتر، مما يدل علي أن النموذج لا يستطيع تحديد تفاصيل تعرج أو تغير سطح الجيويد بدقة.

لكن أهم مميزات النماذج الهارمونية لمجال الجاذبية الأرضية أنها تساعد في تحديد الخصائص العامة لهذا المحال علي المستوي العالمي، وهو الذي لا يستطيع أي فرد أو جهة محلية أن يقوم به بمفرده. أما للحصول علي تمثيل أدق لمجال الجاذبية الأرضية (ومن ثم سطح الجيويد) فأننا

نقوم بدمج النماذج الهارمونية العالمية مع قياسات محلية للجاذبية الأرضية (في منطقة أو دولة معينة) بحيث تعطينا النماذج الهارمونية التغيرات العامة في مجال الجاذبية الأرضية للأرض كلها ثم تعطينا القياسات المحلية التغيرات الدقيقة في هذه المنطقة، ومن ثم فأن الجمع بين كلا النوعين يمكننا من التحديد الدقيق لمجال الجاذبية الأرضية (ولسطح الجيويد) في هذه المنطقة أو الدولة.

١٦-٣ نماذج الجيويد العالمية

تعد طرق التمثيل الهارموني لمجال جهد الأرض Spherical harmonic representation of the Earth's geopotential field من الطرق المستخدمة في نمذجة الجيويد علي المستوي العالمي باستخدام أرصاد مختلفة النوع Heterogeneous Data. تقوم الجهات العلمية المتخصصة بتجميع القياسات الجيوديسية (جاذبية أرضية ، جي بي أس ، أرصاد فلكية .. الخ) من كل مناطق العالم بالإضافة لقياسات الأقمار الصناعية وإدخالها في برامج كمبيوتر متخصصة لتطوير نماذج عالمية تصف تغير الجيويد عالميا Global Geoid Models أو اختصارا GGM.

بدأ تطوير نماذج الجيويد العالمية منذ عام ١٩٦٠ وإنتاجها مستمر حتى الآن ، ويمكن الحصول مجانا علي أي نموذج جيويد عالمي من موقع المركز الدولي لنماذج الجاذبية الأرضية العالمية International Center of Gravity Earth Models أو اختصارا ICGFM في الرابط: http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/ICGEM.html لكن نظرا لعدم توافر عدد ضخم من القياسات الجيوديسية تغطي كل أنحاء الأرض بانتظام فلم يكن ممكنا تطوير نماذج عالمية ذات تباين أفقي resolution كبير ، فمعظم النماذج حتى عام ٢٠٠٨ لم تزيد درجة تمثيل النموذج degree عن ٣٦٠ بما يدل علي أن النموذج يعطي نقطة كل $^{0}.٥$ أو تقريبا ٥٥ كيلومتر أفقيا علي سطح الأرض. تجدر الإشارة إلي أن معظم برامج حسابات أرصاد الجي بي أس تعتمد في داخلها علي أحد نماذج الجيويد العالمية (والأشهر منهم هو نموذج EGM96) بحيث أن البرنامج يستطيع حساب منسوب نقاط الجي بي أس المرصودة. لكن من المهم جدا علي مستخدم الجي بي أس أن يعرف دقة هذا النموذج العالمي وبالتالي دقة هذا المنسوب المحسوب. فعلي سبيل المثال فأن دقة النموذج العالمي EGM96 في مصر تبلغ ٠.٣٩ متر ، أي أن المنسوب أو الارتفاع الأرثومتري المحسوب من هذا النموذج لن يكون أدق من هذا المستوي. لذلك لا يمكن الاعتماد علي نماذج الجيويد العالمية بمفردها في التطبيقات المساحية و الجيوديسية إنما يتم تطعيمها بقياسات محلية لزيادة دقتها في منطقة العمل.

الجدول التالي يعرض خصائص بعض نماذج الجيويد العالمية الحديثة (التي يمكن الحصول عليها من الرابط السابق):

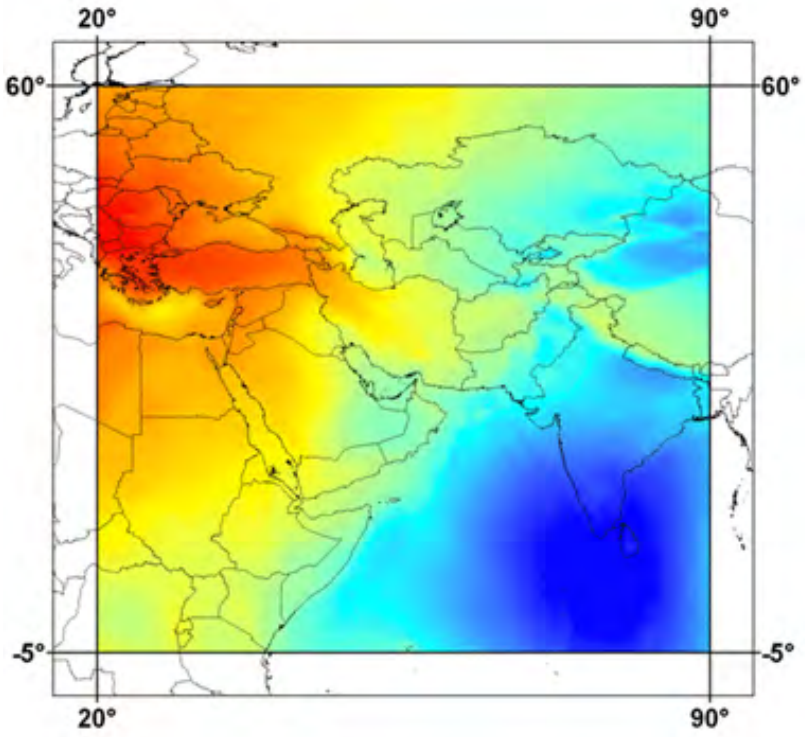
اسم النموذج	السنة	الدرجة	نوع البيانات المستخدمة
GO_CONS_GCF_2_DIR_R3	٢٠١١	٢٤٠	قياسات أقمار صناعية
GIF48	٢٠١١	٣٦٠	قياسات أقمار صناعية
EIGEN-6C	٢٠١١	١٤٢٠	قياسات أقمار صناعية مع أرصاد أرضية وأرصاد بحرية
EIGEN-51C	٢٠١٠	٣٥٩	قياسات أقمار صناعية مع أرصاد أرضية وأرصاد بحرية
GGMO3C	٢٠٠٩	٣٦٠	قياسات أقمار صناعية مع أرصاد أرضية وأرصاد بحرية
EGM2008	٢٠٠٨	٢١٦٠	قياسات أقمار صناعية مع أرصاد أرضية وأرصاد بحرية
PGMA2000	٢٠٠٠	٣٦٠	قياسات أقمار صناعية مع أرصاد أرضية وأرصاد بحرية
EGM96	١٩٩٦	٣٦٠	قياسات أقمار صناعية مع أرصاد أرضية وأرصاد بحرية

١٦-٣-١ نموذج الجيويد العالمي ٢٠٠٨

في أبريل ٢٠٠٨ أطلقت هيئة المساحة العسكرية الأمريكية نموذج الجيويد العالمي EGM2008 وأتاحته للجميع مجانا علي شبكة الانترنت. يعد هذا النموذج ثورة علمية في مجال نماذج الجيويد العالمية ، حيث أن درجة النمذجة degree قد بلغت ٢١٦٠ مقارنة بدرجة تساوي ٣٦٠ لجميع نماذج الجيويد العالمية السابقة له. ترجع هذه الدرجة العالية في تمثيل حيود الجيويد إلي قاعدة البيانات الجيوديسية (وخاصة قياسات شذوذ الجاذبية) الضخمة التي استخدمت في تطوير نموذج EGM2008 والتي غطت تقريبا كل سطح الأرض سواء اليابسة أو البحار مما لم يتوافر لأي جهة عالمية قبل ذلك. و لهذا النموذج ذو الدرجة التي تبلغ ٢١٦٠ ، فأن طول الموجة (من المعادلة ٧-١١) = ١٨٠ / ٢١٦٠ = ٠.٠٨٣٣٣٣ درجة أي تقريبا ٥' ، أي أن درجة الوضوح للنموذج = ٠.٠٨٣٣ × ١١٠ = ٩.٢ كيلومتر تقريبا. أي أن هذا النموذج سيحسب قيمة متوسطة للجيويد كل ٩.٢ كيلومتر.

نموذج الجيويد العالمي ٢٠٠٨ EGM2008 متاح للجميع علي الانترنت في الرابط:
http://earth-info.nima.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008

كما يوجد وصف تفصيلي لطرق تطويره والبيانات المستخدمة في الرابط:
http://earth-info.nima.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/NPavlis&al_EGU2008.ppt



شكل (١٦-٦) حيود الجيويد في منطقة الشرق الأوسط من النموذج العالمي EGM2008

الأهم من درجة وضوح أي نموذج جيويد عالمي هو مدي دقة النموذج نفسه accuracy، والتي يتم تحديدها عند مقارنة نتائج النموذج مع قياسات أرضية دقيقة. لكي نقيم دقة نموذج EGM2008 (علي سبيل المثال) في منطقة جغرافية أو دولة محددة فنقوم بتجميع قياسات حيود الجيويد N عند بعض النقاط ونقارنها بقيم حيود الجيويد الناتجة من النموذج العالمي، ونحسب الفروق بين كلا القيمتين عند كل نقطة ثم نحسب الانحراف المعياري لهذه الفروق جميعا لتكون قيمته مؤشر لدقة نموذج الجيويد العالمي.

تقوم المنظمة الدولية لنماذج الجيويد العالمية باختبار و تقييم دقة نماذج الجيويد عند مجموعة كبيرة من النقاط الجيوديسية المعلومة حول العالم. والجدول التالي يعرض مؤشرات دقة بعض هذه النماذج:

اسم النموذج	دقة النموذج (متر)			
	أمريكا	كندا	أوروبا	استراليا
GO_CONS_GCF_2_DIR_R3	٠.٤٣	٠.٣٥	٠.٤٢	٠.٣٦
GIF48	٠.٣٢	٠.٢٣	٠.٢٨	٠.٢٤
EIGEN-6C	٠.٢٥	٠.١٤	٠.٢١	٠.٢٢
EIGEN-51C	٠.٣٤	٠.٢٥	٠.٢٩	٠.٢٣
GGMO3C	٠.٣٥	٠.٢٨	٠.٣٣	٠.٢٦
EGM2008	٠.٢٥	٠.١٣	٠.٢١	٠.٢٢
PGMA2000	٠.٣٨	٠.٣٦	٠.٤٨	٠.٢٩
EGM96	٠.٣٨	٠.٣٦	٠.٤٨	٠.٣٠

أي أن دقة نموذج الجيويد العالمي EGM2008 (يسمي أيضا EGM08) في حدود ± ٠.٢٣ متر ، بمعني أن عند استنتاج قيمة حيود الجيويد N من هذا النموذج فأنها تحتمل خطأ في المتوسط يبلغ ٢٣ سنتيمتر.

١٦-٣-٢ استخدام EGM2008 لحساب الجيويد

توجد عدة طرق لتطبيق نموذج الجيويد العالمي EGM2008 لحساب قيمة حيود الجيويد N عند أي نقطة (في أي مكان في العالم). نستعرض هنا بعض هذه الطرق و البرامج:

(أ) البرنامج الرئيسي لحساب الجيويد من هيئة المساحة الأمريكية:

تتيح هيئة المساحة الأمريكية ملف يحتوي بيانات الجيويد EGM2008 للعالم وبرنامج للحساب في صفحتها الرئيسية بالرابط التالي:

http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_wgs84.html

في هذه الصفحة يمكن تحميل ملفي البيانات الأساسين لجيويد EGM2008 (بيانات النمذجة الهارمونية الكروية) من:

http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/EGM2008_to2190_TideFree.gz

والملف الثاني من:

http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/Zeta-to-N_to2160_egm2008.gz

وهذين الملفين مضغوطين (zipped) ويمكن فك الضغط عنهما ببرنامج winzipe أو برنامج winrare.

أما برنامج الحسابات نفسه فيمكن تحميله من الرابط:

http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/hsynth_WGS84.exe

لتنفيذ تشغيل الملف الأخير فيجب أن تكون إحداثيات النقاط (المطلوب عندها حساب قيمة حيود الجيويد) مكتوبة في ملف نصي بطريقة format معينة. يوجد نموذج لهذا الملف النصي يمكن تحميله من الرابط:

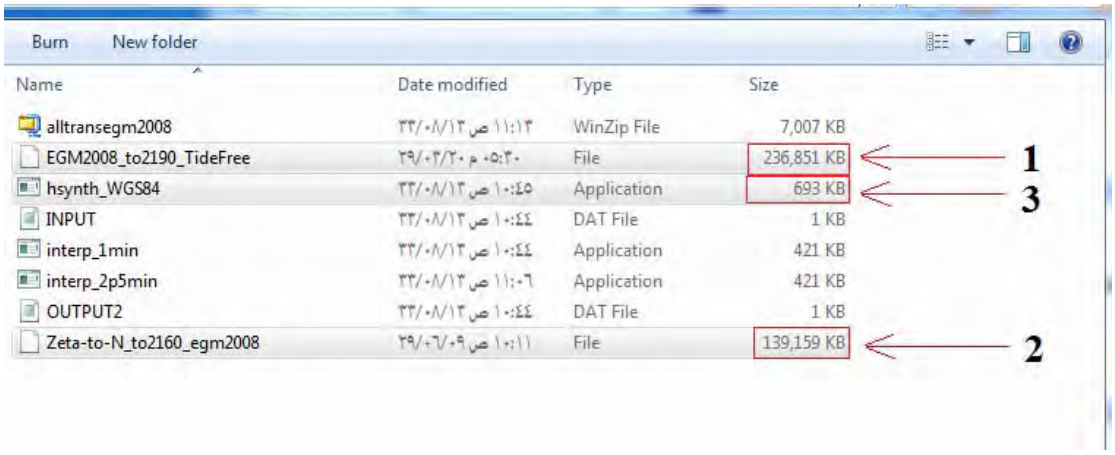
http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/INPUT.DAT

أيضا يوجد ملف للنتائج في الرابط:

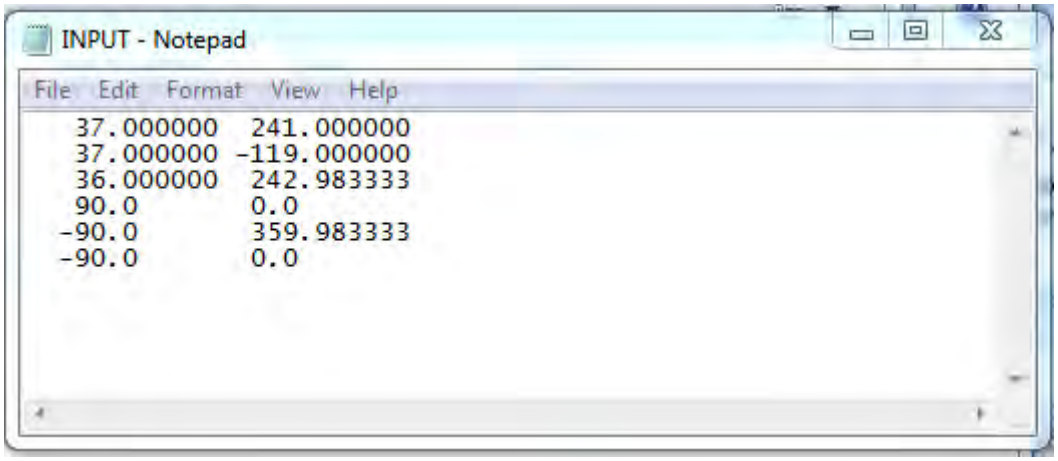
http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/OUTPUT2.DAT

وهذا الملف للتحقق من أن ملفات النموذج التي قمنا بتحميلها سليمة. بمعني أننا نحمل الملفات السابقة ثم نشغل run برنامج الحساب علي بيانات الملف الأساسي input.dat لنتأكد من أن نتائج البرنامج هي نفسها النتائج الموجودة في الملف output2.dat. فان لم تكن النتائج متطابقة فهذا يدل علي أن هناك خطأ معين قد حدث، وغالبا يكون أن الملفات التي قمنا بتحميلها لم تكتمل تماما (حدث انقطاع في الانترنت أثناء التحميل) ، وعلينا في هذه الحالة إعادة تحميل الملفات مرة أخري.

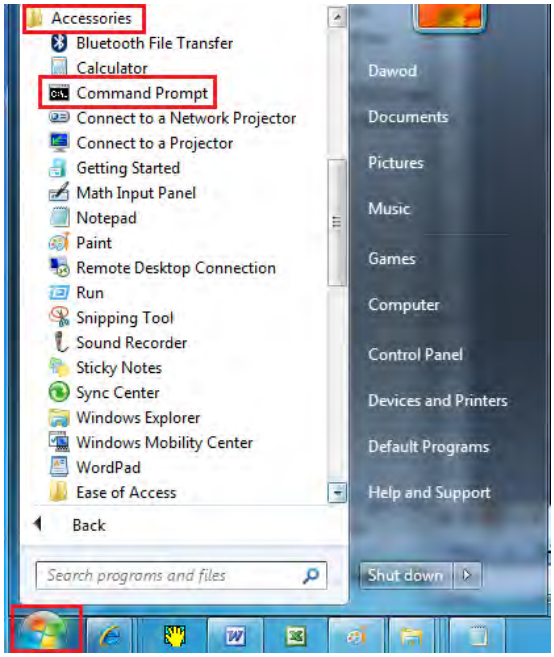
لابد من التأكد من حجم الملفات بعد تحميلها و إزالة الضغط عنها، فالملف الأساسي (كما في الصورة التالية) يبلغ حجمه ٢٣٦.٨ ميجابايت والملف الثاني يبلغ ١٣٩.١ ميجابايت بينما الملف التنفيذي للحساب فيبلغ ٦٩٣ كيلوبايت:



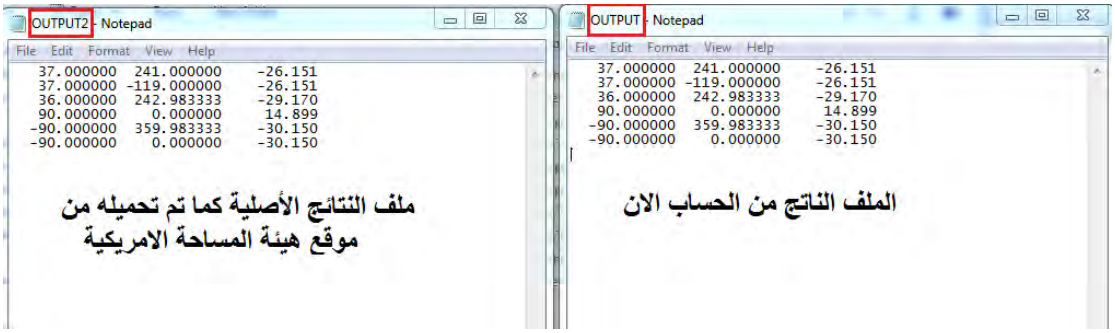
أما الملف النصي لقيم إحداثيات النقاط المطلوبة فيتكون من: كل سطر يتكون من دائرة العرض latitude بالدرجات ثم مسافة ثم خط الطول longitude بالدرجات:



نبدأ أولا في التأكد من أن ملفات البرنامج تعمل بصورة سليمة وذلك عن طريق تنفيذ ملف الحساب علي الملف النصي الأساسي (بإحداثياته كما هي) لنري النتائج ثم نقارنها بالنتائج المفترضة للبرنامج. يجب أن تكون جميع الملفات في نفس المجلد. ثم نفتح نافذة برنامج command prompt من قائمة البرامج الملحقة accessories من قائمة ابدأ start نظام الويندوز:

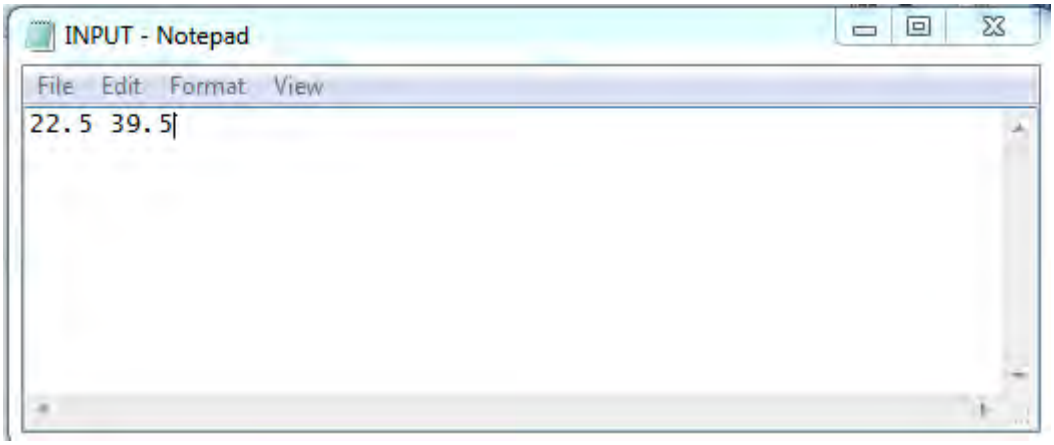


في نافذة موجه الأوامر نتغير للمجلد الموجود به الملفات ثم نكتب اسم ملف التنفيذ hsynth_wgs98 ونضغط مفتاح Enter من لوحة مفاتيح الكمبيوتر. سيأخذ التنفيذ أقل من دقيقة (الملف النصي به إحداثيات ٦ نقاط فقط) ثم يظهر ملف النتائج output.dat. نفتح هذا الملف ونفتح أيضا ملف النتائج الأصلية الذي تم تحميله من موقع هيئة المساحة الأمريكية ونقارن نتائج كلا الملفين:



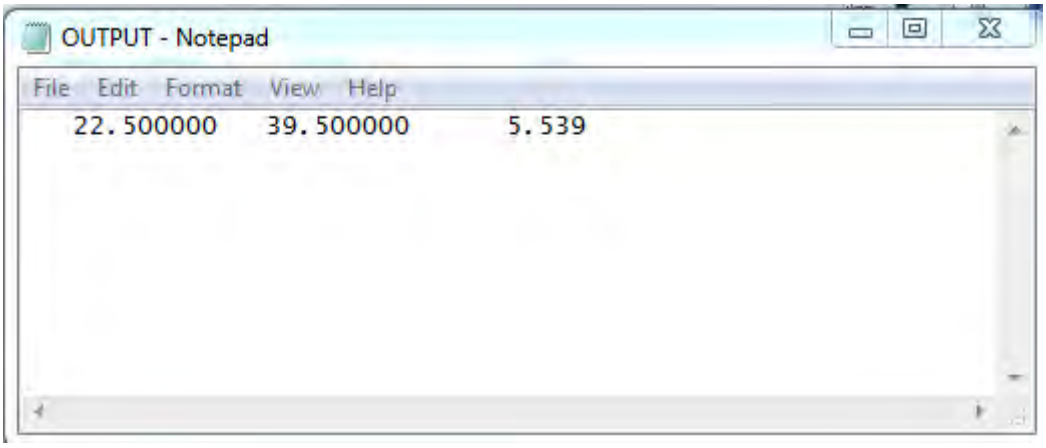
نجد أن النتائج متطابقة (كل سطر يتكون من: دائرة العرض ثم خط الطول ثم قيمة حيود الجيويد بالمتر)، مما يدل علي أن الملفات التي قمنا بتحميلها من الانترنت سليمة و كاملة.

الآن سنغير الإحداثيات الموجودة داخل ملف البيانات النصية input.dat ونكتب إحداثيات النقاط التي نريد أن نحسب عندها قيمة حيود الجيويد من نموذج EGM2008. مثلا سنستخدم هنا نقطة واحدة فقط: دائرة العرض = ٢٢.٥ درجة و خط الطول = ٣٩.٥ درجة ونحفظ الملف:



برنامج hsynth_wgs98 يعتمد علي تنفيذ الحسابات لكل ما هو موجود في ملف input.dat في كل مرة يتم تشغيله بها، ويضع النتائج في ملف جديد أسمه output.dat. حيث أن الملف الأخير موجود (من الخطوة السابقة) فيجب أن نحذفه أو نغير أسمه حتى يستطيع البرنامج إنشاء ملف output.dat من جديد للنتائج الجديدة. إن لم نفعل ذلك سيعطي البرنامج خطأ error في شاشة موجه الأوامر command prompt ولن يتم تنفيذ حسابات الجيويد.

مرة أخري في نافذة موجه الأوامر نكتب اسم ملف التنفيذ hsynth_wgs98 ونضغط مفتاح Enter من لوحة مفاتيح الكمبيوتر. ثم يظهر ملف النتائج output.dat:



أي أن قيمة حيود الجيويد من نموذج EGM2008 تبلغ ٥.٥٣٩ متر عند دائرة العرض ٢٢.٥ وخط الطول ٣٩.٥ درجة.

(ب) شبكات الجيويد من هيئة المساحة الأمريكية:

في نفس صفحة هيئة المساحة الأمريكية يوجد خيار ثاني (بدلا من حساب قيمة الجيويد من القيم الأساسية لمعاملات النموذج عند كل نقطة يحددها المستخدم) يتمثل في شبكات grid لقيم حيود الجيويد علي مستوي العالم. توجد شبكتين الأولي شبكة كل ١'×١' (حوالي ٢×٢ كم) والثانية شبكة كل ٢.٥'×٢.٥' (حوالي ٥×٥ كم). ورابط الشبكتين بالترتيب في:

http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/Small_Endian/Und_min1x1_egm2008_isw=82_WGS84_TideFree_SE.gz

http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/Small_Endian/Und_min2.5x2.5_egm2008_isw=82_WGS84_TideFree_SE.gz

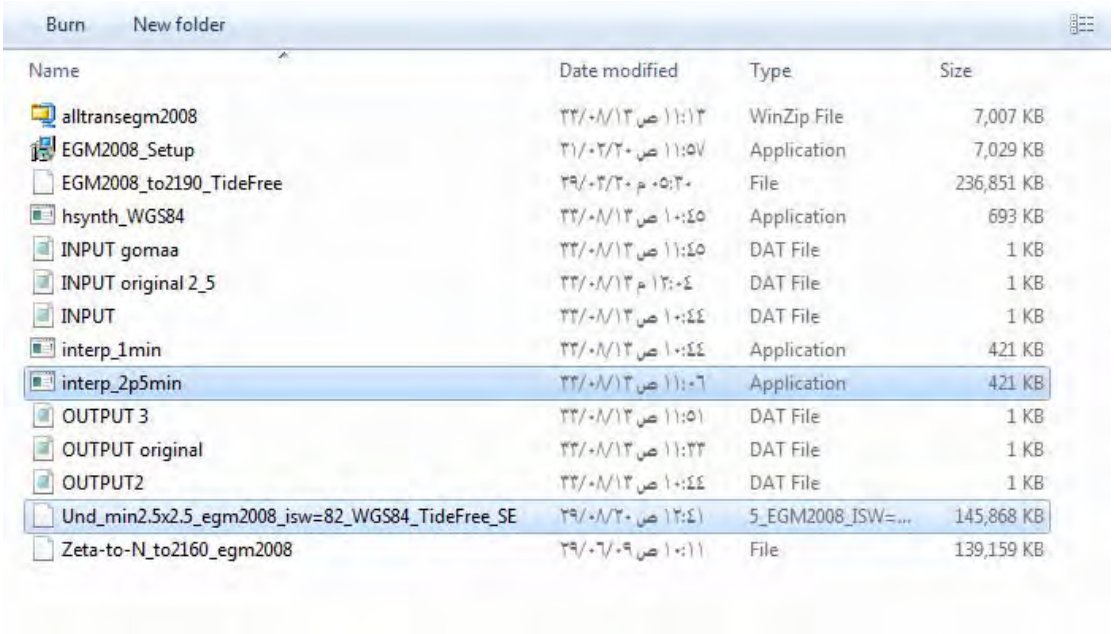
أما برنامج الاستنباط interpolation لحساب قيمة حيود الجيويد (من الشبكة الأولي ١'×١') فيمكن تحميله من الرابط:

http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/interp_1min.exe

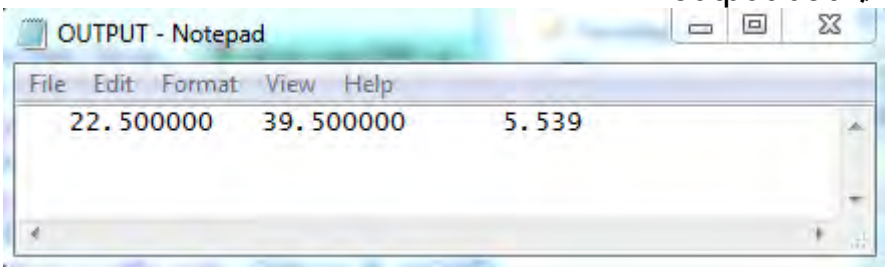
وبرنامج الاستنباط interpolation لحساب قيمة حيود الجيويد (من الشبكة الثانية ٢.٥'×٢.٥') فيمكن تحميله من الرابط:

http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/interp_2p5min.exe

لتشغيل هذه الطريقة: نتأكد من أن ملف الشبكة (الثانية علي سبيل المثال) كامل ويبلغ حجمه بعد فك الضغط عنه ١٤٥.٨ ميجابايت:



مرة أخري نغير أسم ملف النتائج output.dat إلي أي أسم آخر (أو نحذفه) ثم من نافذة موجه الأوامر command prompt نكتب اسم ملف الاستنباط الخاص بالشبكة الثانية interp_2p5min ثم نضغط مفتاح Enter (لم نغير أي شئ في ملف البيانات النصي input.dat أي أن التنفيذ سيتم علي نفس النقطة السابقة). بعد أقل من دقيقة سيظهر ملف النتائج الجديد output.dat:



قيمة حيود الجيويد (٥.٥٣٩ متر) هي نفس القيمة السابقة تماما.

(ج) برنامج Altrans لحساب حيود الجيويد EGM2008:

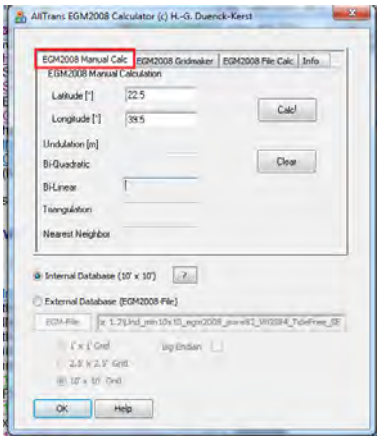
برنامج صغير الحجم (٧ ميجابايت فقط) أعدة مهندس ألماني أسمه Hans-Gerd Duenck-Kerst لاستنباط قيمة حيود الجيويد من النموذج العالمي EGM2008 لكن بصورة أبسط

وأسرع من برنامج هيئة المساحة الأمريكية. يمكن تحميل هذا البرنامج من عدة مواقع علي الانترنت منهم علي سبيل المثال:

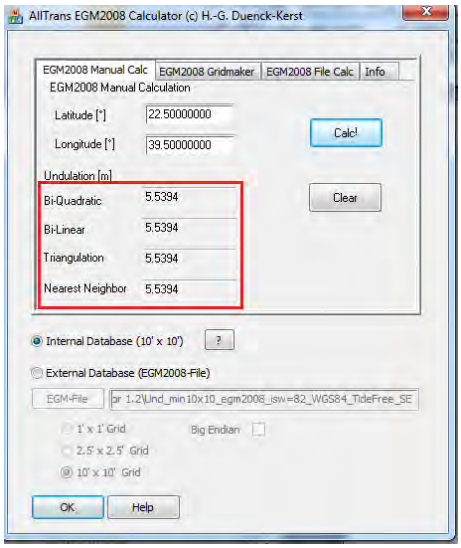
http://www.allsat.de/download/Software/ALLTRANS/alltranseg m2008.zip

بعد تحميل الملف وفك الضغط عنه نقوم بتثبيته setup علي الكمبيوتر (برنامج مجاني لا يحتاج كلمة سر serial number). ثم نبدأ تشغيله (الإصدار ١.٢ في المثال التالي):

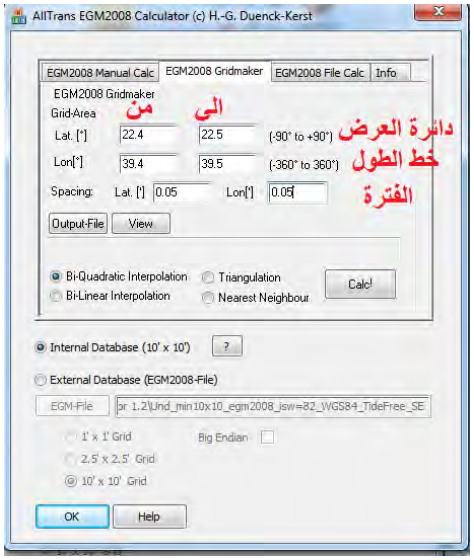
في الحالة الأولي EGM2008 Manual Cak سيتم حساب قيمة حيود الجيويد عند نقطة واحدة بمجرد إدخال إحداثياتها للشاشة (سنستخدم نفس النقطة السابقة حيث دائرة العرض = ٢٢.٥ و خط الطول = ٣٩.٥) ثم نضغط أيقونة الحساب Calc:



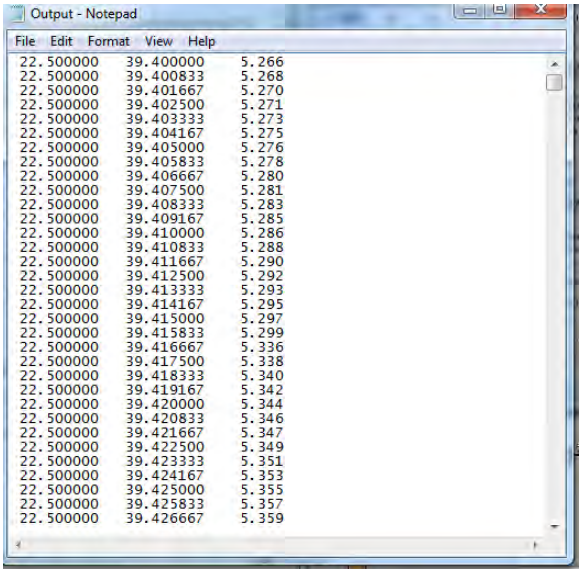
ستظهر ٤ قيم لحيود الجيويد EGM2008 لهذه النقطة بسبب أن البرنامج يقوم بعملية الاستنباط بأربعة طرق رياضية مختلفة. لكن القيم الأربعة طريقة متساوية وحيود الجيويد = ٥.٥٣٩ متر (نفس نتيجة برنامج هيئة المساحة الأمريكية السابق).



أما الحالة الثانية لهذا البرنامج EGM2008 Grid maker فهي لحساب حيود الجيويد لشبكة (وليس نقطة واحدة). مثلا – في الشكل التالي – سنحسب الجيويد من دائرة عرض ٢٢.٤ إلي دائرة عرض ٢٢.٥ ومن خط طول ٣٩.٤ إلي خط طول ٣٩.٥ بفترة تبلغ ٠.٠٥ في دوائر العرض و ٠.٠٥ في خطوط الطول:



نضغط أيقونة الحساب Calc ، ثم نضغط أيقونة عرض النتائج View لنفتح ملف النتائج الذي سيكون كالشكل التالي:



العمود الأول لدائرة العرض و الثاني لخطوط الطول والثالث بقيمة حيود الجيويد EGM2008 لمنطقة الشبكة المطلوبة.

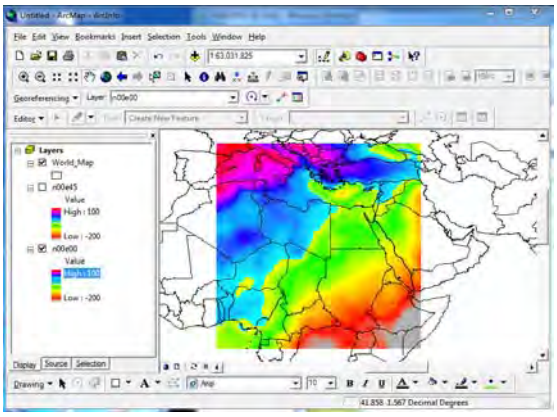
أما الحالة الثالثة للبرنامج EGM2008 File Calc فهي خاصة بإجراء الحسابات علي نقاط موجود إحداثياتها في ملف نصي.

(د) شبكة حيود الجيويد EGM2008 خاصة ببرامج نظم المعلومات الجغرافية:

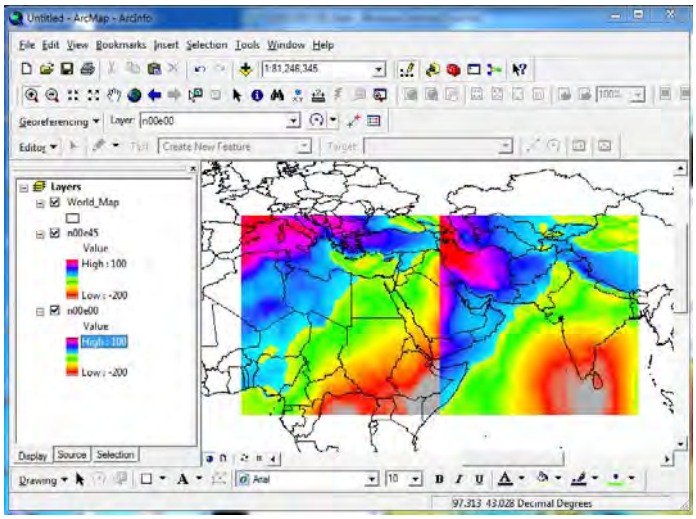
تتيح هيئة المساحة الأمريكية بيانات نموذج الجيويد EGM2008 في صورة شبكات تتناسب مع برامج نظم المعلومات الجغرافية. تم تقسيم العالم إلي عدة ملفات كلا ملف يغطي ٤٥×٤٥ درجة من دوائر العرض و خطوط الطول في الرابط:

http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/egm08_gis.html

مثلا نختار الملف من صفر إلي ٤٥ في دوائر العرض و خطوط الطول (يغطي مصر و الجزء الغربي من المملكة العربية السعودية) ونقوم بتحميله (حجمه ٣.٤ ميجابايت فقط). وبعد فك الضغط عنه سينتج ملف شبكي raster (كما لو كان مرئية فضائية) يمكن فتحه مباشرة داخل برنامج Arc Map لنظم المعلومات الجغرافية:



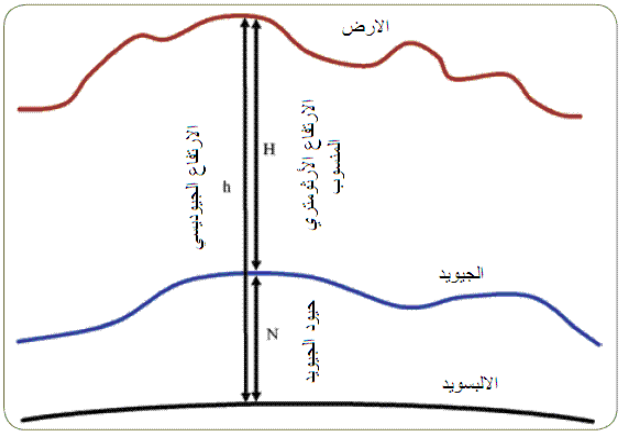
ثم يمكن التعامل معه (لمستخدمي نظم المعلومات الجغرافية) من خلال إنتاج خريطة كنتورية لسطح الجيويد أو اقتطاع جزء لمنطقة محدده أو استنباط قيمة حيود الجيويد عند مجموعة من النقاط ..... الخ. أيضا يمكن تحميل ملف آخر من ملفات شبكات EGM2008 والتعامل معه بنفس الطريقة داخل برنامج Arc Map لدمج كلا الملفين (المرئيتين) في ملف واحد مثلا لكي يغطي المملكة العربية السعودية كلها:



١٦-٤ الجي بي أس و الجيويد

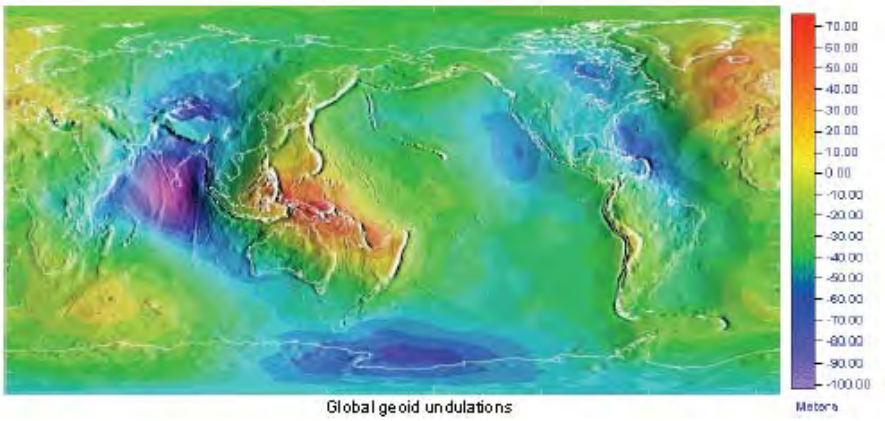
تعتمد أرصاد الجي بي أس وأيضا الإحداثيات الناتجة عن هذه التقنية علي المجسم أو الاليبسويد العالمي WGS84 ، أي أن الارتفاع الناتج من الجي بي أس يكون مقاسا من سطح هذا الاليبسويد ولذلك يسمي الارتفاع الاليبسويدي Ellipsoidal Height أو الارتفاع الجيوديسي Geodetic Height . بينما في التطبيقات المساحية و الخرائطية فأن الارتفاع المستخدم – أي المنسوب – يكون مقاسا من منسوب متوسط سطح البحر MSL أو الذي يمثل شكل الجيويد ، ويسمي الارتفاع الأرثومتري Orthometric Height. والفرق بين سطح الاليبسويد و سطح الجيويد يسمي حيود الجيويد Geoid Undulation أو ارتفاع الجيويد Geoidal Height (شكل ١٥-٢٢) ، وهو فرق مؤثر لا يمكن إهماله حيث قد تصل قيمته إلي ١٠٠ متر في بعض المناطق علي الأرض. كمثال في مصر يتراوح حيود الجيويد بين حوالي ٩ متر عند الحدود المصرية السودانية في الجنوب و حوالي ٢٢ متر عند البحر الأبيض المتوسط في الشمال. ولكي يتم تحويل الارتفاع الجيوديسي لنقطة ما (لنرمز له بالرمز h) إلي منسوبها المقابل (لنسميه H) فيجب معرفة قيمة حيود الجيويد (N) عند هذه النقطة طبقا للمعادلة:

$$h = H + N \qquad (16\text{-}12)$$



شكل (١٦-٨) العلاقة بين أنواع الارتفاعات

لذلك فمن المهم عند استخدام نظام الجي بي أس في المشروعات المساحية أن نحصل علي نموذج للجيويد حتى يمكن تحويل ارتفاعات الجي بي أس إلي مناسيب و بدقة تناسب العمل الهندسي. توجد طرق عديدة لحساب قيمة حيود الجيويد – أي نمذجة الجيويد Geoid Modeling - تعتمد علي عدة أنواع من القياسات الجيوديسية مثل: الأرصاد الفلكية ، أرصاد الجاذبية الأرضية ، أرصاد الجي بي أس مع الميزانيات ، طرق التمثيل المتناسق لمجال جهد الأرض باستخدام أرصاد مختلفة النوع Heterogeneous Data.



شكل (١٦-٩) الفروق بين الجيويد و الاليبسويد في العالم

١٦-٥ نمذجة الجيويد

١٦-٥-١ نمذجة الجيويد من أرصاد الجاذبية الأرضية

يتم قياس قيمة الجاذبية الأرضية Measured Gravity علي سطح الأرض باستخدام أجهزة قياس الجاذبية الأرضية Gravimeters ، كما يمكن أيضا باستخدام خصائص الاليبسويد حساب قيمة الجاذبية النظرية Theoretical or Normal Gravity علي سطح الاليبسويد. الفرق بين قيمة الجاذبية المقاسة و قيمة الجاذبية النظرية المحسوبة - يسمي شذوذ الجاذبية Gravity Anomalies - يعبر بصورة معينة عن الفرق بين كلا من الاليبسويد و الجيويد.

المعادلة (١٦-٨) تتيح حساب قيم حيود الجيويد N من بيانات شذوذ الجاذبية الأرضية Δg. لكن قياسات الجاذبية الأرضية في منطقة محلية معينة (دولة مثلا) لا تكون بكثافة عالية تسمح بحساب قيم دقيقة لحيود الجيويد كما أن المعادلة المذكورة تتطلب معرفة قيم الجاذبية الأرضية في كافة أنحاء الأرض. لذلك يتم تقسيم قيمة حيود الجيويد إلي ٣ مركبات:

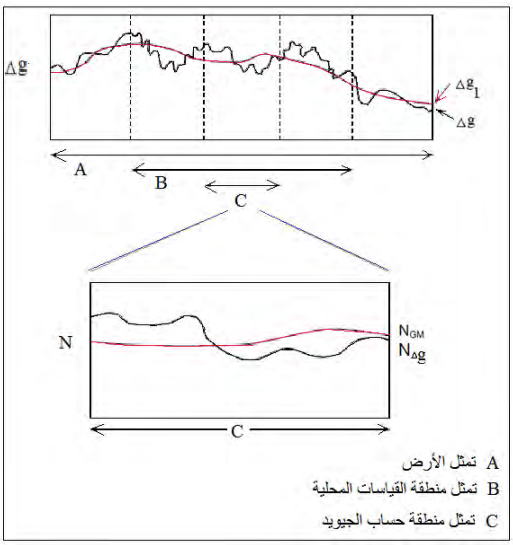
$$N = N_{GM} + N_{\Delta g} + N_H \qquad (16\text{-}13)$$

حيث:

N_{GM} تأثير نموذج الجيويد العالمي

$N_{\Delta g}$ تأثير قياسات الجاذبية المحلية

N_H تأثير تغير التضاريس المحلية



شكل (٧-١٠) مركبات الجيويد في منطقة محلية

يتم حساب كل مركبة (من هذه المركبات الثلاثة) كالتالي:

$$N_{GM} = R \sum_{n=2}^{n} \sum_{m=0}^{n} \bar{P}\,nm\,(\cos\theta)\,(\Delta\bar{C}_{nm}\cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm}\sin m\lambda) \qquad (16\text{-}14)$$

$$N_{\Delta g} = \frac{R}{4\pi\gamma}\iint_{\sigma_0} St(\psi)\Delta g_2 \, d\sigma \qquad (16\text{-}15)$$

where, $\Delta g_2 = \Delta g - \Delta g_1$

$$\Delta g_1 = \gamma \sum_{n=2}^{n} \sum_{m=0}^{n} \bar{P}\,nm\,(\cos\theta)(n\text{-}1)\,(\Delta\bar{C}_{nm}\cos m\lambda + \Delta\bar{S}_{nm}\sin m\lambda)$$

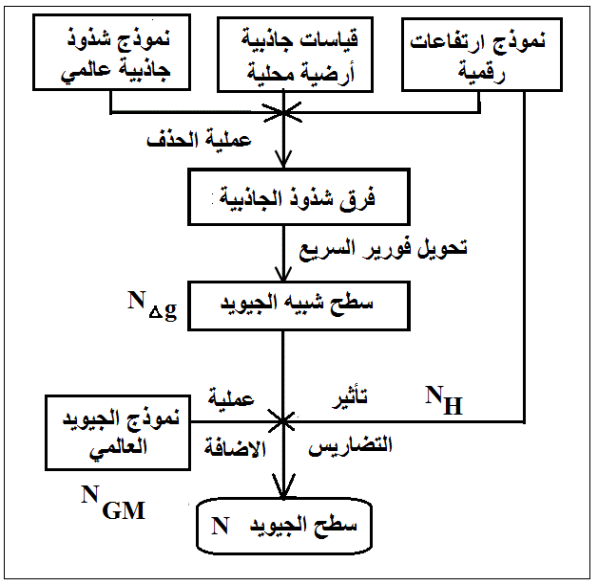
$$N_H = \left[\left(\frac{g-\gamma}{\gamma}\right)\right] H \qquad (16\text{-}16)$$

لإتمام هذه العملية يتم حساب شذوذ الجاذبية الناتجة من قياسات الجاذبية الأرضية في المنطقة المحلية (الدولة) ثم نطرح منها تأثير شذوذ الجاذبية الناتجة من قياسات الجاذبية الأرضية العالمية، والفرق يتم منه حساب قيمة $N_{\Delta g}$. ثم يتم حساب تأثير الجاذبية العالمية علي قيم حيود الجيويد N_{GM}، ثم باستخدام نموذج ارتفاعات رقمية DEM للمنطقة المحلية يتم حساب تأثير التضاريس علي حيود الجيويد N_H. وفي آخر خطوة يتم جمع قيم المركبات الثلاثة للحصول علي قيمة حيود الجيويد N. لذلك تسمي هذه العملية باسم الحذف/الحساب/الإضافة أو Remove-Compute-Restore. تتم الحسابات الرياضية بطريقة تسمي تحويل فورير السريع أو Fast Fourier Transform أو اختصارا FFT لكي تحول عملية التكامل

المزدوج (في المعادلة ١٦-٨) إلي عملية جمع مزدوج كما سبق الذكر. كما توجد طريقة أخري لحساب حيود الجيويد تسمي collocation.

أي أنه لاستنتاج سطح الجيويد في منطقة محلية يلزمنا:

١. قياسات جاذبية أرضية بكثافة مناسبة لمساحة المنطقة
٢. نموذج جاذبية أرضية عالمي
٣. نموذج جيويد عالمي
٤. نموذج ارتفاعات رقمية للمنطقة المحلية
٥. برنامج حساب software متخصص (مثل برنامج gravsoft)



شكل (١٦-١١) حساب الجيويد من الجاذبية الأرضية

١٦-٥-٢ نمذجة الجيويد من أرصاد الجي بي أس و الميزانيات

يعد هذا الأسلوب (يسمي الطريقة الهندسية) هو الأمثل للمساحة بالجي بي أس وخاصة للمناطق الصغيرة (منطقة تغطي مساحة من ١٠ إلي ٢٠ كيلومتر مربع). يتم تنفيذ قياسات جي بي أس عند مجموعة من النقاط المعلوم منسوبها (نقاط روبيرات أو BM) ، وبالتالي يمكن حساب قيمة حيود الجيويد عند هذه النقاط باستخدام المعادلة (١٦-١٢).

في أبسط الصور يمكن باستخدام نقطة واحدة فقط معرفة الفرق بين سطحي الاليبسويد و الجيويد، إلا أن رصد جي بي أس عند ٣ روبيرات يعد وضعا أفضل بالتأكيد. وجود ٣ نقاط معلوم لهم كلا من h و H سيمكننا من حساب ٣ معاملات (الميل tilt في اتجاه الشمال ، الميل في اتجاه الشرق ، الفرق المتوسط) لوصف الفروق بين كلا السطحين. أي أن الجيويد يتم تمثيله من خلال سطح أو مستوي مائل tilted plane . وبعد ذلك يمكن استخدام هذا النموذج أو هذا المستوي لكي نحول ارتفاع الجي بي أس لأي نقطة جديدة مرصودة إلي منسوبها. وبالطبع يمكن استخدام أكثر من ٣ نقاط (معلوم عندها h و H) وذلك للحصول علي مصداقية أكثر more reliability لنتائج المستوي المائل حيث أن استخدم ٣ نقاط معلومة فقط يعطي ٣

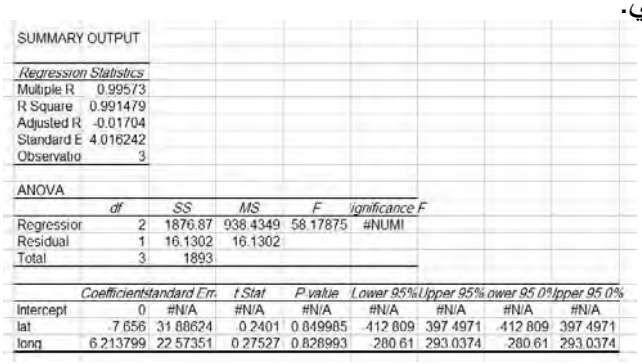
معادلات مطلوب حلهم في ٣ قيم مجهولة أي – رياضيا و إحصائيا - لا يوجد أي تحقيق check للنتائج ، بينما استخدام أكثر من ٣ نقاط سيعطي عدد معادلات أكبر من عدد المجاهيل مما سينتج عنه وجود تحقيق ومؤشرات إحصائية لجودة النتائج المحسوبة. أيضا يمكن استخدام نماذج رياضية أكثر دقة (من نموذج السطح المائل) مثل دالة ذات الحدود polynomials بفرض وجود عدد أكبر من النقاط المعلومة (معلوم لها h و H).

مثال:
إذا كان لدينا البيانات (الافتراضية) التالية لعدد ٣ نقاط:

خط الطول	دائرة العرض	الارتفاع الجيوديسي h	المنسوب H	حيود الجيويد N=h-H
٢٢.٣	٣١.٤	١٠٠	٧٨	٢٢
٢٢.٢	٣١.٥	١٢٠	٩٥	٢٥
٢٢.٤	٣١.٦	١٤٠	١١٢	٢٨

نستخدم أداه الانحدار regression من أداه تحليل البيانات Data Analysis في برنامج الإكسل:

لتكون نتائجها كالتالي:



SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics

Multiple R	0.99573
R Square	0.991479
Adjusted R	-0.01704
Standard E	4.016242
Observatio	3

ANOVA

	df	SS	MS	F	ignificance F
Regressior	2	1876.87	938.4349	58.17875	#NUMI
Residual	1	16.1302	16.1302		
Total	3	1893			

	Coefficients	tandard Er	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	ower 95.0%	pper 95.0%
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
lat	-7.656	31.88624	-0.2401	0.849985	-412.809	397.4971	-412.809	397.4971
long	6.213799	22.57351	0.27527	0.826993	-280.61	293.0374	-280.61	293.0374

أي أن:

N = -7.656 Latitude + 6.214 Longitude

أي أن الجيويد (في هذا المثال الافتراضي) ينقص في اتجاه دوائر العرض بقيمة ٧.٦٥٦ متر لكل درجة بينما يزيد في اتجاه خطوط الطول بقيمة ٦.٢١٤ متر لكل درجة.

لتحديد دقة هذه المعادلة (في تمثيل سطح الجيويد) يجب اختبارها عند نقطة معلومة، أي نقطة معلوم لها الإحداثيات و الارتفاع الجيوديسي و المنسوب. نحسب قيمة حيود الجيويد الحقيقي لهذه النقطة (من بياناتها المعلومة) ثم نحسب قيمة حيود الجيويد من المعادلة، والفرق بين القيمتين يعبر عن دقة المعادلة ذاتها.

مثلا إذا كان لدينا نقطة بإحداثيات ٢٢.٣٥ ، ٣١.٤٥ ومعلوم عندها الارتفاع الجيوديسي ١٢٥ متر والمنسوب ١٠٠ متر: حيود الجيويد المعلوم (أو الحقيقي) = ١٢٥ – ١٠٠ = ٢٥ متر. ثم نستخدم معادلة الانحدار المستنبطة في حساب قيمة حيود الجيويد عند هذه النقطة N:

$$N = (-7.656 \times 22.35) + (6.214 \times 31.45) = 24.319 \text{ m}$$

قيمة الخطأ (دقة معادلة الجيويد) = ٢٥ – ٢٤.٣١٩ = ٠.٦٨ متر

بعد ذلك يمكننا استخدام المعادلة في حساب قيمة حيود الجيويد عند أي نقطة جي بي أس (معلوم لها الارتفاع الجيوديسي) ومن ثم حساب منسوبها أيضا. فإذا كان لدينا نقطة (داخل حدود منطقة العمل أو منطقة النقاط الثلاثة المعلومة) بإحداثيات: ٢٢.٢٥ ، ٣١.٥٥ ومعلوم عندها الارتفاع الجيوديسي ١١٧ متر فنستخدم معادلة الانحدار المستنبطة في حساب قيمة حيود الجيويد عند هذه النقطة N ومن ثم يمكن حساب منسوبها:

$$N = (-7.656 \times 22.25) + (6.214 \times 31.55) = 25.706 \text{ m}$$

$$H = h – N = 117 – 25.706 = 91.294 \text{ m}$$

لكن هذه الطريقة الهندسية لها أيضا بعض العيوب مثل:

- النموذج الرياضي المستنبط يصلح فقط للمنطقة المحصورة بالنقاط المعلومة (محاولة استنباط extrapolation قيمة N خارج المنطقة لن تكون جيدة علي الإطلاق).
- نموذج المستوي المائل – نموذج بسيط رياضيا – ويصلح فقط لمناطق صغيرة (شكل وتغير الجيويد أكثر تعقيدا من محاولة وصفه بسطح مائل).
- عمليا قد يكون من الصعب إيجاد نقاط معلومة المنسوب (روبيرات أو BM) في المنطقة المطلوب العمل فيها.

أما في حالة وجود عدد أكبر من النقاط المعلوم لها كلا من H , h فمن الأفضل استخدام معادلة رياضية من الدرجة الثانية للوصول لدقة أفضل في تمثيل تغيرات سطح الجيويد في هذه المنطقة. أيضا يمكن استخدام برنامج السيرفر Surfer لاستنباط سطح جيويد بطريقة Kriging وهي أدق من طرق الاستنباط interpolation البسيطة.

أيضا من الممكن الجمع بين مميزات نموذج الجيويد العالمي EGM2008 (حيث أنه مجاني و يغطي العالم كله) مع مميزات الأرصاد المحلية في منطقة معينة في محاولة تحديد سطح الجيويد. هذا الأسلوب توصي به هيئة المساحة الأمريكية NGS (أنظر المراجع) في الأعمال المساحية التي تتم في مناطق محلية صغيرة (أقل من ٥٠×٥٠ كيلومتر)، كما ثبت نجاحه في عدة بحوث علمية حول العالم. تعتمد الفكرة الرئيسية لهذا الأسلوب علي محاولة اكتشاف أخطاء EGM2008 وزيادة دقته في منطقة محلية من خلال تطعيمه أو تعديله بقياسات محلية:

- معرفة قيمة الجيويد الحقيقية (المقاسة) للمنطقة المحلية من خلال عدد من النقاط المعلوم لها كلا من الارتفاع الجيوديسي و المنسوب (نقاط روبيرات BM تم رصدها بالجي بي أس أو نقاط ثوابت أرضية جي بي أس تم رصد الميزانية لها).
- استنباط قيمة الجيويد من EGM2008 عند هذه النقاط معلومة الإحداثيات (بأي برنامج من برامج EGM2008 السابق شرحها).
- حساب قيمة فرق الجيويد ΔN عند كل نقطة من هذه النقاط = قيمة الجيويد المقاس – قيمة الجيويد المحسوب من EGM2008. وهذه القيم تعبر عن دقة النموذج العالمي عند هذه المنطقة المحلية.
- تمثيل هذه الفروق ΔN بمعادلة رياضية (ببرنامج الإكسل مثلا كما سبق) أو كسطح (ببرنامج السيرفر) لإيجاد صيغة رياضية تعبر عن التغير في ΔN علي امتداد منطقة الدراسة (المنطقة المحددة بمواقع القياسات المعلومة).
- عند أي نقطة مطلوب حساب قيمة الجيويد N عندها نحسب أولا قيمة الجيويد الناتج من النموذج العالمي EGM2008 ثم نضيف إليه قيمة تصحيح ΔN في هذا الموقع (إحداثيات هذه النقطة).

الفصل السابع عشر

نظرية الأخطاء

يعتمد علم المساحة في المقام الأول علي الأرصاد (القياسات) والتي مهما بلغت دقة قياسها فلن تعطي نتائج صحيحة بصورة مطلقة بل سيكون بها خطأ مهما كان صغيرا جدا. فعلي سبيل المثال إذا قام راصد ذو خبرة كبيرة مستخدما جهاز ثيودليت دقيق بقياس زاوية ما عدد من المرات فلن تكون قيمة الزاوية واحدة في كل هذه القياسات. لذلك من الضروري علي دارس المساحة أن يلم بمصادر الأخطاء و أنواعها و كيفية التغلب عليها – إن أمكن – أو كيفية التعامل معها حسابيا للوصول إلي قيمة أقرب للصحة للكمية (مسافة أو زاوية أو فرق منسوب ...الخ) التي يتم قياسها.

١٧-١ مصادر و أنواع الأخطاء

الخطأ هو مقدار الفرق بين القيمة المقاسة (المرصودة) والقيمة الحقيقية لها. لكن من الصعب – إن لم يكن من المستحيل – أن نعرف القيمة الحقيقية لأي قياس، ولذلك فنستعيض عنه بالقيمة الأكثر احتمالا له.

تحدث الأخطاء نتيجة ثلاثة أسباب أو مصادر هي:

(أ) أخطاء إلية:
أخطاء ناتجة عن عيوب الأجهزة المستخدمة في القياس والتي يمكن التغلب عليها من خلال ضبط الجهاز ضبط دائم و معايرته كل فترة و إتباع خطة معينة في الرصد (مثل الرصد متيامن و متياسر بجهاز الثيودليت) وتصحيح أو ضبط الأرصاد من خلال معادلات رياضية (مثلا ضبط زوايا المثلث بحيث يساوي مجموع زواياه ١٨٠ درجة).

(ب) أخطاء شخصية:
أخطاء ترجع للراصد ذاته مثل عدم اعتنائه بعملية الرصد بصورة سليمة أو قلة خبرته العملية.

(ج) أخطاء طبيعية:
أخطاء ترجع أسبابها لتغير الظروف الطبيعية أثناء عملية الرصد مثل تغير تأثير الانكسار الجوي علي الميزان في فترات اليوم الواحد.

تنقسم أنواع الأخطاء إلي أربعة أنواع تشمل:

(١) الغلط أو الخطأ الجسيم Mistake or Blunder or Gross Error:

هو قيمة شاذة تجعل القيم المرصودة غير متجانسة مع بقية الأرصاد المماثلة، وينتج عن قلة الخبرة أو الإهمال في القياس. مثلا عند قياس زاوية عدة مرات فتكتب قيمتها في احدي المرات ١٥٣ درجة بدلا من ١٣٥ درجة، أو التوجيه علي نقطة "أ" وتسجيل قراءة الزاوية علي أنها لنقطة "ب". فإذا تم قياس مسافة عدة مرات كالتالي: ٥٦.٣٢، ٥٦.٣٨، ٥٦.٤٠، ٥٧.٣٨، ٥٦.٣٥، ٥٦.٣٩ متر، فيمكن بالملاحظة اكتشاف أن القيمة ٥٧.٣٨ تعد غلط أو

خطأ جسيم حيث أن باقي القيم متقاربة مع بعضها في حدود سنتيمترات بينما هذه القيمة تبعد عنهم بمتر كامل تقريبا. يمكن اكتشاف الغلط من خلال الحرص في المراجعة والتحقق من كل خطوة من خطوات الرصد ثم استبعاده نهائيا من عملية الحسابات المساحية. تجدر الإشارة إلي أن الغلط هو أخطر أنواع الأخطاء وأشدها تأثيرا علي دقة العمل في حالة عدم اكتشافه.

(٢) الخطأ التراكمي Accumulative Error:

هو خطأ صغير القيمة نسبيا (عند مقارنته بقيمة الغلط) يتكرر بنفس المقدار و الإشارة إذا تكرر القياس تحت نفس الظروف وباستخدام نفس الأجهزة ونفس الراصدين. الخطأ المنتظم خطا تراكمي بمعني أن قيمته تزيد كلما تكرر القياس، فمثلا إذا كان هناك خطأ ١٠ سنتيمتر في شريط طوله ٢٠ متر وأستخدمنا هذا الشريط في قياس مسافة تبلغ ١٠٠ متر فأن خطا منتظم قيمته ١٠ سنتيمتر سيكون في كل طرحة (رصدة أو جزء من المسافة، أي في كل ٢٠ متر مقاسه) مما سيجعل الخطأ المنتظم سيبلغ ١٠ سنتيمتر × ٥ مرات قياس = ٥٠ سنتيمتر في نهاية هذه المسافة. يتم التغلب علي الخطأ المنتظم إما بإضافة التصحيحات اللازمة له أو بوضع خطة دقيقة لعملية الرصد ذاتها، ويجب أن يتم ذلك قبل استخدام الأرصاد في العمليات الحسابية المساحية.

(٣) الخطأ المنتظم Systematic Error:

يشبه الخطأ المنتظم الخطأ التراكمي في طبيعته إلا أنه قد يكون تراكميا بنفس المقدار والإشارة وقد يختلف في قيمته و إشارته من أجزاء العمل الحقلي. كمثال تأثير عوامل الطقس (الحرارة والرطوبة) علي قياسات الزوايا و المسافات المقاسة الكترونيا سواء بأجهزة EDM أو المحطات الشاملة، ولذلك توجد معادلات رياضية لحساب قيمة هذا الخطأ المنتظم بناءا علي قيم درجات الحرارة و الرطوبة المقاسة أثناء عملية الرصد الميداني. يتم التغلب علي الأخطاء المنتظمة من خلال إجراء التصحيحات اللازمة أو بوضع خطة دقيقة لعملية الرصد واختيار أنسب ظروف القياس. أيضا يجب أن يتم التغلب علي الأخطاء المنتظمة و تصحيحها (مثل الأخطاء التراكمية) قبل استخدام الأرصاد في العمليات الحسابية المساحية.

(٤) الخطأ العشوائي أو العارض Random or Accidental Error:

الخطأ العشوائي خطأ متغير غير ثابت لا في القيمة ولا في الإشارة ولا يمكن التنبؤ به ولا معرفة مصدره الرئيسي، ولذلك فأسمه العشوائي. توجد الأخطاء العشوائية - مهما صغرت قيمتها - في كل القياسات ويتم التعامل معها بطرق رياضية لمحاولة الوصول إلي القيمة الأكثر احتمالا للكميات المطلوب حساب قيمتها الدقيقة. وهذا هو موضوع نظرية الأخطاء Theory of Errors أو عملية الضبط Adjustment.

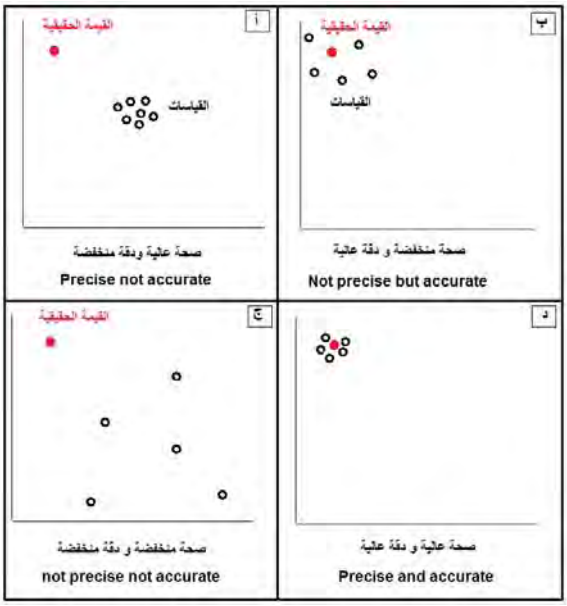
١٧-٢ مبادئ إحصائية في المساحة

(أ) الدقة Accuracy والصحة Precision:

يجب علي دارس المساحة أن يفرق بين كلا المفهومين وخاصة – للأسف – أن بعض الكتب باللغة العربية تترجم كلا الكلمتين إلي "دقة" مع أنه يوجد اختلاف جذري بينهما. فالصحة (البعض يسميها الإحكام أو الدقة الظاهرية) Precision تدل علي مدي تقارب مجموعة من القياسات لنفس الهدف، أي أن الصحة هي درجة التوافق بين عدة قياسات لقيمة واحدة، أو هي درجة تنقية الأرصاد من الأخطاء معروفة المصدر وإزالة تأثيرها علي القياسات. بينما الدقة Accuracy تدل علي مدي قرب هذه الأرصاد من القيمة الحقيقية لها، أو بمعني آخر فالدقة هي درجة الكمال في الأرصاد وخلوها من الأخطاء بقدر الإمكان.

لنأخذ مثالا: تم قياس مسافة عدد من المرات فكانت النتائج ٨.٢٤ ، ٨.٢٦ ، ٨.٢٠ ، ٨.٢٢ متر. هذه الأرصاد متقاربة جدا من بعضها مما يجعلنا نقول أن "صحة" الأرصاد عالية. لكن ماذا لو كان الشريط المستخدم في هذه الأرصاد به خطأ منتظم قيمته ٢٠ سنتيمتر مثلا، هنا ستكون كل القياسات بعيدة عن القيمة الحقيقية للمسافة المقاسة ، أي أنها "دقة" الأرصاد ستكون منخفضة.

الشكل التالي يمثل أربعة حالات للفرق بين الدقة و الصحة: (أ) فان كانت القياسات متقاربة جدا من بعضها البعض لكنها في نفس الوقت بعيدة عن القيمة الحقيقية فهنا تكون الصحة عالية لكن الدقة منخفضة، (ب) أما إن كانت القياسات متباعدة عن بعضها البعض لكنها في نفس الوقت قريبة من القيمة الحقيقية فهنا تكون الصحة منخفضة لكن الدقة عالية، (ج) أما إن كانت القياسات متباعدة عن بعضها البعض وأيضا بعيدة عن القيمة الحقيقية فهنا تكون الصحة منخفضة والدقة منخفضة أيضا، (د) أما إن كانت القياسات متقاربة جدا من بعضها البعض وفي نفس الوقت قريبة من القيمة الحقيقية فهنا تكون الصحة عالية والدقة عالية أيضا.



شكل (١٧-١) الدقة و الصحة

من الصعب معرفة القيمة الحقيقية لأي قيمة مقاسة لتحديد دقة القياسات، وغالبا نستطيع حساب قيمة هي الأكثر احتمالا أو الأكثر قربا للقيمة الحقيقية. مثلا إذا قمنا بقياس زاوية عدة مرات – وتأكدنا من عدم وجود أية أغلاط أو أخطاء منتظمة أو أخطاء تراكمية – ثم قمنا بحساب متوسط هذه الأرصاد فأنه سيكون أقرب وأكثر احتمالا للقيمة الحقيقية لهذه الزاوية. لكي نحدد مقياس للدقة يتم مقارنة القيمة الأكثر احتمالا (المتوسط) بقيمة المسافة التي تم قياسها بطريقة أدق، فمثلا نقارن متوسط المسافات المقاسة بالشريط مع قيمة المسافة المقاسة بالمحطة الشاملة ونقارن متوسط الزاوية المقاسة بالثيودليت مع قيمة الزاوية المحسوبة من أرصاد النظام العالمي لتحديد المواقع GPS، ونقارن إحداثيات GPS مع إحداثيات تقنية أخري أكثر تقدما ودقة مثل VBLI.

يمكن تقسيم الأرصاد المساحية إلي مجموعتين:

(١) أرصاد مباشرة Direct Observations:

عند قياس الكمية المطلوبة قياسا مباشرا فمثلا قياس المسافة مباشرة وكذلك قياس الزوايا المطلوبة ... الخ. تسمي هذه الكميات في هذه الحالة كميات مستقلة Independent Observations أي لا تعتمد علي أية أرصاد أو كميات أخري.

(٢) أرصاد غير مباشرة Indirect Observations:

هي الكميات التي لا يمكن قياسها مباشرة لكن يتم عمل أرصاد لكميات أخري والتي منها سيتم تحديد أو حساب قيم الكميات الأصلية المطلوبة. فمثلا قياس طول وعرض مربع بهدف حساب مساحته، وعند حساب إحداثيات نقاط ترافرس فنقيس زوايا و أضلاع الترافرس والتي هنا تمثل أرصاد غير مباشرة. وتسمي الأرصاد غير المباشرة كميات تابعة Dependant Observations لأنها تعتمد في تحديد قيمتها علي قيم أرصاد أخري تتأثر بها.

القيمة الأكثر احتمالا Most-Probable Value:

من الصعب – إن لم يكن من المستحيل – معرفة القيمة الحقيقية لأي كمية مقاسة وذلك لوجود أخطاء في القياس مهما كانت قيمة هذه الأخطاء صغيرة جدا. إن كانت الأرصاد مستقلة ولا تعتمد علي بعضها البعض وقمنا بتكرار القياس عدة مرات فأن قيمة المتوسط الحسابي ستمثل القيمة الأكثر احتمالا أو الأكثر توقعا أو الأكثر قربا للقيمة الحقيقية.

المتوسط الحسابي = مجموع الأرصاد / عدد الأرصاد (١-١٧)

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i}{n} \qquad (17\text{-}1)$$

حيث:
y_i تمثل الأرصاد $y_1, y_2, y_3, \ldots . y_n$
n تمثل عدد الأرصاد

الخطأ الحقيقي True Error:

هو الفرق بين القيمة المرصودة والقيمة الحقيقية لها. وبما أن القيمة الحقيقية لا يمكن معرفتها ففي معظم الأحيان فان الخطأ الحقيقية أيضا لا يمكن معرفته. لكن في بعض الحالات يمكن معرفة الخطأ الحقيقي من خلال مواصفات أو قواعد هندسية معلومة فمثلا عند قياس الزوايا الثلاثة لمثلث فيجب أن يساوي مجموع الزوايا ١٨٠ درجة، ففي هذه الحالة يكون الخطأ الحقيقي هو ناتج طرح مجموع الزوايا المقاسة من ١٨٠.

الخطأ الحقيقي = القيمة المرصودة – القيمة الحقيقية (٢-١٧)

$$\varepsilon_i = y_i - \mu \qquad (17\text{-}2)$$

حيث:
μ القيمة الحقيقية
ε الخطأ الحقيقي

الأخطاء المتبقية أو الفروق Residuals or Discrepancies:

الفرق أو الخطأ المتبقي (أو الباقي) هو الفرق بين القيمة المرصودة و القيمة الحقيقية لها. لكننا نستعيض عن القيمة الحقيقية بالقيمة الأكثر احتمالا لها وبذلك يكون الخطأ المتبقي:

الفرق = القيمة الأكثر احتمالا – القيمة المرصودة (٣-١٧)

$$v_i = \bar{y} - y_i \qquad (17\text{-}3)$$

حيث:
v الخطأ المتبقي أو الفرق

التباين Variance:

التباين هو مؤشر إحصائي يحدد مدي تباين أو انتشار أو تشتت مجموعة من الأرصاد حول القيمة الحقيقية لها أو القيمة الأكثر احتمالا لها، ولذلك يوجد نوعين من التباين:

تباين المجتمع Population Variance:

إذا تم قياس **كل** الأرصاد الممكنة للقيمة المطلوبة فأن تباين المجتمع يساوي مجموع مربعات الأخطاء **الحقيقية** مقسوما علي عدد الأرصاد:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2}{n} \qquad (17\text{-}4)$$

حيث ε الخطأ الحقيقي لكل رصدة (وهو كما ذكرنا غير معلوم بسبب أن القيمة الحقيقية غالبا غير معلومة).

تباين العينة Sample Variance:

إذا تم قياس **عينة** أو مجموعة من الأرصاد للقيمة المطلوبة فأن تباين هذه العينة يساوي مجموع مربعات الأخطاء **المتبقية** (وليست الأخطاء الحقيقية) مقسوما علي عدد الأرصاد ناقص واحد:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} v_i^2}{n-1} \qquad (17\text{-}5)$$

حيث: v الخطأ المتبقي أو الفرق لكل رصدة.

أي أننا في حسابات المساحة نتعامل مع تباين العينة وليس تباين المجتمع وذلك بسبب حساب تباين المجتمع يتطلب معرفة القيمة الحقيقية وهي غير معلومة وبالتالي لا يمكننا معرفة قيم الأخطاء الحقيقية (في المعادلة ١٢-٤) وذلك بالإضافة إلي أننا لا نستطيع قياس كل الأرصاد الممكنة للقيمة المطلوب قياسها.

الخطأ المعياري Standard Error:

الخطأ المعياري هو الجذر التربيعي لقيمة تباين المجتمع.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \varepsilon_i^2}{n}} \qquad (17\text{-}6)$$

الانحراف المعياري Standard Deviation:

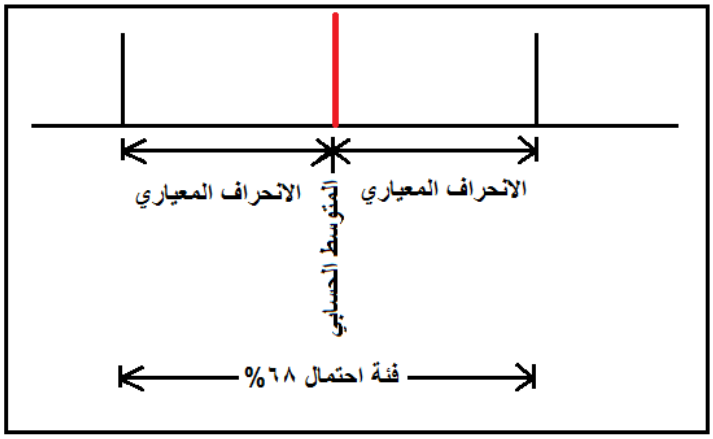
يعبر الانحراف المعياري (يطلق عليه أيضا أسم الخطأ التربيعي المتوسط Mean Square Error) عن مدي انحراف (ابتعاد أو اقتراب) القيمة المقاسة عن القيمة الأكثر احتمالا لها، وقيمته تساوي الجذر التربيعي لقيمة تباين العينة:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} v_i^2}{n-1}} \qquad (17\text{-}7)$$

ترجع أهمية قيمة الانحراف المعياري إلي وجود احتمال بنسبة ٦٨% أن القيمة الحقيقية ستقع في مدي يتراوح بين (المتوسط + الانحراف المعياري) و (المتوسط - الانحراف المعياري). مثال: إذا كان متوسط عدد من القياسات لمسافة يساوي ٥٣.٢١ متر وكان الانحراف المعياري للقياسات يساوي ± ٠.٠٣ متر فأن القيمة الحقيقية لهذه المسافة ستقع باحتمال ٦٨% بين ٥٣.٢١+٠.٠٣ و ٥٣.٢١-٠.٠٣ أي بين ٥٣.٢٤ و ٥٣.١٩ متر.

بمعني آخر يمكن القول أن ٦٨% من القياسات أو الأرصاد يحتمل أن يكون بها خطأ قيمته تساوي قيمة الانحراف المعياري سواء بإشارة موجبة أو سالبة.

كلما صغرت قيمة الانحراف المعياري صغرت حدود هذه الفئة مما يدل علي أن القياسات أقرب ما تكون للقيمة الحقيقية، والعكس صحيح فكلما كبرت قيمة الانحراف المعياري زادت حدود الفئة مما يعطي انطباعا أن القياسات أو الأرصاد بعيدة عن القيمة الحقيقية.



شكل (١٧-٢) العلاقة بين المتوسط و الانحراف المعياري

أيضا يجب ملاحظة أن الانحراف المعياري يعتمد علي عدد الأرصاد ، أي أن كلما زاد عدد الأرصاد أو القياسات كلما زاد اقتراب هذه القياسات من القيمة الحقيقية لها وبالتالي تزداد الثقة في القياسات. وهذا من أهم مبادئ العمل المساحي بصفة عامة حيث دائما نفضل أن نقيس الكمية عدد من المرات ولا نكتفي بقياسها مرة واحدة فقط.

الانحراف المعياري للمتوسط Standard Deviation of the Mean:

الانحراف المعياري للمتوسط الحسابي هو حاصل قسمة الانحراف المعياري للعينة علي الجذر التربيعي لعدد الأرصاد:

$$S_{\bar{y}} = \pm\frac{S}{\sqrt{n}} \qquad (17\text{-}8)$$

تعبر قيمة الانحراف المعياري عن مدي تشتت أو تباعد القياسات عن بعضها البعض وبالتالي فهي قيمة معبرة عن مدي التوافق بين الأرصاد ومن ثم فأن الانحراف المعياري يؤخذ علي أنه مقياس أو مؤشر للصحة Precision. وفي العمل المساحي لا نعبر عن القيمة الأكثر احتمالا بقيمة المتوسط فقط إنما بقيمتي المتوسط و الانحراف المعياري معا، فنقول أن المسافة المقاسة – علي سبيل المثال – تساوي ٥٣.٢١ ± ٠.٠٣ متر.

بالعودة لتعريف كلا من الصحة و الدقة نستطيع القول أن الانحراف المعياري (الذي هو أساسا مؤشر للصحة Precision) يمكنه أن يعبر عن الدقة Precision في حالة خلو الأرصاد بقدر الإمكان من الأخطاء المنتظمة والأخطاء التراكمية والأغلاط. ففي حالة خلو

الأرصاد من مصادر الأخطاء المعروفة فأن القياسات لن يكون بها إلا الأخطاء العشوائية فقط وبالتالي ستقترب قيم الأخطاء المتبقية أو الفروق من قيم الأخطاء الحقيقية وستقترب القيمة الأكثر احتمالا من القيمة الحقيقية للكمية المقاسة، ومن هنا فأن قيمة الانحراف المعياري ستقترب من قيمة الخطأ الحقيقي مما يجعل الانحراف المعياري يعبر - بدرجة كبيرة - عن الدقة. هنا تأتي أهم مبادئ العمل المساحي وهو أنه يحاول تحقيق أعلي درجة من الدقة في الرصد الحقلي سواء دقة الأجهزة المستخدمة أو دقة أساليب الرصد الميداني واتخاذ كافة الاحتياطات و تطبيق مواصفات الرصد وزيادة عدد الأرصاد مما يجعل الأرصاد المساحية خالية بقدر الإمكان من الأخطاء معلومة المصدر وبذلك فتكون نتائج الحسابات المساحية معبرة عن دقة الكميات المطلوب تحديدها.

مثال ١:

قيست مسافة ستة مرات فكانت الأرصاد كالتالي: ٥١.١٢، ٥١.١٤، ٥١.١٨، ٥١.١٩، ٥١.٢٢، ٥١.١٦ متر. أحسب القيمة الأكثر احتمالا لهذه المسافة.

مجموع المسافات المقاسة = ٥١.١٢ + ٥١.١٤ + ٥١.١٨ + ٥١.١٩ + ٥١.٢٢ + ٥١.١٦ = ٣٠٧.٠١ متر

المتوسط الحسابي = مجموع المسافات ÷ عددهم = ٣٠٧.٠١ ÷ ٦ = ٥١.١٦٨ متر

نحسب الخطأ المتبقي لكل قياس = المتوسط - الرصدة
الخطأ المتبقي للرصدة رقم ١ = ٥١.١٦٨ – ٥١.١٢ = ٠.٠٤٨ متر
الخطأ المتبقي للرصدة رقم ٢ = ٥١.١٦٨ – ٥١.١٤ = ٠.٠٢٨ متر
وهكذا كما في العمود الثالث من الجدول التالي.

نحسب مربع كل خطأ متبقي للقياسات:
مربع الخطأ المتبقي للرصدة رقم ١ = ٠.٠٤٨ × ٠.٠٤٨ = ٠.٠٠٢٣٣٦ متر مربع
مربع الخطأ المتبقي للرصدة رقم ٢ = ٠.٠٢٨ × ٠.٠٢٨ = ٠.٠٠٠٨٠٣ متر مربع
وهكذا كما في العمود الرابع من الجدول التالي.

نحسب مجموع مربعات الأخطاء المتبقية = ٠.٠٠٦٤٨٣ متر مربع

نحسب تباين العينة (المعادلة ١٢-٥) = ٠.٠٠٦٤٨٣ ÷ (٦-١))
= ٠.٠٠١٢٩٦٧ متر مربع

نحسب الانحراف المعياري (المعادلة ١٢-٧) = جذر (٠.٠٠١٢٩٦٧)
= ٠.٠٣٦ متر.

م	القياسات Y	الفروق v	مربع الفروق v2
1	51.12	0.048	0.002336
2	51.14	0.028	0.000803
3	51.18	-0.012	0.000136
4	51.19	-0.022	0.000469
5	51.22	-0.052	0.002669
6	51.16	0.008	0.000069

العدد	6		
المجموع	307.010		0.006483
المتوسط	51.168		

تباين المجتمع			0.0012967
الانحراف المعياري			0.036
الانحراف المعياري للمتوسط			0.015

القيمة الأكثر احتمالا = المتوسط ± الانحراف المعياري
= ٥١.١٦٨ ± ٠.٠١٥ متر.

١٧-٣ مبدأ الوزن في القياسات المساحية

في المثال السابق قمنا بحساب المتوسط و الانحراف المعياري للمسافة التي تم قياسها عدد من المرات لكننا افترضنا أن كل القياسات متساوية في الدقة و الأهمية. ماذا لو كانت بعض القياسات قد تمت باستخدام الشريط بينما القياسات الأخرى تمت باستخدام جهاز EDM؟ هل ستكون كل القياسات متساوية في الأهمية ومقدار الثقة بها؟ هنا يأتي دور الوزن weight ليكون مفهوما يعبر عن مدي اختلاف أهمية أو الثقة في بعض القياسات. فكلما كانت الثقة في الرصدة كبيرة فيكون وزنها (أهميتها النسبية) كبيرا والعكس صحيح فكلما كانت الثقة ضعيفة في رصدة معينة فيجب أن يكون وزنها أقل. فعلي سبيل المثال إذا قمنا برصد زاوية معينة مرة باستخدام محطة شاملة دقتها ١" ومرة أخري باستخدام جهاز ثيودليت دقته ٥" فأن وزن الزاوية الأولي يجب أن يكون – منطقيا- أكبر من وزن الزاوية الثانية حيث أن دقة الجهاز المستخدم أعلي في الأولي من الثانية.

وبناءا علي مبدأ الوزن (أو الأهمية النسبية) فأن طريقة حساب المتوسط ستتغير لنحسب ما نطلق عليه أسم المتوسط الموزون Weighted Mean (لنفرق بينه وبين المتوسط العادي في المعادلة ١٧-١ والذي كان يعتمد علي أن كل القياسات متساوية في الأهمية أو متساوية في الوزن):

المتوسط الموزون = مجموع (حاصل ضرب كل رصدة× وزنها) / مجموع الأوزان

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{n} y_i \, w_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i} \qquad (17\text{-}9)$$

كما ستتغير أيضا طريقة حساب الانحراف المعياري عند وجود أوزان مختلفة للقياسات (بدلا من المعادلة ١٧-٧) وذلك بحساب الجذر التربيعي لقيمة الناتج من قسمة مجموع حاصل ضرب (مربع الخطأ المتبقي لكل رصدة في وزن الرصدة) علي عدد الأرصاد ناقص واحد:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} v_i^2 \, w_i}{n-1}} \qquad (17\text{-}10)$$

كذلك ستتغير معادلة حساب الانحراف المعياري للمتوسط (١٧-٨) لتصبح ناتج قسمة الانحراف المعياري علي الجذر التربيعي لمجموع الأوزان:

$$S_{\bar{y}} = \pm \frac{S}{\sqrt{w}} \qquad (17\text{-}11)$$

مثال ٢:

قيست مسافة ستة مرات فكانت الأرصاد كالتالي: ٥١.١٢، ٥١.١٤، ٥١.١٨، ٥١.١٩، ٥١.٢٢، ٥١.١٦ متر، وكانت أوزان الأرصاد بالترتيب هي ٦، ٥، ٣ ، ١، ١، ٣. أحسب القيمة الأكثر احتمالا لهذه المسافة.

نحسب مجموع الأوزان = ٦ + ٥ + ٣ + ١ + ١ + ٣ = ١٩

نحسب حاصل ضرب الرصدة × وزنها:
للرصدة رقم ١ = ٥١.١٢ × ٦ = ٣٠٦.٧٢٠
للرصدة رقم ٢ = ٥١.١٤ × ٥ = ٢٥٥.٧٠٠
وهكذا كما في العمود الرابع من الجدول التالي.

مجموع (الرصدة×الوزن) أي مجموع العمود الرابع = ٩٧١.٨٥٠

من المعادلة ١٢-٩:
المتوسط الحسابي الموزون = مجموع (الرصدة×الوزن) ÷ مجموع الأوزان
= ٩٧١.٨٥٠ ÷ ١٩ = ٥١.١٥٠ متر

نحسب الخطأ المتبقي لكل قياس = المتوسط الموزون - الرصدة
الخطأ المتبقي للرصدة رقم ١ = ٥١.١٥٠ – ٥١.١٢ = ٠.٠٣٠ متر
الخطأ المتبقي للرصدة رقم ٢ = ٥١.١٥٠ – ٥١.١٤ = ٠.٠١٠ متر

وهكذا كما في العمود الخامس من الجدول التالي.

نحسب مربع كل خطأ متبقي للقياسات:
مربع الخطأ المتبقي للرصدة رقم ١ = ٠.٠٣٠ × ٠.٠٣٠ = ٠.٠٠٠٩ متر مربع
مربع الخطأ المتبقي للرصدة رقم ٢ = ٠.٠١٠ × ٠.٠١٠ = ٠.٠٠٠٠١ متر مربع
وهكذا كما في العمود السادس من الجدول التالي.

نحسب حاصل ضرب (الخطأ المتبقي× الوزن):
للرصدة رقم ١ = ٠.٠٠٠٩ × ٦ = ٠.٠٠٥٤ متر
للرصدة رقم ٢ = ٠.٠٠٠١ × ٥ = ٠.٠٠٠٥ متر
وهكذا كما في العمود السابع من الجدول التالي.

نحسب مجموع حاصل ضرب (مربعات الأخطاء المتبقية × الوزن) أي مجموع العمود السابع = ٠.٠١٥٤ متر مربع

نحسب تباين العينة = ٠.٠١٥٤ ÷ (٦-١))
= ٠.٠٠٣٠٨ متر مربع

نحسب الانحراف المعياري (المعادلة ١٢-١٠) = جذر (٠.٠٠٣٠٨)
= ٠.٠٥٥ متر.
القيمة الأكثر احتمالا = المتوسط ± الانحراف المعياري
= ٥١.١٥٠ ± ٠.٠١٣ متر.

م	القياسات Y	الأوزان w	الرصدة × الوزن y.w	الفروق V	مربع الفروق v2	مربع الفروق × الوزن w.v2
1	51.12	6	306.72	0.030	0.000900	0.005400
2	51.14	5	255.70	0.010	0.000100	0.000500
3	51.18	3	153.54	-0.030	0.000900	0.002700
4	51.19	1	51.19	-0.040	0.001600	0.001600
5	51.22	1	51.22	-0.070	0.004900	0.004900
6	51.16	3	153.480	-0.010	0.00010	0.00030

العدد	6					
المجموع	307.01	19	971.85		0.00850	0.01540
المتوسط الموزون			51.150			

تباين المجتمع					0.001700	0.003080
الانحراف المعياري						0.055
الانحراف المعياري للمتوسط						0.013

بمقارنة نتائج هذا المثال بنتائج المثال السابق نجد أن:

- قيمة المتوسط الموزون (٥١.١٥٠ متر) تختلف عن قيمة المتوسط العادي (٥١.١٦٨ متر).
- قيمة الانحراف المعياري للمتوسط الموزون (± ٠.٠١٣ متر) أقل من قيمة الانحراف المعياري العادي (± ٠.٠١٥ متر).

يرجع السبب في هذه الاختلافات إلي أننا في المثال الأول قد تعاملنا مع كل الأرصاد بنفس قيمة الوزن أو الأهمية أو مقدار الثقة فيها، بينما في المثال الثاني استطعنا التفرقة بين الأرصاد الموثوق بها (صاحبة الوزن الكبير) والأرصاد قليلة الثقة أو قليلة الأهمية (صاحبة الوزن الصغير) مما يجعل قيمة المتوسط الموزون تكون أقرب للأرصاد الموثوق

بها. وكذلك فأن قيمة الانحراف المعياري في المثال الثاني أقل من المثال الأول بسبب أن الأرصاد صغيرة الوزن لم تعد مؤثرة بدرجة كبيرة مما يقلل من قيمة التباين أو التشتت بين مجموعة الأرصاد ككل وهذا يؤدي لتحسن قيمة الانحراف المعياري للمتوسط.

و كتجربة إذا اعتمدنا فقط علي أول رصدتين (بصفتهما ذات أعلي وزن) فسنجد أن قيمة المتوسط الموزون ستصبح ٥١.١٢٩ متر وأن قيمة الانحراف المعياري له ستصبح ± ٠.٠٠٤ متر.

م	القياسات y	الأوزان w	الرصدة × الوزن y.w	الفروق v	مربع الفروق v2	مربع الفروق × الوزن w.v2
1	51.12	6	306.720	0.009	0.000083	0.000496
2	51.14	5	255.700	-0.011	0.000119	0.000595

العدد	6					
المجموع	102.26	11	562.42		0.000202	0.001091
المتوسط الموزون			51.129			

تباين المجتمع					0.000040	0.000218
الانحراف المعياري						0.015
الانحراف المعياري للمتوسط						0.004

مثال ٣:

تم إجراء ثلاثة خطوط ميزانية بين نقطتين فكانت الأرصاد كالتالي:

الخط الأول: طول الخط = ١٧٠٠ متر ، فرق المنسوب = ٢٩.٤٩٢ متر
الخط الثاني: طول الخط = ٩٠٠ متر ، فرق المنسوب = ٢٩.٤٤٠ متر
الخط الثالث: طول الخط = ١٠٠٠ متر ، فرق المنسوب = ٢٩.٤٨٠ متر

أحسب القيمة الأكثر احتمالا لفرق المنسوب بين هاتين النقطتين.

من مبادئ أعمال الميزانية أن قيمة الخطأ ستزيد كلما زادت المسافة بين النقطتين بسبب أن رصد المسافات الطويلة سيستغرق وقتا أطول وتكون عدد وقفات الميزان أكثر مما يزيد من احتمالات حدوث أخطاء في عملية الرصد الحقلي. لذلك فأننا نأخذ الوزن بحيث أنه يتناسب

عكسيا مع طول خط الميزانية، أي أن الخطوط الطويلة ستأخذ وزنا أقل من الخطوط القصيرة.

وزن الخط الأول = ١ / ١٧٠٠ = ٠.٠٠٠٥٩
وزن الخط الثاني = ١ / ٩٠٠ = ٠.٠٠١١١
وزن الخط الثالث = ١ / ١٠٠٠ = ٠.٠٠١٠٠

المتوسط الموزون = (٢٩.٤٩٢×٠.٠٠٠٥٩) + (٢٩.٤٤٠×٠.٠٠١١١) + (٢٩.٤٨٠×٠.٠٠١٠٠) ÷ (٠.٠٠٠٥٩ + ٠.٠٠١١١ + ٠.٠٠١٠٠) = ٢٩.٤٦٦ متر

الخطأ المتبقي ١ = ٢٩.٤٦٦ - ٢٩.٤٩٢ = - ٠.٠٢٦ متر
الخطأ المتبقي ٢ = ٢٩.٤٦٦ - ٢٩.٤٤٠ = + ٠.٠٢٦ متر
الخطأ المتبقي ٣ = ٢٩.٤٦٦ - ٢٩.٤٨٠ = - ٠.٠١٤ متر

ونكمل باقي خطوات الحساب كما في الجدول التالي:

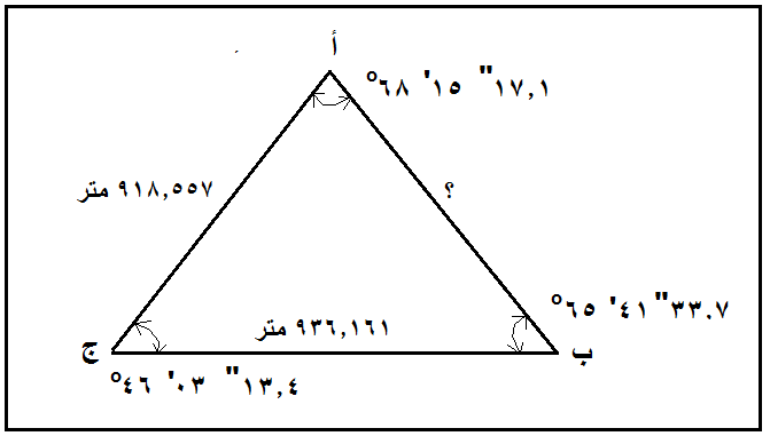
م	القياسات Y	الأوزان w	الرصدة × الوزن y.w	الفروق v	مربع الفروق v2	مربع الفروق × الوزن w.v2
1	29.492	0.00059	0.017	-0.026	0.00067	0.000000
2	29.44	0.00111	0.033	0.026	0.00068	0.000001
3	29.48	0.00100	0.029	-0.014	0.00019	0.000000
العدد	6					
المجموع	88.412	0.002699	0.080		0.00154	0.000001
المتوسط الموزون			29.466			
تباين المجتمع					0.00031	0.0000003
الانحراف المعياري						0.001
الانحراف المعياري للمتوسط						0.010

القيمة الأكثر احتمالا لفرق المنسوب بين النقطتين: ٢٩.٤٤٦ ± ٠.٠١٠ متر.

١٧-٤ ضبط الشبكات Network Adjustment

من مبادئ العمل المساحي إننا نقوم بقياس عدد من الأرصاد أكثر من العدد الفعلي المطلوب وذلك لكي يتوافر لدينا أرصاد زائدة Redundant Observations تمكننا من توفير فرصة للمراجعة و التحقيق الحسابي و فحص الأرصاد. فمثلا من الممكن أن نكتفي بقياس زاويتين في مثلث ونقوم بحساب الزاوية الثالثة لكننا في الواقع نقيس الزوايا الثلاثة حتى نتحقق من أن مجموعهم يساوي ١٨٠ درجة وبالتالي نتأكد من جودة القياسات ونستطيع أن نحدد قيمة الخطأ. وهنا تكون لدينا رصدة واحدة زائدة حيث أن عدد الأرصاد الفعلية للمثلث هو ٢ بينما عدد الأرصاد المقاسة هو ٣.

علي سبيل المثال إذا كان مطلوبا في الشكل التالي حساب طول ضلع المثلث أ ب وقمنا لرصد الزوايا الثلاثة للمثلث و تم قياس طول الضلعين الآخرين أ ج ، ب ج.



شكل (١٧-٣) مثال للأرصاد الزائدة في مثلث

لحساب طول الضلع الثالث للمثلث يلزمنا ٣ أرصاد فقط بينما المتوفر ٥ أرصاد، لذلك يوجد عدة حلول مختلفة منها علي سبيل المثال:

من معادلة جيب الزاوية:

أ ب = ب ج جا ج / جا أ = ٧٢٥.٧٥٣ متر

أ ب = أ ج جا ج / جا ب = ٧٢٥.٧٥٩ متر

من معادلة جيب تمام الزاوية:

أب = جذر (ب ج ^{٢} + أ ج ^{٢} – ٢ ب ج × أ ج × جتا ج) = ٧٢٥.٩٥٣ متر

للتغلب علي مشكلة وجود عدة حلول (عدة احتمالات للقيمة المطلوبة) فتوجد أربعة أساليب:

(أ) اختيار أنسب مجموعة أرصاد من حيث الثقة فيهم (أدق ٣ قيم في المثال الحالي) وحساب قيمة الضلع المجهول منها. لكن عيب هذه الطريقة أننا سنهمل باقي الأرصاد ولن نستخدمها في الحسابات.

(ب) حساب القيمة المجهولة بإتباع كل الحلول و المعادلات المتاحة ثم حساب متوسط كل هذه الحلول. لكن هذه الطريقة تحتاج وقت أطول ومجهود أكبر بالطبع.

(ج) ضبط الأرصاد بصورة بسيطة (مثل ضبط قيم زوايا المثلث الثلاثة بحيث يساوي مجموعهم ١٨٠ درجة بالضبط) ثم الاعتماد علي الأرصاد المضبوطة أو المصححة في حساب قيمة الكمية المطلوبة (الضلع الثالث في مثالنا الحالي). لكن يعيب هذه الطريقة أنها تحتاج مجهود كبير خاصة في الشبكات المساحية الضخمة ، لكنها قد تكون مناسبة للأعمال البسيطة مثل الترافرسات

(د) ضبط الأرصاد بالاعتماد علي شرط أو خاصية محددة أو بأسلوب معين مشروط. وهنا يأتي ما يسمي بضبط الشبكات Network Adjustment والذي له عدة طرق.

١٧-٥ الضبط بطريقة مجموع أقل المربعات Least-Squares Adjustment

توجد عدة طرق لضبط الشبكات Network Adjustment مثل (١) طريقة أقل مجموع Least Sum والتي تعتمد علي ضبط الأرصاد بحيث يكون مجموع الأخطاء المتبقية أو الفروق Residuals أقل ما يمكن، (٢) طريقة مجموع أقل المربعات Least-Squares والتي تعتمد علي جعل مربعات الأخطاء المتبقية أقل ما يمكن. وهذه الطريقة الثانية هي الأشهر و الأكثر استخداما في أعمال المساحة و الجيوديسيا.

أثبتت الدراسات الرياضية و الإحصائية أن حل مجموعة من المعادلات - بحيث يكون مجموع مربعات الأخطاء المتبقية أقل ما يمكن – ينتج عنه أدق قيم العناصر المجهولة في هذه المعادلات. الشرط الرئيسي للضبط بطريقة مجموع أقل المربعات أن لا تحتوي الأرصاد (القياسات) الأصلية علي أي أخطاء منتظمة أو أغلاط أو أخطاء تراكمية، إنما فقط الأخطاء العشوائية. أي يجب معالجة الأخطاء المنظمة واكتشافها و إزالتها من الأرصاد قبل البدء في تنفيذ ضبط أقل مجموع مربعات.

يوجد أسلوبين لتنفيذ ضبط الشبكات في طريقة مجموع أقل المربعات:

(أ) طريقة معادلات الرصد Observation Equations:

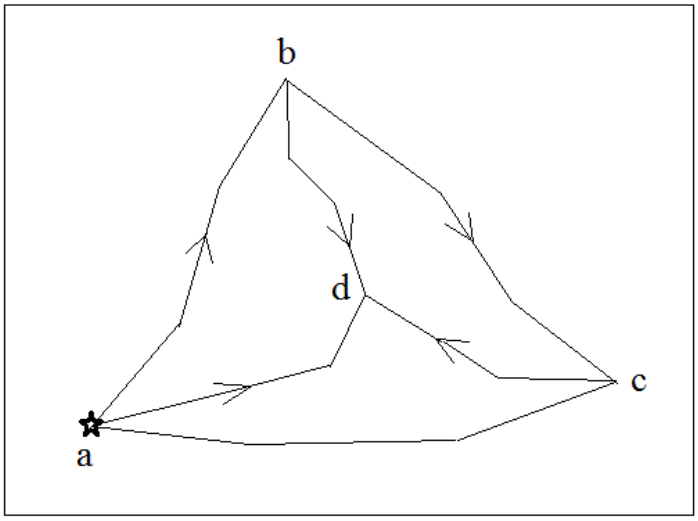
يتم تكوين معادلة رياضية تربط بين القيمة المرصودة (الرصدة) والقيم المجهولة ، ثم يتم حل هذه المعادلات معا. كما تسمي هذه الطريقة أيضا باسم الضبط المباشر Parametric Adjustment حيث أن القيم المجهولة Parameters تظهر مباشرة في معادلات الرصد المطلوب حلها.

(ب) طريقة معادلات الشرط Condition Equations:

يتم تكوين معادلات شرطية بحيث تحقق كل معادلا منهم شرطا رياضيا معينا يجب تحقيقيه في الأرصاد المساحية، ثم يتم حل هذه المعادلات معا لحساب قيم العناصر المجهولة. وتسمي هذه الطريقة أيضا باسم الضبط الشرطي Conditional Adjustment. في الأجزاء التالية سنتعرض لأمثلة تطبيقية لكلا من هاتين الطريقتين وكيفية تكوين و حل معادلاتهم خطوة بخطوة.

١٧-٥-١ ضبط أقل المربعات لمعادلات الرصد

الشكل التالي يمثل شبكة من أرصاد الميزانيات تربط بين ٤ روبيرات BM حيث تتكون هذه الشبكة من ٦ خطوط ميزانية، ونفترض أن منسوب النقطة a معلوم (سنفرضه = صفر متر في الحالة الحالية) في هذه الحلقة.



شكل (١٧-٤) مثال لضبط شبكة ميزانيات

الجدول التالي يمثل قيم الأرصاد (فروق المناسيب في كل خط) وكذلك طول خطوط الميزانية:

م	خط الميزانية		فرق المنسوب (متر)	طول الخط (كم)
	من نقطة	إلي نقطة		
١	a	c	٦.١٦	٤
٢	a	d	١٢.٥٧	٢
٣	c	d	٦.٤١	٢
٤	a	d	١.٠٩	٤
٥	b	d	١١.٥٨	٢
٦	b	c	٥.٠٧	٤

المطلوب حساب قيم العناصر المجهولة التي تتمثل في منسوب النقاط b, c, d مع قيم الانحراف المعياري لكلا منهم.

في الخطوة الأولي نكون معادلات الرصد observation equations التي تربط بين الأرصاد الستة (فروق المناسيب) والقيم المجهولة الأربعة (المناسيب ذاتها). علما بأن عدد الأرصاد (يأخذ الرمز n) = ٦، وعدد المجاهيل أو القيم المجهولة (يأخذ الرمز u) = ٣، وبالتالي سيكون لدينا عدد المعادلات = عدد الأرصاد = n = ٦ كالتالي:

$$\Delta H_1 = H_c - H_a$$
$$\Delta H_2 = H_d - H_a$$
$$\Delta H_3 = H_d - H_c$$
$$\Delta H_4 = H_b - H_a$$
$$\Delta H_5 = H_d - H_b$$
$$\Delta H_6 = H_c - H_b$$

الآن سنعيد تنظيم (أو كتابة) كل معادلة بحيث تشمل العناصر المجهولة الثلاثة (بدلا من عنصرين فقط يتغيران من معادلة لأخرى)، وبالطبع سنضع القيمة صفر أمام العنصر الذي لا يظهر في المعادلة (سنضيف في المعادلات منسوب النقطة المعلومة a مجرد للحساب لاحقا):

$$\Delta H_1 = +0\,H_b + H_c + 0\,H_d - H_a$$
$$\Delta H_2 = +0\,H_b - 0\,H_c + H_d - H_a$$
$$\Delta H_3 = +0\,H_b - H_c + H_d + 0\,H_a$$
$$\Delta H_4 = + H_b + 0\,H_c + 0\,H_d - H_a$$
$$\Delta H_5 = - H_b + 0\,H_c + H_d + 0\,H_a$$
$$\Delta H_6 = - H_b + H_c + 0\,H_d + 0\,H_a$$

في الخطوة التالية سنحول هذه المعادلات (الستة) إلي صورة المصفوفات Matrix (والمتجهات vectors وهي المصفوفة التي تتكون من عمود واحد أو صف واحد).

نضع قيم الأرصاد في متجه $\overline{L}$ (يسمي متجه الأرصاد vector of observations) يتكون من n (٦ في المثال الحالي) من الصفوف، يكتب $\overline{L}_{nx1}$ أي $\overline{L}_{6x1}$ في المثال الحالي:

$$\overline{L}_{nx1} = \begin{bmatrix} \Delta H_1 \\ \Delta H_2 \\ \Delta H_3 \\ \Delta H_4 \\ \Delta H_5 \\ \Delta H_6 \end{bmatrix}$$

ثم نضع قيم العناصر المجهولة في متجه X (يسمي متجهة العناصر المجهولة vector of unknown parameters) يتكون من u (٣ في المثال الحالي) من الصفوف، يكتب X_{ux1} أي X_{3x1} في المثال الحالي:

$$X_{ux1} = \begin{bmatrix} H_b \\ H_c \\ H_d \end{bmatrix}$$

الآن سنحسب قيم تقريبية للعناصر المجهولة (من الأرصاد نفسها) وباستخدام القيمة الثابتة لمنسوب النقطة الأولي a (منسوبها = صفر افتراضا) كالآتي:

$H_b = H_a + \Delta H_4 = 0.0 + 1.09 = 1.09$ m
$H_c = H_a + \Delta H_1 = 0.0 + 6.16 = 6.16$ m
$H_d = H_a + \Delta H_2 = 0.0 + 12.57 = 12.57$ m

أي أن متجهة القيم المجهولة التقريبي X^o سيكون:

$$X^o_{ux1} = \begin{bmatrix} 1.09 \\ 6.16 \\ 12.57 \end{bmatrix}$$

نلاحظ أن عدد الأرصاد n أكبر من عدد المجاهيل u (٦ أرصاد في ٣ مجاهيل في المثال الحالي). الفرق بين هاتين القيمتين n – u هو ما يطلق عليه اسم درجات الحرية degree of freedom. بمعني أن شبكة الروبيرات الحالية تحتوي علي ٣ نقاط (روبيرات) مجهولة المنسوب، وكان يمكن رصد ٣ خطوط ميزانية فقط لحساب قيم مناسيب هذه الروبيرات الثلاثة (حالة أن n = u). لكن لن يكون هناك أي تحقيق حسابي check أن المناسيب المحسوبة تعد مناسيب دقيقة أم لا. فإذا رصدنا خط ميزانية رابع فسيصبح لدينا أكثر من حل، وهكذا إذا رصدنا خط ميزانية خامس. أي أن في المثال الحالي يتوافر لدينا عدد درجات حرية = ٦ – ٣ = ٣. هنا يأتي دور طريقة الضبط بأقل مجموع مربعات حيث أن نتائج هذه الطريقة تقدم لنا "أفضل أو أدق" الحلول الممكنة. كلما زاد عدد درجات الحرية كلما كان ذلك أفضل في العمل المساحي و الجيوديسي بصفة عامة.

في الخطوة التالية سنقوم بحساب قيم تقريبية للأرصاد (من القيم التقريبية للعناصر المجهولة) للمتجهة التقريبي L^o كالآتي:

$\Delta H^o_1 = H^0_c - H_a = 6.16 - 0.0 = 6.16$ m
$\Delta H^o_2 = H^0_d - H_a = 12.57 - 0.0 = 12.57$ m
$\Delta H^o_3 = H^0_d - H^o_c = 12.57 - 6.16 = 6.41$ m
$\Delta H^o_4 = H^0_b - H_a = 1.09 - 0.0 = 1.09$ m
$\Delta H^o_5 = H^0_d - H^o_b = 12.57 - 1.09 = 11.48$ m
$\Delta H^o_6 = H^0_c - H^o_b = 6.16 - 1.09 = 5.07$ m

ثم سنحسب قيم متجهة الأخطاء المتبقية W (Residual Vector) والذي يتكون من n (٦ في المثال الحالي) من الصفوف، يكتب W_{nx1} أي W_{6x1} في المثال الحالي، وهو الفرق بين متجه الأرصاد الأصلية ومتجهة الأرصاد التقريبية:

$$W_{6x1} = L^o_{6x1} - L_{6x1}$$

$$W = \begin{bmatrix} 6.16 \\ 12.57 \\ 6.41 \\ 1.09 \\ 11.48 \\ 5.07 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 6.16 \\ 12.57 \\ 6.41 \\ 1.09 \\ 11.58 \\ 5.07 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ -0.10 \\ 0.00 \end{bmatrix} \text{ m}$$

ثم نضع قيم معاملات معادلات الأرصاد في مصفوفة A (تسمي مصفوفة المعاملات Coefficients Matrix) تتكون من n من الصفوف (٦ في المثال الحالي) و u من الأعمدة (٣ في المثال الحالي)، تكتب A_{nxu} أي A_{6x3} في المثال الحالي:

$$A_{6x3} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{unitless}$$

لاحظ أن المصفوفة A ليس لها وحدات Unitless لأن جميع عناصرها مجرد معاملات ليس لها أية وحدات.

نأتي الآن لتكوين مصفوفة التباين Variance-Covariance Matrix و مصفوفة الوزن Weight Matrix.

تتكون مصفوفة التباين Σ من n من الصفوف و n من الأعمدة، و يتكون قطر المصفوفة diagonal من قيم التباين variance لكل رصدة من الأرصاد الأصلية، بينما يتواجد خارج

القطر off-diagonal قيم الارتباط بين كل رصدة والأرصاد الأخرى. إذا لم يكن لدينا معلومات عن الارتباط بين الأرصاد (قيم العناصر خارج القطر = صفر) فأن مصفوفة الارتباط ستكون مصفوفة قطرية Diagonal Matrix أي تحتوي قيم في القطر فقط والباقي أصفار. في شبكات الميزانيات – غالبا – نأخذ التباين لكل خط ميزانية يساوي طول الخط نفسه، أي أن مصفوفة التباين للمثال الحالي ستكون:

$$\Sigma_{6x6} = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad cm^2$$

لاحظ أننا اخترنا أو فرضنا وحدات مصفوفة التباين لتكون بالسنتيمتر المربع حتى تكون متناسبة مع دقة الأرصاد الأصلية حيث أن قيم الأرصاد (القياسات) كانت لأقرب سنتيمتر. لاحظ أيضا أن وحدات بالسنتيمتر المربع لأنها وحدات تباين variance وليس وحجات انحراف معياري. لكن لأن جميع الحسابات و المصفوفات ستتم بوحدات المتر (وحدات القياسات) فيجب أن نحول هذه المصفوفة أيضا إلي وحدات المتر. يمكن لإتمام هذا التحويل (من سم^2 إلي م^2) أن نضرب المصفوفة كلها في ٠.٠٠٠١ (أو 10^{-4}) لتصبح:

$$\Sigma_{6x6} = 10^{-4} \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \quad m^2$$

ثم نحدد وزن (مؤشر الدقة) لكل رصدة من الأرصاد الأصلية (القياسات الحقلية). في شبكات الميزانيات يكون الخطأ المتوقع في أي خط ميزانية يتناسب تناسبا طرديا مع طول الخط ذاته، بمعني إذا كان خط الميزانية طويلا فنتوقع أن يحدث به خطأ أكبر من الخط القصير. لذلك نأخذ الوزن – في شبكات الميزانية – يساوي مقلوب التباين لكل رصدة. نكون مصفوفة الوزن Weight Matrix والتي تتكون من n من الصفوف و n من الأعمدة P_{nxn} (أي P_{6x6} في المثال الحالي) كالتالي:

$$P_{6x6} = 10^{-4} \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/4 \end{bmatrix} \quad 1/m^2$$

العلاقة بين الوزن و التباين هي علاقة عكسية، بمعني أن لأي رصدة:

$$P_i = 1 / \sigma^2_i$$

وبدلا من قيمة ١ (في البسط) من الممكن أن نكتب أن:

$$P_i = \text{constant} / \sigma^2_i$$

حيث σ^2_i هو تباين الرصدة variance للرصدة رقم i (حيث σ_i هو الانحراف المعياري لها). والرقم الثابت هو ما نطلق عليه اسم تباين الوزن المتساوي variance of unit weight، بمعني أن هذه القيمة ستكون ثابتة لجميع الأرصاد التي لها نفس الوزن، ويأخذ الرمز σ_o^2. أي أن:

$$P_i = \sigma_o^2 / \sigma^2_i$$

غالبا فنحن نفرض قيمة لتباين الوزن المتساوي σ_o^2 (ثم نحسب القيمة المضبوطة له من نتائج عملية الضبط ذاتها). لذلك من الممكن – في المثال الحالي – أن نأخذ $\sigma_o^2 = ١٠^{-٤}$ بحيث نعيد كتابة مصفوفة الوزن كالتالي:

$$P_{6x6} = \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/4 \end{bmatrix} \quad 1/m^2$$

في الخطوة التالية نحسب مصفوفة جديدة تسمي مصفوفة المعادلات الأصولية Normal Equation Matrix وهي مصفوفة حاصل ضرب كلا من مدور Transposeمصفوفة المعاملات في مصفوفة الوزن في مصفوفة المعاملات نفسها:

$$N = A^T P A$$

i.e.,

$$N_{uxu} = A^T_{uxn} P_{nxn} A_{nxu}$$

أي أن مصفوفة المعادلات الأصولية ستتكون من u من الصفوف و u من الأعمدة (٣×٣ في المثال الحالي).

$$N = A^T P A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$N = \begin{bmatrix} 1.00 & -0.25 & -0.50 \\ -0.25 & 1.00 & -0.50 \\ -0.50 & -0.50 & 1.50 \end{bmatrix}$$

نلاحظ أن المصفوفة N مصفوفة متماثلة Symmetric Matrix ، بمعني أن العنصر في الصف الأول والعمود الثاني = العنصر في العمود الأول و الصف الثاني، والعنصر في الصف الأول و العمود الثالث = العنصر في العمود الأول والصف الثالث ، ... وهكذا.

$$P_{6x6} = \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/4 \end{bmatrix} \quad 1/m^2$$

في الخطوة التالية نحسب متجه جديد يسمي متجه المعادلات الأصولية Normal Equation Vector وهو حاصل ضرب كلا من مدور Transposeمصفوفة المعاملات في مصفوفة الوزن في متجه الأخطاء المتبقية:

$$U = A^T P W$$

i.e.,

$$U_{ux1} = A^T_{uxn} P_{nxn} W_{nx1}$$

أي أن متجه المعادلات الأصولية سيتكون من u من الصفوف وعمود واحد (٣×١ في المثال الحالي).

$$U = A^T P W = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ 0.00 \\ -0.10 \\ 0.00 \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0.00 \\ -0.05 \end{bmatrix}$$

<u>الآن سنضع المعادلة الأساسية لطريقة ضبط أقل المربعات وهي المسماة بنظام المعادلات الأصولية Normal Equation System</u>:

$$(A^T P A) \hat{X} + (A^T P W) = 0$$

i.e.,

$$N \hat{X} + U = 0$$

حيث $\hat{X}$ يمثل متجه القيم المضبوطة لفرق العناصر المجهولة عن قيمتها التقريبية التي بدأنا بها:

أما حل هذه المعادلة فيكون:

$$\hat{X} = - N^{-1} U$$

حيث الرمز -١ يمثل مقلوب المصفوفة inverse of the matrix (الذي إذا ضرب في المصفوفة يكون الناتج مصفوفة الوحدة). ففي المثال الحالي:

$$N^{-1} = \begin{bmatrix} 1.6 & 0.8 & 0.8 \\ 0.8 & 1.6 & 0.8 \\ 0.8 & 0.8 & 1.2 \end{bmatrix}$$

لاحظ أن N^{-1} مصفوفة متماثلة أيضا مثل N نفسها.

ويكون متجه القيم المضبوطة لفرق العناصر المجهولة كالتالي:

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} -0.04 \\ 0.00 \\ 0.02 \end{bmatrix} \text{ m}$$

أما قيم العناصر المجهولة المضبوطة فتكون حاصل جمع المتجه الأخير مع متجهة القيم التقريبية للعناصر المجهولة:

$$\bar{X} = X^{o} + \hat{X}$$

$$\bar{X} = X^{o} + \hat{X} = \begin{bmatrix} 1.09 \\ 6.16 \\ 12.57 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -0.04 \\ 0.00 \\ 0.02 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.05 \\ 6.16 \\ 12.59 \end{bmatrix} \text{ m}$$

أما القيم المضبوطة للأخطاء المتبقية فيمكن حسابها كالتالي:

$$\hat{V} = A \hat{X} + W$$

$$\hat{V} = A \hat{X} + W = \begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.02 \\ 0.02 \\ -0.04 \\ -0.04 \\ 0.04 \end{bmatrix} \text{ m}$$

كما يمكن حساب القيم المضبوطة للأرصاد (القياسات) كالتالي:

$$\bar{L} = L + \hat{V}$$

$$\bar{L} = L + \hat{V} = \begin{bmatrix} 6.16 \\ 12.57 \\ 6.41 \\ 1.09 \\ 11.58 \\ 5.07 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.02 \\ 0.02 \\ -0.04 \\ -0.04 \\ 0.04 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.16 \\ 12.59 \\ 6.43 \\ 1.05 \\ 11.54 \\ 5.11 \end{bmatrix} \text{ m}$$

ويتم حساب القيمة المضبوطة لمعامل التباين Adjusted Variance Factor كالتالي:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \hat{V}^T P \hat{V} / (n - u)$$

$$= \begin{bmatrix} 0.00 & 0.02 & 0.02 & -0.04 & -0.04 & 0.04 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.02 \\ 0.02 \\ -0.04 \\ -0.04 \\ 0.04 \end{bmatrix} / (6 - 3)$$

$$= 0.002 / (6 - 3)$$
$$= 6.7 \times 10^{-4}$$

أما مصفوفة التباين المضبوط بين العناصر المجهولة-Adjusted Variance Covariance Matrix of Adjusted Parameters فيتم حسابها كالتالي:

$$\hat{\Sigma}_{\bar{X}} = \hat{\sigma}_0^2 \, N^{-1}$$

$$= 6.7 \times 10^{-4} \begin{bmatrix} 1.6 & 0.8 & 0.8 \\ 0.8 & 1.6 & 0.8 \\ 0.8 & 0.8 & 1.2 \end{bmatrix}$$

$$= 10^{-4} \begin{bmatrix} 10.67 & 5.33 & 5.33 \\ 5.33 & 10.67 & 5.33 \\ 5.33 & 5.33 & 8.00 \end{bmatrix}$$

إذا أردنا حساب قيمة الانحراف المعياري المضبوط لقيم العناصر المجهولة فنأخذ الجذر التربيعي لعناصر القطر (قيم التباين) لهذه المصفوفة.

$$\sigma H_b = \sqrt{10^{-4} \times 10.67} = 3.27 \text{ cm}$$

$$\sigma H_b = \sqrt{10^{-4} \times 10.67} = 3.27 \text{ cm}$$

$$\sigma H_d = \sqrt{10^{-4} \times 8.00} = 2.83 \text{ cm}$$

وبالتالي فأن القيم المضبوطة للعناصر المجهولة (مناسيب الروبيرات الثلاثة) تكون كالتالي:

منسوب الروبير a = ١.٠٥ ± ٠.٠٣٢٧ متر
منسوب الروبير b = ٦.١٦ ± ٠.٠٣٢٧ متر
منسوب الروبير c = ١٢.٥٩ ± ٠.٠٢٨٣ متر

في الخطوة الأخيرة من خطوات الضبط من الممكن أن نحسب مصفوفة التباين المضبوط للأرصاد المضبوطة Adjusted Variance-Covariance Matrix of Adjusted Observations (في حالة الحاجة إليها) كالتالي:

$$\hat{\Sigma}_{\bar{L}} = A \; \hat{\Sigma}_{\bar{X}} \; A^T$$

$$\hat{\Sigma}_{\bar{L}} = 10^{-4} \begin{bmatrix} 10.67 & 5.33 & -5.33 & 5.33 & 0.00 & 5.33 \\ 5.33 & 8.00 & 2.67 & 5.33 & 2.67 & 0.00 \\ -5.33 & 2.67 & 8.00 & 0.00 & 2.67 & -5.33 \\ 5.33 & 5.33 & 0.00 & 10.67 & -5.33 & -5.33 \\ 0.00 & 2.67 & 2.67 & -5.33 & 8.00 & 5.33 \\ 5.33 & 0.00 & -5.33 & -5.33 & 5.33 & 10.67 \end{bmatrix}$$

من الممكن أن نستخدم هذه المصفوفة في حساب الانحراف المعياري للأرصاد المضبوطة في حالة أن هذه الأرصاد ستدخل في حسابات شبكة روبيرات أخري مجاورة للشبكة الحالية.

ملخص لخطوات ضبط أقل المربعات لمعادلات الرصد:

١. قم بتكوين متجه الأرصاد $\bar{L}$ ومتجه العناصر المجهولة X (مع تثبيت وحدات لجميع عناصرهما بالمتر أو بالسنتيمتر ... الخ) ثم قم بتكوين مصفوفة المعاملان.
٢. قم بتكوين مصفوفة التباين للأرصاد Σ وأختر وحدات ثابتة لجميع عناصرها.
٣. قم باختيار القيمة المناسبة لمعامل الارتباط σ_o^2 ومن ثم قم بحساب مصفوفة الوزن P.
٤. أحسب قيم العناصر المجهولة التقريبية X^o ثم القيم التقريبية للأخطاء المتبقية W.
٥. تحقيق: قيم عناصر W يجب أن تكون صغيرة.

٦. قم بحساب كلا من المصفوفة $N = A^T P A$ والمتجهة $U = A^T P W$
٧. تحقيق: N يجب أن تكون متماثلة.
٨. قم بحساب مقلوب المصفوفة N
٩. قم بحساب قيمة المتجه $\hat{X} = - N^{-1} U$
١٠. قم بحساب الأخطاء المتبقية المضبوطة $\hat{V} = A \hat{X} + W$
١١. تحقيق: $A^T P \hat{V} = 0$
١٢. قم بحساب القيم المضبوطة للعناصر المجهولة $\bar{X} = X^0 + \hat{X}$
١٣. قم بحساب القيم المضبوطة للأرصاد $\bar{L} = L + \hat{V}$
١٤. قم بحساب القيمة المضبوطة لمعامل التباين $\hat{\sigma}_0^2$
١٥. قم بحساب مصفوفة التباين المضبوط بين العناصر المجهولة $\hat{\Sigma}_{\bar{X}}$
١٦. قم بحساب مصفوفة التباين المضبوط بين الأرصاد $\hat{\Sigma}_{\bar{L}}$

<u>طريقة أخري لتكوين نظام المعادلات الأصولية:</u>

يمكن تكوين <u>نظام المعادلات الأصولية</u> بصورة أخري دون الاعتماد علي حساب قيم تقريبية للعناصر المجهولة كالتالي:

$$(A^T P A) \bar{X} + (A^T P \bar{L}) = 0$$

i.e.,

$$N \bar{X} + C = 0$$

where

$$C = A^T P \bar{L}$$

<u>حيث:</u>
تم استخدام متجه الأرصاد الأصلية $\bar{L}$ بدلا من متجهة الأخطاء المتبقية W، وأيضا $\bar{X}$ سيمثل متجه القيم المضبوطة للعناصر المجهولة مباشرة (وليس الفرق بينها وبيت قيمها التقريبية)

أما حل هذه المعادلة فيكون:

$$\bar{X} = N^{-1} C = (A^T P A)^{-1} (A^T P \bar{L})$$

وفي هذه الحالة فأن الأرصاد المضبوطة يتم حسابها من المعادلة:

$$\bar{L} = A \bar{X}$$

ويتم حساب الأخطاء المتبقية المضبوطة كالتالي:

$$V^{\wedge} = \bar{L} - A X^{\wedge}$$

١٧-٥-٢ ضبط أقل المربعات للمعادلات غير الخطية

تعتمد نظرية أو طريقة ضبط أقل مجموع المربعات - في أساسها - علي المعادلات الرياضية الخطية فقط Linear Equations. في المثال السابق كانت معادلات الرصد من النوع الخطي (الدرجة الأولي وبدون أية أسس رياضية) وهذه هي الحالة العامة لشبكات الروبيرات و شبكات الجاذبية الأرضية وحتى شبكات الجي بي أس. ففي شبكات الجي بي أس تكون الأرصاد هي فروق الإحداثيات بين طرفي كل خط قاعدة base line بينما تكون العناصر المجهولة هي إحداثيات طرفي خط القاعدة، أي أن معادلات الرصد الثلاثة لكل خط قاعدة تكون:

$$\Delta X = X_2 - X_1$$
$$\Delta Y = Y_2 - Y_1$$
$$\Delta Z = Z_2 - Z_1$$

أي أنها معادلات خطية.

لكن هناك الكثير من التطبيقات المساحية التي بها تكون العلاقة الرياضية بين الأرصاد و العناصر المجهولة (المطلوب حسابها) ليست علاقة خطية من الدرجة الأولي. ولتطبيق طريقة ضبط مجموع أقل مربعات يجب تحويل هذه العلاقة (معادلة الرصد) إلي النوع الخطي وهذه العملية تسمي **التحويل الخطي أو Linearization**. تتم عملية التحويل الخطي من خلال تطبيق ما يعرف بمجموعة امتدادات تايلور Taylor expansion series، لأي معادلة غير خطية F في المجهول X فيمكن تحويلها لمعادلة خطية من خلال:

$$F(X) = a_0 + a_1 (x-x_o) + a_2 (x-x_o)^2 + a_3 (x-x_o)^3 + \ldots\ldots$$

where,

$$a_0 = F(x_0)$$
$$a_1 = \delta F(X) / \delta X$$
$$a_2 = 0.5 (\delta^2 F(X) / \delta^2 X)$$
$$a_3 = (1/6) (\delta^3 F(X) / \delta^3 X)$$

أي أن الصورة الخطية للمعادلة (غير الخطية) تتكون من حاصل جمع مجموعة من العناصر حيث العنصر الأول هو قيمة المعادلة نفسها عند القيمة التقريبية للعنصر x_0 والعنصر الثاني عبارة عن التفاضل الأول للمعادلة بالنسبة للعنصر المجهول X والعنصر الثالث هو نصف التفاضل الثاني للمعادلة .... وهكذا.

بالطبع فأن تطبيق نظرية تايلور سيكون معقدا ويحتاج لخطوات حسابية كثيرة، ولذلك فأن عملية التحويل الخطي Linearization في الضبط المساحي تكتفي بحساب أول عنصرين فقط من عناصر النظرية. ونتيجة إهمال باقي العناصر فستكون قيمة المتجه المضبوط للعناصر المجهولة $\hat{X}$ غير دقيقة ولذلك سنستعمل هذا المتجهة – مرة أخري – كما لو كان هو متجه القيم التقريبية X^o ثم نعيد خطوات الضبط مرة أخري (وخاصة قيمة متجه الأخطاء المتبقية W). وتستمر هذه العملية التكرارية iteration عدة مرات حتى يكون الفرق (في قيمة $\hat{X}$) بين تكرارين متتاليين قيمة صغيرة جدا فنأخذ قيمة المتجه $\hat{X}$ الأخير ليكون هو النتيجة النهائية لقيم العناصر المجهولة (لاحظ أننا لا نحتاج للعملية التكرارية في حل المعادلات الخطية).

أمثلة للمعادلات غير الخطية في المساحة و الجيوديسيا:

١- معادلة المسافة المقاسة بين نقطتين:

المعادلة الأصلية غير الخطية:

$$D_{jk} = \sqrt{[(X_k - X_j)^2 + (Y_k - Y_j)^2]}$$

حيث: D_{jk} المسافة (الرصدة) بين النقطة المعلومة الإحداثيات j والنقطة المجهولة الإحداثيات k، أي أن العناصر المجهولة هنا ستكون إحداثيات النقطة الثانية (X_k , Y_k).

المعادلة الخطية بالنسبة للاحداثي X للنقطة k (أي العنصر في مصفوفة المعاملات A المقابل للمجهول X_k):

$$\delta D_{jk} / \delta X_k = (X^o_k - X_j) / D_{jk}$$

المعادلة الخطية بالنسبة للاحداثي Y للنقطة k (أي العنصر في مصفوفة المعاملات A المقابل للمجهول Y_k):

$$\delta D_{jk} / \delta Y_k = (Y^o_k - Y_j) / D_{jk}$$

حيث:

(X^o_k , Y^o_k) الإحداثيات التقريبية للنقطة المجهولة K
(X_j , Y_j) الإحداثيات الحقيقية للنقطة المعلومة J
D_{jk} المسافة المقاسة بين النقطتين.

٢- معادلة الانحراف المقاس بين نقطتين:

المعادلة الأصلية غير الخطية:

$$\alpha = \tan^{-1} [(X_k - X_j) / (Y_k - Y_j)]$$

حيث: α الانحراف المقاس (الرصدة) بين النقطة المعلومة الإحداثيات j والنقطة المجهولة الإحداثيات k، أي أن العناصر المجهولة هنا ستكون إحداثيات النقطة الثانية (X_k , Y_k).

المعادلة الخطية بالنسبة للاحداثي X للنقطة k (أي العنصر في مصفوفة المعاملات A المقابل للمجهول X_k):

$$\delta \alpha / \delta X_k = (Y^o_k - Y_j) / (d^o_{jk})^2$$

المعادلة الخطية بالنسبة للاحداثي Y للنقطة k (أي العنصر في مصفوفة المعاملات A المقابل للمجهول Y_k):

$$\delta \alpha / \delta Y_k = - (X^o_k - X_j) / (d^o_{jk})^2$$

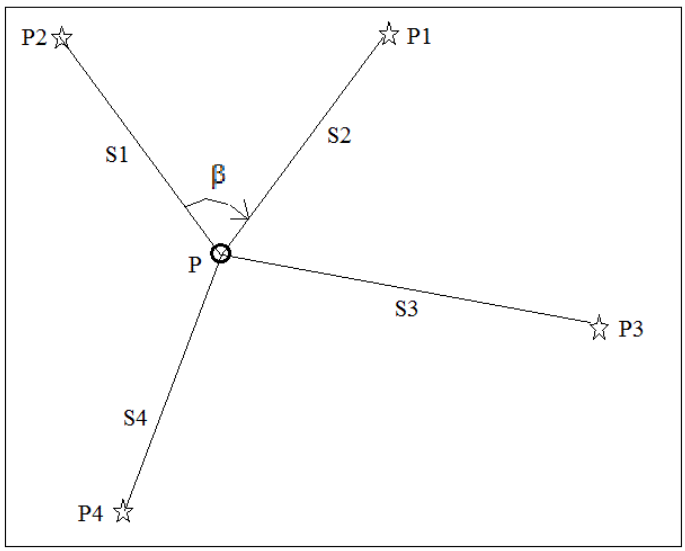
حيث:

(X^o_k , Y^o_k) الإحداثيات التقريبية للنقطة المجهولة K
(X_j , Y_j) الإحداثيات الحقيقية للنقطة المعلومة J

$$d^o_{jk} = (X^o_k - X_j)^2 + (Y^o_k - Y_j)^2$$

مثال لضبط الأرصاد غير الخطية:

في الشكل التالي تم قياس ٤ مسافات أفقية (المسافات S1, S2, S3, S4) من النقاط المعلومة P1, P2, P3, P4 إلي النقطة المجهولة P (المطلوب حساب إحداثياتها) كما تم قياس الزاوية الأفقية P1 P P2 (أنظر مرجع Uotila 1986):



شكل (٨-٥) مثال لضبط الأرصاد غير الخطية

كانت القياسات (الأرصاد) كالتالي:

م	الرصدة	القيمة	الانحراف المعياري
١	S1	٢٤٤.٥١٢ متر	± ٠.٠١٢ متر
٢	S2	٣٢١.٥٧٠ متر	± ٠.٠١٦ متر
٣	S3	٧٧٣.١٥٤ متر	± ٠.٠٣٨ متر
٤	S4	٢٧٩.٩٩٢ متر	± ٠.٠١٤ متر
٥	β	°١٢٣ '٣٨ "١.٤	± "٢

كانت القيم المعلومة لإحداثيات نقاط الثوابت الأرضية كالتالي:

نقطة رقم	الاسم	X (meter)	Y (meter)
١	P1	٨٤٢.٢٨١	٩٢٥.٥٣٢
٢	P2	١٣٣٧.٥٤٤	٩٩٦.٢٤٩
٣	P3	١٨٣١.٧٢٧	٧٢٣.٩٦٢
٤	P4	٨٤٠.٤٠٨	٦٥٨.٣٤٥

أما القيم التقريبية لإحداثيات النقطة المجهولة P فيمكن اعتبارها كالتالي:

$X^o = 1062.2\ m$
$Y^o = 825.2\ m$

عدد الأرصاد $n = ٥$
عدد القيم المجهولة $u = ٢$
درجات الحرية $df\ (n - u) = ٥ - ٢ = ٣$

متجه الأرصاد:

$$\overline{L} = \begin{bmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \\ S4 \\ \beta \end{bmatrix}$$

متجه العناصر المجهولة:

$$\overline{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix}$$

معادلات الأرصاد الأصلية غير الخطية (مع ملاحظة أن الزاوية المقاسة هي الفرق بين الاتجاه الأفقي P P2 و الاتجاه الأفقي P P1) :

$$S1 = [(X_1 – X)^2 + (Y_1 – Y)^2)]^{0.5}$$
$$S2 = [(X_2 – X)^2 + (Y_2 – Y)^2)]^{0.5}$$
$$S3 = [(X_3 – X)^2 + (Y_3 – Y)^2)]^{0.5}$$
$$S4 = [(X_4 – X)^2 + (Y_4 – Y)^2)]^{0.5}$$
$$\beta = \tan^{-1} [(X_2 – X) / (Y_2 – Y)] - \tan^{-1} [(X_1 – X) / (Y_1 – Y)]$$

مصفوفة المعاملات A (التي ستحتوي معاملات الأرصاد بعد تحويلها إلي الصورة الخطية) ستكون:

$$A = \begin{bmatrix} \delta S1 / \delta X & \delta S1 / \delta Y \\ \delta S2 / \delta X & \delta S1 / \delta Y \\ \delta S3 / \delta X & \delta S1 / \delta Y \\ \delta S4 / \delta X & \delta S1 / \delta Y \\ \delta \beta / \delta X & \delta \beta / \delta Y \end{bmatrix}$$

سيتم حساب قيم معاملات المصفوفة A بالتعويض: $X = X^o$ و $Y = Y^o$. كما سيتم حساب القيم التقريبية للأرصاد بالتعويض المباشر في معادلات الرصد (غير الخطية) مع استخدام القيم التقريبية لإحداثيات النقطة المجهولة:

$$S1^o = [(X_1 – X^o)^2 + (Y_1 – Y^o)^2)]^{0.5} = 244.454 \text{ m}$$
$$S2^o = [(X_2 – X^o)^2 + (Y_2 – Y^o)^2)]^{0.5} = 321.604 \text{ m}$$
$$S3^o = [(X_3 – X^o)^2 + (Y_3 – Y^o)^2)]^{0.5} = 773.184 \text{ m}$$
$$S4^o = [(X_4 – X^o)^2 + (Y_4 – Y^o)^2)]^{0.5} = 279.950 \text{ m}$$
$$\beta = \tan^{-1} [(X_2 – X^o) / (Y_2 – Y^o)] - \tan^{-1} [(X_1 – X^o) / (Y_1 – Y^o)]$$
$$= 123^0\ 38'\ 19.87''$$

و بذلك سيكون متجه الأخطاء المتبقية:

$$W = L^0 - L = \begin{bmatrix} 244.454 \\ 321.604 \\ 773.184 \\ 279.950 \\ 19.87'' \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 244.512 \\ 321.570 \\ 773.154 \\ 279.992 \\ 01.40'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.058 \\ 0.034 \\ 0.030 \\ -0.042 \\ 18.47'' \end{bmatrix}$$

ولحساب معاملات المصفوفة A:

$$\delta S_1 / \delta X = (X_1 – X^o) / S_1^o = 0.911907$$
$$\delta S_1 / \delta Y = (Y_1 – Y^o) / S_1^o = - 0.410397$$

$$\delta S_2 / \delta X = (X_2 – X^o) / S_2^o = - 0.846831$$

$\delta S_2 / \delta Y = (Y_2 - Y^o) / S_2^o = - 0.531862$

$\delta S_3 / \delta X = (X_3 - X^o) / S_3^o = - 0.991291$
$\delta S_3 / \delta Y = (Y_3 - Y^o) / S_3^o = 0.130937$

$\delta S_4 / \delta X = (X_4 - X^o) / S_4^o = 0.802972$
$\delta S_4 / \delta Y = (Y_4 - Y^o) / S_4^o = 0.596017$

$\delta\beta/\delta X = [(Y_1 - Y^o) / (S_1^o)^2] - [(Y_2 - Y^o) / (S_2^o)^2] = 2.505347 \times 10^{-5}$ m
$\delta\beta/\delta Y = [(X_1 - X^o) / (S_1^o)^2] - [(X_2 - X^o) / (S_2^o)^2] = 6.363532 \times 10^{-3}$ m

حيث أن وحدات السطر الأخير من المصفوفة A بالمتر بينما وحدات السطر الأخير من المتجه W بوحدات الثانية، فيجب ضرب السطر الأخير من A في الرقم ٢٠٦٢٦٤.٨ (رقم ثابت يعادل قيمة مقلوب جا ١").

بذلك فتكون مصفوفة المعاملات A كالتالي:

$$A = \begin{bmatrix} 0.911907 & -0.410397 \\ -0.846831 & -0.531862 \\ -0.991391 & 0.130937 \\ 0.802972 & 0.596017 \\ 5.16765 & 1312.574 \end{bmatrix}$$

يتم تكوين مصفوفة التباين للأرصاد الأصلية بحيث تتكون عناصر قطرها من التباين (مربع الانحراف المعياري) للأرصاد:

$$\Sigma_{\overline{L}} = \begin{bmatrix} (0.012)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (0.016)^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (0.038)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & (0.014)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (2)^2 \end{bmatrix}$$

و بفرض أن قيمة σ^2_o = ١ فأن مصفوفة الوزن ستكون كالتالي:

$$P = \begin{bmatrix} 1/(0.012)^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/(0.016)^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/(0.038)^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/(0.014)^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/(2)^2 \end{bmatrix}$$

نقوم بتكوين نظام المعادلات الأصولية:

$$N = A^T P A = \begin{bmatrix} 12553.01962 & 3208.04304 \\ 3208.04304 & 434811.54111 \end{bmatrix}$$

$$U = A^T P W = \begin{bmatrix} -649.618710 \\ 6031.984978 \end{bmatrix}$$

ويكون متجه القيم المضبوطة لفرق قيمة المجاهيل عن قيمتها التقريبية:

$$\hat{X} = -N^{-1} U = \begin{bmatrix} 0.055400 \\ -0.014281 \end{bmatrix} \quad m$$

وبذلك فأن متجه القيم المضبوطة للمجاهيل (الحل) فيكون:

$$\overline{X} = X^o + \hat{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 10965.2554 \\ 825.1867 \end{bmatrix} \quad m$$

أما متجه القيم المضبوطة للأخطاء المتبقية فيكون:

$$\hat{V} = A\hat{X} + W = \begin{bmatrix} 0.00197\ m \\ 0.00550\ m \\ 0.02726\ m \\ 0.00597\ m \\ -0.27\ '' \end{bmatrix}$$

أما متجه القيم المضبوطة للأرصاد فيكون:

$$\bar{L} = L + \hat{V} = \begin{bmatrix} 244.510\ m \\ 321.564\ m \\ 773.127\ m \\ 279.986\ m \\ 123^{\circ}\ 38'\ 01.13'' \end{bmatrix}$$

ويتم حساب القيمة المضبوطة لمعامل التباين Adjusted Variance Factor كالتالي:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \hat{V}^T\ P\ \hat{V}\ /\ (n-u)$$
$$= 0.8436 / 3$$
$$= 0.2812$$

أما مصفوفة التباين المضبوط بين العناصر المجهولة-Adjusted Variance Covariance Matrix of Adjusted Parameters فيتم حسابها كالتالي:

$$\hat{\Sigma}_{\bar{X}} = \sigma_0^2\ N^{-1} = 0.2812 \begin{bmatrix} 79.81 & -0.59 \\ -0.59 & 2.304 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 22.44 & -0.17 \\ -0.17 & 0.65 \end{bmatrix}$$

إذا أردنا حساب قيمة الانحراف المعياري المضبوط لقيم العناصر المجهولة فنأخذ الجذر التربيعي لعناصر القطر (قيم التباين) لهذه المصفوفة.

$\hat{\sigma}_X = \sqrt{22.44} = 4.74$ mm
$\hat{\sigma}_Y = \sqrt{0.65} = 0.81$ mm

وبالتالي فأن القيم المضبوطة للعناصر المجهولة (إحداثيات نقطة P) تكون كالتالي:

X = 10965.2554 ± 0.00474 m
Y = 825.1867 ± 0.0081 m

١٧-٥-٣ ضبط أقل المربعات لمعادلات الشرط

تعتمد هذه الطريقة من طرق ضبط مجموع أقل المربعات علي تحقيق مجموعة من الشروط conditions أو القيود constrains علي الأرصاد. يكون عدد هذه الشروط مساويا لعدد الأرصاد الزائدة عن الحاجة redundant observations المتوفرة بمجموعة الأرصاد. فعلي سبيل المثال يمكن حل أي مثلث مستوي إذا عرفنا ٣ أرصاد به (زاويتين وضلع أو ضلعين و زاوية ... الخ) وهذا ما نسميه الأرصاد المحتاجين إليها أو الأرصاد الضرورية necessary observations، فإذا رصدنا الرصدة الرابعة (الزاوية الثالثة مثلا) فستكون رصدة زائدة عن الحاجة وبالتالي سيكون هناك شرط أو قيد (تحقيق حسابي) يجب تحقيقه (مجموع زوايا المثلث يجب أن تساوي ١٨٠°). يختلف عدد الأرصاد الضرورية (الأرصاد

المحتاجين إليها) طبقا لنوع العمل المساحي نفسه (ترافرس، ميزانية، مثلثات .... الخ). القاعدة العامة أن:

$$r = df = n - n_{nec} = n - u$$

حيث:

r	عدد الشروط المستقلة independent conditions
df	درجات الحرية
n	عدد الأرصاد
n_{nec}	عدد الأرصاد الضرورية
u	عدد القيم المجهولة

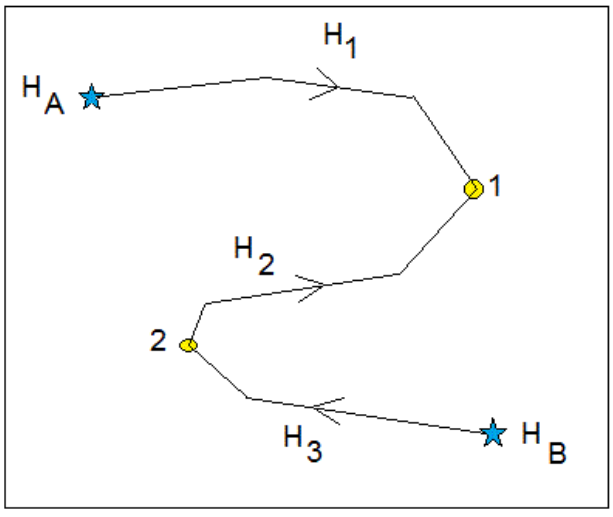
تجدر الإشارة إلي أن معادلات الشروط (أو الاشتراطات) تتكون من الأرصاد فقط و لا تدخل في تكوينها القيم المجهولة المطلوب حسابها. وعند تنفيذ طريقة الضبط الشرطي Conditional Adjustment يتم أولا تحقيق هذه الاشتراطات للحصول علي الأرصاد المضبوطة ثم في الخطوة التالية يتم حساب قيم العناصر المجهولة.

أمثلة للمعادلات الشرطية في العمل المساحي:

يعتمد تكوين معادلات الشرط علي طبيعة العمل المساحي وعلي توزيع الأرصاد ذاتها في الشبكة، أي أنه لا يوجد طريقة آلية لتكوين معادلات الشروط وعلي الراصد أن يكونها بنفسه في كل عمل مساحي يقوم بتنفيذه (بعكس طريقة معادلات الرصد التي يمكن تكوينها آليا بسهولة). سنقدم هنا بعض أمثلة لكيفية تكوين معادلات الاشتراطات:

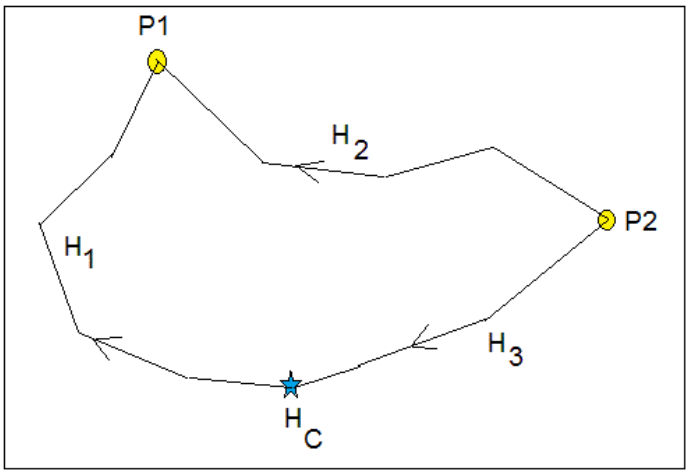
(أ) في شبكات الروبيرات:

في حالة خط ميزانية معلوم منسوب روبير BM بدايته و نهايته (أنظر الشكل) فأن مجموع فروق المناسيب للخطوط (مع مراعاة الإشارات) يجب أن يساوي فرق المنسوب بين الروبيرين، أي أن معادلة الشرط تكون:



$$H_1 - H_2 - H_3 + (H_B - H_A) = 0$$

في حالة حلقة خطوط ميزانية (أنظر الشكل) فأن معادلة الشرط تنص علي أن المجموع الجبري لفروق الميزانية (مع مراعاة الإشارات) يساوي صفر:

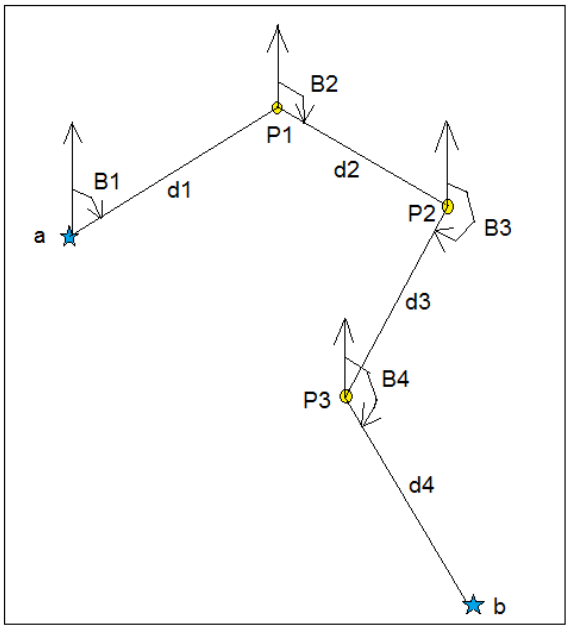


$$H_1 - H_2 + H_3 = 0$$

يمكن استنتاج أن معادلات الشرط في شبكات الميزانية تكون من النوع الخطي (معادلات درجة أولي)، وكذلك ستكون حالة شبكات الجاذبية الأرضية و شبكات الجي بي أس.

(ب) في شبكات الترافرس:

للترافرس الموصل (يربط بين نقطتين معلومتين الإحداثيات) فيوجد شرطين أحدهما لفرق الإحداثيات السينية و الآخر لفرق الإحداثيات الصادية (أنظر الشكل). في كل شرط فأن القاعدة أن مجموع فروق الإحداثيات (سواء السينية أو الصادية) يساوي فرق الإحداثيات بين النقطتين المعلومتين:



$$\Sigma^{4}_{i=1} \Delta X_i - (X_b - X_a) = 0$$

$$\Sigma^{4}_{i=1} \Delta Y_i - (Y_b - Y_a) = 0$$

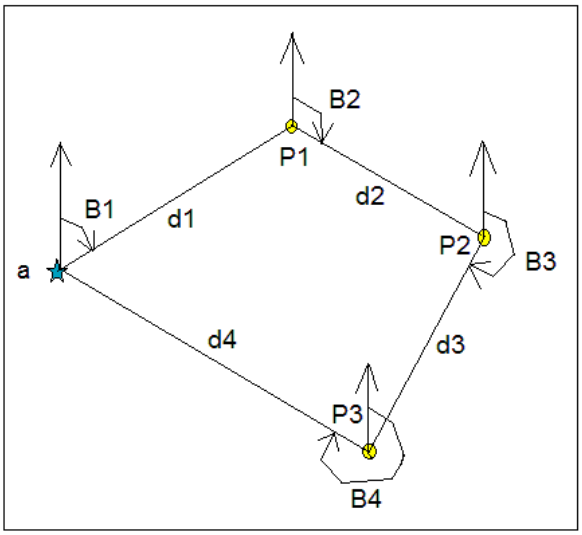
حيث علامة Σ هنا تدل علي المجموع، (X_a , Y_a) إحداثيات النقطة المعلومة a و (X_b , Y_b) إحداثيات النقطة المعلومة b.

و حيث أن فروق الإحداثيات لأي خط يتم حسابها من الأرصاد الأصلية للترافرس (زوايا و انحرافات) فأن معادلتي الشرط يمكن إعادة كتابتهما كالتالي:

$$\Sigma^{4}_{i=1} d_i \sin B_i - (X_b - X_a) = 0$$

$$\Sigma^{4}_{i=1} d_i \cos B_i - (Y_b - Y_a) = 0$$

أما في حالة الترافرس المغلق فأن معادلتي الشرط ستكونان:

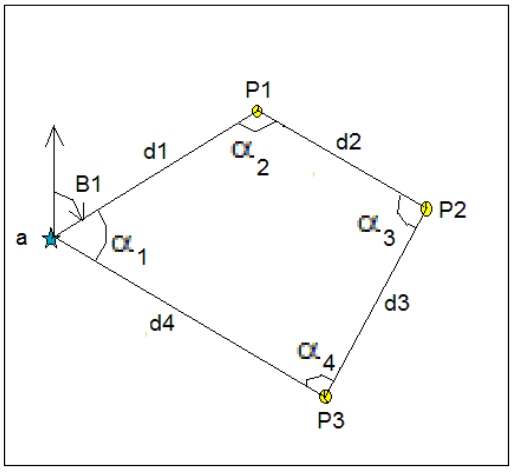


$$\Sigma^{4}_{i=1}\, d_I \sin B_I = 0$$

$$\Sigma^{4}_{i=1}\, d_I \cos B_I = 0$$

تجدر ملاحظة أن المعادلتين السابقتين ليستا معادلات خطية.

أما إذا كانت الأرصاد في الترافرس المغلق هي المسافات و الزوايا الداخلية (α) مع وجود انحراف واحد معلوم فستوجد معادلة شرط ثالثة لمجموع الزوايا الداخلية:



$$\Sigma^{4}_{i=1}\, \alpha_I - k = 0$$

حيث K ثابت يعتمد علي عدد نقاط الترافرس S ويتم حسابه كالتالي:

$$K = (2\, S - 4) \times 90^{o}$$

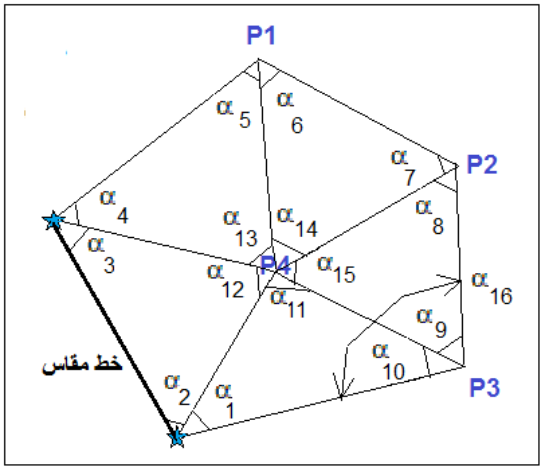
ففي الشكل السابق فأن عدد نقاط الترافرس S = ٤ وبالتالي فأن قيمة K = ٣٦٠°، أي أن معادلة الشرط الثالثة لهذا الشكل هي أن مجموع الزوايا الداخلية يجب أن يساوي ٣٦٠°.

(ج) في شبكات المثلثات:

بصفة عامة: في شبكات المثلثات مقيسة الزوايا Triangulations فأن: عدد الأرصاد الضرورية = ضعف عدد النقاط المجهولة.

في الشكل التالي:

عدد النقاط المجهولة = ٤
عدد الأرصاد الضرورية = ٢ × ٤ = ٨
الأرصاد الزائدة (عدد الشروط المستقلة) = عدد الأرصاد الفعلية – عدد الأرصاد الضرورية
= ١٦ – ٨ = ٨



تتكون الشروط الثمانية من: ٥ شروط مثلثيه + ٢ شرط محلي + ١ شرط ضلعي كالتالي:

الشروط المثلثية:

لكل مثلث مغلق فأن معادلة الشرط المثلثي تكون أن مجموع زوايا يجب أن يساوي ١٨٠° زائد الزيادة الكروية spherical excess (ε) حيث أنه مثلث كروي وليس مثلث مستوي. مثلا:

$$\alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_{12} - (180^o + \varepsilon) = 0$$

الشروط المحلية:

تتعلق هذه الشروط بالأرصاد الزائدة عند أي نقطة، فمثلا عند أي نقطة تم قياس جميع الزوايا لقفل الأفق فأن مجموع هذه الزوايا يجب أن يساوي ٣٦٠° كما هو الحال عند النقطة P4 في الشكل. أيضا عند النقطة P3 تم قياس زاوية غير ضرورية (الزاوية ١٦) وهي مجموع الزاويتين ٩ و ١٠. وبذلك فأن معادلتي الشرطين المحليين في الشكل السابق هما:

$$\alpha_9 + \alpha_{10} - \alpha_{16} = 0$$

$$\alpha_{11} + \alpha_{12} + \alpha_{13} + \alpha_{14} + \alpha_{15} - 360^{o} = 0$$

الشرط الضلعي:

طالما يوجد ضلع (مسافة) مقاس طوله في شبكة المثلثات فيوجد شرط يسمي الشرط الضلعي وهو أن مجموع لوغاريتمات جيب الزوايا الفردية (للشكل الخارجي فقط) يجب أن يساوي مجموع لوغاريتمات جيب الزوايا الزوجية. أي أن معادلة الشرط الضلعي ستكون:

$$[\log \sin \alpha_1 + \log \sin \alpha_3 + \log \sin \alpha_5 + \log \sin \alpha_7 + \log \sin \alpha_9] - [\log \sin \alpha_2 + \log \sin \alpha_4 + \log \sin \alpha_6 + \log \sin \alpha_8 + \log \sin \alpha_{10}] = 0$$

تجدر ملاحظة أن المعادلة الشرطية السابقة ليست معادلة خطية بينما معادلات الشروط المثلثية و الشروط المحلية معادلات خطية. كما أن عدد المعادلات الشرطية في شبكة المثلثات (٨) أقل من عدد الأرصاد الفعلية (١٦) مما يعطي ميزة حسابية لطريقة الضبط بمعادلات الاشتراطات عن الضبط بمعادلات الأرصاد في حالة شبكات المثلثات.

معادلات الضبط الشرطي:

بعد تحويل معادلات الشروط إلي الحالة الخطية (إن كانت غير خطية في أساسها) فيمكن كتابة الصورة العامة لمعادلات الشروط كالتالي:

$$B_{r,n}\ \hat{V}_{n,1} + W_{r,1} = 0$$

حيث:

$\hat{V}$ متجه الأخطاء المضبوطة (n من الصفوف)

W متجه الأخطاء المتبقية (r من الصفوف)

B مصفوفة معاملات معادلات الشروط (الخطية) وتتكون من r من الصفوف (عدد الشروط) و n من الأعمدة (عدد الأرصاد). أي أن كل عنصر من عناصر المصفوفة B هو التفاضل الأول لمعادلة الشرط بالنسبة لرصده من الأرصاد:

$$B_{r,n} = \begin{bmatrix} \frac{\delta f1}{\delta l1} & \frac{\delta f1}{\delta l2} & \cdots\cdots\cdots\cdots & \frac{\delta f1}{\delta ln} \\ \frac{\delta f2}{\delta l1} & \frac{\delta f2}{\delta l2} & \cdots\cdots\cdots\cdots & \frac{\delta f2}{\delta ln} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\delta fr}{\delta l1} & \frac{\delta fr}{\delta l2} & \cdots\cdots\cdots\cdots & \frac{\delta fr}{\delta ln} \end{bmatrix}$$

أما نظام المعادلات الأصولية Normal Equation System لطريقة الضبط الشرطي فيكون في صورة:

$$M_{r,r}\, K_{r,1} + W_{r,1} = 0$$

where,

$$M = B\, P^{-1}\, BT$$

حيث P هي مصفوفة الوزن للأرصاد الأصلية.

أما المتجه K فيسمي متجه الارتباط Vector of Correlate أو معامل ضرب لاجرانج Lagrange Multiplier حيث ابتكره العالم لاجرانج لحل مشكلة أن مصفوفة المعاملات B هي مصفوفة مستطيلة بما أن عدد صفوفها لا يساوي عدد أعمدتها (وليست مربعة مثل حالة المصفوفة A في طريقة الضبط بمعادلات الأرصاد) ولا يمكن إيجاد مقلوبها B^{-1}.

أما خطوات حل نظام المعادلات الأصولية فتتكون من:

$$K = - M^{-1}\, W$$

$$\hat{V} = - P^{-1}\, B^{T}\, K = (B\, P^{-1}\, B^{T})^{-1}\, W$$

$$\overline{L} = L + \hat{V}$$

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{V^T P\, V}{r}$$

$$\hat{\Sigma}_{\overline{L}} = \hat{\sigma}_o^2 \, [P^{-1} - (P^{-1}\, B^{T}\, M^{-1}\, B\, P^{-1})]$$

وبذلك نحصل علي الأرصاد المضبوطة $\overline{L}$ ومصفوفة التباين لها $\hat{\Sigma}_{\overline{L}}$ بالإضافة لقيمة معامل التباين بعد الضبط $\hat{\sigma}_o^2$.

أما لحساب القيم المضبوطة للعناصر المجهولة فنقوم باستخدام الأرصاد المضبوطة في تكوين معادلات تربط بينها و بين العناصر المجهولة، ولتكن مثلا في صورة:

$$\hat{X} = F1(\overline{L})$$

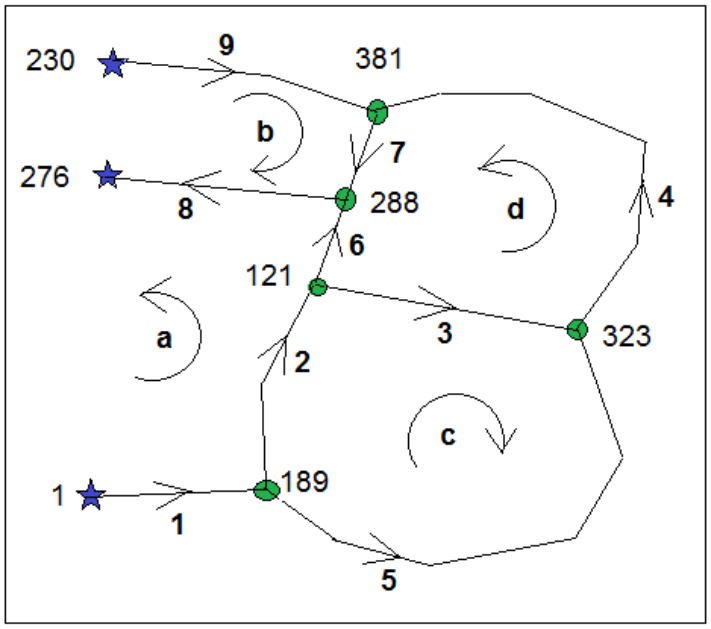
فإذا أخذنا التفاضل الأول لهذه المعادلات F1 بالنسبة للأرصاد (لنسميها المصفوفة G) فيمكن حساب مصفوفة التباين للعنصر المجهولة:

$$G = \delta F1 / \delta L$$

$$\hat{\Sigma}_{\hat{X}} = G \hat{\Sigma}_{L} G^{T}$$

مثال للضبط الشرطي لمعادلات خطية:

الشكل التالي يمثل حلقات ميزانيات لعدد ٩ خطوط (أي أن n = 9) تربط بين ٣ نقاط معلومة المنسوب و ٥ نقاط مجهولة المنسوب (أي أن u = 5). إذن عدد الشروط المستقلة = عدد درجات الحرية: r = n – u = 4



شكل (١٧-٧) مثال ١ للضبط الشروط الخطية

وكانت الأرصاد وقيم مناسيب الروبيرات المعلومة كالآتي:

الروبير	المنسوب H (متر)
١	٢.٧٩١
٢٧٦	١٩.٣١٦
٢٣٠	٣٣.٨٣١

رصدة رقم L	من روبير	إلي روبير	المسافة (كم)	فرق المنسوب (متر)
١	١	١٨٩	١.١٤	١٠.٠٣٨
٢	١٨٩	١٢١	٢.٨٤	٨.٢٩٧
٣	١٢١	٣٢٣	٣.٢١	١.٩٤٩
٤	٣٢٣	٣٠١	٦.٠٣	٥.٢١٧-
٥	١٨٩	٣٢٣	٦.٧٥	١٠.٢٤٤

٦	١٢١	٢٨٨	٠.٨٤	١.٥٦٢
٧	٣٠١	٢٨٨	٢.٩٤	٤.٨٣٧
٨	٢٨٨	٢٧٦	٢.٠١	٣.٣٧٠-
٩	٢٣٠	٣٠١	٥.٢٨	١٥.٩٧٩-

من حلقات الميزانية بالشكل يمكن اختيار الشروط المستقلة (الأربعة) كالتالي:

من الحلقة a:

$$L_1 + L_2 + L_6 + L_8 - (H_{276} - H_1) = 0$$

من الحلقة b:

$$L_9 + L_7 + L_8 - (H_{276} - H_{230}) = 0$$

من الحلقة c:

$$L_2 + L_3 - L_5 = 0$$

من الحلقة d:

$$L_3 + L_4 + L_7 - L_6 = 0$$

حيث أن معادلات الاشتراطات خطية فيمكن تكوين مصفوفة المعاملات B (٤ صفوف و ٩ أعمدة) كالتالي:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

أما متجهة الفروق W فيتم حسابه من معادلات الاشتراطات وباستخدام قيم الأرصاد المقاسة:

$W_1 = L_1 + L_2 + L_6 + L_8 - (H_{276} - H_1) = 10.038 + 8.297 + 1.562 - 3.370 - (19.316 - 2.791) = 0.002 \text{ m} = 2 \text{ mm}$

$W_2 = L_9 + L_7 + L_8 - (H_{276} - H_{230}) = -15.979 + 4.837 - 3.370 - (19.316 - 33.831) = 0.003 \text{ m} = 3 \text{ mm}$

$W_3 = L_2 + L_3 - L_5 = 8.297 + 1.949 - 10.244 = 0.002 \text{ m} = 2 \text{ mm}$

$W_4 = L_3 + L_4 + L_7 - L_6 = 1.949 - 5.217 + 4.837 - 1.562 = 0.007 \text{ m} = 7 \text{ mm}$

أي أن:

$$W = \begin{bmatrix} 2 \\ 3 \\ 2 \\ 7 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

كما سبق الذكر فأن في شبكات الميزانية يتم اعتبار التباين variance (لكل خط) مساويا لطول الخط ذاته، وبما أن الوزن weight هو مقلوب التباين فأن الوزن لكل خط ميزانية يمكن أخذه

مساويا لطول الخط بالكيلومتر. أي أن مصفوفة التباين للأرصاد Σ_L = مقلوب مصفوفة الوزن P^{-1} ستكون كالتالي:

$$P^{-1} = \Sigma_L = \begin{bmatrix} 1.14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2.84 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3.21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6.03 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 6.75 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.84 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.94 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5.28 \end{bmatrix}$$

نبدأ في خطوات الحل المتتالية:

$$M = (B P^{-1} B^T) = \begin{bmatrix} 6.83 & 2.01 & 2.84 & -0.84 \\ 2.01 & 10.23 & 0 & 2.94 \\ 2.84 & 0 & 12.80 & 3.21 \\ -0.84 & 2.94 & 3.21 & 13.02 \end{bmatrix}$$

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} 0.1850 & -0.0463 & -0.0497 & 0.0347 \\ -0.0463 & 0.1166 & 0.0188 & -0.0339 \\ -0.0497 & 0.0188 & 0.0970 & -0.0314 \\ 0.0347 & -0.0339 & -0.0314 & 0.0944 \end{bmatrix}$$

$$K = -M^{-1} W = \begin{bmatrix} -0.37 \\ -0.06 \\ 0.07 \\ -0.57 \end{bmatrix}$$

$$\hat{V} = -P^{-1} B^T K = \begin{bmatrix} -0.4 \\ -0.9 \\ -1.6 \\ -3.4 \\ -0.5 \\ 0.2 \\ -1.8 \\ -0.9 \\ -0.3 \end{bmatrix} \text{ mm}$$

$$\bar{L} = L + \hat{V} = \begin{bmatrix} 10.0376 \\ 8.2962 \\ 1.9474 \\ -5.2204 \\ 10.2435 \\ 1.5622 \\ 4.8352 \\ -3.3709 \\ -15.9793 \end{bmatrix} \text{ m}$$

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{\hat{V}^T P \hat{V}}{r} = \frac{4.743}{4} = 1.1857$$

$$\hat{\sigma}_o = \sqrt{1.1857} = 1.09$$

$$\hat{\Sigma}_{\bar{L}} = \hat{\sigma}_o^2 \left[P^{-1} - \left(P^{-1} B^T M^{-1} B P^{-1} \right) \right]$$

$$= \begin{bmatrix} 1.067 & -0.519 & 0.065 & -0.282 & -0.454 & -0.171 & 0.046 & -0.377 & 0.330 \\ & 1.622 & -0.547 & -0.067 & 1.075 & -0.373 & 0.240 & -0.729 & 0.489 \\ & & 2.233 & -1.447 & 1.687 & 0.250 & -0.536 & 0.231 & 0.305 \\ & & & 3.078 & -1.514 & 0.359 & -1.272 & -0.010 & 1.282 \\ & & & & 2.761 & -0.123 & -0.296 & -0.498 & 0.794 \\ & & & & & 0.820 & 0.211 & -0.276 & 0.065 \\ & & & & & & 2.019 & -0.498 & -1.521 \\ & & & & & & & 1.382 & -0.885 \\ & & & & & & & & 2.406 \end{bmatrix}$$

متماثلة

الآن يمكن حساب القيم المضبوطة لمناسيب النقاط المجهولة باستخدام الأرصاد المضبوطة:

$$\hat{H}_{189} = H_1 + \bar{L}_1 = 12.8286 \text{ m}$$

$$\hat{H}_{121} = H_1 + \bar{L}_1 + \bar{L}_2 = 21.1248 \text{ m}$$

$$\hat{H}_{323} = H_1 + \bar{L}_1 + \bar{L}_5 = 23.0721 \text{ m}$$

$$\hat{H}_{288} = H_{276} - \bar{L}_8 = 22.6869 \text{ m}$$

$$\hat{H}_{301} = H_{230} + \bar{L}_9 = 17.8517 \text{ m}$$

من هذه المعادلات الخمسة نكون المصفوفة G كالتالي:

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ثم يمكن حساب قيمة مصفوفة التباين للقيم المجهولة:

$$\hat{\Sigma}_{\hat{X}} = G \hat{\Sigma}_{L} G^{T} = \begin{bmatrix} 1.067 & 0.547 & 0.613 & 0.377 & 0.330 \\ 0.547 & 1.650 & 1.169 & 1.106 & 0.820 \\ 0.613 & 1.169 & 2.921 & 0.875 & 1.124 \\ 0.377 & 1.106 & 0.875 & 1.382 & 0.885 \\ 0.330 & 0.820 & 1.124 & 0.885 & 2.406 \end{bmatrix}$$

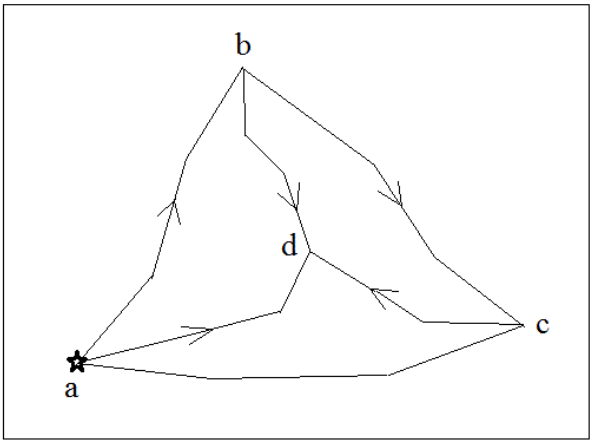
أي أن قيم الانحراف المعياري لمناسيب الروبيرات (الجذر التربيعي لعناصر القطر):

$\sigma_{189} = \sqrt{}\ 1.067$ m
$\sigma_{121} = \sqrt{}\ 1.650$ m
$\sigma_{323} = \sqrt{}\ 2.921$ m
$\sigma_{288} = \sqrt{}\ 1.382$ m
$\sigma_{301} = \sqrt{}\ 2.406$ m

<u>مثال ٢ للضبط الشرطي لمعادلات خطية:</u>

هذا المثال هو السابق حله (أنظر ١٧-٥-١) بطريقة الضبط بمعادلات الأرصاد وسنقوم هنا بحله مرة أخري بطريقة الضبط بمعادلات الشروط:

الشكل التالي يمثل شبكة من أرصاد الميزانيات تربط بين ٤ روبيرات BM حيث تتكون هذه الشبكة من ٦ خطوط ميزانية، ونفترض أن منسوب النقطة a معلوم (سنفرضه = صفر متر في الحالة الحالية) في هذه الحلقة.



الجدول التالي يمثل قيم الأرصاد (فروق المناسيب في كل خط) وكذلك طول خطوط الميزانية:

م	خط الميزانية		فرق المنسوب (متر)	طول الخط (كم)
	من نقطة	إلي نقطة		
١	a	c	٦.١٦	٤
٢	a	d	١٢.٥٧	٢
٣	c	d	٦.٤١	٢
٤	a	d	١.٠٩	٤
٥	b	d	١١.٥٨	٢
٦	b	c	٥.٠٧	٤

المطلوب حساب قيم العناصر المجهولة التي تتمثل في منسوب النقاط b, c, d مع قيم الانحراف المعياري لكلا منهم.

معادلات الاشتراطات:

$$\Delta H_1 - \Delta H_4 - \Delta H_6 = 0$$
$$\Delta H_1 - \Delta H_2 + \Delta H_3 = 0$$
$$\Delta H_2 - \Delta H_4 - \Delta H_5 = 0$$

المصفوفة B:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.00 \\ -0.10 \end{bmatrix} \text{ m}$$

$$P^{-1} = \Sigma_L = \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} cm^2 = 10^{-4} \begin{bmatrix} 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} m^2$$

$$M = (B P^{-1} B^T) = \begin{bmatrix} 12 & 4 & 4 \\ 4 & 8 & -2 \\ 4 & -2 & 8 \end{bmatrix}$$

$$K = - M^{-1} W = \begin{bmatrix} -0.01 \\ 0.01 \\ 0.01 \end{bmatrix}$$

$$\hat{V} = - P^{-1} B^T K = \begin{bmatrix} 0.00 \\ 0.02 \\ 0.02 \\ -0.04 \\ -0.04 \\ 0.04 \end{bmatrix} m$$

$$\bar{L} = L + \hat{V} = \begin{bmatrix} 6.16 \\ 12.59 \\ 6.43 \\ 1.05 \\ 11.54 \\ 5.11 \end{bmatrix} m$$

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{\hat{V}^T P \hat{V}}{r} = \frac{0.002}{3} = 6.7 \times 10^{-4}$$

$$\hat{\Sigma}_{\bar{L}} = \hat{\sigma}_o^2 [P^{-1} - (P^{-1} B^T M^{-1} B P^{-1})]$$

$$= 6.7 \times 10^{-4} \begin{bmatrix} 10.67 & & & & & \\ 5.33 & 8.00 & & \text{متماثلة} & & \\ -5.33 & 2.67 & 8.00 & & & \\ 5.33 & 5.33 & 0 & 10.67 & & \\ 0 & 2.67 & 2.67 & -5.33 & 8.00 & \\ 5.33 & 0 & -5.33 & -5.33 & 5.33 & 10.67 \end{bmatrix}$$

الآن يمكن حساب القيم المضبوطة لمناسيب النقاط المجهولة باستخدام الأرصاد المضبوطة:

$$\hat{H}_b = H_a + \Delta H_4 = 1.05 \text{ m}$$
$$\hat{H}_c = H_a + \Delta H_1 = 6.16 \text{ m}$$
$$\hat{H}_d = H_a + \Delta H_2 = 12.59 \text{ m}$$

من هذه المعادلات الخمسة نكون المصفوفة G كالتالي:

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

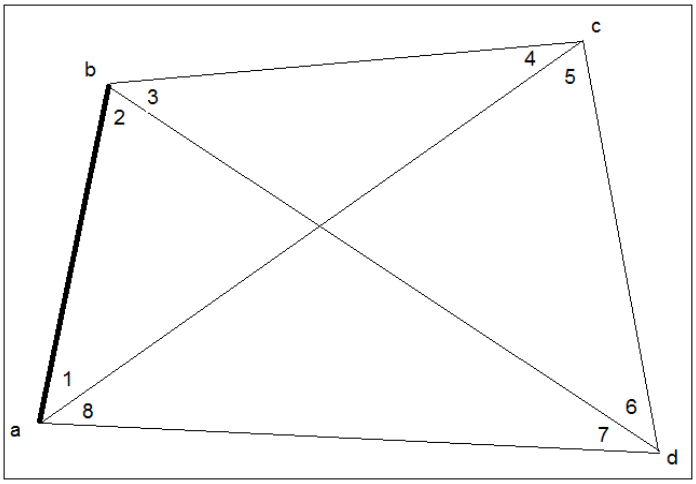
ثم يمكن حساب قيمة مصفوفة التباين للقيم المجهولة:

$$\hat{\Sigma}_{\hat{X}} = G \; \hat{\Sigma}_{\overline{L}} \; G^T$$

$$= 6.7 \times 10^{-4} \begin{bmatrix} 10.67 & 5.33 & 5.33 \\ 5.33 & 10.67 & 5.33 \\ 5.33 & 5.33 & 8.00 \end{bmatrix} \; m^2$$

<u>مثال ٣ للضبط الشرطي لمعادلات غير خطية:</u>

الشكل الرباعي التالي يمثل ٨ زوايا داخلية مقاسة لشكل رباعي يبدأ من خط قاعدة معلوم ab بهدف تحديد إحداثيات النقطتين الجديدتين c , d.



شكل (١٧-٨) مثال لضبط الشروط غير الخطية

الأرصاد كالتالي:

رقم	اسم الزاوية	قيمة الزاوية L
١	b a c	٤٨° ٢٦' ٠٩.٠"
٢	d b a	٣٧° ١٠' ٣٢.٦"
٣	c b d	٣٠° ٢٧' ٠٧.٢"
٤	a c b	٦٣° ٥٦' ١٤.٥"
٥	d c a	٥٤° ٣٩' ٤٨.٨"
٦	b d c	٣٠° ٥٦' ٤٥.٣"
٧	a d b	٤٤° ٠١' ٢٣.٢"
٨	c a d	٥٠° ٢١' ٥٤.٦"

سنعتبر في المثال الحالي أن جميع الزوايا لها نفس الدقة (أي نفس الوزن) و سنهمل الزيادة الكروية في أي مثلث (كما لو كان مثلث مستوي).

عدد الأرصاد: $n = ٨$

عدد الأرصاد الضرورية: $n_{nec} = ٢$ (عدد النقاط – ٢) = ٢ (٤ – ٢) = ٤

عدد الشروط المستقلة: $r = ٨ - ٤ = ٤$

تتكون الشروط الأربعة – في الشكل الرباعي - من ٣ شروط مثلثيه و شرط واحد ضلعي.

<u>الشروط المثلثية:</u>

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6 + \alpha_7 + \alpha_8 - 360^o = 0$$

$$\alpha_3 + \alpha_4 \qquad -\alpha_7 - \alpha_8 \qquad = 0$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 \qquad -\alpha_5 - \alpha_6 \qquad = 0$$

والمعادلات الثلاثة خطية.

<u>الشرط الضلعي:</u>

$$[\log \sin \alpha_1 + \log \sin \alpha_3 + \log \sin \alpha_5 + \log \sin \alpha_7] - [\log \sin \alpha_2 + \log \sin \alpha_4 + \log \sin \alpha_6 + \log \sin \alpha_8] = 0$$

وهذه معادلة غير خطية.

أما متجهة الأخطاء المتبقية W فيتم حسابه كالتالي:

$$W_1 = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5 + \alpha_6 + \alpha_7 + \alpha_8 - 360^o = -4.8"$$

$W_2 = \alpha_3 + \alpha_4 - \alpha_7 - \alpha_8 = +3.9"$

$W_3 = \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_5 - \alpha_6 = +7.5"$

$W_4 = [\log \sin \alpha_1 + \log \sin \alpha_3 + \log \sin \alpha_5 + \log \sin \alpha_7] - [\log \sin \alpha_2 + \log \sin \alpha_4 + \log \sin \alpha_6 + \log \sin \alpha_8] = 25.1 \times 10^{-6} = 25.1$ ppm

$$W = \begin{bmatrix} -4.8" \\ +3.9" \\ +7.5" \\ 25.1 \text{ ppm} \end{bmatrix}$$

لحساب معاملات المصفوفة B:

للشروط المثلثية الثلاثة فأن العنصر في B هو معامل الزاوية في معادلة الشرط (المعادلات خطية مباشرة). أما لحساب عناصر B المقابلة للشرط الضلعي لأي زاوية α_i فأن:

$$\delta f / \delta \alpha_i = (\delta \log \sin \alpha_i / \delta \alpha_l) \times 10^6$$
$$= (\delta \log \sin \alpha_i / 1") \times 10^6$$
$$= (\cot \alpha_i \times \log_{10}{}^e / 206264.8) \times 10^6$$
$$= (\cot \alpha_i \times 0.43429448 / 206264.8) \times 10^6$$

وبذلك تكون المصفوفة B كالتالي:

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ -1.87 & -2.78 & 3.58 & -1.03 & 1.48 & -3.51 & 2.18 & -1.74 \end{bmatrix}$$

أما خطوات الحل فتتابع كالتالي:

$$M = (B P^{-1} B^T)$$

لكن حيث أن الأرصاد هنا كلها بنفس الدقة (نفس الوزن) فأن المصفوفة $P^{-1} = I$ مما يجعل:

$$M = (B B^T)$$

$$M = (B B^T) = \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 & 0.06 \\ 0 & 4 & 0 & 2.11 \\ 0 & 0 & 4 & 1.11 \\ 0.06 & 2.11 & 1.11 & 47.42 \end{bmatrix}$$

$$K = - M^{-1} W = \begin{bmatrix} 0.6034 \\ -0.7342 \\ -1.7483 \\ -0.4565 \end{bmatrix}$$

$$\hat{V} = -P^{-1} B^T K = B^T K = \begin{bmatrix} -2.00 \\ 0.12 \\ -1.76 \\ 0.34 \\ 1.67 \\ 3.95 \\ 0.34 \\ 2.13 \end{bmatrix}''$$

$$\bar{L} = L + \hat{V} = \begin{bmatrix} 0\ '\ '' \\ 48\ 26\ 07.00 \\ 37\ 10\ 32.72 \\ 30\ 27\ 05.44 \\ 63\ 56\ 14.84 \\ 54\ 39\ 50.47 \\ 30\ 56\ 49.25 \\ 44\ 01\ 23.54 \\ 50\ 21\ 56.73 \end{bmatrix}$$

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{\hat{V}^T P \hat{V}}{r} = \frac{30.27}{4} = 7.57$$

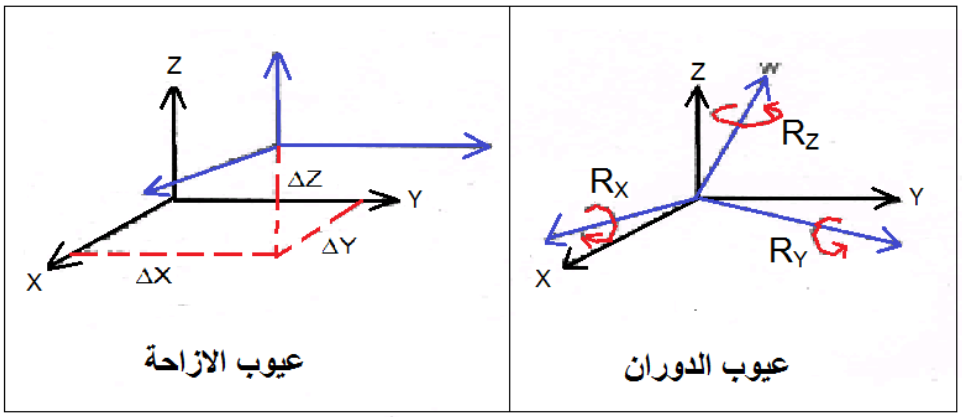
$$\hat{\sigma}_o = \sqrt{7.57} = 2.75''$$

٦-١٧ ضبط الشبكات بطريقة حرة Free-Net Adjustment

تعاني أرصاد (قياسات) أي شبكة جيوديسية من عيوب المرجع Datum Defects حيث أن الأرصاد في حد ذاتها لا تحدد المرجع الذي تستند إليه هذه الشبكة. فإذا أخذنا علي سبيل المثال أرصاد شبكة الميزانية (حلقة من خطوط الميزانية) فأن كل رصدة تعطي فرق المنسوب بين نقطتين BM، لكن هذه الشبكة غير محدد لها المرجع الرأسي الذي تعتمد عليه. فان لم نحدد القيمة المطلقة absolute value لمنسوب نقطة من نقاط الشبكة فأن الشبكة لن تكون مرجعة أو محددة المرجع. من هنا نقول أنه يوجد عيب مرجعي واحد في شبكة الميزانية. مثال آخر عندما نرصد أطوال أضلاع مثلث فأن هذه المثلث من الممكن أن يقع في أي منطقة في العالم حيث أنه غير محدد المرجع، أي يعاني من عيوب مرجعية. ولإصلاح هذه العيوب يلزمنا معرفة القيمة المطلقة لإحداثيات (س،ص) لنقطة من نقاط هذا المثلث. وبعد ذلك يلزمنا أيضا تحديد علاقة هذا المثلث المقاس الأضلاع بمحور الإحداثيات (قيمة ميله علي المحور س أو المحور ص). إذن نقول أن المثلث المقاس الأضلاع يعاني من ٣ عيوب مرجعية.

يمكن تقسيم العيوب المرجعية في الشبكات الجيوديسية إلي ٣ أنواع: عيوب الإزاحة Translation وعيوب الدوران Rotation وعيب المقياس Scale. تكمن عيوب الإزاحة في تحديد الإزاحات بين نقطة من نقاط الشبكة و نقطة الأصل لنظام الإحداثيات، أي أن عيوب الإزاحة يمكن أن تكون ٢ فقط (س،ص) للشبكات الأفقية أو ٣ (س،ص،ع) للشبكات ثلاثية الأبعاد. أما عيوب الدوران فتشمل تحديد ميول الشبكة عن محاور نظام الإحداثيات نفسه، أي أنها مثل عيوب الإزاحة قد تكون ٢ للشبكات الأفقية (أالميل عن محور س و الميل عن محور ص) أو تكون ٣ للشبكات ثلاثية الأبعاد. أما عيب الدوران (دائما عيب واحد فقط) فهو الذي

يحدد حجم الشبكة بالنسبة للأرض. فمثلا إن لم يتم قياس طول ضلع واحد من أضلاع أي مثلث فيمكننا رسم مئات من هذه المثلثات تختلف في حجمها مع أن زواياه واحدة.



شكل (١٧-٩) العيوب المرجعية في الشبكات الجيوديسية

العيوب المرجعية للشبكات الجيوديسية

نوع الشبكة	العيوب المرجعية	
	العدد	النوع
شبكات الميزانيات	١	١ إزاحة
شبكات الجاذبية الأرضية	١	١ إزاحة
شبكات المثلثات مقاسة الأضلاع	٣	٢ إزاحة ١ دوران
شبكات المثلثات مقاسة الزوايا	٤	٢ إزاحة ١ دوران ١ مقياس
الشبكات الأرضية ثلاثية الأبعاد	٦ (في حالة قياس ضلع في الشبكة)	٣ إزاحة ٣ دوران
	٧ (في حالة عدم قياس ضلع في الشبكة)	٣ إزاحة ٣ دوران ١ مقياس
شبكات الجي بي أس	٣	٣ إزاحة

تجدر ملاحظة السطر الأخير في الجدول السابق والذي يحدد عدد عيوب شبكات الجي بي أس بثلاثة فقط مع أن هذه الشبكات من نوع الشبكات ثلاثية الأبعاد. يرجع السبب في ذلك إلي أن أرصاد الجي بي أس الأساسية هي فروق الإحداثيات بين كل طرفي خط قاعدة ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) والتي يمكن منها حساب انحراف الخط وبالتالي يمكن تحديد ميله عن المحاور الثلاثة (أي لا توجد عيوب دوران في شبكات الجي بي أس). بالمثل فيمكن حساب طول خط القاعدة من مركباته الثلاثة المقاسة، وبالتالي فلن يوجد عيب مقياس في شبكات الجي بي أس وسيتبقي فقط في هذه الشبكات عيوب الإزاحة الثلاثة.

هذه هو مفهوم العيوب المرجعية للشبكات من وجهة النظر الجيوديسية. أما من وجهة النظر الرياضية فأن وجود هذه العيوب لا يسمح بحساب مقلوب مصفوفة نظام المعادلات الأصولية N وهي التي يعتمد عليها حساب قيم العناصر المجهولة الناتجة من ضبط مجموع أقل المربعات ($\hat{X} = - N^{-1} U$). بمعني أننا لا نستطيع حساب قيمة المصفوفة N^{-1} لأنها مصفوفة أحادية Singular Matrix لأي شبكة جيوديسية. وللتغلب علي هذا الوضع فيجب معالجة العيوب المرجعية للشبكة، وهو ما يتم بأحدي طريقتين وهما: ضبط الشبكة الحرة و الضبط بأقل عدد من القيود.

تعتمد طريقة ضبط الشبكة الحرة Free-Network Adjustment علي معالجة العيوب المرجعية للشبكة من خلال تثبيت قيم (غير دقيقة) لمرجع الشبكة. فمثلا في حالة شبكة الميزانية فنقوم بفرض قيمة منسوب احدي نقاط الشبكة (مثلا نفرضه = صفر)، وبالتالي يمكننا حساب مناسيب كل نقاط الشبكة المرصودة. مثال آخر: في حالة شبكات الجي بي أس نقوم بفرض الإحداثيات الثلاثة لنقطة من نقاط الشبكة المرصودة (مثلا إحداثياتها التقريبية الناتجة من أرصاد الشفرة) وبالتالي يمكن استكمال خطوات عملية الضبط وحساب إحداثيات باقي نقاط الشبكة.

لكن من المهم جدا ملاحظة أن نتائج هذا الضبط الحر (كما يبدو من أسمه) لن تكون هي النتائج الدقيقة للشبكة الجيوديسية. فهذه النتائج معتمدة علي قيمة تقريبية لمعالجة عيوب الشبكة حتى نستطيع حساب N^{-1} و استكمال معادلات وخطوات الضبط. علي الجانب الآخر فأن أهم مميزات طريقة الضبط الحر أنها تسمح لنا باكتشاف دقة أرصاد الشبكة ذاتها وأيضا باكتشاف أيه أخطاء بها قبل إتمام عملية الضبط النهائي. فمثلا من نتائج الضبط الحر نستطيع حساب قيم الانحراف المعياري للأرصاد المضبوطة (من المصفوفة $\hat{\Sigma}_{\bar{L}}$) وبالتالي يمكننا اكتشاف أية أرصاد غير دقيقة ونقوم بحذفها حتى لا تؤثر علي باقي الأرصاد وعلي النتائج النهائية للعناصر المجهولة. من هنا فأن إتمام عملية الضبط الحر وفحص نتائجها بدقة و تمعن يعد من أهم خطوات ضبط الشبكات الجيوديسية. من الممكن أن نعيد عملية الضبط الحر عدة مرات (مع حذف بعض الأرصاد غير الدقيقة في كل مرة) قبل أن نتأكد من أن الأرصاد التي ستدخل في الضبط النهائي للشبكة هي الأرصاد الدقيقة فقط.

أما طريقة الضبط بأقل عدد من القيود Minimal- or Minimum-Constraints Adjustment فهي مثل طريقة الضبط الحر تماما إلا أننا نقوم بتثبيت قيم حقيقية معلومة لعيوب الشبكة. فمثلا في حالة شبكة الميزانية نقوم بتثبيت قيمة المنسوب المعلوم (الحقيقي) لنقطة BM في الشبكة بدلا من فرض أن منسوبها يساوي الصفر. يمكن الاطلاع علي المعادلات الرياضية لعملية الضبط الحر أو الضبط بأقل عدد من القيود في المراجع الجيوديسية المتخصصة.

أما في حالة تثبيت عدد أكبر من عدد عيوب المرجع للشبكة الجيوديسية فهذا ما يطلق عليه اسم الضبط بعدد أكبر من القيود أو Over-Constraints Adjustment. فمثلا في شبكات الميزانية إذا قمنا بتثبيت قيمة منسوب نقطتين BM من نقاط الشبكة (عدد العيوب المرجعية للشبكة ١ فقط)، أو في شبكات الجي بي أس إذا قمنا بتثبيت إحداثيات نقطتين من نقاط الشبكة (أي ٦ عناصر) مع أن عدد عيوب الشبكة يبلغ ٣ فقط (X,Y,Z لنقطة واحدة). وهي حالة تتطلب فحص دقيق للشبكة المقاسة و أيضا تعتمد علي دقة المرجع الذي نقوم بتثبيته.

١٧-٧ تحليل نتائج ضبط الشبكات

يعد تحليل النتائج من أهم – إن لم يكن هو أهم – خطوات ضبط الشبكات الجيوديسية وخاصة شبكات الجي بي أس التي بدأ تطبيقها في ازدياد سريع في الفترة الأخيرة. يمكن بالتحليل الدقيق لنتائج الضبط (الفحص المبدئي للأرصاد و الضبط الحر للشبكة) اكتشاف أية أرصاد غير دقيقة وأية مشاكل في الشبكة ومن ثم التعامل معها بطريقة علمية للوصول إلي أدق النتائج. توجد عدة خطوات لتحليل نتائج الشبكات سنتعرض لأهمهم في الأجزاء التالية.

تحليل معامل التباين Variance Factor Analysis

في معادلات الضبط بطريقة أقل مجموع مربعات تعاملنا مع معامل التباين قبل الضبط (assumed or a priori variance factor) σ_o^2 وهي قيمة تم افتراضها – قبل بدء الضبط – ليتم بها حساب مصفوفة الوزن من مصفوفة التباين للأرصاد (غالبا نفرضها = ١):

$$P = \sigma_o^2 \ \Sigma^{-1}$$

وبعد اكتمال خطوات الضبط قمنا بحساب أو تقدير القيمة المضبوطة لمعامل التباين (Adjusted or estimated or a posteriori Variance Factor):

$$\hat{\sigma}_o^2 = \hat{V}^T \ P \ \hat{V} \ / \ (n - u)$$

يتم إجراء مقارنة بين القيمة المفترضة أو الأولية لمعامل التباين والقيمة المحسوبة أو المضبوطة لها:

$$\hat{\sigma}_o^2 \ / \ \sigma_o^2$$

والذي من المفترض أن يساوي ١ أو قريبا منه حتى تكون قيمة معامل التباين المبدئي مناسبة أو قريبة لتلك القيمة الناتجة من الضبط وبالتالي فأن خطوات و حسابات الضبط تكون سليمة. أما إن كانت نتيجة هذه المقارنة لا تساوي ١ (أو قريبة منه) فأن هذا يعد إنذارا بأن هناك شيئا ما لم يكن بالصورة السليمة سواء في:

- وجود أخطاء – بشرية - في نقل الأرصاد المقاسة في الطبيعة.
- وجود أخطاء منتظمة لم يتم معالجتها في الأرصاد قبل بدء الضبط.
- تكوين معادلات الضبط (سواء معادلات الأرصاد أو معادلات الاشتراطات) بصورة غير دقيقة.
- عدم مناسبة الوزن المستخدم للأرصاد الأصلية، إما أن يكون الوزن (أو بمعني آخر الانحراف المعياري الذي يعبر عن دقة الأرصاد الأساسية) أقل من الحقيقية أو أن يكون أكبر من الحقيقية.

ومن ثم فيجب إعادة فحص الأرصاد و المعادلات مرة أخري وإصلاح أية عيوب بها ثم إعادة عملية الضبط من جديد.

يجب ملاحظة أن هذا التحليل لا يؤثر علي القيمة النهائية المضبوطة للعناصر المجهولة حيث أن معادلة حساب هذه العناصر لا تدخل بها قيمة معامل التباين المضبوط $\hat{\sigma}_o^2$ كما سبق أن رأينا في المعادلة:

$$\hat{X} = -N^{-1}U$$

لكنه يؤثر علي قيمة التباين (ومن ثم الانحراف المعياري) لهذه العناصر:

$$\hat{\Sigma}_{\bar{X}} = \hat{\sigma}_o^2 \; N^{-1}$$

وأيضا يؤثر علي قيمة التباين للأرصاد المضبوطة:

$$\hat{\Sigma}_{\bar{L}} = A \; \hat{\Sigma}_{\bar{X}} \; A^T$$

في الأمثلة المحلولة السابقة نري (في مثال شبكة الميزانيات) أن قيمة معامل التباين المبدئي أو المفروض كانت:

$$\sigma_o^2 = 1 \times 10^{-4}$$

بينما قيمة معامل التباين المضبوط كانت:

$$\hat{\sigma}_o^2 = 6.7 \times 10^{-4}$$

أي أن قيمة تحليل معامل التباين:

$$\hat{\sigma}_o^2 / \sigma_o^2 = 6.7$$

مما يدل علي أن قيمة معامل التباين (ومن ثم الانحراف المعياري للأرصاد) المبدئي كانت أكبر مما ينبغي، أي أن الأرصاد الأصلية كانت أقل دقة مما توقعنا.

أما في المثال الثاني (مثال التقاطع) فنري أن قيمة معامل التباين المبدئي أو المفروض كانت:

$$\sigma_o^2 = 1$$

بينما قيمة معامل التباين المضبوط كانت:

$$\hat{\sigma}_o^2 = 0.2812$$

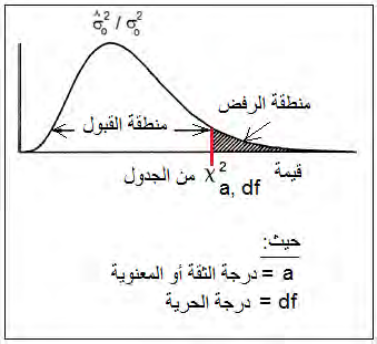
أي أن قيمة تحليل معامل التباين:

$$\hat{\sigma}_o^2 / \sigma_o^2 = 0.2812$$

مما يدل علي أن قيمة معامل التباين (ومن ثم الانحراف المعياري للأرصاد) المبدئي كانت أقل مما ينبغي، أي أن الأرصاد الأصلية كانت أدق مما توقعنا لها.

يعد الاختبار الإحصائي "مربع كاي Chai-Square" أو χ^2 هو الذي يتم استخدامه لبيان العلاقة الإحصائية بين معامل التباين المبدئي و معامل التباين المضبوط، ويسمي هذا الاختبار

علي نتائج ضبط الشبكات باختبار درجة التوافق Goodness of Fit. يعتمد هذا الاختبار علي مقارنة قيمة تحليل معامل التباين $\hat{\sigma}_o^2 / \sigma_o^2$ لشبكة معينة مع القيمة المفترضة من الجداول الإحصائية للاختبار، ومن ثم إن كانت النتيجة متوافقة فأن الاختبار يكون مقبول أو ناجح Pass أو يكون الاختبار مرفوض أو غير ناجح Fail في الحالة الأخرى.

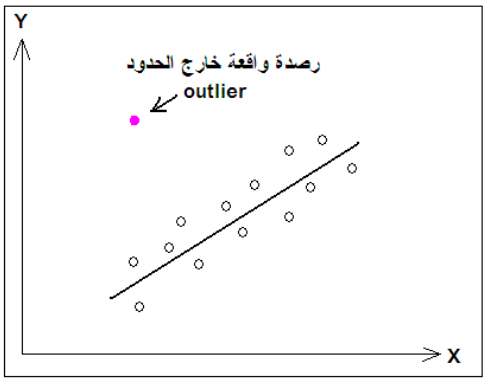


شكل (١٧-١٠) اختبار درجة التوافق أو اختبار مربع كاي

معظم البرامج التجارية software الخاصة بضبط الشبكات الجيوديسية (وخاصة برامج الجي بي أس) تعطي نتيجة هذا الاختبار ضمن نتائج عملية الضبط، ومن ثم يجب علي المستخدم معرفة نتيجة الاختبار وكيفية التعامل معها. كما سبق الذكر أن عدم نجاح هذا الاختبار يعد إنذارا لمراجعة البيانات الأصلية للشبكة ومعادلاتها، فان تأكد المستخدم أن كل هذه الخطوات سليمة فليس أمامه إلا تغيير قيمة معامل التباين المبدئي σ_o^2 بحيث يكون متوافقا مع القيمة المضبوطة الناتجة من الضبط $\hat{\sigma}_o^2$ ثم يعيد عملية ضبط الشبكة مرة أخري حتى ينجح هذا الاختبار.

تحليل الأرصاد الشاذة Outliers Analysis

الأرصاد الشاذة أو الأرصاد الواقعة خارج الحدود هي أرصاد لها أخطاء متبقية Residuals تقع خارج (من هنا جاء أسمها Out Lay or Outliers) حدود ثقة معينة متوقعة لها. لنأخذ مثال بسيط: إذا قسنا مسافة عدد من المرات وكانت قيمها هي ١١.٢٤ ، ١١.٢١ ، ١١.٢٧ ، ١١.٢٨ ، ١١.٢٣ ، ١٧.٨٨ متر. من الواضح أن القياسات الخمسة الأولي قريبة جدا من بعضها البعض بينما الرصدة الأخيرة بعيدة جدا عنهم. مما يجعلنا نشك أن هذا القياس الأخير حدث به خطأ ضخم سواء نتيجة الجهاز المستخدم أو الراصد أو الظروف الجوية لعملية الرصد ذاتها ، وهذا ما نطلق عليه "الرصدة الشاذة أو الرصدة الواقعة خارج الحدود outlier". فإذا قمنا بحساب المتوسط باستخدام جميع الأرصاد فستكون قيمته غير دقيقة ، بينما المنطقي أن يتم استبعاد هذه الرصدة الخاطئة وحساب المتوسط باستخدام الأرصاد الخمسة الأولي فقط. وعلي سبيل المثال إن كان لدينا رصدة وكان الخطأ المتبقي لها (أي التصحيح) $\hat{V}$ الناتج من عملية الضبط ٠.٠١ متر – مثلا – لكن الانحراف المعياري لهذا التصحيح $\hat{\sigma}_{\hat{V}}$ كان ± ٠.٠٣ متر. في هذه الحالة تكون هذه الرصدة مشكوكا في مصداقيتها حتى إن كانت قيمة التصحيح (الخطأ المتبقي) صغيرة في حد ذاتها، إلا أن انحرافه المعياري أكبر من قيمته ذاتها. تأتي خطورة الأرصاد الشاذة من أنها **تؤثر** علي باقي أرصاد الشبكة وتقلل من دقة النتائج النهائية الناتجة من عملية الضبط. من هنا لا بد من اكتشاف هذه الأرصاد الشاذة و حذفها من الشبكة الجيوديسية.



شكل (١٧-١١) الأرصاد الشاذة أو الواقعة خارج الحدود

أهتم علماء الجيوديسيا بعملية اكتشاف الأرصاد الشاذة من خلال ابتكار اختبارات إحصائية خاصة لتحليل نتائج ضبط الشبكات، مثل طريقة فحص البيانات Data Snooping للعالم Barada من خلال تطبيق الاختبار الإحصائي t-Test في عام ١٩٦٨م، و طريقة اكتشاف الأرصاد الشاذة Outlier Detection من خلال تطبيق اختبار تاو Tau Test للعالم Pope في عام ١٩٧٦م. يعتمد اختبار تاو علي حساب قيمة حاصل قسمة القيمة المطلقة للخطأ المتبقي لأي رصدة علي قيمة انحرافه المعياري $|\hat{v}| / \hat{\sigma}_{\hat{v}}$ (ويسمي الخطأ المتبقي المعياري Standardized Residual) ومقارنتها بالقيمة المتوقعة من الجداول الإحصائية الخاصة بهذا الاختبار. فان كان الخطأ المتبقي المعياري أكبر من القيمة الإحصائية المتوقعة له فهذا يدل علي أن هذه الرصدة هي رصدة شاذة outlier ويجب حذفها من أرصاد الشبكة وإعادة عملية الضبط مرة أخري.

معظم البرامج التجارية software الخاصة بضبط الشبكات الجيوديسية (وخاصة برامج الجي بي أس) تعطي نتيجة هذا الاختبار ضمن نتائج عملية الضبط، ومن ثم يجب علي المستخدم معرفة نتيجة الاختبار وكيفية التعامل معها. وتتكون خطوات تحليل الأرصاد و نتائج الضبط من:

- إجراء الضبط الأولي باستخدام جميع أرصاد الجي بي أس.
- إذا أشارت نتائج الاختبار الإحصائي لوجود عدد من الأرصاد الواقعة خارج الحدود outliers فلا نحذفها كلها ، إنما نحذف فقط الرصدة ذات أكبر قيمة من نتائج الاختبار. السبب في ذلك أن رصدة واحدة خاطئة من الممكن أن تؤثر علي أرصاد أخري سليمة أو دقيقة ، ومن هنا فأن حذف كل الأرصاد التي تظهر في نتائج الاختبار سيقلل من عدد الأرصاد في الشبكة بصورة غير ضرورية مما سيقلل من جودة الحل النهائي للشبكة.
- نعيد إجراء ضبط الشبكة مرة أخري للحصول علي نتائج جديدة سواء للإحداثيات أو للاختبار الإحصائي أيضا.
- تتكرر هذه العملية عدد من المرات حتى نصل في الخطوة الأخيرة إلي عدم وجود أية أرصاد واقعة خارج الحدود علي الإطلاق.
- نعتمد إحداثيات آخر عملية ضبط لتكون الإحداثيات النهائية الدقيقة لشبكة الجي بي أس.

الفصل الثامن عشر

مقدمة عن النظام العالمي لتحديد المواقع

١٨-١ مقدمة

النظام العالمي لتحديد المواقع Global Positioning System (أو اختصارا GPS) هو نظام لتحديد المواقع و الملاحة وتحديد الزمن تم تصميمه و يدار بواسطة وزارة الدفاع الأمريكية. ويقدم هذا النظام العديد من المميزات التي جعلته التقنية الاساسية حول العالم في تجميع البيانات المكانية، وتشمل:

- متاح طوال ٢٤ ساعة يوميا ليلا و نهارا وعلي مدار العام كله.
- يغطي جميع أنحاء الأرض.
- لا يتأثر بأية ظروف مناخية مثل درجات الحرارة و المطر و الرطوبة والرعد و البرق و العواصف.
- الدقة العالية في تحديد المواقع لدرجة تصل إلي ملليمترات في بعض التطبيقات و طرق الرصد الجيوديسية أو دقة أمتار قليلة (٥.٢ متر في المتوسط) للتطبيقات الملاحية.
- الوفرة الاقتصادية بحيث أن تكلفة استخدام الجي بي أس تقل بنسبة أكبر من ٢٥% بالمقارنة بأي نظام ملاحي أرضي أو فضائي آخر.
- لا يحتاج لخبرة تقنية متخصصة لتشغيل أجهزة الاستقبال (وخاصة المحمولة يدويا) لدرجة أن بعض مستقبلات الجي بي أس أصبحت تدمج في الساعات اليدوية و أجهزة الاتصال التليفوني.

تتعدد التطبيقات المدنية لتقنية الجي بي أس بصورة كبيرة في مجالات متعددة مثل: الملاحة البرية وتحديد مواقع المركبات المتحركة في الشوارع بغرض زيادة كفاءة النقل البري، الملاحة الفضائية و تحديد مواقع المركبات الفضائية الخارجية ، الملاحة الجوية وتحديد مواقع الطائرات أثناء الهبوط و الإقلاع و طوال مسار الرحلات الجوية ، الزراعة ورسم خرائط التربة وإرشاد الجرارات الزراعية أثناء عملها ، الملاحة البحرية وتحديد مواقع السفن طوال مسار الرحلة ، السكك الحديدية والتحديد الدقيق لمواقع القطارات بهدف تحسين مستوي السلامة والأمان و كفاءة التشغيل ، التطبيقات البيئية مثل تحديد مواقع محطات قياس المد و الجزر وربط بياناتها علي المستوي العالمي بغرض مراقبة ظاهرة ارتفاع منسوب سطح البحر وكذلك مراقبة حركة التسربات من حاملات البترول و مراقبة و رسم خرائط لمناطق حرائق الغابات ، السلامة العامة و الغوث من الكوارث الطبيعية وخاصة في استخدامات فرق البحث و الإنقاذ للمناطق التي تعرضت لمثل هذه الكوارث وأيضا الاستجابة السريعة لحالات الطوارئ ، تطبيقات قياس و تزامن الوقت مثل دمج بيانات محطات رصد مواقع الزلازل وكذلك ضبط تزامن أجهزة الكمبيوتر للبنوك العالمية متعددة الفروع وأيضا لشركات توزيع الكهرباء ، بالإضافة لمجال الهندسة المساحية و إنشاء الخرائط.

أيضا تعددت التطبيقات المساحية لتقنية الجي بي أس بصورة كبيرة في السنوات الماضية وتشمل بعضها:

- إنشاء الشبكات الجيوديسية للثوابت الأرضية الدقيقة وتكثيف الشبكات القديمة منها (عن طريق إضافة محطات جديدة لها).
- رصد تحركات القشرة الأرضية.
- رصد إزاحة أو هبوط المنشئات الحيوية كالكباري و الجسور و السدود و القناطر.
- أعمال الرفع المساحي التفصيلي و الطبوغرافي.
- إنتاج خرائط طبوغرافية و تفصيلية دقيقة و في صورة رقمية.
- تحديد المواقع لعلامات الضبط الأرضي للصور الجوية و المرئيات الفضائية لنظم الاستشعار عن بعد.
- تطبيقات المساحة التصويرية الأرضية Close-Range Photogrammetry.
- تطوير نماذج الجيويد الوطنية بالتكامل مع أسلوب الميزانية الأرضية.
- تجميع البيانات المكانية عند استخدام تقنية نظم المعلومات الجغرافية، وخاصة لتطبيقات تحديد مواقع الخدمات المدنية Location-Based Services وتطبيقات النقل الذكي Intelligent Transportation وأيضا تطبيقات نظم معلومات الأراضي Land Information Systems أو LIS.
- الربط بين المراجع الجيوديسية المختلفة للدول في حالات المشروعات الحدودية المشتركة.
- نظم الخرائط المحمولة Mobile Mapping Systems أو MMS.
- الرفع الهيدروجرافي و تطوير الخرائط البحرية و النهرية.
- تثبيت و توثيق مواقع العلامات الحدودية بين الدول.
- بدمج تقنيتي الجي بي أس و نظم المعلومات الجغرافية أمكن إنتاج خرائط رقمية و قواعد بيانات محمولة يدويا للمدن بكافة تفاصيلها و خدماتها.

شكل (١٨-١) بعض مجالات تطبيقات الجي بي أس

١٨-٢ نبذة تاريخية

قبل بدء عصر الأقمار الصناعية توصل العلماء إلي طريقة جديدة لتحديد المواقع بالاعتماد علي الموجات الراديوية أو الكهرومغناطيسية ، وكان المبدأ الأساسي في هذه الطريقة هو قياس الزمن الذي تستغرقه الموجه الراديوية في الرحلة ذهابا و عودة بين محطة البث أو الإرسال Transmitting Station وجهاز الاستقبال Receiver. فإذا استخدمنا القاعدة العلمية المعروفة:

المسافة = السرعة × الزمن

وباعتبار أن سرعة الموجة تعادل سرعة الضوء (حوالي ٣٠٠ ألف كيلومتر في الثانية) فيمكننا حساب المسافة بين محطة الإرسال و جهاز المستقبل. لكن يتبادر إلي الأذهان السؤال التالي: كيف يمكن لهذه الفكرة - أو هذه المسافة التي يمكن حسابها – أن تستخدم في تحديد موقع شخص معين؟ الإجابة سهلة و تتكون من (شكل ١٨-٢):

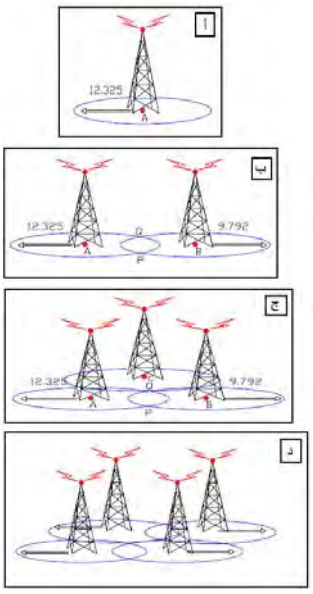
نفترض أن برج إرسال قد تم وضعه فوق نقطة معلومة الموقع ولتكن نقطة A علي سطح الأرض ، ونحن لدينا وحدة أو جهاز استقبال لهذه الموجات الراديوية في موقع ما غير معلوم. عند فتح جهاز الاستقبال وقياس (أو حساب) المسافة بين هذا الموقع المجهول و المحطة أو البرج عند A وجدنا أنها تساوي ١٢.٣٢٥ متر مثلا. إن هذه المعلومة (شكل ١٨-٢ أ) لا تخبرنا أين موقعنا بالضبط ولكنها تقرب موقعنا إلي أي نقطة علي محيط الدائرة التي نصف قطرها يساوي ١٢.٣٢٥ متر حول برج الإرسال A (وهو البرج المعلوم موقعه مسبقا).

الآن نفترض أننا قمنا بتثبيت برج إرسال ثاني فوق نقطة معلومة أيضا ولتكن B علي سطح الأرض، و بنفس الطريقة قمنا بحساب (أو قياس) المسافة بواسطة جهاز استقبال الموجات الراديوية فكانت تساوي ٩.٧٩٢ متر.هذه المعلومة الجديدة تخبرنا أيضا أننا نقع علي محيط دائرة مركزها نقطة B ونصف قطرها يساوي ٧.٧٩٢ متر. أي أننا موجودين علي بعد ١٢.٣٢٥ متر من نقطة A وأيضا علي بعد ٩.٧٩٢ متر من نقطة B. وهذا يؤدي بنا أننا نقع عند تقاطع هاتين الدائرتين ، أما عند نقطة P أو عند نقطة Q (شكل ١٨-٢ ب). أي أننا نستخلص أن وجود برجين إرسال يمكننا من تحديد احتمال موقع من موقعين ، ولا يخبرنا بالضبط أين نحن.

نحتاج الآن لبرج إرسال ثالث يتم وضعه عند نقطة معلومة و لتكن C علي سطح الأرض ، و بنفس الطريقة نقوم بحساب (أو قياس) المسافة بواسطة جهاز استقبال الموجات الراديوية. هذه المسافة الثالثة ستخبرنا بكل تأكيد هل نحن عند النقطة P أو عند النقطة Q (شكل ١٨-٢ ج).

فإذا كانت الأبراج أو محطات الإرسال الثلاثة تعمل باستمرار وفي نفس الوقت ، فأن أي جهاز استقبال لهذه الموجات الراديوية سيستقبل الإشارات المرسلة من المحطات الثلاثة و يمكنه بسرعة تحديد موقعه في هذه اللحظة. فإذا كان جهاز الاستقبال هذا متحركا (أي موجود علي سفينة مثلا) فأنه باستطاعته تحديد موقعه باستمرار عند كل لحظة في مسيرته. فإذا أضفنا برج إرسال رابع فأن

هذه المنظومة ستكون ذات كفاءة عالية لان البرج الرابع سيكون حكما للوثوق في إشارات الأبراج الثلاثة الأساسية كما أنه سيكون احتياطيا في حالة عدم استقبال الإشارات من أيا من الأبراج الثلاثة (شكل ١٨-٢ د). وتسمي هذه الطريقة لتحديد المواقع بنظم الملاحة الراديوية Radio Navigation Systems.

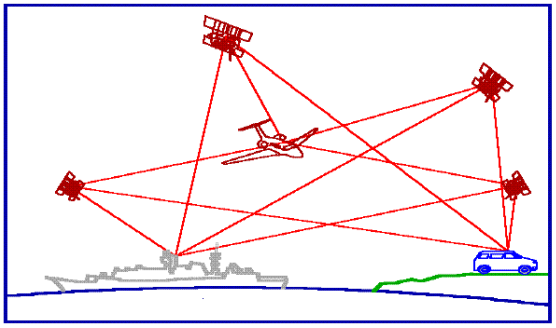


شكل (١٨-٢) الملاحة الراديوية و تحديد المواقع

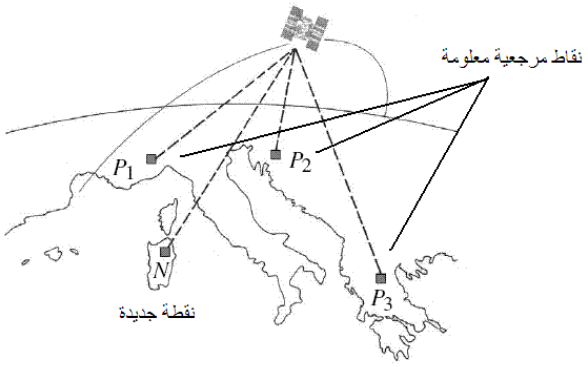
ومن أمثلة هذه النظم الراديوية لتحديد المواقع نظام لوران LORAN وهو اختصارا لاسم "الملاحة للمساحات الشاسعة LOng RAnge Navigation" والذي بدأ في الولايات المتحدة الأمريكية تقريبا في عام ١٩٥٠ ويهدف أساسا لمساعدة السفن في إبحارها. تكون نظام لوران من عدد من السلاسل (السلسلة مكونة من ٤ أبراج إرسال تغطي كل محطة أو برج حوالي ٥٠٠ ميل) ليمكن تغطية الساحل الغربي الأمريكي كله. لكن هذه النظم الملاحية كان لها بعض العيوب أو المعوقات مثل: (١) أي نظام سيكون ذو تغطية محدودة تبلغ حوالي ٥% من سطح الأرض وبالتالي فلن يصلح ليكون نظام ملاحة عالمي ، (٢) يستطيع هذا النظام تحديد المواقع في اتجاهين فقط – أي الموقع الأفقي – لكنه لا يمكنه تحديد الارتفاع في الاتجاه الرأسي ، (٣) دقة النظام كانت في حدود ٢٥٠ متر والتي قد يمكن اعتبارها مناسبة للملاحة البحرية لكنها غير مناسبة للملاحة الجوية – للطائرات – أو لطرق المساحة الأرضية التي تتطلب دقة أعلي في تحديد المواقع.

مع ظهور الأقمار الصناعية طبق العلماء نفس مبدأ الملاحة الراديوية في تطوير ما عرف باسم الملاحة بالأقمار الصناعية Satellite Navigation. فإذا استبدلنا محطات الإرسال الأرضية بأقمار صناعية ترسل موجات راديوية يستطيع جهاز الاستقبال أن يتعامل معها ويحسب المسافة من موقعه إلي موقع كل قمر صناعي فيمكن تحديد الموقع الذي به هذا المستقبل. ربما يتبادر إلي الأذهان الآن سؤال: أبراج الإرسال كانت ثابتة و معلومة الموقع وكنا نستخدمها كعلامات مرجعية Reference Points تمكننا من حساب موقع جهاز الاستقبال ، لكن الأقمار الصناعية غير ثابتة

فكيف سيمكن التعامل معها؟ الإجابة هي أن كل قمر صناعي يكون معلوم المدار الذي يدور عليه في الفضاء وتكون من أهم مهام الجهة المسئولة عن نظام الأقمار الصناعية أن تراقب كل قمر و تحدد موقعه بكل دقة في كل لحظة ، وبالتالي فيمكننا القول أن موقع كل قمر صناعي يكون معلوما في أي لحظة طوال ٢٤ ساعة يوميا ، أي أن كل قمر صناعي سيكون بمثابة نقطة مرجعية. وطبقا لهذا المبدأ الأساسي فيمكن اعتبار القمر الصناعي – من وجهة النظر المساحية – علي أنه هدف Target عالي الارتفاع ، بحيث إذا أمكن رصده من ثلاثة نقاط أرضية معلومة الإحداثيات فيمكن تحديد موقع نقطة مجهولة ترصد هذا القمر الصناعي في نفس اللحظة.



شكل (١٨-٣) الملاحة بالأقمار الصناعية



شكل (١٨-٤) المبدأ المساحي للملاحة بالأقمار الصناعية

تطورت نظم الملاحة بالأقمار الصناعية مع إطلاق نظام الملاحة الأمريكي Navy Navigation Satellite System الذي عرف باسم ترانزيت Transit وأيضا باسم نظام دوبلر Doppler - في الستينات من القرن العشرين الميلادي، وكان الهدف الرئيسي منه تحديد مواقع القطع البحرية في البحار و المحيطات والمعرفة الدقيقة لإحداثيات المواقع الإستراتيجية. وبالرغم من هذه الأهداف العسكرية إلا أن المهندسين المدنيين قد استخدموا هذا النظام في العديد من التطبيقات المساحية وخاصة إنشاء شبكات الثوابت الأرضية الدقيقة. أعتمد نظام الدوبلر علي عدد من الأقمار الصناعية التي تدور علي ارتفاع حوالي ١٠٠٠ كيلومتر من سطح الأرض حيث يكمل كل قمر دورة كاملة حول الأرض في مدة تبلغ ١٠٧ دقيقة وكانت دقة تحديد المواقع الأرضية اعتمادا علي هذا النظام

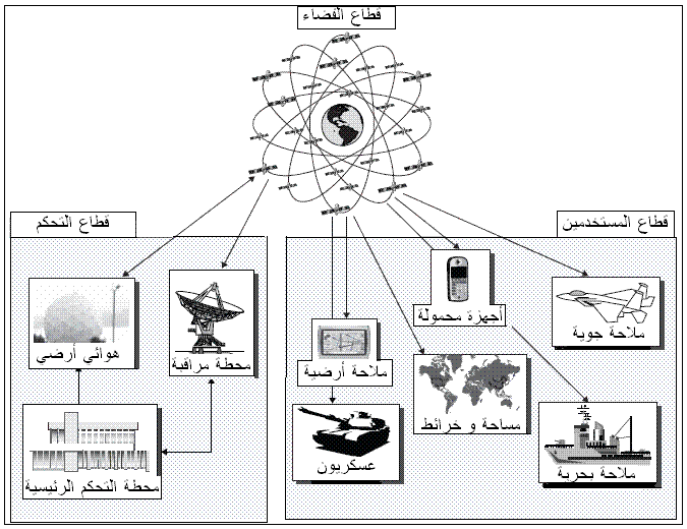
في حدود ٣٠-٤٠ متر. ومع أن أقمار الدوبلر تغطي معظم أنحاء الأرض إلا أن عددها (٦ أقمار صناعية فقط) لم يكن يسمح بتواصل الإشارات طوال ٢٤ ساعة يوميا – بل لعدة ساعات طبقا للموقع المطلوب علي الأرض – مما لم يلبي حاجة مستخدمي النظام سواء العسكريين أو المدنيين وأدي ذلك إلي بدء وزارة الدفاع الأمريكية - مع بداية السبعينات - في تطوير نظام ملاحي آخر.

مع بداية الستينات من القرن العشرين الميلادي اهتمت عدة جهات حكومية في الولايات المتحدة الأمريكية (مثل وزارة الدفاع DoD و وزارة النقل DoT وهيئة الطيران الفضاء ناسا NASA) بتطوير نظام ملاحي يعتمد علي رصد الأقمار الصناعية. وتم إطلاق نظام ترانزيت Transit في عام ١٩٦٤ ، إلا أنه سرعان ما لم يلبي حاجات القطاعين العسكري و المدني وخاصة في عنصري الدقة و الاتاحة وبدأ التفكير إما في تطوير هذا النظام أو البحث عن بديل جديد له. بدأت عدة جهات علمية و حكومية اقتراح نظم جديدة و في عام ١٩٦٩ قامت وزارة الدفاع بإنشاء برنامج جديد تحت اسم البرنامج العسكري للملاحة بالأقمار الصناعية DNSS لتوحيد الجهود وراء إطلاق نظام ملاحي جديد. وبالفعل تم اقتراح تقنية جديدة تحت اسم "النظام العالمي الملاحي لتحديد المواقع بقياس المسافة و الزمن باستخدام الأقمار الصناعية NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System" أو اختصارا باسم NAVSRAT GPS، إلا أنه عرف علي نطاق واسع – بعد ذلك – باسم النظام العالمي لتحديد المواقع أو اختصارا "جي بي أس GPS". تم إطلاق أول قمر صناعي في هذا النظام في ٢٢ فبراير ١٩٧٨ وفي ٨ ديسمبر ١٩٩٣ تم إعلان اكتمال النظام مبدئيا Initial Operational Capability (IOC) ، أما الإعلان النهائي لاكتمال النظام رسميا Fully Operational Capability (FOC) فقد كان في ٢٧ أبريل ١٩٩٥. وفي بدايته كان الجي بي أس مقصورا علي الاستخدامات العسكرية للقوات المسلحة الأمريكية وحلفاؤها حتى أعلن الرئيس الأمريكي ريجان في عام ١٩٨٤ السماح للمدنيين باستخدامه (لكن ليس جميع مميزاته أو مستوي الدقة العالية في تحديد المواقع !) ، وكان ذلك بعد حادثة إسقاط القوات المسلحة الروسية لطائرة ركاب كورية مدنية بعد دخولها بالخطأ في المجال الجوي الروسي. ويدار الجي بي أس من خلال وزارة الدفاع الأمريكية وهي الجهة المسئولة عن إطلاق الأقمار الصناعية و مراقبتها و التأكد من كفاءة تشغيلها واستبدالها كل فترة زمنية بحيث تكون إشارات هذه التقنية متاحة ٢٤ ساعة يوميا وعلي مدار كل الأيام لجميع المستخدمين علي سطح الأرض. وفي عام ١٩٩٦ تم تكوين لجنة عليا تضم عدد من الوزارات الأمريكية لكي تشرف علي نظام الجي بي إس و تضع السياسات المستقبلية اللازمة ، وسميت باللجنة التنفيذية مابين الوزارات Inter-Agency GPS Executive Board أو اختصارا IGEB (الرابط علي شبكة الانترنت في: http://www.igeb.gov/charter.shtml

١٨-٣ مكونات نظام الجي بي أس

يتكون نظام الجي بي أس من ثلاثة أجزاء أو أقسام هي:

- قسم الفضاء ويحتوي الأقمار الصناعية Space Segment.
- قسم التحكم و السيطرة Control Segment.
- قسم المستقبلات الأرضية أو المستخدمون User Segment.



شكل (١٨-٥) أقسام الجي بي أس

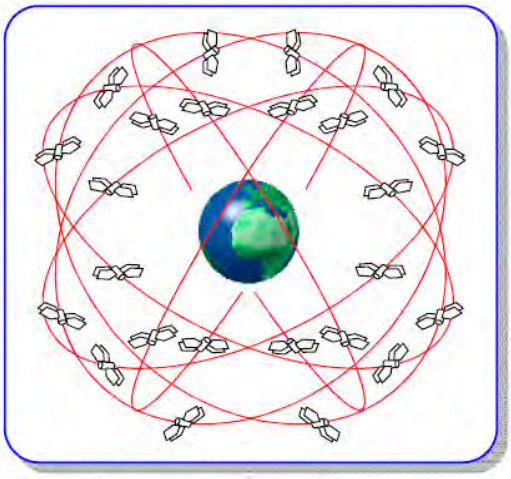
وسنستعرض الملامح الرئيسية لكل قسم من هذه الأقسام الثلاثة.

١٨-٣-١ قسم الفضاء أو الأقمار الصناعية

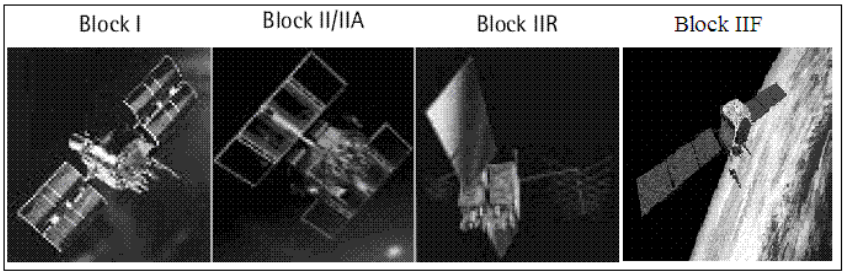
يتكون قسم الفضاء - اسميا - من ٢٤ قمرا صناعيا (٢١ قمر عامل + ٣ أقمار احتياطية spare موجودة في الفضاء) موزعة في ٦ مدارات بحيث يكون هناك ٤ أقمار صناعية في كل مدار مما يسمح بالتغطية الدائمة (أي وجود علي الأقل ٤ أقمار صناعية) لكل موقع علي سطح الأرض في أي لحظة طوال اليوم (شكل ٣-٣). وقد يصل عدد الأقمار الصناعية في وقت معين إلي ما هو أكثر من ٢٤ قمرا طبقا لخطة إطلاق الأقمار الصناعية. وتدور الأقمار الصناعية في مدارات شبه دائرية علي ارتفاع حوالي ٢٠٢٠٠ كيلومتر من سطح الأرض ليكمل كل قمر صناعي دورة كاملة حول الأرض في مدة ١١ ساعة و ٥٦ دقيقة بالتوقيت الزمني الأرضي العالمي GMT. ويتراوح وزن القمر الصناعي بين ٤٠٠ و ٨٥٠ كيلوجرام ويبلغ عمره الافتراضي (للأجيال الحديثة من الأقمار الصناعية) حوالي سبعة سنوات و نصف، ويستمد طاقته من خلال صفيحتين لالتقاط الطاقة الشمسية بالإضافة لوجود ثلاثة بطاريات احتياطية من النيكل تزوده بالطاقة عندما يمر بمنطقة ظل الأرض. ويقوم كل قمر صناعي بتوليد موجتين علي ترددين مختلفين Frequency يسموا L1 و L2 بالإضافة لشفرتين Codes و رسالة ملاحية Navigation Message يتم بثهم علي هذين الترددين. كما يحتوي كل قمر علي عدد من الساعة الذرية Atomic Watch سواء من نوع السيزيوم cesium أو الرابيديوم rubidium.

تغيرت مواصفات و كفاءة الأقمار الصناعية في نظام الجي بي أس علي مر السنوات بحيث يمكن تقسيم الأقمار إلي عدد من الأجيال (شكل ٣-٤). بدأت أقمار الجيل الأول – يسمي Block I – وعددهم ١١ قمرا مع بداية تقنية الجي بي أس منذ إطلاق القمر الأول في ٢٢ فبراير ١٩٧٨ وكان آخر أقمار هذا الجيل الذي أطلق في ٩ أكتوبر ١٩٨٥. وكان ميل مدار أقمار الجيل الأول 63^{o} علي مستوي دائرة الاستواء والعمر الافتراضي المصمم للقمر الواحد هو أربعة سنوات و نصف (إلا أن

بعضهم بقي يعمل بكفاءة لحوالي عشرة سنوات). وكان الجيل الثاني من الأقمار الصناعية Block II/IIA أكثر كفاءة من سابقه وتكون من ٢٨ قمرا صناعيا تم إطلاقها في الفترة بين فبراير ١٩٨٩ و نوفمبر ١٩٩٧ بحيث يبلغ ميل مدار القمر الصناعي ٥٥° علي دائرة الاستواء ، و زاد العمر الافتراضي للقمر الواحد إلي سبعة سنوات و نصف. ثم تعددت الأجيال الفرعية من الجيل الثاني لتصبح هناك أقمار IIR (٢١ قمر بعمر افتراضي يبلغ عشرة سنوات) وأقمار IIR-M وأقمار IIF (بعمر افتراضي يصل إلي خمسة عشر عاما) ، كما بدأ العمل في تصميم أقمار الجيل الثالث من الأقمار الصناعية Block III.



شكل (١٨-٦) قطاع الفضاء في تقنية الجي بي أس



شكل (١٨-٧) نماذج للأقمار الصناعية في نظام الجي بي أس

١٨-٣-٢ قسم التحكم و المراقبة

يتكون قسم التحكم و المراقبة من محطة التحكم الرئيسية في ولاية كلورادو الأمريكية وأربعة محطات مراقبة في عدة مواقع حول العالم. تستقبل محطات المراقبة كل إشارات الأقمار الصناعية وتحسب منها المسافات لكل الأقمار المرصودة وترسل هذه المعطيات بالإضافة لقياسات الأحوال الجوية إلي محطة التحكم الرئيسية والتي تستخدم هذه البيانات في حساب المواقع اللاحقة للأقمار وسلوك (تصحيحات) ساعاتها وبالتالي تكون الرسالة الملاحية لكل قمر صناعي. تقوم محطة التحكم

الرئيسية بعمل التصحيحات اللازمة لمدارات الأقمار الصناعية وكذلك تصحيح ساعات الأقمار ، ثم تقوم بإرسال هذه المعلومات للأقمار الصناعية (مرة كل ٢٤ ساعة) والتي تقوم بتعديل مساراتها و أزمانها وبعد ذلك ترسل هذه البيانات المصححة كإشارات إلي أجهزة الاستقبال الأرضية.

شكل (١٨-٨) قسم التحكم و السيطرة

١٨-٣-٣ قسم المستقبلات الأرضية

يضم هذا القطاع أجهزة استقبال الجي بي أس (مستخدمو النظام) التي تستقبل إشارات الأقمار الصناعية وتقوم بحساب موقع – إحداثيات – المكان الموجود به المستقبل سواء علي الأرض أو في الجو أو في البحر ، بالإضافة لسرعة واتجاه حركة المستقبل إن كان متحركا أثناء فترة الرصد. بصفة عامة يتكون جهاز الاستقبال من: هوائي مع مضخم إشارة ، وحدة تردد راديوي أو لاقط الإشارات، مولد ترددات ، وحدة تأمين الطاقة الكهربائية ، وحدة التحكم للمستخدم ، بالإضافة إلي وحدة ذاكرة لتخزين القياسات.

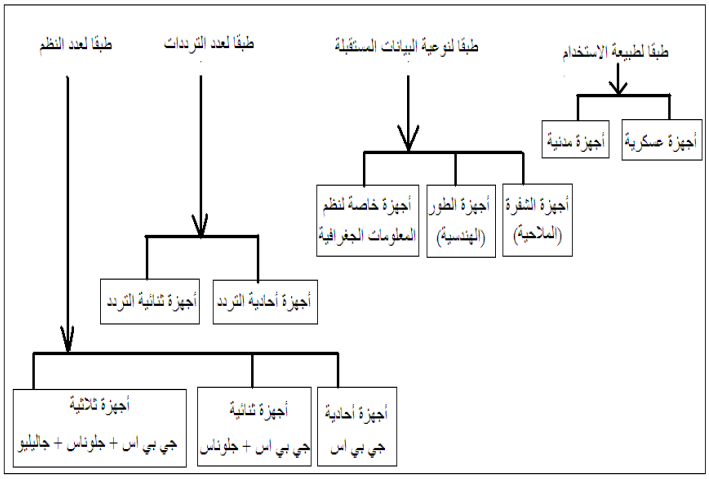
تتعدد أنواع أجهزة الاستقبال بصورة كبيرة جدا طبقا لعدد من العوامل:

أ- طبقا لطبيعة الاستخدام: توجد أجهزة استقبال عسكرية (تستطيع التعامل مع الشفرة العسكرية التي تبثها الأقمار الصناعية وتفك شفرتها للحصول علي دقة عالية جدا في حساب المواقع) وأجهزة استقبال مدنية.

ب- طبقا لنوعية البيانات المستقبلة: توجد مستقبلات تسمي بأجهزة الشفرة Code ومشهورة أيضا باسم الأجهزة الملاحية Navigation Receivers أو الأجهزة المحمولة يدويا Hand-Held Receivers ، وتوجد أجهزة تسمي بأجهزة قياس الطور Phase ومعروفة أيضا باسم الأجهزة الهندسية أو الجيوديسية Geodetic Receivers ، وظهرت حديثا الفئة الثالثة من الأجهزة والتي أطلق عليها أجهزة تجميع البيانات لنظم المعلومات الجغرافية GIS-Specific Receivers.

ج- <u>طبقا لعدد الترددات:</u> توجد أجهزة تستقبل تردد واحد من الترددين الذين تبثهما الأقمار الصناعية وتسمي أجهزة أحادية التردد Single-Frequency Receivers أو أجهزة التردد الأول L1-Receivers ، وأجهزة ثنائية التردد Dual-Frequency Receivers التي تستطيع استقبال كلا ترددي الجي بي أس L1 and L2 (وهي أغلي قليلا من الأجهزة أحادية التردد).

د- <u>طبقا لعدد النظم:</u> هناك أجهزة تتعامل فقط مع إشارات نظام الجي بي أس ، وأجهزة ثنائية النظام تستقبل الإشارات من كلا من الجي بي أس و النظام الملاحي الروسي جلوناس، وأجهزة ثلاثية النظم حيث يمكنها أيضا استقبال إشارات النظام الملاحي الأوروبي جاليليو عند بدء العمل به،



شكل (١٨-٩) أنواع أجهزة استقبال الجي بي أس

شكل (١٨-١٠) بعض أجهزة استقبال الجي بي أس

الفصل التاسع عشر

اشارات و بيانات الجي بى أس

١٩-١ مقدمة

يهدف هذا الفصل الي التعرف بصورة تفصيلية عن خصائص اشارات النظام العالمي لتحديد المواقع، وأيضا أنواع بيانات هذه التقنية.

١٩-٢ تركيب الاشارات

يقوم كل قمر صناعي من أقمار الجي بي أس بإرسال إشارتين راديوتين علي ترددين carrier frequencies ومحمل عليهما نوعين من الشفرات الرقمية digital codes بالإضافة لرسالة ملاحية navigation message. يبلغ تردد الإشارة الأولي – تسمي L1 – ١٥٧٥.٤٢ ميجاهرتز بينما يبلغ تردد الإشارة الثانية – تسمي L2 – ١٢٢٧.٦٠ ميجاهرتز. كما يبلغ طول الموجة wavelength لتردد L1 ١٩ سنتيمتر بينما يبلغ ٢٤.٤ سنتيمتر لتردد L2. السبب الرئيسي وراء وجود ترددين صادرين من كل قمر صناعي هو تقدير و حساب الخطأ الذي تتعرض له الإشارات عند مرورها في طبقات الغلاف الجوي. أما طريقة وضع modulation الشفرة علي التردد الحامل له فتختلف من قمر صناعي لآخر حتى يتم تقليل أخطاء تداخل الإشارات.

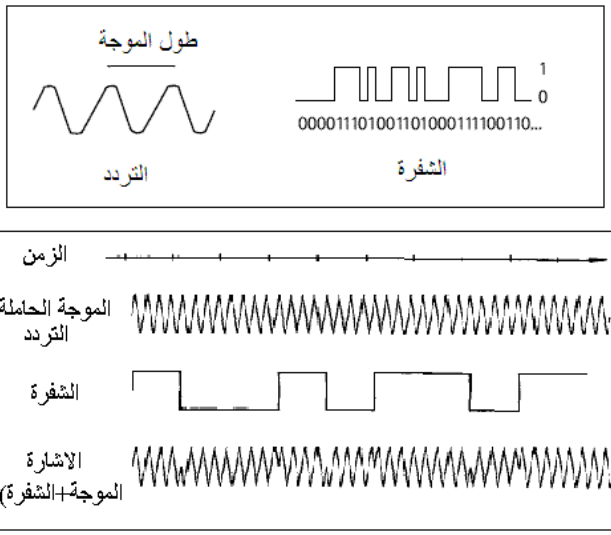
الشفرة الأولي تسمي شفرة الحصول الخشن Coarse-Acquisition Code وترمز لها بالرمز C/A وأحيانا نسميها الشفرة المدنية (لأنها المتاحة للأجهزة المدنية للتعامل معها وقراءة محتوياتها)، بينما الشفرة الثانية تسمي الشفرة الدقيقة Precise Code ويرمز لها بالرمز P والبعض يطلق عليها أحيانا اسم الشفرة العسكرية (لان التعامل معها وقراءتها لا يتم إلا باستخدام أجهزة استقبال خاصة غير متاحة إلا لأفراد الجيش الأمريكي). تتكون كل شفرة من سيل من الأرقام صفر و واحد ، ولذلك تعرف الشفرة بمصطلح الضجة العشوائية الزائفة Pseudo Random Noise أو PRN لان الشفرة تشبه الإشارة العشوائية ، لكن في الحقيقة فأن الشفرة يتم توليدها من خلال نموذج رياضي وليست عشوائية. تحمل شفرة C/A علي التردد الأول L1 فقط بينما تحمل الشفرة P علي كلا الترددين L1, L2. تجدر الإشارة – دون الدخول في تفاصيل فنية معقدة – أن الشفرة P أدق كثيرا من الشفرة C/A ولذلك فقد تم منع إمكانية قراءتها من قبل المستخدمين المدنيين منذ فبراير ١٩٩٤ وقصرها فقط علي التطبيقات العسكرية للولايات المتحدة الأمريكية و حلفاؤها (عن طريق إضافة قيم مجهولة لها تسمي W-code بحيث تتغير الشفرة من P إلي ما يسمي الشفرة Y-code).

وبذلك يمكن القول أن نظام الجي بي أس يقدم نوعين من الخدمات:

- خدمة التحديد القياسي للمواقع Standard Positioning Service أو اختصارا SPS والتي تعتمد علي استقبال و قراءة واستخدام البيانات من الشفرة المدنية C/A ، ولذلك تسمي هذه الخدمة بالخدمة المدنية.

- خدمة التحديد الدقيق للمواقع Precise Positioning Service أو اختصارا PPS والتي تعتمد علي استقبال و قراءة واستخدام البيانات من الشفرة الدقيقة P ولذلك تسمي هذه الخدمة بالخدمة العسكرية.

تتكون الرسالة الملاحية لكل قمر صناعي من مجموعة من البيانات ، وهي تضاف علي كلا الترددين L1, L2. تحتوي بيانات الرسالة الملاحية علي إحداثيات القمر الصناعي ، معلومات عن حالة و كفاءة القمر (صحة القمر satellite health) وأيضا الأقمار الأخرى ، تصحيح خطأ ساعة القمر ، الإحداثيات المتوقعة أو المحسوبة للقمر الصناعي (ولباقي الأقمار) في الفترة المستقبلة وتسمي almanac ، بالإضافة لبيانات عن الغلاف الجوي.



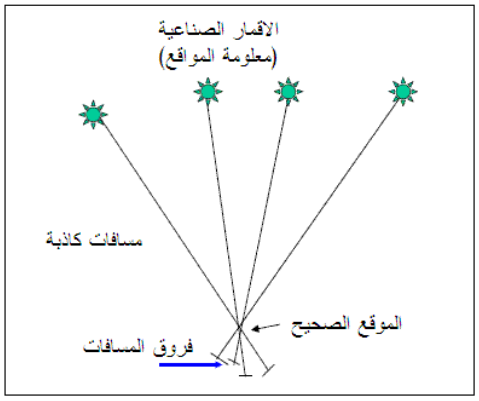
شكل (١٩-١) التردد و الشفرة في إشارات الأقمار الصناعية

١٩-٣ أرصاد الجي بي أس

إن دراسة الأرصاد (أساليب القياس) التي يوفرها نظام الجي بي أس من الأهمية لمستخدم هذه التقنية حتى يلم بطرقها المختلفة ودقة تحديد الموقع الممكن الوصول إليها في كل نوع من الأرصاد المستخدمة. يوفر نظام الجي بي أس أربعة أنواع من الأرصاد (أو طرق قياس المسافات بين جهاز الاستقبال و الأقمار الصناعية) إلا أن نوعين فقط هما الشائعي الاستخدام والمطبقين في أجهزة الاستقبال ، وهما المسافة الكاذبة باستخدام الشفرة (البعض يسميها أشباه المسافات) و فرق طور الإشارة الحاملة. تختلف دقة تحديد المواقع بدرجة كبيرة جدا باختلاف نوع الأرصاد ، فالأجهزة الملاحية تطبق طريقة المسافة الكاذبة ودقتها في حساب الإحداثيات بحدود عدة أمتار بينما تطبق الأجهزة الجيوديسية أسلوب فرق طور الإشارة الحاملة لتصل إلي مستوي عدة سنتيمترات في دقة تحديد المواقع. وسنتعرض لكلا نوعي الأرصاد في الأجزاء التالية.

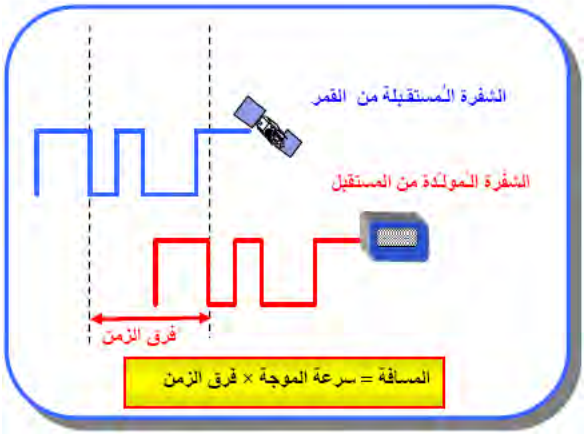
١٩-٣-١ أرصاد المسافة الكاذبة باستخدام الشفرة

يعتمد هذا الأسلوب أو هذا النوع من أرصاد الجي بي أس علي الفكرة البسيطة التي تعرضنا إليها في الفصل الثالث وهي أن المسافة بين جهاز الاستقبال و القمر الصناعي تساوي سرعة الإشارة مضروبة في الزمن المستغرق. لكن بسبب وجود عدة مصادر للأخطاء فأن هذه المسافة المحسوبة لن تساوي المسافة الحقيقية بين القمر الصناعي و جهاز الاستقبال ، ولذلك تسمي المسافة الكاذبة Pseudorange.



شكل (١٩-٢) مبدأ المسافات الكاذبة

لقياس المسافة الكاذبة يقوم جهاز الاستقبال بتطوير شفرة داخله (سواء الشفرة المدنية C/A أو الشفرة العسكرية الدقيقة P طبق لنوع جهاز الاستقبال ذاته) مماثلة للشفرة التي يستقبلها من القمر الصناعي. بمقارنة كلا الشفرتين يمكن حساب فرق الزمن الذي استغرقته الإشارة منذ صدورها من القمر الصناعي وحتى وصولها لجهاز الاستقبال ، ومن ثم يمكن حساب قيمة المسافة الكاذبة.



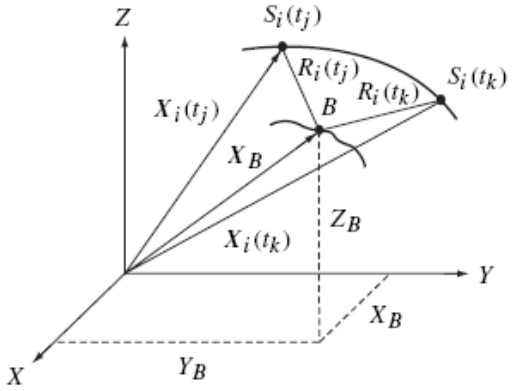
شكل (١٩-٣) طريقة قياس المسافة الكاذبة باستخدام الشفرة

يمكن التعبير عن المسافة الكاذبة بدلالة إحداثيات كلا من القمر الصناعي (الإحداثيات المعلومة) وجهاز الاستقبال (الإحداثيات المطلوب حسابها) بالمعادلة التالية:

$$PR_i = ((X_i-X_B)^2 +(Y_i-Y_B)^2 +(Z_i-Z_B)^2)^{1/2} + c\ dt_u \qquad (19\text{-}1)$$

حيث:

PR_i المسافة الكاذبة المقاسه بين القمر الصناعي i وجهاز الاستقبال B.
(X_i , Y_i , Z_i) إحداثيات القمر الصناعي.
(X_B , Y_B , Z_B) إحداثيات جهاز الاستقبال.
c سرعة الضوء.
dt_u خطأ التزامن بين زمن نظام الجي بي أس و ساعة جهاز الاستقبال.



شكل (١٩-٤) العلاقات الهندسية في أرصاد المسافات الكاذبة

طبقا لوجود العديد من مصادر الأخطاء التي تؤثر علي إشارات الأقمار الصناعية فأن المعادلة (١٩-١) غير دقيقة و يجب أن تصبح:

$$PR_i = ((X_i-X_B)^2 +(Y_i-Y_B)^2 +(Z_i-Z_B)^2)^{1/2} + c\ dt_u + \delta \qquad (19\text{-}2)$$

حيث δ يضم تأثيرات أخطاء الأيونوسفير و التروبوسفير و باقي الأخطاء الأخرى الطبيعية منها و العشوائية.

برصد ٤ أقمار صناعية (علي الأقل) يمكن تكوين ٤ معادلات من النوع (١٩-٢) وحلهم آنيا لحساب قيم إحداثيات جهاز الاستقبال.

من أهم مميزات ها النوع من أرصاد تقنية الجي بي أس أنه لا يتطلب مواصفات تقنية عالية تدخل في تصنيع أجهزة الاستقبال ، فاستخدام الشفرة لا يتطلب أجزاء الكترونية متقدمة وبالتالي فأن سعر

جهاز الاستقبال لن يكون غاليا. ومن هنا فأن جميع أجهزة الاستقبال الملاحية Navigation أو المحمولة يدويا Hand-Held تطبق أسلوب المسافة الكاذبة باستخدام الشفرة في تحديد المواقع.

علي الجاني الآخر فأن أهم عيوب هذا النوع من أرصاد الجي بي أس يتمثل في أن الدقة المتوقعة لتحديد المواقع بهذا الأسلوب لن تكون عالية الدقة. يمكن تقدير دقة أرصاد المسافة الكاذبة بقيم تتراوح بين ±٦ متر (عند انحراف معياري 1σ أي بنسبة احتمال تبلغ ٦٨.٣%) و ±١٩ متر (عند انحراف معياري 3σ أي بنسبة احتمال تبلغ ٩٩.٧%) للإحداثيات الأفقية ، بينما ستكون الدقة أكبر من هذه الحدود في الاحداثي الرأسي (من ±١١ إلي ±٤٢ متر). وبالطبع فقد تكون هذا الدقة في تحديد المواقع مناسبة للأعمال الاستكشافية و الجغرافية والخرائط ذات مقياس الرسم الصغير و بعض تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية ، إلا أنها دقة غير مناسبة للأعمال المساحية و الجيوديسية.

تجدر الإشارة إلي أن هذا النوع من أرصاد الجي بي أس يسمي أيضا التحديد المطلق للنقطة Absolute Point Positioning حيث أنه يعتمد علي استخدام جهاز استقبال واحد فقط لتحديد موقع أو إحداثيات النقطة المرصودة في نفس لحظة رصدها.

١٩-٣-٢ أرصاد فرق طور الإشارة الحاملة

يقوم جهاز الاستقبال (الجيوديسي النوع) بتطوير موجة داخلية ثابتة تشبه الموجة التي يبثها القمر الصناعي ، ثم يقوم بمقارنة طور phase كلا الموجتين عن طريق قياس فرق الطور carrier phase or carrier beat phase والذي يكون دالة في المسافة بين القمر الصناعي و جهاز الاستقبال في لحظة الرصد. لكن هذا الفرق في الطور يتكون من جزأين: (١) العدد الصحيح integer للموجات الكاملة ، (٢) أجزاء الموجات عند كلا من جهاز الاستقبال و القمر الصناعي. وهنا تأتي أهم المشاكل التي تواجه نوع هذه الأرصاد: جهاز الاستقبال يستطيع وبكل دقة قياس أجزاء الموجات لكنه لا يستطيع تحديد عدد الموجات الكاملة. ومن ثم فأن العدد الصحيح للموجات الكاملة ويسمي الغموض الصحيح Integer Ambiguity أو اختصارا الغموض Ambiguity (N') يتم اعتباره قيمة مجهولة مطلوب حسابها أثناء إجراء حسابات تحديد المواقع.

فرق الطور Φ_B عند جهاز الاستقبال B هو الفرق بين طور الإشارة الملتقطة من القمر الصناعي Φ_{CR} وطور الإشارة الثابتة المولدة في جهاز الاستقبال Φ_o:

$$\Phi_B = \Phi_{CR} - \Phi_o \qquad (19\text{-}3)$$

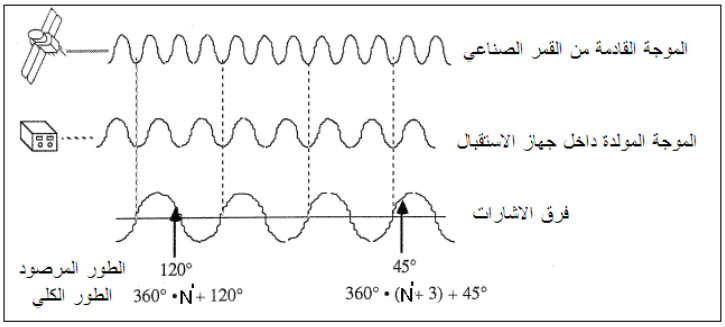
والذي يمكن كتابته بصورة أخري كالآتي:

$$\Phi_{CR} = (2\pi / \lambda') (| X_i - X_B | - N'_{Bi} \lambda + c\, dt_U) \qquad (19\text{-}4)$$

حيث:
X_i متجه vector موقع القمر الصناعي

X_B متجه vector موقع جهاز الاستقبال
λ' طول الموجة الحاملة (١٩ سم للموجة الأولي L1 ، ٢٤ سم للموجة الثانية L2).
c سرعة الضوء.
dt_u خطأ التزامن بين زمن نظام الجي بي أس و ساعة جهاز الاستقبال.
N' هو الغموض أو عدد الموجات الصحيحة.

شكل (١٩-٥) أرصاد فرق طور الموجة الحاملة



شكل (١٩-٦) كيفية قياس فرق طور الموجة الحاملة

أيضا وبسبب وجود العديد من مصادر الأخطاء التي تؤثر علي إشارات الأقمار الصناعية فأن المعادلة (١٩-٤) غير دقيقة تماما و يجب أن تصبح:

$$\Phi_{CR} = (2\pi / \lambda) (| X_i - X_B | - N'_{Bi} \lambda' + c\, dt_U) + \delta \qquad (19\text{-}5)$$

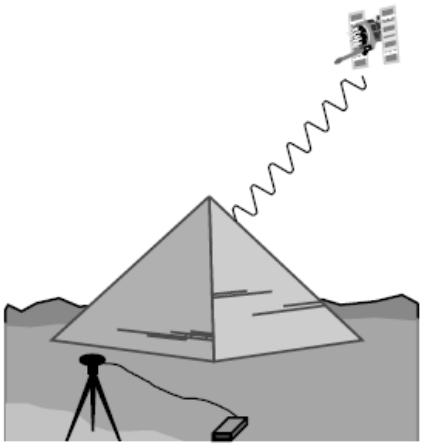
حيث δ يضم تأثيرات أخطاء الأيونوسفير و التروبوسفير و باقي الأخطاء الأخرى الطبيعية منها و العشوائية.

من عيوب ها النوع من أرصاد تقنية الجي بي أس أنه يتطلب مواصفات تقنية عالية تدخل في تصنيع أجهزة الاستقبال ، فتوليد موجة داخل أجهزة الاستقبال يتطلب أجزاء الكترونية متقدمة وبالتالي فأن سعر جهاز الاستقبال سيكون غاليا مقارنة بأجهزة قياس المسافات الكاذبة. ومن هنا فأن

أجهزة الاستقبال الملاحية Navigation أو المحمولة يدويا Hand-Held لا تطبق هذا الأسلوب، إنما هو فقط مطبق في تحديد المواقع باستخدام الأجهزة الجيوديسية.

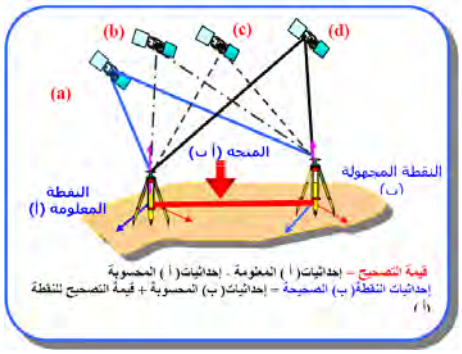
علي الجاني الآخر فأن أهم مميزات أرصاد الجي بي أس باستخدام فرق طور الإشارة الحاملة يتمثل في أن الدقة المتوقعة لتحديد المواقع بهذا الأسلوب تكون عالية. فالقاعدة العامة أن أقل مسافة يمكن قياسها بهذا النوع من الأرصاد = (٣٦٠/٢) من طول الموجة ، فمثلا طول موجة التردد الأول L1 = ١٩ سنتيمتر ، مما يسمح لنا بقياس مسافات تصل إلي ١ ملليمتر. وبالطبع فأن هذا المستوي العالي من الدقة في تحديد المواقع مناسبة للأعمال المساحية و الجيوديسية.

أيضا من المشكلات التي تواجه عملية تحديد المواقع باستخدام فرق طور الموجة الحاملة: تحديد قيمة الغموض المجهول 'N وأيضا تأثير مصادر الأخطاء الأخرى δ في المعادلة (١٩-٥). كما أن الغموض سيظل ثابت القيمة طالما أستمر جهاز الجي بي أس في استقبال الموجة القادمة من هذا القمر الصناعي ، بينما إذا أنقطع هذا الاستقبال (بسبب أي عوائق منعته من الوصول لجهاز الاستقبال) فأن قيمة الغموض 'N ستتغير وتصبح مجهول جديد عند عودة الاستقبال مرة أخري. وهذه الحالة هي ما يطلق عليها "خطأ تغير الدورة Cycle Slip".



شكل (١٩-٧) خطأ تغير الدورة

لذلك لجأ علماء الجيوديسيا إلي فكرة الفروقات Differencing التي تتيح حذف تأثير بعض مصادر الأخطاء عند رصد إشارات الجي بي أس باستخدام جهازي استقبال في نقطتين مختلفتين و يعملان معا في نفس الوقت. وفي هذه الحالة يمكن حساب فرق الإحداثيات ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) بين النقطتين الأرضيتين بدقة عالية بدلا من حساب إحداثيات نقطة واحدة كما في أسلوب التحديد المطلق للإحداثيات. ومن ثم فيطلق - عامة - علي هذا النوع من أرصاد الجي بي أس أسم التحديد النسبي للمواقع Relative Positioning.



شكل (١٩-٨) التحديد النسبي للمواقع

١٩-٤ مصادر الأخطاء في قياسات الجي بي أس

كأي تقنية بشرية ، توجد عدة مصادر للأخطاء الطبيعية العشوائية Random Errors وأيضا الأخطاء المنتظمة Systematic Errors or Biases تؤثر علي جودة و دقة عمل الجي بي أس. أمكن للعلماء استنباط طرق و نماذج رياضية للتغلب علي هذه الأخطاء أو علي الأقل الوصول بها لأدني حد ممكن حتى يمكن الحصول علي دقة عالية في تحديد المواقع.

من أهم مصادر الأخطاء في نظام الجي بي أس:

أ- الاتاحية المنتقاة
ب- تأثير طبقة التروبوسفير في الغلاف الجوي
ت- تأثير طبقة الأيونوسفير في الغلاف الجوي
ث- خطأ ساعة القمر الصناعي
ج- خطأ مدار القمر الصناعي
ح- خطأ ساعة جهاز الاستقبال
خ- خطأ هوائي جهاز الاستقبال
د- خطأ تعدد المسار
ذ- تأثير الوضع الهندسي للأقمار الصناعية

شكل (١٩-٩) مصادر أخطاء الجي بي أس

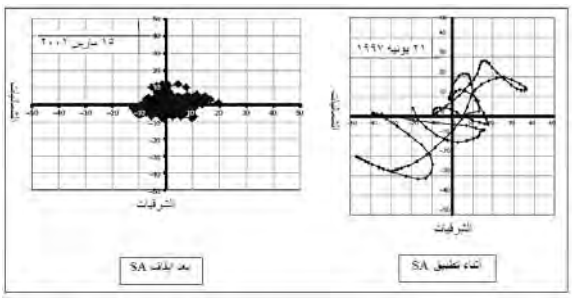
يعرض الجدول التالي أحد التقديرات لتأثير مصادر الأخطاء علي دقة تحديد المواقع أو حساب إحداثيات أجهزة استقبال الجي بي أس

تأثير الأخطاء علي دقة تحديد المواقع
(باستخدام شفرة C/A وعند مستوي ثقة ٩٥%)

نوع مصدر الخطأ	الخطأ (بالمتر)
طبقة التروبوسفير في الغلاف الجوي	٠.٢
طبقة الأيونوسفير في الغلاف الجوي	٧.٠
خطأ ساعة ومدار القمر الصناعي	٢.٣
خطأ جهاز الاستقبال	٠.٦
تعدد المسارات	١.٥
التوزيع الهندسي لمواضع الأقمار الصناعية	١.٥

خطأ الاتاحية المنتقاة:

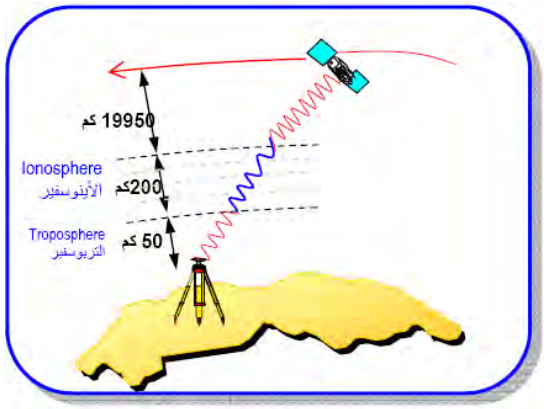
الاتاحية المنتقاة Selective Availability أو اختصارا SA هو خطأ متعمد حيث تضيف وزارة الدفاع الأمريكية قيمة معينة من الخطأ لتقليل الدقة التي يمكن للمستخدم أن يحسب إحداثياته اللحظية Real-Time. كان الهدف الرئيسي وراء فرض هذا الخطأ في إشارات الأقمار الصناعية هو منع التطبيقات العسكرية (التي تتطلب الحصول علي الإحداثيات لحظيا) للجيوش المعادية للولايات المتحدة من التمتع بمميزات دقة الجي بي أس ، ولم يكن هذا الخطأ يؤثر كثيرا علي التطبيقات المدنية – بصفة عامة – حيث طور العلماء عدة طرق رياضية لتقدير هذا الخطأ ومعالجته في مرحلة الحسابات المكتبية بعد انتهاء العمل الحقلي. أثناء فرض خطأ SA كانت الدقة الأفقية للخدمة المدنية SPS (عند مستوي معنوية ٩٥%) ±١٠٠ متر والدقة الأفقية تبلغ ±٣٠٠ متر. وفي ١ مايو ٢٠٠٠ وبعد دراسات مكثفة قامت الحكومة الأمريكية بإيقاف العمل بهذا المصدر من مصادر الأخطاء لتجعل إشارات الأقمار الصناعية في حالتها الطبيعية. ومنذ ذلك الحين فقد أصبحت الدقة الأفقية للخدمة المدنية SPS (عند مستوي معنوية ٩٥%) ±١٣ متر أو أقل كمتوسط علي المستوي العالمي وبحد أقصي ±٣٦ متر في أسوأ الحالات و المواقع ، بينما صارت الدقة الرأسية ±٢٢ متر أو أقل كمتوسط علي المستوي العالمي وبحد أقصي ±٧٧ متر في أسوأ الحالات و المواقع.



شكل (١٩-١٠) دقة تحديد المواقع قبل و بعد خطأ SA

تأثير طبقة التروبوسفير في الغلاف الجوي:

التروبوسفير طبقة من طبقات الغلاف الجوي للأرض تمتد حوالي ٥٠ كيلومتر من سطح الأرض. تتسبب هذه الطبقة – عند مرور إشارات الأقمار الصناعية بها – في تأخير أو إبطاء سرعة الإشارات مما ينتج عنه خطأ في حساب المسافات بين جهاز الاستقبال والأقمار الصناعية (حيث تكون المسافة المحسوبة أطول من المسافة الحقيقية) ، وبالتالي سينتج خطأ في تحديد إحداثيات موقع الرصد. تتراوح قيم خطأ طبقة التروبوسفير بين ٢.٣ متر للأقمار التي تقع رأسيا أعلي جهاز الاستقبال ، ٩.٣ متر للأقمار علي زاوية ارتفاع ١٥° من جهاز الاستقبال ، ٢٠-٢٨ متر للأقمار علي زاوية ارتفاع ٥° فقط من جهاز الاستقبال. أبتكر العلماء عدة نماذج رياضية تمكن من تقدير قيمة خطأ التروبوسفير – بدقة معقولة – ومن ثم إمكانية تصحيح تأثير هذا الخطأ علي إشارات الأقمار الصناعية. من أحدث هذه النماذج نموذج هيئة المحيطات و الأجواء الأمريكية NOAA.

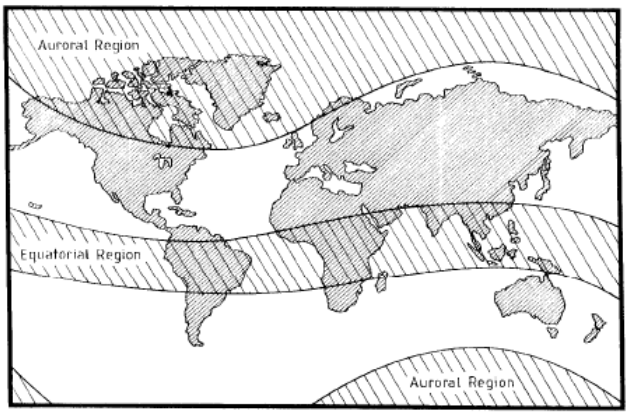


شكل (١٩-١١) طبقيتي التروبوسفير و الأيونوسفير في العلاف الجوي

تأثير طبقة الأيونوسفير في الغلاف الجوي:

في الطبقات العليا من الغلاف الجوي للأرض فأن الأشعة فوق البنفسجية و الأشعة السينية تتفاعل مع جزئيات و ذرات الغازات ، مما ينتج عنه الكترونيات و ذرات حرة في احدي طبقات الغلاف الجوي. تسمي هذه الطبقة بالايونوسفير أو طبقة التأين الحر وهي تمتد من ارتفاع حوالي ٥٠ كيلومتر من سطح الأرض إلي ارتفاع حوالي ١٠٠٠ كيلومتر أو أكثر. تؤثر طبقة الأيونوسفير علي إشارات الجي بي أس المرسلة من الأقمار الصناعية بصورة تجعل الإشارة أسرع قليلا من سرعة الضوء ، أي أن المسافة المحسوبة بين المستقبل و القمر الصناعي ستكون أقصر (في حالة استخدام أرصاد الطور) و أطول (في حالة استخدام أرصاد الشفرة) من المسافة الحقيقية ، مما سينتج عنه خطأ في تحديد إحداثيات موقع الرصد. يعتمد تأثير خطأ الأيونوسفير علي دورة النشاط الشمسي التي تتكرر كل ١١ سنة ويبلغ أقصي تأثير له عند قمة هذه الدورة حيث تبلغ كمية الإشعاع الشمسي أقصي مدي لها (حدثت آخر قمة لدورة الإشعاع الشمسي في عام ٢٠٠١ أي أن القمة التالية ستكون في أكتوبر ٢٠١١). كما يزداد النشاط الشمسي (ومن ثم تأثير الأيونوسفير) في الحزام الجغرافي ±٣٠° خط الاستواء المغناطيسي و في مناطق الشفق القطبية. عامة يتراوح تأثير خطأ الأيونوسفير في تحديد الإحداثيات من ٥ إلي ١٥ متر ، وقد يبلغ حوالي ١٥٠ متر في فترة الإشعاع الشمسي

القصوى وخاصة بالقرب من المستوي الأفقي Horizon في فترة منتصف اليوم. حيث أن تأثير الأيونوسفير يختلف باختلاف تردد الموجة فقد تمكن العلماء من استنباط طرق رياضية لحساب هذا التأثير عند استخدام أجهزة استقبال ثنائية التردد (أي تستقبل إشارات الأقمار الصناعية علي كلا الترددين L1 and L2). وهذا هو السبب وراء أن هذه الأجهزة ثنائية التردد هي المستخدمة في الأعمال الجيوديسية التي تتطلب دقة عالية في تحديد المواقع (مثل إنشاء شبكات الثوابت الأرضية)، بينما الأجهزة أحادية التردد (L1 فقط) تستخدم في تطبيقات الرفع المساحي التي لا تطلب إلا دقة سنتيمترات.



شكل (١٩-١٢) مناطق النشاط الشمسي المرتفع

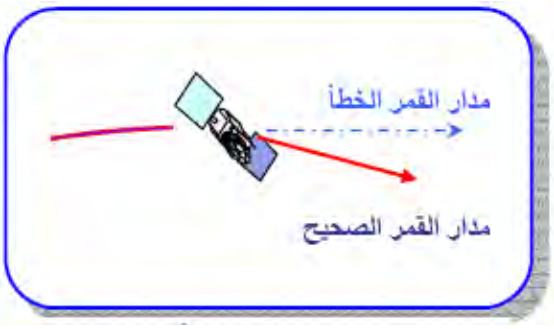
خطأ ساعة القمر الصناعي:

مع أن الساعات الموجودة في الأقمار الصناعية هي ساعات ذرية دقيقة جدا ، إلا أنها ليست تامة الدقة perfect وتكون دقتها في حدود من ٨.٦٤ إلي ١٧.٢٨ نانوثانية/يوم (النانو ثانية هو الجزء من المليار من الثانية الواحدة). وهذه الدقة في قياس الزمن في القمر الصناعي تعادل دقة تتراوح بين ٢.٥٩ و ٥.١٨ متر في قياس المسافة بين القمر الصناعي و جهاز الاستقبال. يقوم قسم التحكم و السيطرة – في منظومة الجي بي أس – بمراقبة أداء الساعات الموجودة في الأقمار الصناعية وحساب قيمة أي أخطاء بها ومن ثم يرسل هذه التصحيحات إلي الأقمار الصناعية و التي تقوم بدورها في إعادة بث هذه المعلومات – داخل الرسالة الملاحية – إلي المستخدمين لأخذها في الاعتبار. إلا أن هذه التصحيحات لا تكون كافية تماما ويتبقي جزء بسيط من الخطأ يؤدي لوجود خطأ - في حساب إحداثيات أجهزة الاستقبال - في حدود أمتار قليلة.

خطأ مدار القمر الصناعي:

مدار كل قمر صناعي يتم حسابه بواسطة محطة التحكم و السيطرة و إرساله للأقمار الصناعية التي بدورها ترسله للمستخدمين داخل ما يعرف بالرسالة الملاحية في الإشارات. لكن القوي الحقيقية في الفضاء الخارجي المؤثرة علي حركة القمر الصناعي في مداره لا تكون في الصورة المثلي المستخدمة في النماذج الرياضية لحساب مدار كل قمر صناعي ، مما سينتج عنه اختلاف بين

المدار المحسوب (أي إحداثيات القمر الصناعي) و المدار الحقيقي. عامة يبلغ خطأ المدار قيمة تتراوح بين ٢ و ٥ متر.



شكل (١٩-١٣) خطأ مدار الأقمار الصناعية

خطأ ساعة جهاز الاستقبال:

تستخدم أجهزة الاستقبال في قياس الزمن ساعات أرخص وأقل دقة من الساعات الذرية الموجودة في الأقمار الصناعية ، مما ينتج عنه خطأ في قياس المسافة لبن القمر و المستقبل تكون قيمته أكبر بكثير من خطأ ساعة القمر الصناعي. لكن أخطاء ساعة جهاز الاستقبال يمكن معالجتها بعدة طرق منها طريقة إضافة مجهول أثناء عملية حل المعادلات في حسابات إحداثيات جهاز الاستقبال (المعادلتين ١٩-٣ و ١٩-٤).

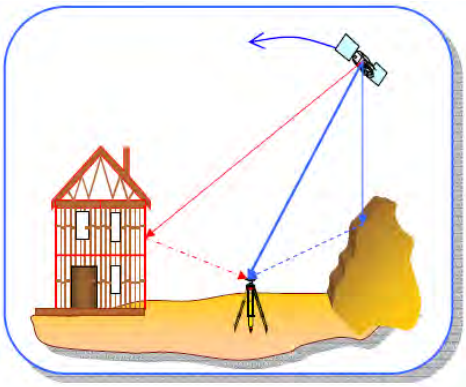
خطأ هوائي جهاز الاستقبال:

من أهم خصائص هوائي جهاز الاستقبال Receiver Antenna دقة تحديد نقطة التقاط الأشعة القادمة من الأقمار الصناعية وهي المسماه "مركز طور الهوائي Antenna Phase Center". عامة لا ينطبق مركز طور الهوائي مع المركز الهندسي للهوائي ، حيث أنه يختلف عنه بناءا علي ارتفاع و انحراف القمر الصناعي أثناء الرصد. ويؤدي ذلك الاختلاف إلي خطأ في قياس المسافات و حساب إحداثيات جهاز الاستقبال. تختلف قيمة خطأ الهوائي باختلاف نوع الهوائي ذاته ، ويكون عادة في حدود سنتيمترات قليلة. وتوجد أنواه من الهوائيات للأجهزة المساحية العادية و أنواع أخري للأجهزة الجيوديسية التي تتطلب دقة عالية في تحديد المواقع.

خطأ تعدد المسار:

يعد خطأ تعدد المسار من أهم و أخطر أنواع مصادر الأخطاء في قياسات الجي بي أس. ينتج هذا الخطأ عندما تصل إشارات الأقمار الصناعية إلي جهاز الاستقبال من خلال مسارات متعددة ، أي تصطدم الإشارة بعائق (شجرة أو مبني أو جسم معدني أو سطح مائي مثلا) ثم ترتد إلي جهاز الاستقبال. من الممكن أن يصل تأثير هذا الخطأ إلي ٥ متر عند استخدام قياسات الطور علي التردد الأول L1 ، بينما قد يصل إلي عشرات الأمتار عند استخدام أرصاد الشفرة. من هنا جاءت أهمية اختيار أماكن أجهزة الاستقبال بصورة مناسبة لتفادي هذا الخطأ ، كما توجد أيضا أنواع من

هوائيات أجهزة الاستقبال (تسمي Chock-Ring Antenna) تقلل بنسبة كبيرة من أخطاء تعدد المسار.



شكل (١٩-١٤) خطأ تعدد المسارات

شكل (١٩-١٥) نوع هوائي يقلل خطأ تعدد المسارات

تأثير الوضع الهندسي للأقمار الصناعية:

بالإضافة لمصادر الأخطاء السابقة (سواء تلك الناتجة من الأقمار الصناعية أو أجهزة الاستقبال أو الإشارات) فأن الوضع الهندسي لمواقع الأقمار الصناعية أثناء فترة الرصد يؤثر أيضا علي دقة الإحداثيات الأرضية المستنتجة. إن التوزيع الجيد لمواقع الأقمار الصناعية في السماء يعطي دقة جيدة في حساب مواقع المستقبلات الأرضية ، بينما يتوقع أن يؤثر التوزيع السيئ لمواقع الأقمار علي دقة الإحداثيات المستنتجة. يتم التعبير عن تأثير مواقع الأقمار الصناعية باستخدام معامل يسمي "معامل الدقة Dilution of Precision" ويرمز له بالرمز DOP ، ويوجد منه عدة أنواع بناء علي المستوي المطلوب الحساب به. تشتمل معاملات الدقة علي أنواع:

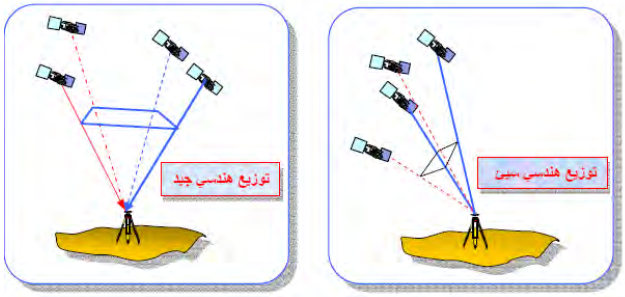
- معامل الدقة الأفقية ويرمز له بالرمز HDOP.
- معامل الدقة الرأسية ويرمز له بالرمز VDOP.
- معامل الدقة ثلاثية الأبعاد ويرمز له بالرمز PDOP.
- معامل الدقة الهندسية (رباعية الأبعاد) ويرمز له بالرمز GDOP.
- معامل الدقة الزمنية ويرمز له بالرمز TDOP.

يمكن حساب الدقة المتوقعة لتحديد المواقع بالجي بي أس من المعادلة:

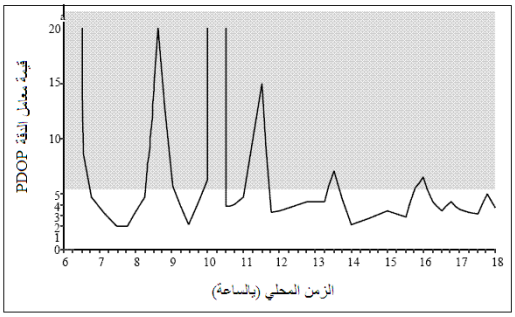
$$A_p = DOP \times A_m \qquad (19\text{-}6)$$

حيث A_p تعبر عن دقة الموقع ، A_m تعبر عن دقة القياس.

بما أن مواقع الأقمار الصناعية في الفترة المستقبلة تكون محسوبة وموجودة داخل الرسالة الملاحية لكل قمر صناعي (almanac) فأنه يمكن حساب قيم معاملات الدقة دون الحاجة للرصد الفعلي. أي إذا عرفنا الموقع الجغرافي التقريبي المطلوب العمل به فيمكن لبرامج حسابات الجي بي أس أن تقوم بحساب قيم DOP ليوم الرصد المطلوب ، ومن هنا يمكن اختيار الفترات الزمنية التي يكون فيها معامل الدقة أحسن ما يمكن وتجنب تلك الفترات التي يكون بها توزيع الأقمار الصناعية سيئا. وهذه الخطوة مهمة بالفعل للأعمال الجيوديسية التي تتطلب دقة عالية في تحديد المواقع. للوصول لدقة عالية في تحديد المواقع يوصي بأن تكون معامل الدقة ثلاثية الأبعاد PDOP ٥-٦ أو أقل.



شكل (١٩-١٦) تأثير توزيع الأقمار الصناعية



شكل (١٩-١٧) مثال لحساب معاملات الدقة و التأثير المتوقع لتوزيع الأقمار الصناعية

١٩-٥ خطة تحديث تقنية الجي بي أس

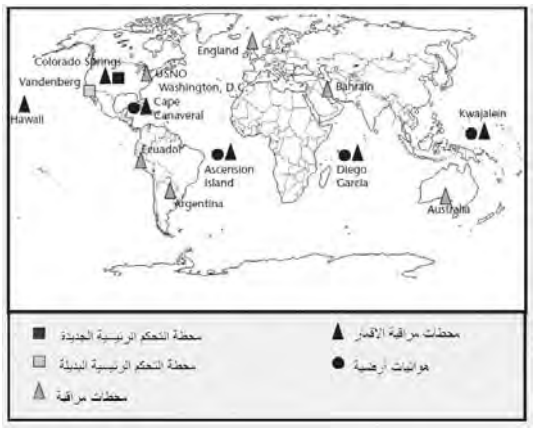
بعد مرور حوالي ثلاثون عاما من بزوغ تقنية الجي بي أس ازداد عدد مستخدميه إلي حوالي ٢٠ مليون مستخدما حول العالم ، مما زادت معه الحاجة لتطوير هذه التقنية بصورة تلبي طموحات كل هؤلاء المستخدمين سواء العسكريين أو المدنيين. وفي ٢٥ يناير ١٩٩٩ أعلن نائب الريس الأمريكي رسميا رصد ميزانية تبلغ ٤٠٠ مليون دولار لتنفيذ خطة تطوير الجي بي أس. تشمل الأهداف الأساسية للخطة إضافة تحسينات تقنية لكلا من قطاع الفضاء (الأقمار الصناعية) وقطاع التحكم و السيطرة وذلك عن طريق إضافة أنواع جديدة من الإشارات بهدف زيادة جودة الخدمة للقطاعات العسكرية و المدنية وأيضا العلمية حول العالم. من المتوقع أن تستمر خطة تحديث الجي بي أس عدة سنوات حتى اكتمالها النهائي.

بدأت أولي خطوات خطة تطوير الجي بي أس من خلال تطوير نسخة معدلة من الجيل الثاني للأقمار الصناعية والتي سميت أقمار IIR-M (بدلا من IIR). تتمتع هذه الأقمار المعدلة بإمكانية بث أو إرسال نوع جديد من الشفرة المدنية علي التردد الثاني (L2) والتي أطلق عليها اسم شفرة L2C بالإضافة لإرسال شفرة عسكرية جديدة سميت الشفرة (M) علي كلا الترددين L1 و L2. ويدا إطلاق أول قمر من هذا الجيل المعدل IIR-M في عام ٢٠٠٥. إن إضافة شفرة مدنية ثانية (مع الشفرة المدنية الحالية C/A) سيتيح إمكانية تصحيح خطأ طبقة الأيونوسفير للأجهزة الملاحية و الجيوديسية ، مما سينعكس علي زيادة دقتها في تحديد المواقع بصورة كبيرة.

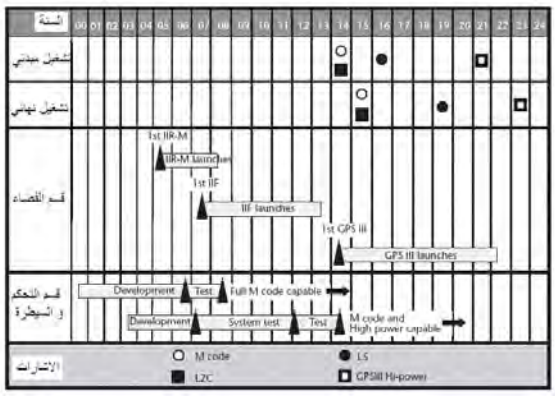
تأتي ثاني خطوات خطة تطوير الجي بي أس من خلال البدء في تصميم و إنتاج و إطلاق جيل فرعي آخر من أقمار الجيل الثاني - أطلق عليها أقمار IIF وعددهم ١٢ قمرا – والتي ستكون أهم خصائصها إرسال إشارة أو تردد ثالث جديد (بجانب الترددين الأساسين L1, L2) والذي أطلق عليه اسم تردد L5 وقيمته ١١٧٦.٤٥ ميجاهرتز ، وذلك بالإضافة لبث الشفرتين الجديدتين L2C و M. كما أن العمر الافتراضي لهذا الجيل من الأقمار الصناعية سيبلغ ١١.٣ سنة ، ومن الموقع أن يبدأ التردد الثالث بحلول عام ٢٠١٦ ويكتمل (يتم بثه في جميع الأقمار الصناعية) في عام ٢٠١٩.

أيضا تشتمل خطة تطوير الجي بي أس علي تصميم و إنتاج الجيل الثالث من الأقمار الصناعية Block-III والذي سيكون نقلة هامة جدا في تطوير أقمار الجي بي أس. من المتوقع بدء إطلاق أقمار الجيل الثالث في عام ٢٠٢١ والانتهاء من إطلاق جميع الأقمار – وعددهم يتراوح بين ٢٧ و ٣٣ قمرا – في ٢٠٢٣.

كما تشتمل خطة تطوير الجي بي أس علي تطوير قسم التحكم و السيطرة – بدأ فعلا في عام ٢٠٠٠ – بهدف تخفيض تكلفة تشغيل القسم و زيادة كفاءة مهامه. وفي هذا الجزء من التطوير سيتم إحلال منشئات محطة التحكم الرئيسية وإضافة إمكانيات متابعة و مراقبة التردد و الإشارات الجديدة وتحديث أجهزة الكمبيوتر العملاقة بقسم التحكم و السيطرة وأيضا إضافة محطات متابعة جديدة لمراقبة أداء و كفاءة عمل الأقمار الصناعية.



شكل (١٩-١٨) محطات المراقبة و السيطرة الجديدة

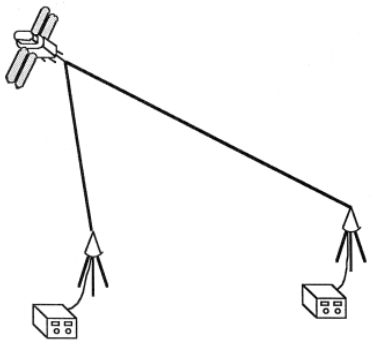


شكل (١٩-١٩) المخطط الزمني لتنفيذ خطة تطوير الجي بي أس

إن خطة تطوير تقنية الجي بي أس ستكون لها العديد من المزايا ، من وجهة نظر مستخدمي النظام، بصورة لم يسبق لها مثيل منذ بدء تطبيق الجي بي أس. فإذا أخذنا عامل دقة الإحداثيات (تحديد المواقع) باستخدام الخدمة المدنية القياسية SPS فأن الدقة ستنخفض من حدودها الحالية (١٠-٢٠ متر) بنسبة ٥٠% بحلول عام ٢٠١٥ (لتصبح ٥-١٠ متر) بالاعتماد علي الإشارتين المدنيتين C/A الحالية و L2C المتوقعة ، وبحلول عام ٢٠١٩ ومع إتاحة التردد الثالث L5 فأن الدقة ستتحسن بنسبة ٥٠% أخري لتصل إلي حدود ١-٥ متر باستخدام أجهزة الاستقبال الملاحية رخيصة السعر. سيؤدي ذلك لجودة أكثر في تجميع المعلومات المكانية الخاصة بتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية GIS وأيضا تطبيقات الاستشعار عن بعد ، كما ستصبح الأعمال الجيوديسية عالية الدقة تتم بصورة أسرع وبالتالي أرخص للوصول لدقة السنتيمترات أو حتى المليمترات.

١٩-٦ مبدأ الفروقات في مرحلة الحسابات

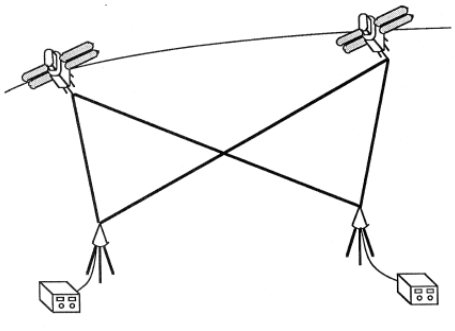
يمكن تقسيم مصادر الأخطاء التي تؤثر علي أرصاد الجي بي أس (وبالتالي دقة تحديد المواقع) إلي ثلاثة مجموعات: أخطاء الأقمار الصناعية ، أخطاء أجهزة الاستقبال ، أخطاء تأثير الغلاف الجوي والأخطاء العشوائية. فإذا أخذنا أخطاء الأقمار الصناعية كمثال: إذا كان لدينا جهازي استقبال يرصدان نفس القمر الصناعي في نفس اللحظة وكانت المسافة بين موقعي الجهازين صغيرة فيمكن أن نتوقع أن تأثير خطأ القمر الصناعي و أيضا تأثير طبقة الغلاف الجوي سيكون متساوي القيمة – تقريبا – علي المسافتين من هذا القمر الصناعي إلي هذين الجهازين الأرضيين. وبالتالي فإذا طرحنا الأرصاد (المعادلتين) عند كلا الجهازين فأننا سنقلل بنسبة كبيرة جدا من تأثير هذين الخطأين علي الحل الناتج ، لكن من المهم جدا أن ندرك أن هذا الحل لن يكون إحداثيات نقطتي الرصد- X_1,Y_1,Z_1 للنقطة الأولي ولا X_2, Y_2, Z_2 للنقطة الثانية - لكن الفرق بينهما ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) ، ومن هنا جاءت تسمية التحديد "النسبي" للمواقع. هذا المبدأ أو الحل يطلق عليه اسم الفرق (أو التفاضل في بعض الترجمات) الأحادي بين المستقبلات Between-Receiver Single Difference



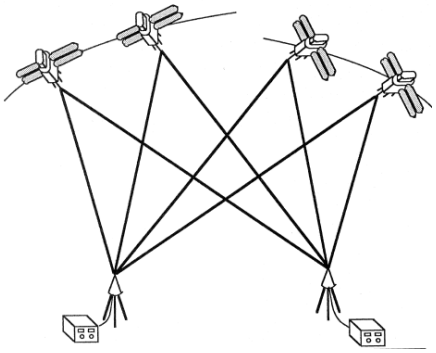
شكل (١٩-٢٠) الفرق الأحادي بين المستقبلات

بنفس المبدأ يمكن تطوير نوع آخر من الفروقات (أثناء عملية حسابات أرصاد الجي بي أس Data Processing) إذا كان لدينا جهازي استقبال يرصدان قمرين صناعيين في نفس اللحظة. بعد تكوين معادلة الفرق الأحادي بين المستقبلات لكلا نقطتي الرصد مع القمر الصناعي الأول، نقوم بتكوين معادلة الفرق الأحادي بين المستقبلات لكلا نقطتي الرصد مع القمر الصناعي الثاني. وبعد ذلك نطرح كللا الفرقين الأحاديين من بعضهما فتنتج لنا معادلة ما يسمي بالفرق الثنائي Double Difference. يتميز الفرق الثنائي أنه يزيل (أو يقلل بنسبة كبيرة) من أخطاء الأقمار الصناعية و تأثير الغلاف الجوي (مثل الفرق الأحادي) بالإضافة إلي أخطاء ساعات أو زمن أجهزة المستقلات أيضا.

يأتي الفرق الثلاثي Triple Difference كأحد أساليب الفروقات الهامة في حسابات أرصاد الجي بي أس، والذي يقوم علي مبدأ طرح معادلتين فرق ثنائي من بعضهم البعض ، أي حالة جهازين استقبال يرصدان نفس القمرين الصناعيين في لحظتي رصد متتاليتين (وليس لحظة رصد واحدة مثل حالة الفرق الثنائي).



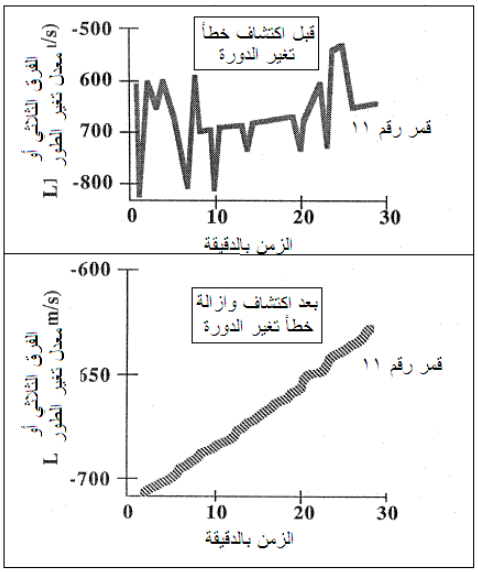
شكل (١٩-٢١) الفرق الثنائي



شكل (١٩-٢٢) الفرق الثلاثي

تنبع أهمية (حل أو معادلة) الفرق الثلاثي من نقطة هامة جدا: كما سبق الإشارة إلي أن قيمة خطأ الغموض Ambiguity تعتبر هامة جدا في أرصاد طور الموجة الحاملة للوصول لدقة عالية في

تحديد المواقع. هذه القيمة (التي يمكن حسابها من معادلات الفرق الثنائي) تظل قيمة ثابتة طالما هناك استمرارية في وصول موجات القمر الصناعي إلي جهاز الاستقبال. فإذا انقطعت هذه الاستمرارية (بسبب وجود أي عائق قريب من جهاز الاستقبال) فأن قيمة خطأ الغموض ستتغير وهي الحالة المعروفة باسم خطأ تغير الدورة Cycle Slip. في معادلة الفرق الثلاثي سيختفي مجهول الغموض (أي لا يمكن تحديده من هذا الفرق) ، فإذا حدث خطأ تغير الدورة فسيظهر في معادلة واحدة فقط – لهذه اللحظة – ولن يظهر في معادلة اللحظة التالية بعد عودة استمرارية الاستقبال مرة أخري. ومن هنا فأن لحظة حدوث الخطأ ستظهر كقفزة مفاجئة في أرصاد الفروقات الثلاثية ، مما يسهل لنا تحديد هذه اللحظة التي حدث بها انقطاع الاستقبال – من القمر الصناعي – وبالتالي إمكانية حساب قيمة خطأ الغموض الجديدة بعد عودة الاستقبال مرة أخري.



شكل (١٩-٢٣) خطأ تغير الدورة في الفرق الثلاثي

الفصل العشرين

طرق الرصد فى الجى بى أس

٢٠-١ مقدمة

يهدف هذا الفصل الي التعرف بصورة تفصيلية عن طرق الرصد و طرق الحساب للنظام العالمي لتحديد المواقع.

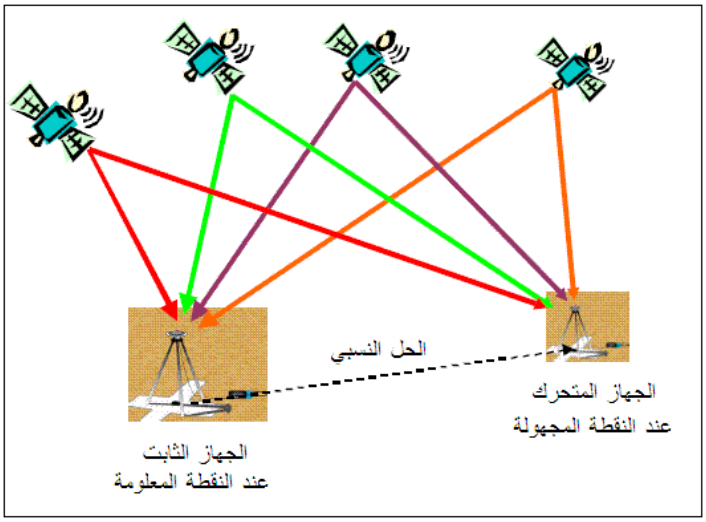
٢٠-٢ طرق الرصد

لتحديد إحداثيات موقع أو نقطة معينة يكفي استخدام جهاز استقبال واحد يقوم باستقبال الموجات المرسلة من الأقمار الصناعية ، وهذا ما يطلق عليه التحديد المطلق للمواقع Absolute Point Positioning. لكن دقة هذه الإحداثيات ستكون في حدود عدة أمتار مما يجعل هذا الأسلوب مناسبا للتطبيقات الملاحية وبعض تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية أو للخرائط ذات مقياس الرسم الصغير ، لكنه بالطبع لن يكون مناسبا للتطبيقات المساحية و الجيوديسية التي تتطلب دقة عالية في تحديد المواقع.

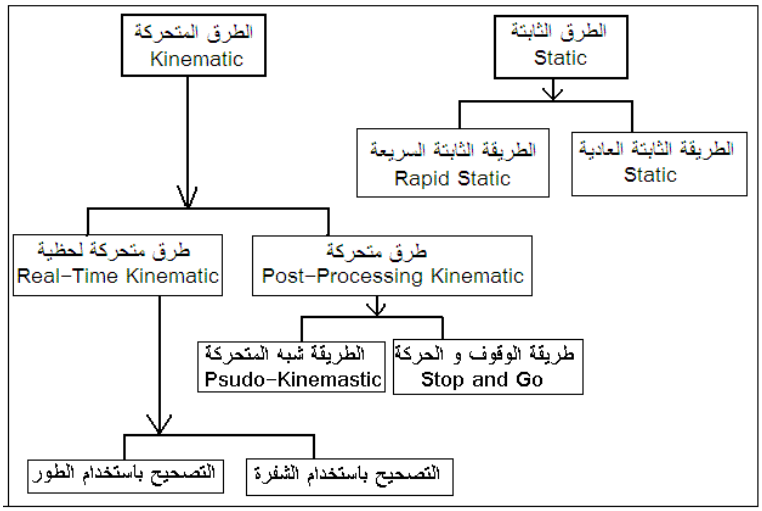
تتعدد طرق الرصد المساحية بنظام الجي بي أس بطريقة كبيرة بناءا علي عدة عوامل مثل عدد أجهزة الاستقبال المتوفرة و الدقة المطلوبة أو طبيعة المشروع. يجب علي مستخدم الجي بي أس أن يلم بمميزات و عيوب كل طريقة قبل أن يقرر الطريقة التي يتبعها في مشروع معين.

تعتمد الطرق المساحية لتجميع أرصاد الجي بي أس علي أسلوب الرصد النسبي أو الرصد التفاضلي Relative or Differential حيث يكون هناك جهازي استقبال أحدهما يسمي القاعدة Base Receiver أو الجهاز المرجعي Reference Receiver موجودا علي نقطة مساحية معلومة الإحداثيات ، بينما الجهاز الثاني يسمي المتحرك Rover Receiver وهو الذي يتولي رصد النقاط المطلوب تحديد موقعها ، ويقوم كلا الجهازين برصد الأقمار الصناعية آنيا simultaneously في نفسي الوقت. يقوم الجهاز الثابت أو القاعدة بتحديد قيمة الخطأ في إشارات الأقمار الصناعية في كل لحظة وذلك عن طريق مقارنة الإحداثيات المعلومة لهذه النقطة مع إحداثياتها المحسوبة من أرصاد الجي بي أس. بافتراض أن المسافة بين جهاز القاعدة و الجهاز المتحرك ليست كبيرة فيمكن اعتماد مبدأ أن تأثير أخطاء الرصد عند النقطة المتحركة تساوي تقريبا نفس التأثير عند النقطة القاعدة ، ومن ثم يمكن أيضا تصحيح إحداثيات النقاط التي يرصدها الجهاز الآخر أو الجهاز المتحرك ، عن طريق نقل هذه التصحيحات من الجهاز الثابت إلي الجهاز المتحرك. قد تتم عملية نقل التصحيحات في المكتب بعد انتهاء تجميع البيانات الحقلية (نسميها المعالجة اللاحقة Post-Processing) أو تتم لحظيا في الموقع (نسميها التصحيح اللحظي Real-Time). وتجدر الإشارة إلي أن الحل الناتج من هذه الطرق يكون حلا نسبيا - أي فرق الإحداثيات - بين النقطة المعلومة و النقطة المجهولة ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) والذي سيضاف إلي إحداثيات النقطة المعلومة ليمكننا حساب إحداثيات النقطة المجهولة.

بصفة عامة يمكن تقسيم طرق الرصد إلي مجموعتين رئيسيتين: الطرق الثابتة Static – ومنها الطريقة التقليدية و الطريقة السريعة – والطرق المتحركة Kinematic ومنها طرق تعتمد علي الحساب اللاحق و أخري تعتمد علي استقبال تصحيحات بهدف إكمال عملية حساب الإحداثيات في الموقع مباشرة. وتجدر الإشارة إلي أن الطريقة الثابتة التقليدية هي الأنسب لمشروعات المساحة الجيوديسية التي تتطلب دقة عالية (مثل إنشاء شبكات الثوابت الأرضية) بينما باقي الطرق تكون مناسبة للأعمال المساحية والرفع المساحي.



شكل (٢٠-١) مبدأ الرصد النسبي لأرصاد الجي بي أس



شكل (٢٠-٢) طرق رصد الجي بي أس

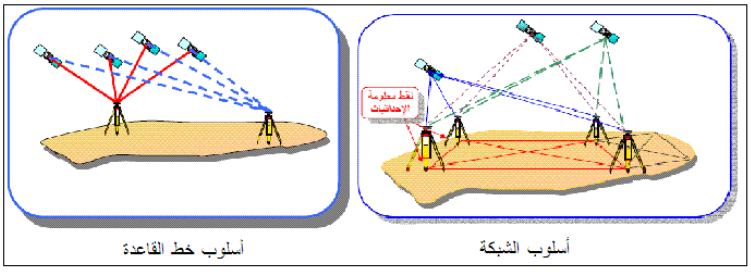
٢٠-٢-١ طرق الرصد الثابتة

تعد طرق الرصد الثابتة static أنسب طرق رصد الجي بي أس للتطبيقات المساحية و الجيوديسية التي تتطلب دقة عالية (تصل إلي مستوي المليمتر) في تحديد المواقع. الطريقة الثابتة التقليدية هي أقدم – و أدق أيضا - طرق رصد الجي بي أس بينما ظهرت بعدها طريقة أخري (أو تعديل لها) سميت بالرصد الثابت السريع.

٢٠-٢-١-١ طريقة الرصد الثابت التقليدي

في هذه الطريقة يحتل الجهاز الثابت نقطة معلومة الإحداثيات بينما يقوم الجهاز الآخر (أو عدد من الأجهزة) باحتلال النقطة (أو النقاط) المجهولة المطلوب تحديد مواقعها ، وفي نفس الوقت تبدأ كل الأجهزة في استقبال إشارات الأقمار الصناعية. الأجهزة الجيوديسية ثنائية التردد Dual-Frequency Geodetic Receivers هي الأجهزة المستخدمة في هذه الطريقة حتى يمكن الوصول لمستوي الدقة المطلوبة ، وان كان يمكن استخدام الأجهزة أحادية التردد Single-Frequency Receivers للمسافات الصغيرة التي لا تتجاوز ٢٠ كيلومتر. تتراوح فترة الرصد المشترك session التي تعمل خلالها أجهزة الاستقبال بين ٣٠ دقيقة و عدة ساعات طبقا لطول المسافات بين الجهاز الثابت و الأجهزة الأخرى (ما يطلق عليه خط القاعدة أو خطوط القواعد Base Line). تقوم أجهزة الاستقبال بتجميع الأرصاد بمعدل (Sample Rate) رصده كل ١٥-٢٠ ثانية.

توجد عدة أساليب لتجميع البيانات تعتمد علي عدد أجهزة الاستقبال المتوفرة. اذا لم يتوفر إلا جهازين استقبال فقط فيتم العمل بأسلوب خط القاعدة Base Line حيث يوضع الجهاز الثابت أعلي النقطة المعلومة و الجهاز الآخر أعلي أولي النقاط المجهولة لفترة زمنية معينة ، ثم ينتقل لرصد النقطة المجهولة الثانية ثم الثالثة و هكذا. بينما في حالة توافر أكثر من جهازين فأن أسلوب العمل يتم بطريقة الشبكة Network حيث جهاز (أو أثنين أحيانا) فوق النقطة (أو النقطتين) المعلومتين بينما توضع باقي الأجهزة علي النقاط المجهولة.



شكل (٢٠-٣) أساليب الرصد الثابت التقليدي

بعد انتهاء تجميع الأرصاد الحقلية يتم نقل البيانات (من جميع الأجهزة) إلي الحاسب الآلي حيث تتولي برامج متخصصة GPS Data Processing Software تنفيذ عمليات الحساب و الضبط للوصول إلي قيم دقيقة لإحداثيات النقاط المجهولة. إذا كانت أطوال خطوط القواعد صغيرة

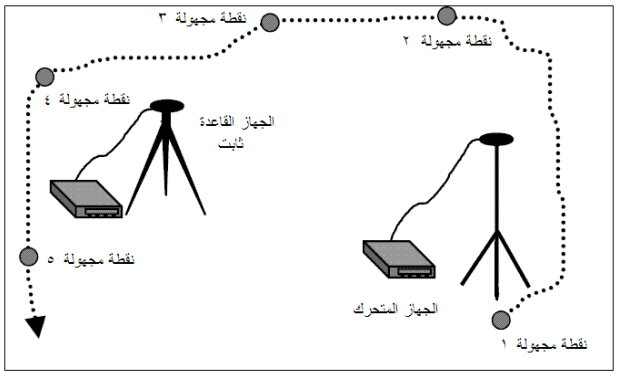
نسبيا (١٥-٢٠ كيلومتر) فيمكن تحديد قيمة الغموض بدقة والوصول إلي نوع الحل الثابت Fixed Solution ، بينما لخطوط القواعد الطويلة فمن المتوقع ألا يتم الوصول لقيمة صحيحة integer لخطأ الغموض ، ومن ثم فيكون الحل الخالي من الأيونوسفير هو الأفضل. أما للخطوط الطويلة جدا (مئات الكيلومترات) فيفضل استخدام برامج الحساب العلمية – مثل برنامج BERNSE من جامعة برن السويسرية – لأنها برامج أفضل من تلك البرامج التجارية العادية لهذه الحالات.

الدقة المتوقعة لطريقة الرصد الثابت التقليدية تكون ٥ ملليمتر ± ١ جزء من المليون (ppm) أي ٥ ملليمتر + ملليمتر لكل واحد كيلومتر من طول خط القاعدة. كمثال: لخط قاعدة طوله ٢٠ كيلومتر ، فأن الدقة المتوقعة = ٥ + ٢٠ = ± ٢٥ ملليمتر. تجدر الإشارة إلي أنه بمكن الوصول لدقة أحسن من هذا المستوي العام باستخدام أجهزة جيوديسية حديثة وأيضا باستخدام مدارات أكثر دقة للأقمار الصناعية.

توجد عدة مواصفات دولية منشورة تحدد التفاصيل التقنية للرصد و الحساب لطرق رصد الجي بي أس، والتي يمكن الحصول عليها من عدد من المواقع علي شبكة الانترنت.

٢٠-٢-١-٢ طريقة الرصد الثابت السريع

في حالة وقوع النقاط المجهولة (المطلوب تحديد إحداثياتها) في نطاق مسافة قصيرة – في حدود ١٠-١٥ كيلومتر - من موقع النقطة المعلومة أو المرجعية فيمكن للجهاز المتحرك أن يرصد نقطة مجهولة لمدة زمنية بسيطة ، ثم ينتقل لرصد نقطة مجهولة ثانية و ثالثة و هكذا. يكون الجهاز القاعدة أو الجهاز المرجعي مستمرا في تجميع الأرصاد طوال فترات الرصد كلها لتتوفر أرصاد مشتركة مع الجهاز المتحرك عند كل نقطة مجهولة يقوم برصدها. لذلك سميت هذه الطريقة بالرصد الثابت السريع Fast or Rapid Static. تتراوح فترة الرصد session عند كل نقطة مجهولة بين ٢ و ١٠ دقائق ، وبمعدل رصد sample rate كل ١٥-٢٠ ثانية مثل الطريقة الثابتة التقليدية. وأيضا يتم نقل الأرصاد من كلا الجهازين إلي الحاسب الآلي لإجراء عمليات الحسابات و استنتاج إحداثيات النقاط المجهولة التي تم رصدها.



شكل (٢٠-٤) طرق الرصد الثابت السريع

تتميز طريقة الرصد الثابت السريع أنها تقلل بدرجة كبيرة من الوقت اللازم لتجميع البيانات الحقلية، مما يجعلها مناسبة للأعمال المساحية التفصيلية و الطبوغرافية في منطقة صغيرة. لكن وعلي الجانب الآخر فأن الدقة المتوقعة لهذه الطريقة (١٠ ملليمتر ± ١ ppm) لا تصل لنفس مستوي دقة طريقة الرصد الثابت التقليدية مما يجعلها غير مطبقة في الأعمال الجيوديسية الدقيقة.

٢٠-٢-٢ طرق الرصد المتحركة

تعتمد فكرة الرصد المتحرك Kinematic علي وجود جهاز ثابت مرجعي Base علي النقطة المعلومة بينما يتحرك الجهاز الآخر Rover (أو الأجهزة) لرصد عدد من النقاط المجهولة. تختلف طرق الرصد المتحرك بناءا علي عاملين: أسلوب حركة الجهاز الثاني ، طريقة نقل التصحيحات من الجهاز الثابت لباقي الأجهزة.

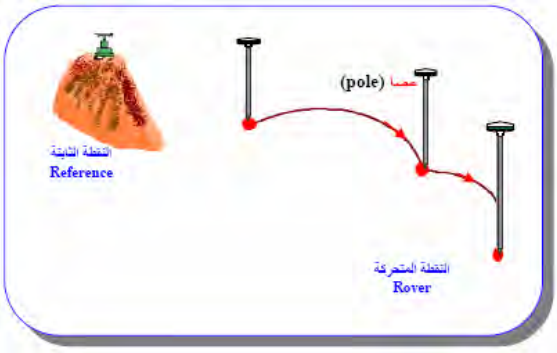
٢٠-٢-٢-١ طرق الرصد المتحرك والحساب لاحقا

في هذه النوعية من أساليب الرصد المتحرك يتم الاعتماد علي أن التصحيحات - التي يقوم بحسابها الجهاز المثبت فوق النقطة المعلومة – سيتم نقلها إلي أرصاد الأجهزة المتحركة عن طريق برنامج الحساب software في الحاسب الآلي بعد انتهاء الأعمال الحقلية. أي أن حساب إحداثيات النقاط المرصودة سيكون في المكتب أو Post-Processing وليس في الحقل(تسمي هذه الطرق PPK اختصارا لكلمات Post-Processing Kinematic).

أولي هذه النوعية طريقة الذهاب و التوقف Stop and Go وفيها يتوقف الجهاز المتحرك Rover لمدة ١٥-٣٠ ثانية ليرصد كل نقطة من النقاط المجهولة. في أولي النقاط المجهولة يتوقف جهاز للاستقبال لمدة ٥-١٠ دقائق يجمع فيها عدد من أرصاد الأقمار الصناعية يسمح بحساب قيمة الغموض Ambiguity ، وتسمي هذه الخطوة: الإعداد Initialization. ثم يبدأ التحرك إلي النقطة الثانية ثم الثالثة و هكذا وهو مستمر في تجميع الأرصاد. طالما لم ينقطع الاتصال (استمرارية استقبال الموجات) بين المستقبل و الأقمار الصناعية فتستمر حركة الجهاز ، إما إذا أنقطع هذا الاستمرار – أي حدث خطأ تغير الدورة Cycle Slip – فيجب العودة لآخر نقطة مرصودة و البقاء أعلاها في وضع الثبات لمدة ٥-١٠ دقائق (عملية إعداد جديدة)، ومن هنا جاء اسم هذه الطريقة: الذهاب و التوقف (شكل ٥-٥) والتي تناسب الرفع المساحي التفصيلي في حدود ١٠-١٥ كيلومتر حول النقطة المعلومة. تقليديا كانت طريقة الذهاب و التوقف أقدم طرق الرصد المتحرك – تم تطويرها في نهاية الثمانينات من القرن العشرين الميلادي – وربما لم تعد مستخدمة بكثرة الآن.

ثاني و أحدث طرق الرصد المتحرك هي ما تعرف باسم طريقة الرصد شبه المتحرك Pseudo-Kinematic والبعض يسميها طريقة الرصد المتحرك Kinematic مباشرة. وأهم مميزاتها أنها لا تتطلب الوقوف عند كل نقطة مجهولة ، إنما تكتفي برصدها حتى ولو ثانية واحدة. أيضا لا تتطلب طريقة الرصد شبه المتحرك إجراء عملية الإعداد لأنها تطبق مبدأ رياضي حديث يسمح بحساب قيمة الغموض أثناء بدء حركة الجهاز Rover من نقطة لآخري (يسمي الحل الطائر On-The-Fly أو اختصارا OFT). أيضا في هذه الطريقة يتم ضبط جهاز الاستقبال بحيث يسجل

الأرصاد آليا كل فترة زمنية معينة (مثلا كل ثانية) ولا توجد حاجة للمستخدم لإعطاء أمر الرصد في جهاز الاستقبال عند كل نقطة مجهولة كما في طريقة الذهاب و التوقف. كل هذه المميزات جعلت طريقة الرصد شبه المتحرك أكثر جاذبية وأسهل و أرخص لتطبيقات الرفع المساحي.



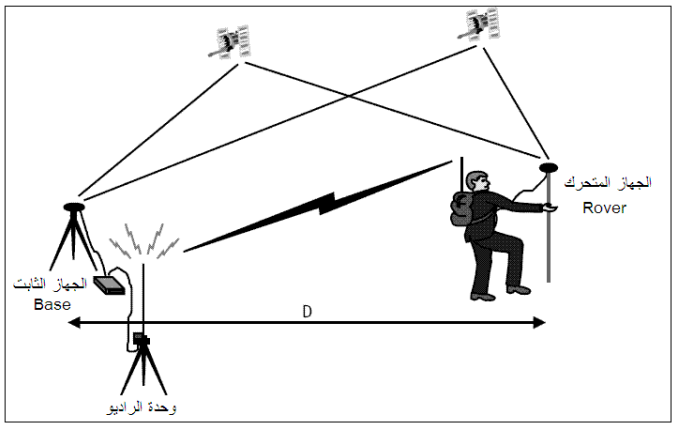
شكل (٢٠-٥) طريقة الذهاب و التوقف

٢٠-٢-٢-٢ طرق الرصد المتحرك مع الحساب اللحظي

كانت الطرق التقليدية للرصد المتحرك تعتمد علي فكرة تجميع الأرصاد في الموقع ثم إجراء الحسابات علي الحاسب الآلي في المكتب. لكن وجد مهندسو المساحة أن هناك حالات معينة – مثل توقيع نقاط معلومة الإحداثيات علي أرض الواقع Stack Out – تحتاج حساب قيم إحداثيات النقط المرصودة في نفس لحظة الرصد. من هنا بدأ التفكير في تطوير طرق رصد متحركة جديدة. تعتمد هذه الطرق علي وجود جهاز راديو عند النقطة الثابت يقوم بإرسال أو بث التصحيحات التي يقوم الجهاز المرجعي بحسابها إلي الجهاز (أو الأجهزة) المتحرك والذي بدورها يكون متصل بجهاز راديو لاسلكي آخر. أي أن الجهاز المتحرك سيتكون من وحدتين: وحدة استقبال إشارات الأقمار الصناعية ، بالإضافة إلي وحدة استقبال لا سلكية لاستقبال التصحيحات المرسلة من الجهاز الثابت. من أرصاد الأقمار الصناعية يقوم الجهاز المتحرك بحساب إحداثيات النقطة المرصودة (لكنها إحداثيات غير دقيقة تماما) ومن تصحيحات الجهاز المرجعي يقوم الجهاز المتحرك بتصحيح الإحداثيات للوصول إلي قيم دقيقة في نفس اللحظة ، ولذلك فتسمي هذه الطرق بطرق الرصد المتحرك الآني Real-Time.

بناء علي نوع التصحيحات التي يحسبها الجهاز الثابت فتوجد طريقتين من طرق الرصد المتحرك مع الحساب اللحظي. إذا كانت التصحيحات خاصة بأرصاد الشفرة code فأن الطريقة تسمي الجي بي أس التفاضلي Differential GPS أو اختصارا DGPS. بينما إن كان الجهاز الثابت يقوم بحساب و تصحيح أرصاد طور الموجة Carrier Phase فأن الطريقة تسمي الرصد المتحرك اللحظي Real-Time Kinematic أو اختصارا RTK. وكما سبق الإشارة فأن أرصاد طور الموجة تكون أكثر دقة من أرصاد الشفرة مما يؤدي إلي أن دقة طريقة الجي بي أس التفاضلي DGPS تكون عدة ديسيمترات أو ما هو أقل من المتر، بينما تصل دقة طريقة الرصد المتحرك اللحظي RTK إلي ٢-٥ سنتيمتر. ولذلك فأن طرق الرصد التفاضلي تستخدم في التطبيقات

الملاحية و نظم المعلومات الجغرافية بينما طريقة الرصد المتحرك اللحظي هي المطبقة في الأعمال المساحية.



شكل (٢٠-٦) طريقة الرصد المتحرك اللحظي

٢٠-٢-٣ مقارنة بين طرق الرصد المختلفة

إذا أخذنا عامل الدقة كمقياس للمقارنة بين طرق الرصد في نظام الجي بي أس فأن أعلي هذه الطرق دقة هي طريقة الرصد الثابت التقليدية. أما إذا أخذنا العامل الاقتصادي فأن طرق الرصد المتحرك تقلل بنسبة كبيرة من الزمن اللازم لتجميع القياسات الحقلية مما يجعلها أرخص تكلفة من الطرق الثابتة. لكن هناك عوامل أخري يجب أخذها في الاعتبار ، فمثلا تكلفة شراء وحدات الراديو اللاسلكية وقدرة هذه الأجهزة علي بث التصحيحات يضيف عاملا جديدا في وضع ميزانية شراء أجهزة الجي بي أس.

أما بالنسبة للمقارنة بين الحساب اللاحق Post-Processing والحساب الآني Real-Time فهناك عوامل أخري يجب وضعها في الحسبان. ففي أسلوب الرصد مع الحساب اللاحق تتوافر للمستخدم – باستخدام برامج الحاسب الآلي المتخصصة - فرصة للتحقق من الأرصاد التي تم تجميعها والتأكد من جودتها والتحكم في عمليات الحساب حتى الوصول للإحداثيات النهائية للنقاط المرصودة. علي الجانب الآخر فان أسلوب الرصد المتحرك مع الحساب الآني لا يوفر هذه الميزة ، وعلي المستخدم أن يقبل الإحداثيات المحسوبة كما هي مهما كان مستوي الدقة التي أمكن التوصل إليه (غالبا يكون أقل دقة من حالة الحساب اللاحق). من وجهة نظر الكثير من مستخدمي الجي بي أس – وخاصة في البلاد العربية – فأن الرصد المتحرك الآني هو الأسهل لأنه لا يحتاج لخبرة كبيرة في التعامل مع برامج متخصصة ، كما أنه يعطي النتائج في نفس لحظة الرصد دون الحاجة لأية عمليات حسابية في المكتب. لكن هذا الأسلوب لا يجب أن يطبق إلا في حالة الحاجة للإحداثيات فعلا أثناء الرصد أي في أعمال التوقيع المساحي Setting Out. الجدولان التاليان يقدمان مقارنة سريعة بين الطرق المختلفة للرصد باستخدام نظام الجي بي أس.

مقارنة بين طرق الرصد المختلفة

الطريقة	الاحتياجات	التطبيقات	الدقة
الرصد الثابت التقليدي	- أجهزة استقبال أحادية أو ثنائية التردد. - فترة رصد من ٣٠ دقيقة إلي ساعة علي الأقل.	المساحة الجيوديسية عالية الدقة.	ملليمترات.
الرصد الثابت السريع	- أجهزة استقبال أحادية أو ثنائية التردد. - فترة رصد ٥-٢٠ دقيقة.	المساحة الأرضية والمساحة الجيوديسية متوسطة الدقة.	ملليمترات إلي سنتيمترات.
الذهاب و التوقف	- أجهزة استقبال أحادية. - فترة رصد ١-٢ دقيقة. - نحتاج فترة إعداد في بداية الرصد.	المساحة الأرضية متوسطة الدقة.	عدة سنتيمترات.
شبه التحرك	- أجهزة استقبال أحادية أو ثنائية.	المساحة الأرضية والرفع المساحي.	عدة سنتيمترات.
التحرك اللحظي	- أجهزة استقبال أحادية أو ثنائية. - وحدة راديو لاسلكية. - المسافات لا تزيد عن ١٠ كيلومتر.	- التوقيع المساحي. - الرفع المساحي و الهيدروجرافي. - إنشاء ثوابت لضبط الصور الجوية. - المساحة الطبوغرافية والخرائط الكنتورية.	عدة سنتيمترات.

مقارنة بين زمن الرصد و دقة طرق الرصد المختلفة

الطريقة	زمن الرصد	الدقة
الرصد الثابت التقليدي	باستخدام أجهزة أحادية التردد: ٤٥-٦٠ دقيقة. باستخدام أجهزة أحادية التردد: ٤٥-٦٠ دقيقة ، ويزيد الزمن بزيادة المسافة بين الجهاز الثابت و المتحرك.	١ سنتيمتر + ٢ جزء من المليون. ٠.٥ سنتيمتر + ١ جزء من المليون.
الرصد الثابت السريع	٨-٢٠ دقيقة طبقا لعدد الاقمار المرصودة.	قريبة من دقة الرصد الثابت التقليدي.
الذهاب و التوقف	٥-٣٠ ثانية	٢-٥ سنتيمتر + ٢ جزء من المليون.
شبه التحرك	٠.٥ – ٥ ثانية	٢-٥ سنتيمتر + ٢ جزء من المليون.
التحرك اللحظي	٥-٣٠ ثانية تبعا لحاجة العمل.	٢ سنتيمتر + ٢ جزء من المليون.

٢٠-٣ حسابات خطوط القواعد لأرصاد الجي بي أس

عادة فأن برامج الحسابات Data Processing Software التي تأتي مع أجهزة الجي بي أس تشمل ما يسمي الحساب الآلي Auto-Processing – وهو وظيفة في هذه البرامج لتنفيذ الحسابات آليا – للتسهيل علي المستخدمين غير المتخصصين، دون الاطلاع علي المعاملات التي قام البرنامج بتطبيقها عند تنفيذ هذه الحسابات Configuration Parameters. إن برامج الحسابات تم إنتاجها من قبل شركات متخصصة ، لكن داخل البرنامج توجد العديد من الاختيارات و المعاملات التي يجب أن يلم بها المستخدم ليقرر هو الاختيارات المناسبة في كل حالة وكل مشروع. وسنتعرض هنا لبعض أمثلة يجب أخذها في الاعتبار.

حتى الآن فأن الفروقات (سواء الأحادية أو الثنائية أو الثلاثية) يمكن تكوينها إما باستخدام أرصاد الشفرة أو باستخدام أرصاد طور الموجة ، علي التردد الأول L1 من ترددي الأقمار الصناعية (أجهزة الاستقبال أحادية التردد Single-Frequency GPS Receivers). أما في حالة قدرة جهاز الرصد علي استقبال كلا الترددين (الأجهزة ثنائية التردد Dual-Frequency GPS Receivers والتي تكون أغلي سعرا من الأجهزة أحادية التردد) فيوجد نوع آخر من الفروقات – أو طرق الحل - يمكن تطويره. فإذا كان لدينا فرق ثنائي – مثلا – لأرصاد التردد الأول و فرق ثنائي لأرصاد التردد الثاني فمن المنطقي أن نفترض أن تأثير خطا الأيونوسفير سيكون تقريبا واحد علي كلا المعادلتين أو الرصدتين. فإذا طرحنا كلتا المعادلتين (لكلا الترددين) فسينتج لنا معادلة جديدة لن يكون فيها تأثير هذا الخطأ ، وهو الفرق المسمي "الخالي من الأيونوسفير Iono-Free

Solution. وبالطبع فأن هذا الحل سيكون أدق من أي نوع آخر من الحلول أو الفروقات بسبب أن تأثير الأيونوسفير يعد أكبر و أهم مصادر الأخطاء علي أرصاد الجي بي أس.

أيضا عند توفر أرصاد كلا الترددين (L1, L2) فيمكن دمج كلا الترددين لتطوير نوع افتراضي من الأرصاد يسمي Wide-Lane أو الحارة الواسعة ، ومن مميزاته أن طول الموجة له سيكون ٨٦ سنتيمتر (وليس ١٩ أو ٢٤ سنتيمتر للترددين الأصليين أو الحقيقيين) مما يسمح بسهولة تحديد قيمة الغموض Ambiguity.

عند تحديد قيمة الغموض يقوم برنامج الحساب بعدد من تكرارات الحلول Iterations للوصول إلي العدد الصحيح من الدورات الكاملة الذي يعبر عن قيمة هذا الخطأ. بالطبع فأن الحل الرياضي لا يصل إلي عدد صحيح Integer لكن إذا كانت جودة الحل عالية فأن أقرب عدد صحيح سيكون هو القيمة المناسبة للغموض. مثلا: إذا كان أحسن الحلول لعدد الدورات الكاملة = ٨٥٦.٦ دورة فأن أحسن قيمة للغموض (والتي يجب أن تكون عددا صحيحا) ستكون ٨٥٧ دورة. السؤال الآن هو كيف سيحدد البرنامج "أحسن" حل من هذه الحلول أو التكرارت؟ يتم ذلك عن طريق معاملات إحصائية تقيم جودة كل حل أو تكرار iteration حتى يمكن تحديد أي الحلول هو الأحسن. فإذا أجتاز حل هذه الاختبارات الإحصائية فنطلق عليه مصطلح الحب الثابت Fixed Solution ، أما إن لم يجتاز أي حل من الحلول هذه الاختبارات الإحصائية فأن أفضل الحلول يطلق عليه مصطلح الحل غير الثابت Float Solution. وبالطبع فأن الحل الثابت يكون هو الأدق (لأنه توصل إلي قيمة دقيقة للغموض) ويجب استخدامه في مراحل الحسابات التالية.

في حالة التوصل إلي حل ثابت وأيضا – في نفس الوقت - يكون خالي من تأثير الأيونوسفير Iono-Free Fixed Solution فيعد هو أدق الحلول أو أدق قيمة لفرق إحداثيات النقطتين في التحديد النسبي للمواقع Relative Positioning. وحيث أن أرصاد الجي بي أس – عامة – تشتمل علي أرصاد أكبر من العدد الضروري ، أي أرصاد زائدة Redundant Observations بهدف استخدامها في التأكد و التحقيق ، فمن المهم اختيار أي الأرصاد ستدخل في المرحلة النهائية لحسابات إحداثيات النقط المرصودة. كمثال: إذا تم رصد خط بين نقطتين في يومين مختلفين ، وكان حل أرصاد اليوم الأول من النوع غير الثابت Float بينما نتج حل ثابت Fixed من أرصاد اليوم الثاني ، فمن المنطقي أن نفضل الحل الثابت عن الحل الآخر و نعتمد عليه في حساب الإحداثيات لاحقا. من هنا تأتي أهمية أن يلم مستخدم الجي بي أس (وخاصة للتطبيقات المساحية و الجيوديسية) بأنواع الحلول و خصائص كل نوع وأيضا معاملات الحساب في البرنامج Software حتى يكون للمستخدم القرار النهائي السليم في كيفية تنفيذ الحسابات أملا في الوصول إلي أحسن وأدق قيم إحداثيات للنقاط المرصودة بنظام الجي بي أس.

الفصل الحادي و العشرين

الرصد العملي بالجي بي أس

٢١-١ مقدمة

يهدف هذا الفصل الي التعرف بصورة تفصيلية عن الخطوات العملية لتجميع الأرصاد المكانية باستخدام تقنية النظام العالمي لتحديد المواقع.

تتعدد أساليب تنفيذ الأعمال المساحية و الجيوديسية باستخدام الجي بي أس بصورة كبيرة بتعدد طرق الرصد و أنواع الأجهزة و برامج الحسابات ، مما يصعب معه إعداد تصور كامل و دقيق لخطوات تنفيذ أي مشروع مساحي بالجي بي أس. علي الجانب الآخر فهناك خطوط عريضة يتم تطبيقها – بصورة أو بآخري – في أي عمل مساحي بالجي بي أس بهدف التأكد من جودة خطوات العمل المكتبي و الحقلي لضمان الوصول للدقة العالية المنشودة في تحديد المواقع وإنشاء الخرائط.

٢١-٢ التخطيط و التصميم

إن تخطيط ما قبل العمل الحقلي Pre-Planning واختيار مواقع النقاط واختيار الأجهزة المستخدمة و تصميم طريقة واليات الرصد لهو من العوامل الهامة التي تؤثر لاحقا علي الدقة المستهدف الوصول إليها و أيضا تؤثر علي تكلفة المشروع بصفة عامة.

قبل البدء في مشروع الجي بي أس يجب أولا تحديد عدة عوامل تشمل:

- طبيعة المشروع و أهدافه.
- الدقة المطلوب تحقيقها أفقيا و رأسيا.
- عدد نقاط التحكم الأفقية و الرأسية المطلوب رصدها.
- المرجع الجيوديسي الذي ستنسب إليه الأرصاد.
- الأجهزة المتاحة و عددها و مواصفاتها.
- أنسب فترات الرصد الحقلي.

٢١-٢-١ أهداف المشروع و الدقة المطلوبة

تختلف عوامل التخطيط و التصميم باختلاف طبيعة المشروع ذاته (إنشاء شبكات ثوابت أرضية لمنطقة صغيرة أم لمنطقة شاسعة ، الرفع التفصيلي أو الطبوغرافي بهدف إنشاء الخرائط ، تجميع بيانات مكانية لنظم المعلومات الجغرافية .... الخ). لكل مشروع مواصفات (وخاصة في تحديد الدقة المطلوبة) تختلف باختلاف طبيعة المشروع والهدف منه. كمثال يعرض الجدول التالي مواصفات الدقة المطلوبة في مشروعات أو تطبيقات مختلفة باستخدام الجي بي أس، بينما الجدول الآخر يقدم مواصفات أخري لحدود الدقة المطلوبة في مشروعات الهندسة المدنية و نظم المعلومات الجغرافية و إنتاج الخرائط.

الدقة المطلوبة لبعض التطبيقات المساحية للجي بي أس

التطبيق	الدقة النسبية المطلوبة	الدقة المتوقعة (متر)
الاستكشاف و نظم المعلومات الجغرافية	١×١٠^{-٤}	من ١ إلي ٥
الخرائط الطبوغرافية صغيرة المقياس و أنظمة مراقبة المركبات	١×١٠^{-٥}	من ٠.٢ إلي ١
الرفع المساحي متوسط الدقة والمسح العقاري	من ٥ إلي ١×١٠^{-٦}	من ٠.٠١ إلي ٠.٢
الجيوديسيا وشبكات الثوابت الأرضية والرفع المساحي عالي الدقة	من ٥×١٠^{-٧} إلي ١×١٠^{-٦}	أقل من ٠.٠١ إلي ٠.٠٥
الجيوديسيا الديناميكية (مراقبة تحركات القشرة الأرضية مثلا) والعمل المساحي بدقة عالية جدا	١×١٠^{-٧}	من ٠.٠٠١ إلي ٠.٠٢

الدقة المطلوبة للجي بي أس في المشروعات المدنية

نوع المشروع	مقياس رسم الخريطة	الدقة الأفقية (مم)	الدقة الرأسية (مم)
مخططات مشروعات إنشائية	١ : ٥٠٠	١٠٠	٥٠
مخططات الخدمات السطحية و تحت السطحية	١ : ٥٠٠	١٠٠	٥٠
رسومات إنشائية و تصميم مباني	١ : ٥٠٠	٢٥	٥٠
مخططات رصف الطرق	١ : ٥٠٠	٢٥	٥٠
مخططات الحفر	١ : ٥٠٠	٢٥٠	١٠٠
مخططات عامة لقرية أو حي	١ : ٥٠٠٠	١٠٠٠	١٠٠٠
الرفع المساحي للخدمات الموجودة	١ : ١٠٠٠	١٠٠	١٠٠
نظم معلومات جغرافية للمنازل و الخدمات	١ : ٥٠٠٠	١٠٠٠٠	غير مطلوب
خرائط و نظم معلومات جغرافية لتطبيقات بيئية	١ : ٥٠٠٠	١٠٠٠٠	غير مطلوب
خرائط و نظم معلومات جغرافية لخدمات الطوارئ	١ : ٥٠٠٠	١٠٠٠٠	غير مطلوب
خرائط مراقبة الفيضانات وجريان المياه السطحية	١ : ٥٠٠٠	١٠٠٠٠	١٠٠
خرائط تصنيف التربة و الجيولوجيا	١ : ٥٠٠٠	١٠٠٠٠	غير مطلوب
خرائط تصنيف الغطاء الأراضي	١ : ٥٠٠٠	١٠٠٠٠	غير مطلوب
مراقبة هبوط المنشئات	مقياس كبير	١٠	٢

٢١-٢-٢ اختيار أجهزة الاستقبال وبرامج الحساب

إن اختيار الأجهزة المتاحة للرصد (عددها و نوعها) أيضا من أهم العوامل المؤثرة علي جودة المنتج النهائي لمشروعات الجي بي أس. فكمثال توجد بعض أجهزة الاستقبال المخصصة لتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية من الممكن أن توفر الدقة المطلوبة لمثل هذه النوعية من التطبيقات (٠.٥ – ٣ متر) لكنها بالطبع لن تكون مناسبة لأعمال الرفع المساحي. أما مواصفات أجهزة الجي بي أس الجيوديسية فتختلف أيضا من شركة لأخرى ويجب اختيار الجهاز الذي يوفر الحد الأدنى من المواصفات التالية:

- أجهزة جيوديسية النوع Geodetic GPS Receivers ذات دقة عالية.
- أجهزة ثنائية التردد (تستقبل كلا ترددي الجي بي أس L1, L2).
- تستقبل كلا من الشفرة و الموجة الحاملة.
- تعمل في الوضع الثابت التقليدي.
- تعمل أيضا في الوضع التفاضلي (أي تستقبل التصحيحات من مصدر خارجي).
- متعددة القنوات بحد أدني ٢٤ قناة.
- ذاكرة داخلية أو خارجية تسمح بتخزين القياسات لمدة لا تقل عن ٨ ساعات رصد متواصلة.
- مصدر طاقة داخلي أو خارجي يسمح بتوفير الطاقة اللازمة للجهاز لمدة لا تقل عن ٨ ساعات رصد متواصلة.
- الهوائي مقاوم لتأثير تعدد المسار Multipath بدرجة جيدة.
- دقة عالية في تحديد مركز – أو نقطة – التقاط الموجات Phase Center في الهوائي.
- هوائي حساس بدرجة عالية ، و سهل الضبط و التسامت أعلي النقطة الأرضية المرصودة.

أما الأجهزة أحادية التردد (L1) – غالبا توفر دقة سنتيمترات في تحديد المواقع - فيمكن استخدامها في أعمال الرفع المساحي و الطبوغرافي بصفة عامة ولكنها لا تفضل في التطبيقات الجيوديسية مثل إنشاء شبكة الثوابت الأرضية.

اختيار برامج حسابات الأرصاد و برامج الضبط يعد أيضا مؤثر في جودة النتائج المتوقع الحصول عليها. يشترط أن يقدم برنامج الحساب – علي الأقل - الوظائف التالية:

أ- تخطيط ما قبل الرصد.
ب- معالجة القياسات و تنقيحها.
ت- التعامل مع مختلف طرق الرصد (الثابت ، المتحرك ، .... الخ).
ث- التشغيل الآلي للبيانات Auto-processing mode مع إعطاء المستخدم إمكانية تغيير معاملات الحساب إن أراد.
ج- التعامل مع المدارات الدقيقة للأقمار الصناعية Precise ephemerides وأيضا التصحيحات الدقيقة لخطأ ساعات الأقمار الصناعية Precise satellite clocks.
ح- ضبط الأرصاد لكل فترة رصد session.
خ- ضبط الشبكة بالكامل (سواء الضبط المقيد أو غير المقيد).
د- التحليل الإحصائي للنتائج.

ذ- تحويل الإحداثيات بين المراجع الجيوديسية المختلفة.
ر- إسقاط الإحداثيات بمختلف نظم إسقاط الخرائط.
ز- توفير الرسوم البيانية لصحة النتائج و الضبط.
س- سهولة الاستخدام.

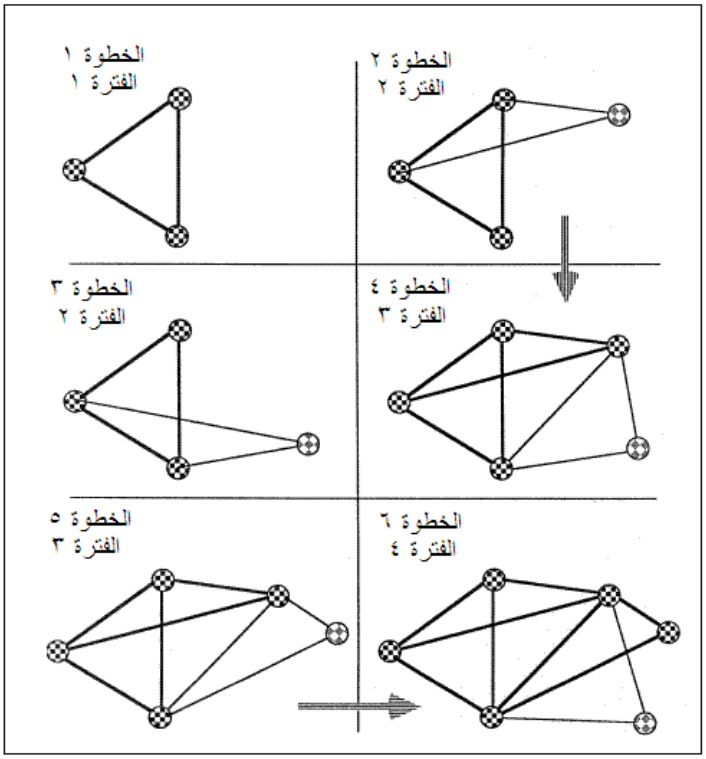
كما أن اختيار الأجهزة و البرامج (في حالة الشراء الجديد) لا بد أن يشمل توافر التدريب الجيد والمتعمق علي استخدام هذه الأجهزة و البرامج في كافة تفاصيل طرق الرصد المتعددة، وأيضا توافر الدعم الفني المستمر من قبل الشركة الموردة.

في حالة الاعتماد علي الرصد المتحرك اللحظي RTK أو الجي بي أس التفاضل DGPS فأن مواصفات وحدة الاستقبال اللاسلكي يجب أيضا أن توضع في الاعتبار. فقدرة ومدي الجهاز في بث التصحيحات تؤثر علي اختيار مواقع و أيضا عدد النقاط الثابتة التي ستستخدم في تنفيذ الرصد الحقلي. بعض أجهزة الراديو اللاسلكية توفر مدي ٣-٥ كيلومترات (أي ستتطلب إنشاء عدد أكبر من نقاط الثوابت في منطقة العمل) بينما البعض الآخر قد يصل مداه إلي ٣٠ كيلومتر.

٢١-٢-٣ تصميم خطة الرصد

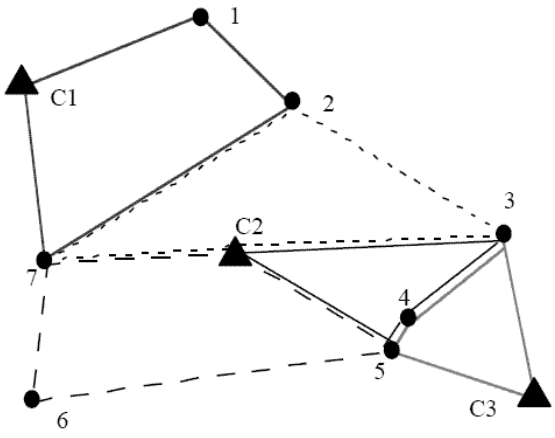
من العوامل المؤثرة علي الزمن المستغرق للعمل الحقلي وضع خطة جيدة لتنقل أجهزة الرصد بين النقاط. مع توافر أجهزة الاتصالات التليفونية المحمولة فقد أصبح تنظيم العمل الحقلي أكثر سهولة و كفاءة ، إلا أن بعض المشروعات من الممكن أن تتم في مناطق خارج حدود تغطية مثل هذه الشبكات الخلوية. وفي هذه الحالات فيجب إعداد تصور كامل وتفصيلي عن كيفية تنظيم مواعيد فترات الرصد sessions وكيفية تنظيم تنقل الأجهزة بين النقاط المختلفة. المثال التالي يقدم مخططا لكيفية تحريك الأجهزة المتاحة (٣ مستقبلات) لرصد شبكة مكونة من ٦ نقاط أرضية. تبدأ الخطوة الأولي – في التصميم – باستخدام المستقبلات الثلاثة لرصد النقاط ١ ، ٢ ، ٣. ثم هناك بديلين لإضافة النقطة الرابعة (الخطوة ٢ والخطوة ٣) إلا أن الخطوة ٣ هي الأفضل ، ثم في الخطوة التالية يوجد بديلين أيضا (الخطوة ٤ و الخطوة ٥) لرصد النقطة الخامسة حيث الخطوة ٥ تعد أفضل ، وفي آخر الخطوات يتم رصد النقطة السادسة. كما يقدم الشكل الآخر مثالا آخر لرصد ١٠ نقاط في ٧ فترات رصد مع تحقيق بعض الأرصاد المتكررة لضمان جودة الشبكة.

كما أن عدد الأجهزة المتاحة للاستخدام سيكون عاملا مؤثرا في تكلفة المشروع ، فمع أن أجهزة الرصد الجيوديسية مازالت مرتفعة الثمن (من ١٠ إلي ٢٠ ألف دولار للجهاز الواحد طبقا لمواصفاته و مشتملاته) إلا أن بعض التطبيقات عالية الدقة يجب أن يتوافر بها علي الأقل ٣-٤ أجهزة تعمل آنيا.



شكل (٢١-١) مثال لتخطيط رصد شبكة جي بي أس

فترة الرصد	أجهزة الاستقبال			
	A	B	C	D
1	C1	1	2	7
2	C2	3	2	7
3	C2	5	6	7
4	C2	5	3	4
5	C3	5	3	4
6	C1	C2	C3	6
7	C1	C2	C3	1



شكل (٢١-٢) مثال لفترات رصد شبكة جي بي أس مع تكرار بعض رصد الخطوط

تحديد مواقع (ومعرفة إحداثيات) نقاط التحكم المتوفرة في منطقة العمل – أو بالقرب منها – من العوامل الهامة أيضا في التخطيط ما قبل العمل الحقلي. كما هو معروف أن أرصاد الجي بي أس في الوضع النسبي Relative Positioning (وهو المطبق في الأعمال المساحية وليس الملاحية) تعطي فروق الإحداثيات بين كل نقطتين مرصودتين ، و لحساب الإحداثيات المطلقة لكل نقطة فيجب ربط الشبكة بنقطة واحدة – علي الأقل – من نقاط التحكم Control Points المعلومة الإحداثيات. يتطلب التخطيط و التصميم لمشروع الجي بي أس معرفة مواقع نقاط التحكم المتوفرة وأيضا الحصول علي إحداثيات هذه النقاط التي ستستخدم لاحقا في مرحلة الحسابات و ضبط الشبكات. ومع أن أقل عدد لنقاط التحكم المطلوبة هو نقطة واحدة فقط إلا أنه يفضل وجود أكثر من نقطة تحكم يتم رصدهم مع الشبكة الجديدة للحصول علي ربط جيد للعمل المساحي المستهدف مع المرجع الجيوديسي ونظام الإحداثيات الوطني للدولة. في التطبيقات الجيوديسية – مثل إنشاء شبكات ثوابت أرضية – يشترط وجود أكثر من نقطة تحكم يتم استخدامهم في أثناء العمل الحقلي. أما في حالة عدم توافر أية نقاط تحكم علي الإطلاق فيوجد طرق حديثة لربط الشبكة منها: (١) حساب الوضع المطلق الدقيق Precise Point Positioning or PPP لأحدي النقاط الجديدة بالشبكة ويكون ناتجا من رصدها لفترة زمنية طويلة أو (٢) استخدام الشبكة العالمية IGS (سنتحدث عنها لاحقا).

٢١-٢-٤ تصميم الربط علي شبكات التحكم

توافر عدد من نقاط التحكم الرأسية المعلومة المنسوب Vertical Control Points مهم أيضا عند تحويل الارتفاعات الناتجة من أرصاد الجي بي أس (ارتفاعات جيوديسية) إلي مناسيب مقاسة من متوسط سطح البحر MSL. لذلك لا بد من وجود نقطة تحكم رأسية واحدة علي الأقل يتم رصدها في احدي فترات رصد مشروع الجي بي أس الجديد. لكن في معظم التطبيقات المساحية فمن الأفضل توافر أكثر من نقطة - من هذه النوعية – في منطقة العمل لاستخدامهم لاحقا للحصول علي دقة جيدة في عملية تحويل الارتفاعات واستنباط قيم المناسيب.

يعرض الجدول التالي مثال لمجموعة أخري من المواصفات الجيوديسية فيما يتعلق بنقاط الضبط الأفقية و الرأسية المطلوبة عند إنشاء شبكة ثوابت بالجي بي أس سواء بطريقة الرصد الثابت التقليدية أو الرصد الثابت السريع، بينما يعرض الجدول الآخر مجموعة أخري من مواصفات تخطيط و رصد شبكة من الثوابت الأرضية باستخدام الرصد الثابت.

مواصفات نقاط التحكم المطلوبة في إنشاء شبكة جي بي أس

البند	الرصد الثابت التقليدي	الرصد الثابت السريع
أقل عدد لنقاط التحكم المطلوبة لربط المشروع الجديد	علي الأقل ٣	علي الأقل ٣
أقصي مسافة بين نقاط التحكم و حدود المشروع	٣٠ ميل	٣٠ ميل
أقل نسبة مئوية لعدد خطوط القواعد متكررة الرصد	٥ %	٥ %
أقل عدد تكرار لاحتلال النقاط	١٠٠% مرتين ، ١٠% ثلاثة مرات	١٠٠% مرتين ، ١٠% ثلاثة مرات

مواصفات الرصد الثابت لإنشاء شبكة جي بي أس

البند	شبكة درجة أولي	شبكة درجة ثانية	شبكة درجة ثالثة
الدقة النسبية المطلوبة (جزء في المليون ppm)	١٠	٢٠-٥٠	١٠٠
الربط علي الشبكة الوطنية	نعم	نعم	اختياري
أقل عدد لنقاط الربط علي المرجع الوطني	٣	٢	٢
أنسب عدد لنقاط الربط علي المرجع الوطني	أكثر من ٣	٢	٢
مرات تكرار رصد خطوط القواعد لنسبة ١٠% من عدد الخطوط	٢	٢	٢
أقصي عدد لخطوط القواعد في الحلقة الواحدة	١٠	١٠-٢٠	٢٠
أقصي محيط للحلقة الواحدة (كم)	١٠٠	١٠٠-٢٠٠	اختياري
أقصي خطأ قفل الحلقة (جزء من المليون ppm)	١٠	٢٠-٥٠	١٠٠-٢٠٠
عدد مرات قياس ارتفاع الهوائي/الجهاز في النقطة	٢	٢	٢
أجهزة جيوديسية ثنائية التردد لرصد الخطوط أقل من ٢٠ كم	نعم	لا	لا
أجهزة جيوديسية ثنائية التردد لرصد الخطوط أكبر من ٢٠ كم	نعم	نعم	نعم
زاوية القناع Mask Angle أثناء الرصد	٥١٥	٥١٥	٥١٥

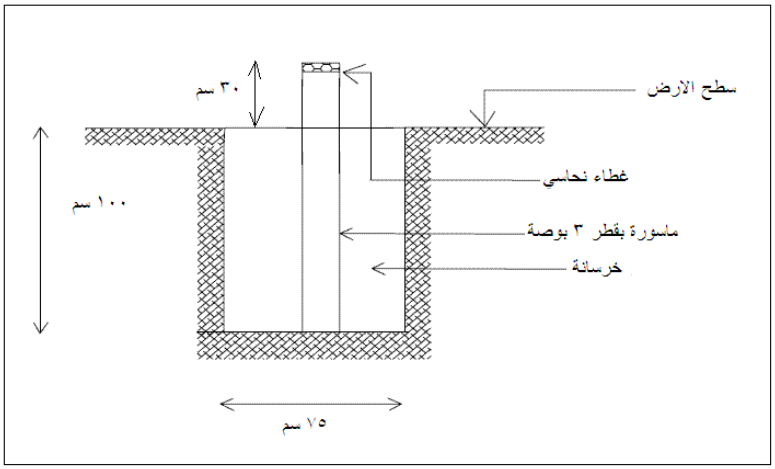
٢١-٢-٥ اختيار المرجع الجيوديسي المطلوب

تحديد المرجع الجيوديسي Datum الذي سيعتمد عليه المشروع يعد من العوامل الهامة جدا في التخطيط ، هل المطلوب اعتماد المرجع العالمي WGS84 في حساب إحداثيات النقاط المرصودة و إنشاء الخرائط الجديدة للمشروع أم يجب تحويل الإحداثيات لمرجع جيوديسي محلي. فان كانت عملية التحويل Datum Transformation مطلوبة فيجب تحديد طريقة تنفيذها: (١) بمعرفة عناصر تحويل معلومة Transformation Parameters ، (٢) بحساب عناصر التحويل. فان كانت عناصر التحويل معلومة فيجب الحصول علي قيمها من الجهة المسئولة عن حسابها. أما في حالة عدم وجود عناصر تحويل فيجب رصد ٣ نقاط تحكم (معلومة الإحداثيات في المرجع المحلي) مع شبكة الثوابت الجديدة المزمع إقامتها للمشروع واستخدام أحد برامج الحساب لتقدير عناصر التحويل بين المراجع في منطقة العمل.

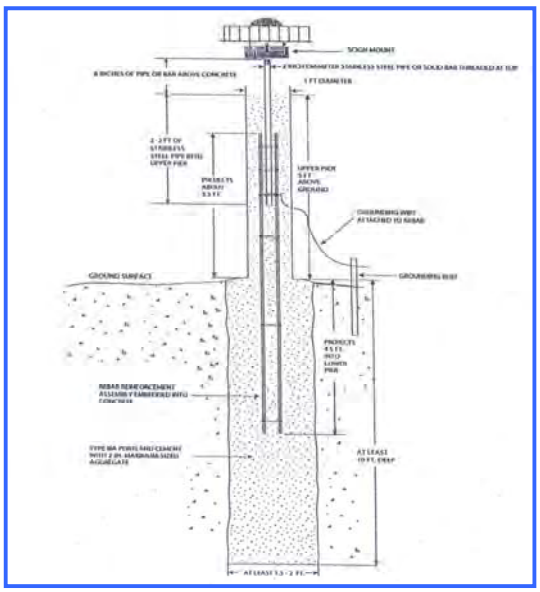
٢١-٢-٦ اختيار مواقع النقاط وتثبيت العلامات

مواصفات اختيار مواقع النقاط الثابتة و طريقة بناء العلامات الأرضية يعد أيضا من عوامل التخطيط ما قبل العمل الحقلي. الشكل التالي يقدم نموذجا عاما لبناء نقطة ثوابت أرضية للتطبيقات المساحية بينما يقدم الشكل الآخر نموذجا آخر للتطبيقات الجيوديسية الدقيقة، بينما توجد مواصفات أكثر تفصيلا لإنشاء الثوابت المساحية طبقا لكل نوع من أنواع التربة في منطقة العمل. النقاط التالية تقدم خطوطا عريضة لكيفية اختيار المواقع المناسبة لإنشاء الثوابت الأرضية:

- سهولة الوصول لموقع النقطة.
- ضمان تواجد النقطة في هذا الموقع لفترة طويلة.
- أن يكون الموقع مناسبا للاستخدام المساحي.
- أن يكون البناء علي أرض صخرية صلبة و ثابتة.
- ألا توجد عوائق حول موقع النقطة في حدود ^{o}١٥ من مستوي الأفق.



شكل (٢١-٣) نموذج بناء نقطة ثوابت للأعمال المساحية



شكل (٢١-٤) نموذج بناء نقطة ثوابت للأعمال الجيوديسية

٢١-٢-٧ اختيار أنسب أوقات الرصد

اختيار أنسب وقت للرصد في الجي بي أس يعد أيضا من خطوات التصميم و التخطيط. فمع أن أشارات الأقمار الصناعية في الجي بي أس متاحة ٢٤ ساعة يوميا ، ألا أن دقة و جودة وعدد الأقمار الصناعية يختلف من موقع جغرافي لآخر و من ساعة لآخري في نفس اليوم. يعد معامل دقة الموقع PDOP العامل الأساسي الذي يصف العلاقة بين توزيع الأقمار الصناعية في زمن معين و بين الدقة المتوقعة للرصد في هذا الوقت. ويمكن معرفة قيم PDOP لأي مكان و في أي وقت باستخدام البرامج المتخصصة (أي قبل تنفيذ العمل الحقلي ذاته). لذلك لا بد من استخدام أحد هذه البرامج لحساب معامل الدقة في الأيام المحددة للرصد الحقلي ، ومن ثم اختيار أنسب أوقات أو ساعات اليوم التي يكون فيها معامل PDOP أقل من ٦ ضمانا للوصول لأدق تحديد للمواقع المرصودة. أما للرصد المتحرك اللحظي فأن PDOP أقل من ٣ يعتبر جيدا ، ومن ٣ إلي ٦ يعتبر مقبولا بينما ما هو أكبر من ٦ يعتبر ضعيفا. أما قيمة زاوية القناع Mask or Cut-Off Angle فيجب ألا تقل عن 15^{o} في معظم التطبيقات المساحية و الجيوديسية.

يعتمد اختيار طول فترة الرصد علي عدة عوامل أهمهم الدقة المتوقعة أو المطلوبة في المشروع المساحي ، بالإضافة لمعامل الدقة GDOP وعدد الأقمار الصناعية المتوفرة في وقت الرصد. الجدول التالي يقدم خطوطا عريضة لكيفية تحديد طول زمن أو فترة الرصد سواء في طريقة الرصد الثابت التقليدي أو الرصد الثابت السريع ، بينما يقدم الجدول التالي مواصفات أخري عند استخدام أجهزة استقبال جي بي أس أحادية أو ثنائية التردد. أما في حالة أنشاء ثوابت أرضية و رأسية – أي أنه مطلوب تحديد الارتفاع الارثومتري لنقاط الشبكة – فأن مواصفات طول فتره الرصد ستتغير بصورة ملحوظة للوصول إلي دقة جيدة في قياس الارتفاعات كما نري في الجدول

الاخر، وفي هذه الحالة يجب أن يتم ربط الشبكة مع ٣ نقاط تحكم رأسية BM علي الأقل مع استخدام نموذج جيويد جيد.

طول وقت الرصد الحقلي للرصد الثابت

طول خط القاعدة (كم)	عدد الأقمار الصناعية المتوفرة	معامل الدقة GDOP	وقت الرصد (دقيقة)
أولا: الرصد الثابت التقليدي:			
أقل من ١ كم	أكثر من ٤	أقل من ٦	١٠-٣٠
١ - ٥	أكثر من ٤	أقل من ٦	٣٠-٦٠
٥-١٠	أكثر من ٤	أقل من ٦	٦٠-٩٠
١٠-٢٠	أكثر من ٤	أقل من ٦	٩٠-١٢٠
٢٠-٥٠	أكثر من ٤	أقل من ٦	٢-٣ ساعات
٥٠-١٠٠	أكثر من ٤	أقل من ٦	أكثر من ٣ ساعات
أكثر من ١٠٠	أكثر من ٤	أقل من ٦	أكثر من ٤ ساعات
ثانيا: الرصد الثابت السريع:			
أقل من ١ كم	أكثر من ٤	أقل من ٥	أقل من ٥ دقائق
١-٥	أكثر من ٤	أقل من ٥	٥-١٠ دقائق
٥-١٠	أكثر من ٤	أقل من ٥	١٠-١٥ دقيقة
١٠-٢٠	أكثر من ٤	أقل من ٥	١٠-٣٠ دقيقة

طول وقت الرصد الحقلي للرصد الثابت للأجهزة أحادية و ثنائية التردد

طول خط القاعدة (كم)	عدد الأقمار الصناعية المتوفرة	وقت الرصد للأجهزة أحادية التردد (دقيقة)	وقت الرصد للأجهزة ثنائية التردد (دقيقة)
١ ــ ١٠	أكثر من ٦	٢٤	٨
١٠ ــ ٢٠	أكثر من ٦	٣٠	١٠
٢٠ - ٥٠	أكثر من ٦	٦٠	٢٠
أكبر من ٥٠	أكثر من ٦	٩٠	٣٠
١ ــ ١٠	أكثر من ٤	٣٦	١٢
١٠ ــ ٢٠	أكثر من ٤	٤٥	١٥
٢٠ - ٥٠	أكثر من ٤	٧٥	٢٥
أكبر من ٥٠	أكثر من ٤	١٣٥	٤٥

طول وقت الرصد الحقلي للرصد الثابت لشبكات الثوابت الرأسية
(للوصول لدقة ± ٣٠ ملليمتر في حساب المناسيب)

طول خط القاعدة (كم)	وقت الرصد للأجهزة أحادية التردد (دقيقة)	معامل القياس Sample rate (ثانية)
أقل من ١٠	٣٠	٥
١٠ ــ ٢٠	٦٠	١٠
٢٠ ــ ٤٠	١٢٠	١٥
٤٠ ــ ٦٠	١٨٠	١٥
٦٠ ــ ٨٠	٢٤٠	١٥
٨٠ ــ ١٠٠	٣٠٠	١٥
أكبر من ١٠٠	أكثر من ٣٠٠	١٥

أيضا فأن تحديد معامل الأرصاد sample rate (المعدل الزمني بين كل رصدة و الرصدة التالية) يجب أن يتم قبل بدء العمل الحقلي ويتم ضبط أجهزة الاستقبال قبل التوجه للمشروع. الجدول التالي يوضح قيم معامل الأرصاد المقترحة لكافة طرق الرصد بالجي بي أس، بينما يقدم الجدول الآخر نموذجا آخر لمواصفات الرصد بالجي بي أس في إنشاء شبكة ثوابت أرضية بكلتا طريقتي الرصد الثابت التقليدي و السريع.

قيم معامل الأرصاد في طرق الرصد المختلفة

طريقة الرصد	الثابت	الثابت السريع	الذهاب و التوقف	المتحرك
معامل الأرصاد	١٠ ثانية	٥-١٠ ثانية	١-٥ ثانية	٠.٢ ثانية

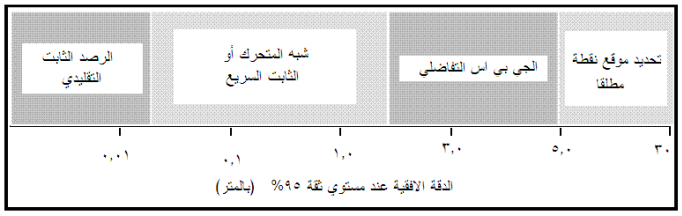
مواصفات رصد شبكة جي بي أس

البند	الرصد الثابت التقليدي	الرصد الثابت السريع
أقصي قيمة لمعامل الدقة PDOP	٥	٥
أقل زمن لفترة الرصد	٣٠ دقيقة	١٥ دقيقة
أقصي معامل أرصاد	١٥ ثانية	١٥ ثانية
أقل زاوية قناع	^{o}١٠	^{o}١٠

٢١-٢-٨ اختيار أنسب طريقة للرصد

يتم اختيار طريقة الرصد بعد وضع الخطوط العريضة لأهداف المشروع و مستوي الدقة المطلوب الوصول إليه ، حيث تتم المفاضلة بين جميع طرق الجي بي أس وخاصة من وجهة نظر تقنية و اقتصادية في نفس الوقت. فإذا كان المشروع – مثلا – بهدف استكشاف عام لمنطقة أو تطوير نظم معلومات جغرافية لأماكن الخدمات الموجودة في مدينة أو تحديث الخرائط صغيرة المقياس فيمكن

الاكتفاء باستخدام أجهزة الاستقبال الملاحية أو المحمولة يدويا (أجهزة أرصاد الشفرة) والتي توفر دقة في حدود ± ٤-٨ متر وبمتوسط ± ٥ مترحيث تكون هذه الدقة مناسبة لمثل هذه التطبيقات و أيضا غير مكلفة ماديا. أما في حالة تطوير نظم معلومات جغرافية لمساحة صغيرة (حي مثلا) أو لأعمال المساحة الهيدروجرافية أو لمراقبة النحر في الشواطئ فأن الدقة المطلوبة ستكون في حدود ± ١ متر أو أقل مما يجعل طريقة الجي بي أس التفاضلي DGPS هي الأنسب وخاصة في حالة توافر مصدر لتصحيحات الأرصاد سواء من جهات توفر هذه الخدمة أو استخدام جهاز مرجعي لحساب تصحيحات الشقرة و نقلها للأجهزة المتحركة سواء لحظيا أو باستخدام التصحيح المكتبي. تعد أجهزة الرصد (النسبي وليس المطلق) المخصصة لتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية بديلا مناسبا لمثل هذه التطبيقات (حيث أنها أرخص سعرا من الأجهزة الجيوديسية و أسهل أيضا في التعامل معها). كما أن خدمات التصحيحات التجارية (مثل خدمة OmniStar) تعد بديلا آخر اقتصاديا في حالة عدم توافر جهات حكومية تبث التصحيحات في محيط منطقة العمل ، وكمثال فقد تم استخدام هذه الخدمة التجارية في الرفع الهيدروجرافي لنهر النيل في مصر وأثبتت أنها توفر الوقت اللازم للأعمال الحقلية بنسبة كبيرة مما جعلها تخفض من تكلفة المشروع. أما للرفع المساحي سواء التفصيلي أو الطبوغرافي فأن طرق الرصد المتحرك تعد هي الأنسب و الأوسع انتشارا ، لكن يبقي المفاضلة بين هذه الطرق لتنفيذ التصحيح و الحسابات في الموقع مباشرة RTK أم في المكتب بعد انتهاء العمل الحقلي PPK. في حالة توقيع نقاط معلومة الإحداثيات فأن طريقة RTK هي البديل الوحيد لان التوقيع اللحظي يتطلب التصحيح اللحظي لأرصاد الجي بي أس ، أما في حالة الرفع المساحي فأن طريقة PPK من الممكن أن تكون هي الأفضل حيث أنها تتيح للمستخدم التحقق من الأرصاد و استبعاد الغير دقيق منها قبل إجراء حسابات تحديد الإحداثيات النهائية للنقاط المرصودة وذلك من خلال البرامج المكتبية المتخصصة بعد انتهاء العمل الميداني ، وان كان البعض يستعمل طريقة RTK في الرفع المساحي لأنها أسرع ولا تحتاج لأية أعمال مكتبية. أما لتطبيقات المساحة الجيوديسية و المساحة الأرضية عالية الدقة فلا يوجد بديل عن طرق الرصد الثابت.



شكل (٢١-٥) مثال للدقة المتوقعة من طرق الرصد المتعددة

٢١-٢-٩ المتطلبات الأخرى

أيضا تجهيز المتطلبات اللوجستية اللازمة يعد من مكونات التخطيط للمشروع لأنه يؤثر علي الوقت المستغرق لتنفيذ العمل الحقلي. يجب عمل حصر بالمتطلبات (عدد و مواصفات السيارات المناسبة لمنطقة العمل ، عدد أفراد الفريق الحقلي وخبراتهم (الجدول التالي)، مدي توافر مصدر طاقة دائم لشحن بطاريات أجهزة الرصد ، إمكانيات الاتصالات التليفونية أو اللاسلكية في منطقة العمل ، إمكانيات إقامة مخيم لأفراد الفريق الحقلي .... الخ) وإعدادها قبل بدء العمل الميداني.

مثال لأفراد الفريق الحقلي و مسؤولياتهم

الوظيفة	المسؤوليات
رئيس الفريق الحقلي	- تنظيم الأرصاد طبقا لخطة الرصد. - التحقق من جودة إشارات الأقمار الصناعية. - التحقق من جودة النتائج يوميا و تعديل خطة الرصد إن لزم. - التغلب علي الصعوبات الفنية و الحياتية للفريق.
راصدين	- التأكد من توافر الأجهزة و المعدات اللازمة. - التأكد من شحن بطاريات الأجهزة يوميا. - التأكد من احتلال النقطة المطلوب رصدها فعلا. - ضبط أفقية و تسامت جهاز الاستقبال/الهوائي. - قياس ارتفاع الجهاز/الهوائي. - تشغيل الجهاز. - مراقبة عمل الجهاز و استمرارية الأرصاد. - تكملة تسجيل كل بيانات النقطة في جدول الرصد الحقلي.
مشغل بيانات	- التأكد من تجميع بيانات كل الأجهزة. - نقل البيانات من الأجهزة إلي الحاسب الآلي. - عمل نسخ احتياطية backup من كل الأرصاد. - حساب أرصاد الجي بي أس. - ضبط الحلقات أولا بأول. - مراجعة النتائج وإعداد تقرير إلي رئيس الفريق الحقلي.

٣-٢١ الرصد الحقلي

تبدأ خطوات العمل الحقلي باستكشاف منطقة العمل بصورة عامة ، من خلال الخرائط أو المرئيات الفضائية أو الصور الجوية المتوفرة ، كما يمكن الاستعانة بالطرق الحديثة المتوفرة علي شبكة الانترنت مثل برنامج جوجل أيرث Earth Google أو موقع http://www.wikimapia.org المجاني. في مرحلة الاستكشاف يتم اختيار مواقع النقاط الثابتة المطلوب إنشاؤها ويتم إعداد كروكي لكل موقع و طرق الوصول إليه. ويجب مراعاة المواصفات الفنية لتوزيع نقاط الثوابت و مواصفات موقع كل نقطة وخاصة فيما يتعلق بخلو الموقع المقترح من أية عوائق ربما تكون سببا في حدوث خطأ تعدد المسار Multipath Error الذي يؤثر علي جودة و دقة أرصاد الجي بي أس. وقبل بدء الرصد الحقلي يتم مراجعة كافة معاملات التشغيل configuration or setup parameters المخزنة في الجهاز أو وحدة التحكم ، مثل نوع الرصد و معدل الأرصاد وزاوية القناع ... الخ.

إن أجهزة استقبال الجي بي أس تعد أجهزة متطورة وتكاد تكون عملية استقبال و تخزين إشارات الأقمار الصناعية عملية آلية ، وتنحصر الأخطاء البشرية في بعض النقاط التي يجب مراعاتها وبكل دقة:

- إعداد جدول لتسجيل بيانات كل محطة يتم رصدها وخاصة: اسم النقطة ، نوع و موديل و رقم جهاز الاستقبال ، نوع و موديل و رقم الهوائي إن كان منفصلا عن جهاز الاستقبال ، اسم الراصد ، وقت بدء و إنهاء عملية تجميع الأرصاد.
- ضبط تسامت و أفقية الجهاز أو الهوائي بعناية تامة ودقة ، والتأكد من ضبط الأفقية قبل و بعد عملية تجميع الأرصاد.
- قياس ارتفاع الجهاز بكل دقة مرة قبل بدء تشغيله و مرة أخري بعد انتهاء عملية الرصد. علما بأن بعض الأجهزة تقيس الارتفاع مائلا و بعضها يقيسه رأسيا ، فيجب التأكد من كتيب تشغيل كل جهاز من الطريقة الصحيحة المناسبة.
- إدخال ارتفاع الجهاز في وحدة التحكم المصاحبة له ، وأيضا تسجيل الارتفاع في جدول الرصد ، وهذه خطوة هامة للتحقق من أن كلا القراءتين سليمتين.
- في الرصد المتحرك يتم قياس ارتفاع الانتنا عن سطح الأرض سواء كانت مركبة علي عصا الرصد pole أو مثبتة علي السيارة من الخارج.
- اختيار أسما مناسبا لأرصاد كل نقطة في كل فترة رصد عند إدخال البيانات في وحدة التحكم (اسم المشروع Job).
- للرصد المتحرك اللحظي RTK يجب ضبط معاملات استقبال التصحيحات في كلا من الجهاز المرجعي و الجهاز المتحرك – طبقا لكتيبات التشغيل - بحيث يكونا متطابقين لضمان إرسال و استقبال التصحيحات.
- متابعة قيمة PDOP – علي شاشة الجهاز - طوال فترة الرصد و تسجيل تغيرها بمرور زمن الرصد.

نموذج رصد ثابت بجهاز تحديد المواقع GPS

(مجموعة من النقط)

اسم الراصد : .....

معلومات عن المشروع:	معلومات عن الموقع:
اسم المشروع: ..... رقم النقطة:	الإحداثيات التربيعية للنقطة:
نوع النقطة : ☐ ثابت Reference ☐ متحرك Rover	خط الطول: .....
نوع الرصد : ☐ ثابت ☐ ثابت سريع	دائرة العرض: .....
التاريخ: / / 142 هـ الموافق / / م	الارتفاع: ..... .
وقت بداية الرصد(التوقيت المحلي):	
وقت نهاية الرصد(التوقيت المحلي) :	
معلومات عن الجهاز:	**معلومات عن الأقمار:**
اسم الجهاز وموديله :	الأقمار عند بداية الرصد: .....
رقم وحدة المستقبل:	الأقمار عند نهاية الرصد : .....
رقم الهوائي: ..... ارتفاع الهوائي: ..... م	التوزيع الهندسي للأقمار: ..... (PDOP)

ملحوظات:

.....

.....

.....

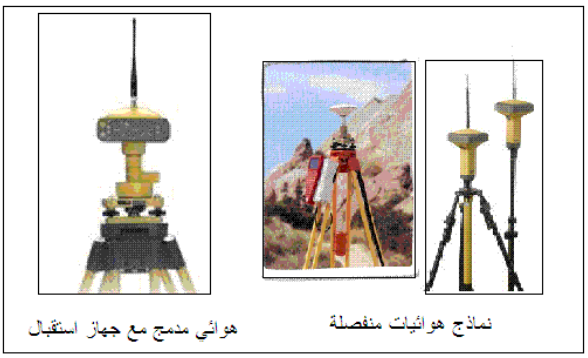
.....

.....

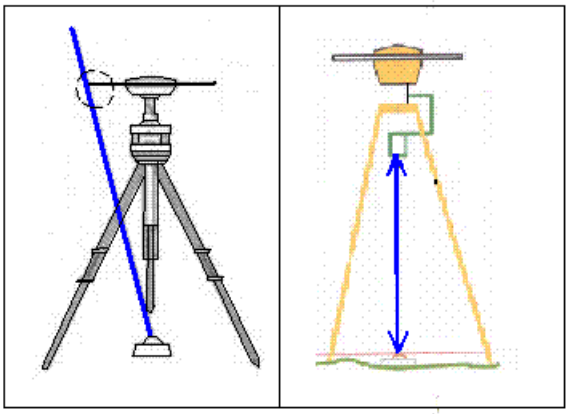
.....

.....

شكل (٢١-٦) نموذج لكارت بيانات حقلية لمحطة جي بي أس



شكل (٢١-٧) بعض أجهزة الرصد الجيوديسية



شكل (٢١-٨) بعض طرق قياس ارتفاع الجهاز

شكل (٢١-٩) العمل الحقلي للرصد المتحرك اللحظي

في تطبيقات تجميع البيانات المكانية و غير المكانية Attributes لنظم المعلومات الجغرافية فيجب تصميم حقول قاعدة بيانات المشروع قبل التوجه للحقل. مثلا لمشروع تجميع بيانات المدارس فأن قاعدة البيانات تتكون حقولها من: اسم المدرسة ، نوع المرحلة التعليمية ، اسم الحي و الشارع ، .... الخ ، وبهذه الخطوة يتم تنفيذ العمل الحقلي أسرع عند رصد موقع وإدخال البيانات المطلوبة لكل مدرسة.

شكل (٢١-١٠) العمل الحقلي بأجهزة نظم المعلومات الجغرافية

في تطبيقات التوقيع المساحي Setting-Out (باستخدام طريقة الرصد المتحرك اللحظي RTK) يجب إعداد ملف بإحداثيات النقاط المطلوب توقيعها ورفع الملف إلي جهاز الاستقبال – أو وحدة التحكم – قبل بدء العمل الحقلي. وفي الحقل يتم استدعاء الملف و البدء في توقيع كل نقطة حيث يظهر علي شاشة الجهاز الفروق (مسافة و اتجاه) بين الإحداثيات الحالية و الإحداثيات المطلوب توقيعها ويبدأ الراصد في التحرك حتى يتلاشي هذا الفرق فيقوم بوضع العلامة الأرضية في مكانها المطلوب.

في تطبيقات الرفع الطبوغرافي لمساحة كبيرة يجب إعداد تصور لكيفية تنفيذ العمل الحقلي ومواصفاته وخاصة المسافة الأفقية بين النقاط التي تحقق الوصول لأهداف و دقة المشروع. تعتمد هذه المسافة علي الفترة الكنتورية اللازمة لإعداد الخرائط الكنتورية المطلوبة ، وحيث أن عملية توجيه الراصد في المناطق الصحراوية (حيث لا توجد أهداف أو علامات أرضية) ليست سهلة فيفضل إعداد مسارات (خطوط) الرصد في ملفات – ملفات أوتوكاد مثلا - و تحميلها إلي أجهزة الاستقبال قبل بدء العمل الحقلي. وبذلك يتم التأكد من أن عملية الرفع المساحي بالجي بي أس تمت كما هو مخططا لها و بالكثافة المطلوبة للبيانات والتي تؤدي لتحقيق أهداف المشروع.

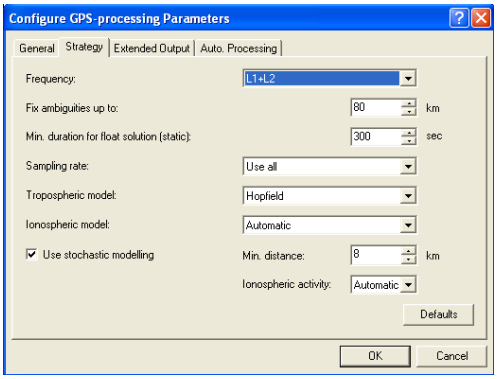
من المهم جدا تحميل بيانات الأرصاد الحقلية من أجهزة الاستقبال إلي الحاسب الآلي Data Download بعد نهاية كل يوم عمل حقلي لفحص الملفات والتأكد من سلامتها وعمل نسخ احتياطية منها علي أقراص مدمجة (CD or DVD). أما في الأعمال الجيوديسية فيفضل إجراء حسابات الأرصاد بصورة مبدئية – يوميا بعد انتهاء العمل الحقلي – للتأكد من جودة الأرصاد بصورة أولية لحين البدء في تنفيذ الحسابات النهائية ، وفي حالة وجود مشاكل في أحدي النقاط المرصودة أو أحد خطوط القواعد فيتم إعادة الرصد في اليوم التالي مباشرة.

٢١-٤ الحسابات و الضبط

تقوم كل شركة من الشركات المنتجة لأجهزة استقبال الجي بي أس بتطوير صيغ format خاصة بها لتخزين ملفات الأرصاد. وكل شركة تنتج برنامج حسابات software خاص بها والذي يستطيع التعامل بسهولة مع صيغ الملفات الناتجة من أجهزة من نفس الشركة. في حالة وجود أكثر من نوع من أنواع أجهزة استقبال الجي بي أس المستخدمة في مشروع معين فأن أي برنامج حساب لن يستطيع التعامل مع صيغ ملفات صادرة من أجهزة من شركات أخري. هنا نلجأ لصيغة قياسية standard format تسمح باستخراج البيانات – أو الأرصاد – من أي ملف أرصاد ، وهذه الصيغة تسمي راينكس RINEX وهذا الاسم اختصار لكلمات: صيغة تبادل الملفات التي لا تعتمد علي نوع الجهاز Receiver INdependent EXchange format. كمثال: إذا كان لدينا مشروع تم فيه استخدام أجهزة جي بي أس من شركة ترمبل و أجهزة أخري من شركة ليكا ، فأننا نستدعي البيانات من أجهزة ترمبل download باستخدام برنامج هذه الشركة ثم تعيد تصدير Export الملفات إلي صيغة راينكس حتى يستطيع برنامج حسابات شركة ليكا أن يتعامل معها ، والعكس صحيح أيضا حيث يمكن تحميل بيانات أجهزة ليكا إلي الحاسب الآلي ثم تعيد تصديرها بصيغة راينكس حتى يتعامل معها برنامج حسابات شركة ترمبل.

أما خطوات حساب أرصاد الجي بي أس Data Processing فتختلف باختلاف طريقة الرصد المستخدمة ، لكن التسلسل المنطقي للخطوات يشمل:

- تحميل البيانات من أجهزة الاستقبال إلي الحاسب الآلي.
- اختيار معاملات الحساب Processing Parameters المناسبة لطريقة الرصد المستخدمة.
- فحص معلومات كل نقطة مرصودة (اسم النقطة ، ارتفاع الجهاز ، نوع الجهاز و نوع الهوائي .... الخ).
- اختيار خطوط القواعد المستقلة independent baselines لحسابها.
- في حالة توافر ملفات دقيقة لمدارات الأقمار الصناعية Precise Orbits فيجب استدعائها للبرنامج مع التأكد من أنها ضمن معاملات الحساب المطلوبة.
- تنفيذ حساب خطوط القواعد Baseline Processing.
- مراجعة و فحص النتائج.



شكل (٢١-١١) مثال لضبط معاملات الحساب المطلوبة

توجد عدة خطوط عريضة تساعد المستخدم في فحص و تقييم نتائج حسابات خطوط القواعد ومنها ما هو موجود في الجدول التالي.

عناصر تقييم جودة حلول خطوط القواعد

العنصر	الحدود المقبولة
<u>نوع الحل:</u> حل ثابت للتردد الأول L1 حل ثابت خالي مكن الأيونوسفير حل غير ثابت خالي من الأيونوسفير	 مفضل للخطوط أقل من ١٠ كم للخطوط ١٠ – ٧٥ كم مفضل للخطوط أكبر من ٧٥ كم
<u>التبـــاين المرجعـــي Reference Variance:</u> القيمة الاسمية القيمة القصوى لأرصاد L1 القيمة القصوى لأرصاد L1, L2	 من ١ إلي ١٠ ١٠ (يرفض إن زاد عن ٢٠) ٥ (يرفض إن زاد عن ١٠)
<u>الخطأ التربيعي المتوسط RMS:</u> للخطوط أقل من ٥ كم للخطوط أقل من ٢٠ كم للخطوط ٢٠ - ٥٠ كم	 ١٠ مللي ١٥ مللي ٣٠ مللي
نسبة التباين Variance Ratio لحل قيمة الغموض الصحيح Integer Solution	أكبر من ١.٥ للحل الثابت Fixed أقل من ١.٥ للحل غير الثابت Float أكبر من ١.٥ وأقل من ٣.٠: تحذير أو مشكوك به.

ويعرض الشكل التالي مثالا لنتائج حسابات الخطوط حيث يظهر نوع الحل لكل خط و قيمة معامل الحل Ratio وأيضا التباين المرجعي ، مما يسهل فحص جودة حلول الخطوط و اختيار الأدق منهم للدخول في عملية ضبط الشبكة.

Station (From)	(To)	Solution Type	Slope Dist (m)	Ratio	Reference Variance	Entered Ant Hgt (From)	(To)
A 1001	MESAS	Iono free fixed	20841.965	6.6	3.814	1.674	1.559
A 1001	SJH 44	L1 fixed	4426.843	13.3	11.994	2.125	1.714
COMERIO	A 1001	Iono free float	28604.039		3.059	2.122	2.125
COMERIO	DRYDOCK	Iono free fixed	26731.603	17.2	4.845	2.122	1.683
COMERIO	MESAS	Iono free fixed	17436.970	20.4	3.522	2.122	1.504
COMERIO	MP 1	Iono free fixed	26466.871	15.9	3.535	2.122	1.651
COMERIO	SJH 44	Iono free fixed	26791.206	8.0	3.748	2.122	1.714
DRYDOCK	A 1001	L1 fixed	2099.928	3.5	23.933	1.683	2.125
DRYDOCK	SJH 44	L1 fixed	2986.722	4.1	19.858	1.683	1.714
MESAS	A 1001	Iono free fixed	20841.967	1.5	3.761	1.504	2.125
MESAS	DRYDOCK	Iono free fixed	19984.666	16.6	5.558	1.504	1.683
MESAS	SJH 44	Iono free fixed	21973.981	9.3	2.783	1.504	1.714
MP 1	A 1001	L1 fixed	2160.311	4.0	21.693	1.651	2.125
MP 1	PN 007	Iono free fixed	5114.381	19.0	4.801	1.775	2.143
MP 1	PN 030	L1 fixed	4609.931	8.5	27.470	1.775	1.656

شكل (٢١-١٢) مثال لنتائج حسابات خطوط القواعد

أما في تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية وطريقة الجي بي أس التفاضلي DGPS فأن النتائج تشمل – غالبا- الإحداثيات المحسوبة للنقاط المرصودة وقيم الانحراف المعياري فيها.

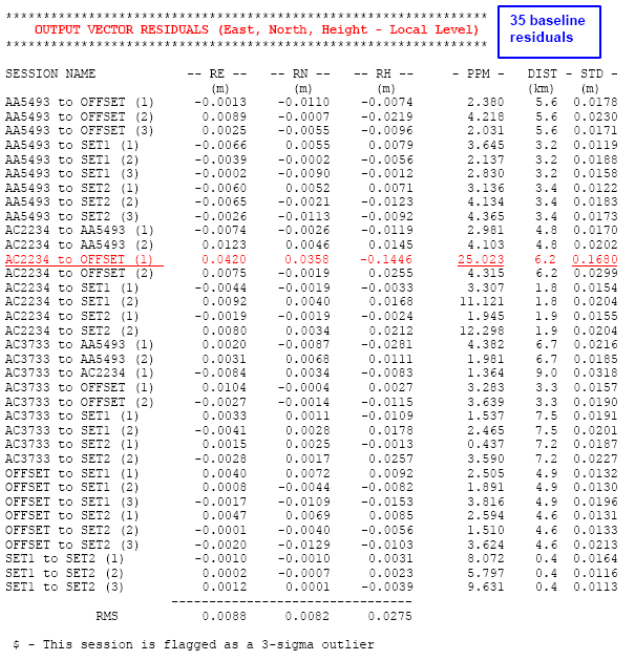
Point	Ref No.	Point Description	FL SP Coordinate X	Y	Obs	95% Precision * Y	X	X-Y	Z
38-1	38	Concrete Bulkhead, in line with East edge of Building	920,742.89	522,331.98	720	0.6 ft	0.6 ft	0.8 ft	0.9 ft
38-2	38	Concrete Bulkhead, in line with West edge of Building	920,696.28	522,324.20	120	1.0 ft	1.0 ft	1.3 ft	1.6 ft
94-3	94	Northeast corner of concrete pier @ La Coloma Marina	918,350.11	525,035.11	723	0.5 ft	0.5 ft	0.7 ft	0.8 ft
94-4	94	Northwest corner of concrete pier @ La Coloma Marina	918,343.00	525,039.66	101	1.2 ft	1.2 ft	1.6 ft	2.7 ft
110-5	110	Point on corrugated steel bulkhead	917,156.88	525,821.07	676	0.9 ft	0.9 ft	1.1 ft	1.6 ft
116-6	116	Northeast corner of wooden pier @ Langer-Krell Marine Electronics	916,946.64	525,963.01	724	0.5 ft	0.5 ft	0.6 ft	0.7 ft
46-7	46	Northeast corner of wooden pier	919,868.69	522,728.61	794	0.5 ft	0.5 ft	0.7 ft	1.4 ft

شكل (٢١-١٣) مثال لنتائج حسابات الجي بي أس التفاضلي

يعد ضبط الشبكة Network Adjustment من أهم خطوات حسابات أرصاد الجي بي أس ، ويتكون من عدة خطوات متتالية ضمانا لاكتشاف أيه أخطاء outliers والتوصل لأدق تقديرات الإحداثيات النهائية للنقاط المرصودة. وتشمل هذه الخطوات:

أ- تحليل خطأ القفل في كل حلقة لضمان حدود قيمه طبقا للمواصفات المطلوبة.
ب- إجراء عملية ضبط غير مقيد Free Net Adjustment (عن طريق تثبيت إحداثيات نقطة واحدة فقط غالبا تكون اختيارية) لفحص جودة الأرصاد ذاتها.
ت- استخدام النتائج الإحصائية للضبط غير المقيد في اكتشاف أية أرصاد غير جيدة Outliers or Blunders وحذفها (عن طريق الاختبارات الإحصائية المعروفة مثل اختبار تاو).
ث- إجراء الضبط النهائي للشبكة Final Constrained Adjustment (سواء بتثبيت إحداثيات نقطة واحدة معلومة فقط Minimal-Constrained أو بتثبيت إحداثيات أكثر من نقطة معلومة Over-Constrained).

الشكل التالي يقدم مثال لنتائج الضبط الغير مقيد لأحدي شبكات الجي بي أس المكونة من عدد ٣٥ خط قاعدة. بسهولة يمكن ملاحظة أن الخط الثاني عشر به مشكلة حيث أن قيمة الانحراف المعياري له تساوي ٠.١٦٨ متر و الدقة النسبية ppm له تساوي ٢٥.٠٢٣ جزء من المليون. كما أن برنامج الحسابات قد عرض ملاحظة في آخر صفحة النتائج أن هذا الخط محتمل أن يكون رصدة خارج الحدود outlier. بينما يعرض الشكل الآخر مثال لنتائج الضبط المقيد والذي يجب فحص نتائجه بعناية – وخاصة الدقة النسبية prec – ضمانا للوصول للدقة المنشودة للمشروع. كما يقدم الشكل الآخر مثال للإحداثيات النهائية للنقاط المرصودة و دقة كل نقطة.



****
OUTPUT VECTOR RESIDUALS (East, North, Height - Local Level)
****

35 baseline residuals

SESSION NAME	-- RE -- (m)	-- RN -- (m)	-- RH -- (m)	- PPM -	DIST (km)	STD (m)
AA5493 to OFFSET (1)	-0.0013	-0.0110	-0.0074	2.380	5.6	0.0178
AA5493 to OFFSET (2)	0.0089	-0.0007	-0.0219	4.218	5.6	0.0230
AA5493 to OFFSET (3)	0.0025	-0.0055	-0.0096	2.031	5.6	0.0171
AA5493 to SET1 (1)	-0.0066	0.0055	0.0079	3.645	3.2	0.0119
AA5493 to SET1 (2)	-0.0039	-0.0002	-0.0056	2.137	3.2	0.0188
AA5493 to SET1 (3)	-0.0002	-0.0090	-0.0012	2.830	3.2	0.0158
AA5493 to SET2 (1)	-0.0060	0.0052	0.0071	3.136	3.4	0.0122
AA5493 to SET2 (2)	-0.0065	-0.0021	-0.0123	4.134	3.4	0.0183
AA5493 to SET2 (3)	-0.0026	-0.0113	-0.0092	4.365	3.4	0.0173
AC2234 to AA5493 (1)	-0.0074	-0.0026	-0.0119	2.981	4.8	0.0170
AC2234 to AA5493 (2)	0.0123	0.0046	0.0145	4.103	4.8	0.0202
AC2234 to OFFSET (1)	0.0420	0.0358	-0.1446	25.023	6.2	0.1680
AC2234 to OFFSET (2)	0.0075	-0.0019	0.0255	4.315	6.2	0.0299
AC2234 to SET1 (1)	-0.0044	-0.0019	-0.0033	3.307	1.8	0.0154
AC2234 to SET1 (2)	0.0092	0.0040	0.0168	11.121	1.8	0.0204
AC2234 to SET2 (1)	-0.0019	-0.0019	-0.0024	1.945	1.9	0.0155
AC2234 to SET2 (2)	0.0080	0.0034	0.0212	12.298	1.9	0.0204
AC3733 to AA5493 (1)	0.0020	-0.0087	-0.0281	4.382	6.7	0.0216
AC3733 to AA5493 (2)	0.0031	0.0068	0.0111	1.981	6.7	0.0185
AC3733 to AC2234 (1)	-0.0084	0.0034	-0.0083	1.364	9.0	0.0318
AC3733 to OFFSET (1)	0.0104	-0.0004	0.0027	3.283	3.3	0.0157
AC3733 to OFFSET (2)	-0.0027	-0.0014	-0.0115	3.639	3.3	0.0190
AC3733 to SET1 (1)	0.0033	0.0011	-0.0109	1.537	7.5	0.0191
AC3733 to SET1 (2)	-0.0041	0.0028	0.0178	2.465	7.5	0.0201
AC3733 to SET2 (1)	0.0015	0.0025	-0.0013	0.437	7.2	0.0187
AC3733 to SET2 (2)	-0.0028	0.0017	0.0257	3.590	7.2	0.0227
OFFSET to SET1 (1)	0.0040	0.0072	0.0092	2.505	4.9	0.0132
OFFSET to SET1 (2)	0.0008	-0.0044	-0.0082	1.891	4.9	0.0130
OFFSET to SET1 (3)	-0.0017	-0.0109	-0.0153	3.816	4.9	0.0196
OFFSET to SET2 (1)	0.0047	0.0069	0.0085	2.594	4.6	0.0131
OFFSET to SET2 (2)	-0.0001	-0.0040	-0.0056	1.510	4.6	0.0133
OFFSET to SET2 (3)	-0.0020	-0.0129	-0.0103	3.624	4.6	0.0213
SET1 to SET2 (1)	-0.0010	-0.0010	0.0031	8.072	0.4	0.0164
SET1 to SET2 (2)	0.0002	-0.0007	0.0023	5.797	0.4	0.0116
SET1 to SET2 (3)	0.0012	0.0001	-0.0039	9.631	0.4	0.0113
RMS	0.0088	0.0082	0.0275			

$ - This session is flagged as a 3-sigma outlier

شكل (٢١-١٤) مثال لنتائج ضبط غير مقيد شبكة جي بي أس

From	To	±S	Slope Dist	Prec
A	C	0.0116	12,653.537	1,089,000
A	E	0.0100	7,183.255	717,000
B	C	0.0116	10,644.669	916,000
B	D	0.0097	11,211.408	1,158,000
D	C	0.0118	17,577.670	1,484,000
D	E	0.0107	9,273.836	868,000
F	A	0.0053	6,430.014	1,214,000
F	C	0.0115	10,617.871	921,000
F	E	0.0095	6,616.111	696,000
F	D	0.0092	8,859.036	964,000
F	B	0.0053	10,744.076	2,029,000
B	F	0.0053	10,744.076	2,029,000
A	F	0.0053	6,430.014	1,214,000

شكل (٢١-١٥) مثال لنتائج ضبط نهائي شبكة جي بي أس

Station	X	Y	Z	Sx	Sy	Sz
A	402.35087	-4,652,995.30109	4,349,760.77753			
B	8,086.03178	-4,642,712.84739	4,360,439.08326			
C	12,046.58076	-4,649,394.08256	4,353,160.06335	0.0067	0.0068	0.0066
E	-4,919.33908	-4,649,361.21987	4,352,934.45341	0.0058	0.0058	0.0057
D	-3,081.58313	-4,643,107.36915	4,359,531.12202	0.0055	0.0056	0.0057
F	1,518.80119	-4,648,399.14533	4,354,116.68936	0.0030	0.0031	0.0031

شكل (٢١-١٦) مثال لنتائج إحداثيات نقاط شبكة جي بي أس

٢١-٥ تحويل الإحداثيات

في آخر خطوات حسابات أرصاد الجي بي أس يتم تحويل الإحداثيات النهائية المضبوطة للمواقع المرصودة من المجسم العالمي WGS84 إلي المرجع المحلي (إن لزم ذلك في حالة توقيع هذه النقاط علي خرائط وطنية مختلفة المرجع). تتكون هذه الخطوة الأخيرة من مراحل الحسابات من خطوتين فرعيتين: (١) تحويل المرجع Datum Transformation ، (٢) إسقاط الخرائط Map Projection. جميع البرامج التجارية commercial software الخاصة بحسابات الجي بي أس تحتوي طرق لتنفيذ كلتا الخطوتين ، بشرط تعيين قيم المعاملات اللازمة.

تحويل المراجع يشمل تحويل الإحداثيات الجيوديسية ثلاثية الأبعاد (خط الطول و دائرة العرض و الارتفاع الجيوديسي) أو الإحداثيات الجيوديسية الكارتيزية (X, Y, Z) من المرجع الجيوديسي العالمي WGS84 - الذي تنسب إليه أرصاد نظام الجي بي أس – إلي المرجع الجيوديسي الوطني لدولة معينة. يلزم تنفيذ هذه الخطوة معرفة قيم لعناصر التحويل السبعة بين هذين المرجعين. يمكن استخدام القيم الموجودة في الجدول مع مراعاة أنها ليست عالية الدقة ، أو الحصول من الجهات الحكومية علي قيم أكثر دقة لعناصر التحويل في هذا البلد. كما يمكن أيضا حساب قيم لعناصر التحويل في حالة معرفة الإحداثيات المحلية لثلاثة نقاط علي الأقل ورصدهم مع شبكة الجي بي أس الجديدة للحصول علي إحداثياتهم علي WGS84 أيضا.

أما الخطوة الثانية فتهدف لإسقاط الإحداثيات ثلاثية الأبعاد إلي إحداثيات ثنائية الأبعاد لتوقيعها علي الخرائط. هنا لا بد من معرفة نوع المسقط المستخدم – في الخرائط المطلوب التوقيع عليها – بالإضافة لقيم العناصر الخمسة التي تحدد مواصفات هذا المسقط.

يجب الإشارة إلي أنه في حالة طريقة الرصد المتحرك اللحظي RTK فيجب تغذية جهاز استقبال الجي بي أس (أو وحدة التحكم به) بقيم عناصر التحويل بين المراجع و أيضا بقيم معاملات نظام الإسقاط حتى يستطيع الجهاز تحويل الإحداثيات - من WGS84 إلي الإحداثيات المسقطة المطلوبة – آنيا في نفس لحظة الرصد ، وبالتالي تكون الإحداثيات الناتجة في الموقع في نظام الإسقاط الوطني المطلوب مباشرة.

أيضا تجدر الإشارة إلي أن دمج أرصاد الجي بي أس مع أرصاد مساحة أرضية أصبح متاحا الآن سواء علي مستوي الأجهزة أو مستوي برامج الحسابات. تم إنتاج أجهزة تدمج مستقبل جي بي أس مع محطة شاملة Total Station في جهاز واحد لتحقيق سهولة في العمل بجهاز واحد بدلا من جهازين (مثال جهاز Smart Station من إنتاج شركة ليكا). كما أن برامج الحسابات الحديثة أصبحت تتعامل مع كلا من أرصاد الجي بي أس وأيضا أرصاد أجهزة المساحة الأرضية (مثل برنامج Geomantic Office من شركة ترمبل أو برنامج Geo Office من شركة ليكا) حيث تتم خطوات الحسابات و الضبط و إسقاط الخرائط لكل أنواع الأرصاد في إطار واحد.

الفصل الثاني و العشرين

حسابات الجي بي أس

٢٢-١ مقدمة

يهدف هذا الفصل الي التعرف بصورة تفصيلية عن خطوات الحساب و خاصة ضبط الشبكات للأرصاد المكانية باستخدام تقنية النظام العالمي لتحديد المواقع، بالإضافة لموضوع تحويل ارتفاعات الجي بي أس الي مناسيب. أيضا يتعرض هذا الفصل لنظم الملاحة بالأقمار الصناعية الأخرى المشابهه للجي بي أس.

٢٢-٢ عيوب الشبكات الجيوديسية في ضبط أقل المربعات

تعاني أي شبكة مساحية أو جيوديسية من عيوب تحديد موقعها المطلق علي سطح الأرض ، حيث أن معظم القياسات المساحية تكون نسبية و ليست مطلقة. أي أننا نقيس مسافة – مثلا – بين نقطتين لنعبر عن الوضع النسبي لإحداهما عن الأخرى ، لكننا لا نعرف الموقع الحقيقي المطلق (الإحداثيات) لأحدي هاتين النقطتين علي الأقل. ومن هنا فأن عملية الضبط التي نجريها لن تنجح في حساب إحداثيات هذه الشبكة.

ترجع عيوب الشبكات Datum Defects إلي كبقية تحديد المرجع Datum الذي تنسب إليه هذه الأرصاد أو الشبكات. أو بمعني آخر كيفية تحديد نظام الإحداثيات المطلوب التعامل معه وأين تقع نقطة الأصل له واتجاهات محاوره الثلاثة بالنسبة للأرض. تتكون عيوب الشبكات من ٧ عناصر أو عيوب:

- ثلاثة عناصر لتحديد موقع مركز نظام الإحداثيات
- ثلاثة عناصر لتحديد اتجاه محاور النظام.
- عنصر لتحديد معامل القياس.

فإذا أخذنا مثال شبكات المثلثات Triangulation Network فأنها تعاني من العيوب السبعة ، حيث أن أرصاد هذه الشبكات تتكون من قياس الزوايا الداخلية للمثلثات ، فلا يوجد بها إحداثيات مطلقة أو مسافات أو انحرافات. لذلك كان يتم الرصد الفلكي لتحديد الإحداثيات المطلقة (خط الطول و دائرة العرض) لبعض نقاط الشبكة وأيضا رصد الانحراف الفلكي لبعض الخطوط لتحديد اتجاهات الشبكة في الفراغ orientation. أما معامل القياس فكان يتم تحديده من خلال قياس بعض أطوال الخطوط في الشبكة ، وبذلك كان يتم التغلب علي العيوب السبعة للشبكة ومن ثم التوصل إلي الإحداثيات المطلقة لكل نقاطها. أما شبكات المثلثات مقاسة الأضلاع Trilateration Network فتعاني من ٦ عيوب فقط حيث أن معامل القياس معلوم لان أرصاد هذه الشبكات تتكون من المسافات بين كل نقطة و الأخرى ، أي أن هذا النوع من الشبكات يحتاج أيضا للقياسات الفلكية سواء للإحداثيات أو الانحرافات.

أما في شبكات الجي بي أس: يوجد فقط ٣ عيوب ، فعيوب تحديد اتجاه محاور النظام وأيضا عنصر معامل القياس تكون معلومة. يرجع ذلك إلي أن قياسات الجي بي أس ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) تمكننا من حساب انحراف وطول هذا الخط:

- ظل (tan) انحراف الخط = $\Delta Y/\Delta X$
- طول الخط = الجذر التربيعي $[\Delta X^2+\Delta Y^2+\Delta Z^2]$

وبالتالي فلا يوجد في شبكة الجي بي أس إلا ٣ عيوب لتحديد مركز محاور نظام الإحداثيات. أي يلزمنا في شبكات الجي بي أس تحديد أو معرفة الإحداثيات المطلقة لنقطة واحدة فقط في الشبكة ومنها يمكن حساب إحداثيات جميع نقاط الشبكة.

إذا كان لدينا نقطة مرجعية معلومة الإحداثيات Reference Control Station فنثبت إحداثياتها أثناء عملية الضبط Fixed Point (أي أن هذه الإحداثيات لن تأخذ أيه تصحيحات وستظل قيمتها ثابتة) وبالتالي حساب إحداثيات باقي النقاط. وهذه الحالة من حالات ضبط مجموع أقل المربعات تسمي الضبط مع أقل عدد من الشروط الخارجية Minimal-Constraints Adjustment. وهذه هي أفضل الحالات حيث أن الدقة الناتجة للإحداثيات ستعبر فقط عن دقة قياسات الجي بي أس المرصودة.

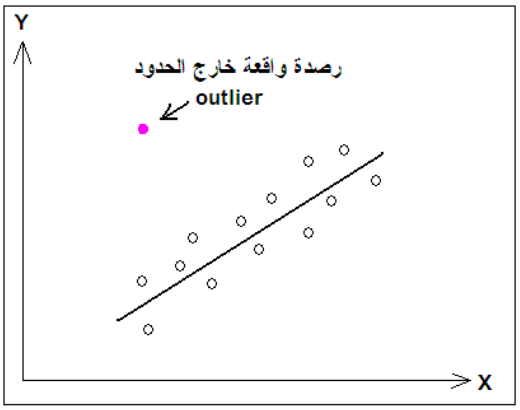
أما إذا كانت شبكة الجي بي أس المرصودة تحتوي علي أكثر من نقطة مرجعية معلومة الإحداثيات يتم تثبيت قيمهم أثناء عملية الضبط فتسمي هذه الحالة الضبط مع شروط خارجية أكثر من اللازم Over-Constraints Adjustment. وهي حالة غير مفضلة في الأحوال العادية لأنه في حالة وجود "عدم توافق" بين إحداثيات النقط المرجعية فأن هذه الاختلافات ستنتقل إلي إحداثيات الشبكة المرصودة بجميع نقاطها ، أي أن الدقة الناتجة لإحداثيات نقاط الشبكة المرصودة ستعبر ليس فقط عن دقة قياسات الجي بي أس إنما أيضا عن دقة النقاط المرجعية المثبتة.

٣-٢٢ اكتشاف أخطاء الأرصاد بعد الضبط

تعتمد نظرية مجموع أقل المربعات – في أساسياتها – علي مبدأ أن الأخطاء أو المتبقيات residuals المصاحبة للأرصاد هي عبارة عن أخطاء طبيعية أو عشوائية normal or random errors ، وتقوم طريقة الضبط بتوزيع هذه الأخطاء بصورة تضمن الوصول لأحسن تقدير للكميات المجهولة (الإحداثيات مثلا). أي أن الأخطاء المنتظمة Systematic Errors (مثل تأثير خطأ التروبوسفير) لا بد من حسابها و تصحيحها قبل بدء عملية الضبط ذاتها. فإذا لم يتم ذلك – لبعض الأرصاد المقاسه – فأنه سيؤثر بشدة علي جودة النتائج التي يتم حسابها. ومن هنا فأن فحص النتائج يعد من أهم خطوات ضبط الأرصاد أو الشبكات في تطبيقات الجي بي أس لاكتشاف أية أرصاد خاطئة Erroneous Observations وحذفها و إعادة ضبط الشبكة مرة أخري.

الأرصاد الواقعة خارج الحدود Outliers هي أرصاد أو قياسات تقع خارج حدود معينة (يتم حسابها) من مستويات الثقة، وبالتالي فأنها أرصاد غير مرغوب بها ويجب حذفها حتى لا تؤثر علي باقي الأرصاد ومن ثم علي جودة النتائج. لنأخذ مثال بسيط: إذا قسنا مسافة عدد من المرات وكانت

قيمها هي ١١.٢٤ ، ١١.٢١ ، ١١.٢٧ ، ١١.٢٨ ، ١١.٢٣ ، ١٧.٨٨ متر. من الواضح أن القياسات الخمسة الأولي قريبة جدا من بعضها البعض بينما الرصدة الأخيرة بعيدة جدا عنهم. مما يجعلنا نشك أن هذا القياس الأخير حدث به خطأ ضخم سواء نتيجة الجهاز المستخدم أو الراصد أو الظروف الجوية لعملية الرصد ذاتها ، وهذا ما نطلق عليه "الرصدة الواقعة خارج الحدود outlier". فإذا قمنا بحساب المتوسط باستخدام جميع الأرصاد فستكون قيمته غير دقيقة ، بينما المنطقي أن يتم استبعاد هذه الرصدة الخاطئة وحساب المتوسط باستخدام الأرصاد الخمسة الأولي فقط.



شكل (٢٢-١) الأرصاد الواقعة خارج الحدود

تقوم معظم برامج حسابات الجي بي أس software بعد انتهاء عملية ضبط الأرصاد بإجراء اختبارات إحصائية لتحديد الأخطاء الواقعة خارج الحدود. ويجب علي المستخدم أن يقرر إذا ما كان سيقبل نتائج الضبط أم يحذف هذه الأخطاء و يعيد إجراء الضبط مرة أخري ، أي أن هذه الخطوة لا يقوم بها البرنامج بشكل آلي. ومن هذه الاختبارات الإحصائية اختبار "فحص البيانات data snooping " و اختبار τ (ينطق" تاو") وهو يعد الأكثر تطبيقا في برامج الحاسب الآلي، كما توجد عدة طرق أخري. وتتكون خطوات تحليل الأرصاد و نتائج الضبط من:

- إجراء الضبط الأولي باستخدام جميع أرصاد الجي بي أس.
- إذا أشارت نتائج الاختبار الإحصائي لوجود عدد من الأرصاد الواقعة خارج الحدود outliers فلا نحذفها كلها ، إنما فقط نحذف الرصدة ذات أكبر قيمة من نتائج الاختبار. السبب في ذلك أن رصدة واحدة خاطئة من الممكن أن تؤثر علي أرصاد أخري سليمة أو دقيقة ، ومن هنا فأن حذف كل الأرصاد التي تظهر في نتائج الاختبار سيقلل من عدد الأرصاد في الشبكة بصورة غير ضرورية مما سيقلل من جودة الحل النهائي للشبكة.
- نعيد إجراء ضبط الشبكة مرة أخري للحصول علي نتائج جديدة سواء للإحداثيات أو للاختبار الإحصائي أيضا.
- تتكرر هذه العملية عدد من المرات حتى نصل في الخطوة الأخيرة إلي عدم وجود أية أرصاد واقعة خارج الحدود علي الإطلاق.
- نعتمد إحداثيات آخر عملية ضبط لتكون الإحداثيات النهائية الدقيقة لشبكة الجي بي أس.

إن تحديد و حذف الأرصاد الواقعة خارج الحدود outliers يحسن من نتائج شبكات الجي بي أس بصورة كبيرة جدا ، ويجب علي المستخدم ألا يهمل هذه الخطوة الإحصائية الهامة حتى يمكنه الحصول علي أصح إحداثيات النقاط المرصودة.

٢٢-٤ تطبيقات ضبط أقل مجموع مربعات في أرصاد الجي بي أس

يستخدم ضبط أقل مجموع مربعات في أرصاد الجي بي أس في مجالين: (١) ضبط الأرصاد المقاسه (إشارات الأقمار الصناعية) للوصول لأدق قيمة لمركبات خط القاعدة Base Line بين كل نقطتين في الوضع النسبي ، (٢) في ضبط الشبكات.

يعتمد المجال الأول علي برنامج الحساب المستخدم GPS Processing Software والمعاملات المطبقة في هذه الخطوة. عند وجود عدد من الأرصاد أكثر من العدد الأدنى المطلوب Redundant Observations فأن نتائج حسابات الأرصاد ستكون عدد من خطوط القواعد ، وهنا يجب علي المستخدم فحص هذه النتائج بكل عناية. ففي هذه الحالة توجد درجة من الحرية Degree of Freedom (تساوي = عدد الأرصاد – عدد القيم المجهولة) تسمح للمستخدم اختيار أحسن الخطوط التي يتدخل عملية ضبط الشبكة. هنا يجب فحص النتائج الإحصائية لكل خط قاعدة محسوب (وخاصة قيمة الخطأ التربيعي المتوسط RMS وقيمة الخطأ في الخط بالنسبة لطول الخط ppm) لبيان أية خطوط قليلة الدقة. ومن ثم بيان مجموعة الخطوط الدقيقة التي سيتم اعتمادها لبدء عملية ضبط الشبكة. وتوجد بعض المواصفات العامة لعملية التقييم و الفحص هذه.

أما المجال الثاني لتطبيق طريقة ضبط مجموع أقل المربعات فيكون في كيفية تنفيذ ضبط الشبكة بصورة جيدة للوصول لأدق الإحداثيات. وعامة تتم عملية ضبط الشبكات Network Adjustment في عدد من الخطوات المتسلسلة تتكون من:

أ- تحليل خطأ القفل في كل حلقة لضمان حدود قيمه طبقا للمواصفات المطلوبة.
ب- إجراء عملية ضبط غير مقيد Free Net Adjustment (عن طريق تثبيت إحداثيات نقطة واحدة فقط غالبا تكون اختيارية) لفحص جودة الأرصاد ذاتها.
ت- استخدام النتائج الإحصائية للضبط غير المقيد في اكتشاف أية أرصاد غير جيدة Outliers or Blunders وحذفها (عن طريق الاختبارات الإحصائية المعروفة مثل اختبار تاو).
ث- إجراء الضبط النهائي للشبكة Final Constrained Adjustment (سواء بتثبيت إحداثيات نقطة واحدة معلومة فقط Minimal-Constrained أو بتثبيت إحداثيات أكثر من نقطة معلومة Over-Constrained).

٢٢-٥ خدمات الجي بي أس علي الانترنت

مع انتشار تطبيقات تحديد المواقع بالأقمار الصناعية في العقدين الأخيرين تم تطوير عدد من المواقع علي شبكة الانترنت لخدمة مستخدمي هذه التقنيات وخاصة للتطبيقات الهندسية والعلمية. إن شبكة المعلومات الدولية مليئة بخدمات مذهلة – تطبيقية و تعليمية – لا غني عنها لمستخدمي نظام الجي بي إس علي وجه الخصوص ، بل أن بعض هذه الخدمات المجانية قد تقلل من التكلفة الاقتصادية للمشروعات المساحية. أيضا المنتجات التقنية المتاحة مجانا علي الانترنت قد ترفع مستوي دقة قياسات تحديد المواقع بالجي بي إس بصورة مؤثرة. كما أن بعض هذه الخدمات يقوم بإجراء الحسابات الدقيقة لتحديد المواقع مجانا ، والبعض الآخر يقدم برامج حاسوبية software مجانية لتطبيقات الجي بي إس. لا يمكن حصر جميع خدمات الجي بي إس علي الانترنت لكننا سنستعرض في هذا الجزء بعضا منها.

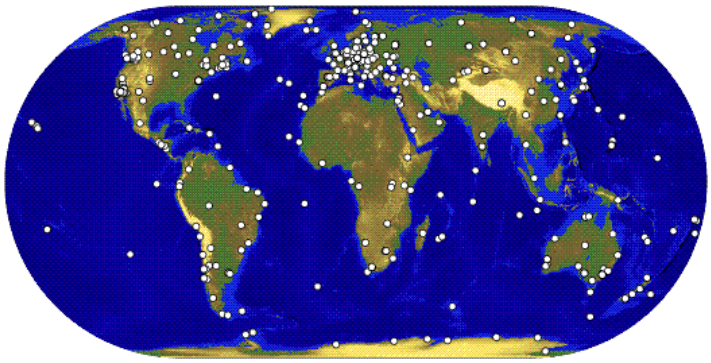
٢٢-٥-١ المنظمة العالمية لخدمات النظم الملاحية بالأقمار الصناعية IGS

تعد المنظمة العالمية لخدمات النظم الملاحية بالأقمار الصناعية International GNSS Service والمعروفة اختصارا باسم IGS من أشهر و أفيد خدمات الجي بي إس علي شبكة الانترنت. كان الاسم القديم للمنظمة هو المنظمة العالمية لخدمات الجي بي إس إلا أنها ومع امتداد خدماتها لتشمل نظام الجلوناس الروسي فقد تغير أسمها للاسم الحالي ، كما أنها تنوي أيضا تقديم خدمات مماثلة للنظام الأوروبي جاليليو عند اكتماله و بدء العمل به. موقع المنظمة في الرابط: http://igscb.jpl.nasa.gov/

إن منظمة IGS هي تجمع تطوعي مكون من حوالي ٢٠٠ جهة تخصصية علي المستوي العالمي تتيح قياسات الجي بي إس و الجلوناس لخدمة المجتمع الدولي مجانا بغرض دراسة الأرض بصورة دقيقة. تعد خدمات IGS جزءا من خدمات المنظمة الدولية للجيوديسيا International Association of Geodesy. كما يتم تقديم خدمات الحسابات الدقيقة من خلال عدد من مراكز الحسابات Data Centers تقدمها الجهات العالمية المتخصصة. يمكن اعتبار منظمة IGS كأدق تجمع مدني – وليس عسكري - لمستخدمي تحديد المواقع بالأقمار الصناعية علي المستوي العالمي. تشمل خدمات IGS الآتي:

١. أرصاد محطات أرضية لكلا من الجي بي إس و الجلوناس.
٢. تصحيح مدارات الأقمار الصناعية للجي بي إس.
٣. تصحيح مدارات الأقمار الصناعية لجلوناس.
٤. تصحيح أخطاء ساعة القمر الصناعي للجي بي إس .
٥. تصحيح أخطاء ساعة جهاز استقبال الجي بي إس عند كل محطة من المحطات الأرضية لشبكة IGS .
٦. الإحداثيات الدقيقة لكل محطة من المحطات الأرضية لشبكة IGS .
٧. سرعة تحرك القشرة الأرضية عند كل محطة من المحطات الأرضية لشبكة IGS .
٨. عناصر دوران الأرض حول محورها Earth Rotation Parameters.
٩. عناصر تصحيح أخطاء الغلاف الجوي Atmospheric Parameters لكلا طبقتي الايونوسفير و التروبوسفير.

تعد شبكة المحطات الأرضية من أهم منتجات منظمة IGS في مجال التطبيقات المساحية لنظام الجي بي إس. تتكون الشبكة من أكثر من ٣٠٠ محطة موزعين علي جميع أنحاء العالم. تم إنشاء هذه المحطات بشروط تقنية عالية بحيث تضمن أعلي دقة ممكنة في تجميع إشارات الأقمار الصناعية ٢٤ ساعة يوميا وإتاحتها علي الانترنت بصورة يومية لجميع المستخدمين مجانا. يتم إرسال أرصاد كل المحطات إلي مراكز التشغيل Processing Centers المتعاونة مع الهيئة لتحليل كل هذه القياسات من خلال برامج Scientific Processing Software عالية الدقة و الكفاءة تعمل علي أجهزة سوبر كمبيوترات ذات مواصفات تقنية عالية. ويتم التواصل و التعاون بين جميع مراكز التشغيل للتأكد من نتائج كل مركز مع المراكز الأخرى حتى يمكن التوصل إلي دقة عاليه للمنتجات عالية الذكر قبل نشرها لجميع المستخدمين مجانا علي موقع الهيئة علي الانترنت. يمكن الحصول علي قائمة بجميع محطات IGS من الرابط: http://igscb.jpl.nasa.gov/network/netindex.html.



شكل (٢٢-٥) توزيع محطات IGS

تعود أهمية محطات IGS الأرضية إلي أنها تعمل ٢٤ ساعة يوميا و تتاح أرصادها – في صيغة راينكس – يوميا مجانا ، كما أن إحداثيات كل محطة معلومة بدقة عالية. بذلك يمكن لأي مستخدم جي بي إس أن يعتمد علي أي نقطة IGS كنقطة تحكم يمكنه ربط أرصاده عليها مباشرة. أي أننا نكون قد قللنا عدد أجهزة استقبال الجي بي إس المطلوبة في أي مشروع مما يقلل من زمن و تكلفة تجميع القياسات الحقلية وبالتالي خفض التكلفة الاقتصادية للمشروع. في بعض المناطق النائية التي لا توجد بها شبكات جيوديسية وطنية – لأي دولة – فأن محطات IGS تكون البديل المناسب المتاح لربط الشبكات الجديدة. كما أن الدقة العالية لإحداثيات محطات IGS تجعلها من أنسب الطرق التقنية في التطبيقات الجيوديسية الدقيقة مثل مراقبة تحركات القشرة الأرضية.

يتم الحصول علي أرصاد (صيغة راينكس) لأي محطة IGS من مراكز البيانات التابعة للمنظمة و منهم مثلا مركز بيانات SOPAC الأمريكي في الرابط: /ftp://garner.ucsd.edu ، حيث توجد جميع الملفات مرتبة سنويا في صفحة: /ftp://garner.ucsd.edu/archive/garner/rinex. وهذه الملفات (بامتداد z) مضغوطة و يمكن إزالة الضغط عنها بأي برنامج (مثل WINZIP) أو الحصول علي أحد هذه البرامج من الرابط: /http://www.gzip.org.

بعد إيقاف العمل بخطأ الاتاحية المنتقاه SA في عام ٢٠٠٠ فأن خطأ مدار القمر الصناعي أصبح أكثر مصادر الأخطاء تأثيرا علي دقة و جودة تحديد المواقع بنظام الجي بي إس. إن قيمة الخطأ في مدار القمر الصناعي Broadcast Orbits (أي المدار الذي يرسله القمر الصناعي لحظيا داخل إشاراته) يبلغ حوالي ١٠٠ سنتيمتر ، ومن هنا جاءت الحاجة لحساب مدار أكثر دقة لكل قمر صناعي قبل استخدامه في حساب موقع جهاز الاستقبال. تقوم منظمة IGS بحساب و نشر عدة أنواع من مدارات الأقمار الصناعية GPS تختلف في دقتها و أيضا موعد إتاحتها للمستخدمين علي الانترنت. وفي مجال التطبيقات الهندسية – وخاصة المساحية – التي تتطلب دقة عالية فأننا نعتمد علي أدق نوع من أنواع المدارات وهو المعروف باسم المدار الدقيق أو المدار النهائي Precise or Final Orbits حتى لو انتظرنا أسبوعين – بعد تاريخ الرصد الحقلي – للحصول عليه من موقع IGS. إن استخدام المدارات الدقيقة للأقمار الصناعية يحسن بدرجة مؤثرة من مستوي الدقة لأرصاد ونتائج مشروعات الجي بي إس. والجدول التالي يقدم مقارنة بين أنواع مدارات الأقمار الصناعية لنظام الجي بي إس التي تتيحها هيئة IGS:

أنواع و خصائص بيانات مدارات الجي بي إس المتاحة في IGS

نوع البيانات		الدقة	مدي التأخير	معدل التحديث	معدل الأرصاد
مرسلة من الأقمار الصناعية Broadcast	مدارات الأقمار	~١٠٠ سم	آنيا	- -	يوميا
	خطأ ساعات الأقمار	~ ٥ نانوثانية			
السريع جدا المحسوب Ultra rapid predicted	مدارات الأقمار	~٥ سم	آنيا	٤ مرات يوميا	١٥ دقيقة
	خطأ ساعات الأقمار	~ ٣ نانوثانية			
السريع جدا المرصود Ultra rapid observed	مدارات الأقمار	أقل من ٣ سم	٣-٩ ساعات	٤ مرات يوميا	١٥ دقيقة
	خطأ ساعات الأقمار	~ ٠.٢ نانوثانية			
السريع Rapid	مدارات الأقمار	أقل من٢.٥ سم	١٧-٤١ ساعة	يوميا	١٥ دقيقة
	خطأ ساعات الأقمار	٠.١ نانوثانية			٥ دقائق
النهائي Final	مدارات الأقمار	أقل من ٢.٥ سم	١٢-١٨ يوم	أسبوعيا	١٥ دقيقة
	خطأ ساعات الأقمار	٠.٧٥ نانوثانية			٥ دقائق

٢٢-٥-٢ خدمات حسابات مجانية لأرصاد الجي بي إس

مع زيادة انتشار تطبيقات الجي بي إس بصورة مذهلة في الكثير من المجالات علي المستوي العالمي قامت عدة جهات دولية أكاديمية و تطبيقية بإنشاء مواقع لها علي شبكة الانترنت بغرض مساعدة مستخدمي الجي بي إس علي الوصول لأعلي دقة ممكنة في تحديد المواقع. تمتلك هذه الخدمات أو المواقع بالعديد من المميزات مثل: (١) أنها خدمة مجانية بدون أي تكلفة ، (٢) أنها تلغي الحاجة لشراء برنامج متخصص في الحسابات ، (٣) أنها مفيدة جدا لمن ليست لديهم خبرة كبيرة في طرق حسابات أرصاد الجي بي إس ونماذجه الرياضية المختلفة ، (٤) أن استخدام المحطات العالمية IGS كمحطات ربط للنقاط الجديدة يقلل من عدد أجهزة الرصد المطلوبة لإكمال الأعمال الحقلية وبالتالي فأن تكلفة تجميع البيانات الحقلية ستقل أيضا. وهذه المميزات تساعد في خفض معقول لتكلفة مشروعات المساحة والخرائط باستخدام تقنية الجي بي إس.

تشمل مواقع الحسابات الآنية on-line processing services العديد من المواقع ومنها علي سبيل المثال:

١. موقع AUSPOS الاسترالي في الرابط: http://www.ga.gov.au.
٢. موقع PPP الكندي في الرابط: http://www.geod.nrcan.gc.ca.
٣. موقع SCOUT الأمريكي في الرابط: http://sopac.ucsd.edu/
٤. موقع هيئة المساحة الجيوديسية الأمريكية OPUS في الرابط: http://www.ngs.noaa.gov.
٥. موقع Auto-GIPSY الأمريكي في الرابط: http://milhouse.jpl.nasa.gov/ag/

يقدم الموقع الأول خدماته لكل المستخدمين في العالم منذ أواخر عام ٢٠٠٠ ، وتقوم بتشغيله منظمة استراليا للعلوم الأرضية Geo-science Australia. يقبل الموقع (عن طريق البريد الالكتروني أو ftp) ملفات أرصاد الجي بي إس بصيغة راينكس من أي مستخدم في العالم. يعتمد حساب الإحداثيات علي استخدام مدارات الأقمار الصناعية الدقيقة من IGS بالإضافة للربط علي أقرب ٣ من محطات IGS الأرضية وإخراج النتائج في إطار ITRF وإرسالها للمستخدم عبر البريد الالكتروني.

الموقع الكندي PPP تديره هيئة المساحة الجيوديسية الكندية و هو مشابه تماما لمواصفات الموقع الأول ، إلا أنه يقبل أيضا أرصاد جي بي إس متحركة kinematic GPS data بالإضافة للأرصاد الثابتة static GPS data. الكنديون هم أول من أبتكر مصطلح PPP الذي يعني التحديد الدقيق لإحداثيات النقطة Precise Point Positioning عن طريق الاستفادة من خدمات منظمة IGS ومازالوا يطورون هذا الأسلوب للعديد من التطبيقات.

موقع SCOUT يديره مركز بيانات المدارات و أرصاد المحطات الدائمة SOPAC وهو أحد مراكز حسابات IGS العالمية. من مميزات هذا الموقع أنه يتيح للمستخدم أن يحدد محطات IGS التي يريد ربط أرصاده عليها. أما موقع OPUS الذي تديره هيئة المساحة الجيوديسية الأمريكية NGS فيعتمد علي ربط الأرصاد مع محطات CORS المقامة في الولايات المتحدة الأمريكية (أو في دول أخري وتشرف عليها NGS) ، وبالتالي فأن خدمات هذا الموقع غير متاحة لكل

المستخدمين. أما موقع Auto-GIPSY فيعتمد علي حساب إحداثيات مطلقة لكل نقطة Single Point Positioning دون ربطها علي محطات IGS.

٢٢-٦ نظم أخري للملاحة بالأقمار الصناعية

لا يعد الجي بي أس هو النظام الملاحي الوحيد المتوافر حاليا لتحديد المواقع باستخدام الأقمار الصناعية ، فتوجد عدة نظم شبيهه سواء نظم عالمية (تغطي خدماتها كل الأرض) أو نظم إقليمية (تغطي خدماتها مناطق معينة). وسنلقي الضوء – في الجزء القادم – علي بعض هذه النظم.

النظام الروسى جلوناس

تتشابه بدايات النظام الروسي للملاحة بالأقمار الصناعية (أسمه باللغة الروسية هو: GLObal'naya NAvigatsionnaya Sputnikovaya Sistema وبالانجليزية: GLObal Navigation Satellite System) المعروف اختصارا باسم جلوناس GLONASS مع بدايات الجي بي أس من حيث أنه نظام عسكري بدأ التفكير بتطويره في عام ١٩٧٦ أثناء فترة الحرب الباردة بين الولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد السوفيتي السابق (روسيا الآن) ، كما أنه مثل الجي بي أس فيدار بواسطة وزارة الدفاع. في ١٢ أكتوبر ١٩٨٢ تم إطلاق أول قمر صناعي في نظام جلوناس وأعلن النظام يعمل مبدئيا في ٢٤ سبتمبر ١٩٩٣.

يتكون نظام جلوناس – رسميا – من ٢١ قمرا صناعيا موزعة في ٣ مدارات حول سطح الأرض ، وتدور علي ارتفاع ١٩١٠٠ كيلومتر من سطح الأرض وزاوية ميل ٦٤.٨^{o} بحيث يكمل كل قمر دورة حول الأرض كل ١١ ساعة و ١٥ دقيقة. يرسل كل قمر صناعي نوعين من الخدمات: الإشارة الدقيقة Precision Signal أو اختصارا SP ، الإشارة عالية الدقة High-Precision Signal أو اختصارا HP علي ترددات تتراوح بين ١٦٠٢.٥٦٢٥ و ١٦١٥.٥ ميجاهرتز(في النطاق المعروف باسم تردد L1). تبلغ الدقة المدنية جراء استخدام إشارات نظام جلوناس حوالي ٥٥ متر أفقيا و ٧٠ متر رأسيا عند رصد ٤ أقمار صناعية ، لكن دقة الإشارة عالية الدقة HP تكون أدق بكثير من هذه المستويات. من المتوقع أن تصل دقة نظام جلوناس لتحديد المواقع إلي حدود نفس الدقة التي يوفرها الجي بي أس بحلول عام ٢٠٢٠. تقع محطة التحكم الرئيسية في موسكو بينما توجد ٤ محطات مراقبة أخري داخل الأراضي الروسية.

النظام الأوروبى جاليليو:

في عام ١٩٩٩ تم اقتراح إقامة نظام جاليليو كمشروع مشترك بين الاتحاد الأوروبي EU و وكالة الفضاء الأوروبية ESA كبديل مدني تديره جهة مدنية بعكس وزارتي الدفاع اللتين تديران كلا من الجي بي أس و جلوناس. كما أن مشروع نظام ملاحي فضائي بهذا الحجم سيتيح قدرات هائلة للصناعة في الدول الأوروبية التي تشترك في تنفيذه ، حيث من المتوقع أن يتيح المشروع وظائف لحوالي ١٠٠ ألف شخص في أوروبا ، وسيكون العائد الاقتصادي للنظام ضخما حيث سيبلغ عدد مستخدميه ٣.٦ مليون مستخدم حتى عام ٢٠٢٠. كما تم السماح لعدة دول غير أوروبية (مثل الصين و كوريا الجنوبية و إسرائيل و المغرب و السعودية) بالمشاركة في تطوير جاليليو عن

طريق المساعدات المادية أو الصناعية أو البحثية. اكتملت الدراسات التقنية المبدئية لهذا المشروع العملاق ، وبدأت مرحلة التطوير في عام ٢٠٠١ ، ومن المتوقع اكتمال النظام في عام ٢٠٢٠.

سيتكون نظام جاليليو من ٣٠ قمر صناعي (٢٧ قمر عامل + ٣ أقمار احتياطية) موزعين في ثلاثة مدارات تميل بزاوية ٥٦° و علي ارتفاع ٢٣٦١٦ كيلومتر من سطح الأرض ، بحيث يكمل كل قمر دورة حول الأرض كل ١٤ ساعة و ٧ دقائق. وسيكون هناك مركزين أرضيين للمراقبة و التحكم في الأقمار الصناعية. ستقوم الأقمار الصناعية في نظام جاليليو ببث ١٠ إشارات: ٦ مخصصة للخدمة العامة و خدمة البحث و الاتقاد ، ٢ للخدمة التجارية ، ٢ لخدمة المرافق العامة. وستكون الإشارات في نطاقين من الترددات: ١١٦٤-١٢١٥ ميجاهرتز ، ١٥٥٩-١٥٩١ ميجاهرتز. وتم إطلاق أول قمر صناعي في منظومة جاليليو (GIOVE-A) في ٢٨ ديسمبر ٢٠٠٥ وكان إطلاق القمر التجريبي الثاني (GIOVE-B) في عام ٢٠٠٨ لوضع اللمسات النهائية علي النظام و مواصفاته و التأكد من تشغيله بجودة عالية.

النظام الصيني بيدو:

بدأ نظام بيدو (أو البوصلة) كنظام ملاحي يهدف لتغطية الصين فقط ، إلا أنه تطور لاحقا بهدف تحقيق تغطية إقليمية ثم الوصول بعد ذلك إلي التغطية العالمية. من المتوقع أن يتكون النظام من ٥ أقمار صناعية ثابتة المدار Geostationary Erath Orbit Satellites أو اختصارا GEO بالإضافة إلي ٣٠ قمرا صناعيا متوسطة المدار Medium Earth Orbiting Satellites أو اختصارا MEO موزعين في ٦ مدارات علي ارتفاع ٢١٥٠٠ كيلومتر من سطح الأرض وبزاوية ميل ٥٥° ، وينتظر اكتمال هذا النظام بحلول عام ٢٠١٥. ترسل الأقمار الصناعية إشارتها في عدد من الترددات: ١١٩٥.١٤ ، ١٢١٩.١٤ ، ١٢٥٦.٥٢-١٢٨٠.٥٢، ١٥٥٩.٠٥-١٥٦٣.١٥ ، ١٥٨٧.٦٩-١٥٩١.٧٩ ميجاهرتز. تم إطلاق القمر الصناعي الثاني في هذا النظام الصيني في ١٤ أبريل ٢٠٠٩ ، والذي قامت الأكاديمية الصينية للفضاء و التكنولوجيا بتصنيعه. يتكون قطاع التحكم والسيطرة من ٣ محطات: محطة تحكم رئيسية ، محطة متابعة ، و محطة إرسال بيانات للأقمار الصناعية. من المتوقع أن يوفر نظام البوصلة خدماته بأسلوبين: الخدمة المفتوحة Open Service لكل المستخدمين والتي ستوفر دقة تحديد المواقع في حدود ١٠ متر ، الخدمة الخاصة Authorized Service للمستخدمين الخاصين.

نظم ملاحية إقليمية:

بالإضافة للنظم الملاحية الأربعة (الجي بي أس و جلوناس و جاليليو و بيدو) التي لها تغطية عالمية فتوجد عدة نظم ملاحية أخري تهدف لزيادة كفاءة الملاحة بالأقمار الصناعية في مناطق محددة من الأرض. قامت اليابان بتطوير نظام QZSS (مكون من ٣ أقمار صناعية) ليغطي حدودها الإقليمية. أيضا تقوم الهند بتطوير نظام ملاحي إقليمي – يسمي IRNSS – ليتم الانتهاء منه فيما بين عامي ٢٠٠٨ و ٢٠١١ ليزيد كفاءة الملاحة في حدودها الجغرافية الإقليمية.

نظم الازدياد

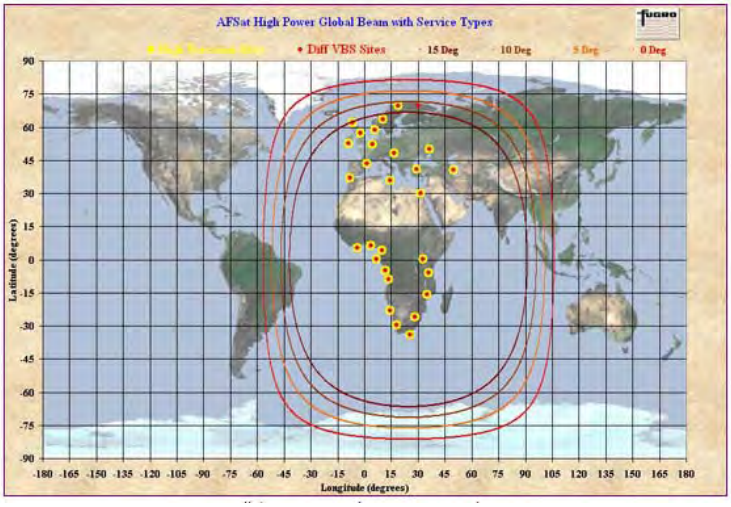
نظم الازدياد (أو التكبير أو التعزيز) Augmentation Systems هي نظم تهدف لزيادة دقة و جودة تحديد المواقع باستخدام جهاز استقبال واحد Stand-alone. المبدأ النظري وراء تطوير مثل هذه النظم يعتمد علي حساب تصحيح لإشارات الأقمار الصناعية المرصودة (يتم حسابه من خلال أجهزة تحتل نقاط معلومة الإحداثيات) وبث هذا التصحيح في نطاق منطقة جغرافية محددة بحيث يكون جهاز الجي بي أس قادرا علي استقباله ومن ثم يقوم بتصحيح الإحداثيات التي يحصل عليها من نظام الجي بي أس. يتم بث هذه التصحيحات بعدة طرق: إما باستخدام البث الراديوي اللاسلكي ، أو بإرسال التصحيحات المحسوبة إلي أقمار صناعية خاصة والتي تعيد إرساله مرة أخري لتستقبله المستقبلات الأرضية (تسمي نظم الازدياد بالاعتماد علي الأقمار الصناعية Satellite-Based Augmentation Systems أو اختصارا SBAS)، أو عن طريق شبكات التليفون الخلوي (الموبايل أو الجوال) ، أو عن طريق شبكة المعلومات الدولية (الانترنت). كما تشمل أيضا نظم الازدياد دمج أجهزة استقبال الجي بي أس مع أنواع أخري من الأجهزة الأرضية (مثل أجهزة القصور الذاتي Inertial Sensors) التي تقوم بتحديد المواقع في حالة غياب إشارات الأقمار الصناعية مثلما يحدث في المناطق السكنية أو داخل الأنفاق في المدن الكبرى. باستخدام جهاز جي بي أس يستطيع التعامل مع نظام من نظم الازدياد يمكن حسين دقة تحديد المواقع من عدة أمتار إلي بعض عشرات من السنتيمترات فقط.

من أمثلة نظم الازدياد الموجودة في بعض الدول الأوروبية و العربية:

- نظام الازدياد للمناطق الشاسعة Wide Area Augmentation System المعروف باسم WASS والذي يغطي الولايات المتحدة الأمريكية وتديره وكالة الطيران الاتحادية الأمريكية. يتكون نظام WASS من ٢٥ محطة جيوديسية أرضية ترصد أقمار الجي بي أس وتحسب التصحيحات اللازمة لكل قمر في كل لحظة ، ثم تقوم بإرسال التصحيحات إلي المحطة الرئيسية والتي تقوم بدورها بإرساله إلي القمرين الصناعيين التابعين لمنظومة WASS ، ثم يرسل هذين القمرين التصحيحات من خلال ترددات تستطيع معظم أنواع أجهزة الجي بي أس (مستخدمي WASS) استقبالها لتصحيح مواقعها المحسوبة. تبلغ دقة تحديد المواقع باستخدام GPS/WASS أقل من ٣ أمتار باستخدام أجهزة الاستقبال الملاحية المحمولة يدويا.
- النظام الملاحي الأوروبي الثابت European Geostationary Navigation Overlay Service المعروف اختصارا باسم EGNOS وتديره هيئة الفضاء الأوروبية ويغطي قارة أوروبا، ويتيح تصحيحات – من خلال ٣ أقمار صناعية - لكلا من نظام الجي بي أس وأيضا نظام جلوناس.
- نظام الازدياد الأمريكي العسكري Wide Area GPS Enhancement أو اختصارا WAGE وتديره وزارة الدفاع الأمريكية للأغراض العسكرية فقط.
- نظام الازدياد متعدد الأغراض Multifunctional Satellite Augmentation System أو MSAS والذي تديره وزارة الأراضي و النقل في اليابان.
- نظام الازدياد لمدينة جده بالمملكة العربية السعودية والذي تديره أمانة جدة، والذي يوفر دقة أفقية في تحديد المواقع تصل إلي مستوي السنتيمتر.

- نظام الازدياد لمدينة دبي بالإمارات العربية المتحدة والذي تديره بلدية دبي ويقدم دقة ٢-٣ سنتيمتر في تحديد المواقع.
- نظام الازدياد الملاحي المصري ويسمي: الشبكة الإقليمية المصرية لتحديد المواقع بالأقمار الصناعية باستخدام الأسلوب الفرقي DGPS (تديره الهيئة المصرية لسلامة الملاحة البحرية) بغرض تقديم خدماته للسفن المبحرة في كلا البحرين الأحمر و الأبيض المتوسط. يتكون هذا النظام من ٧ محطات أرضية كلا منها تبث إرسالها (خدمة التصحيحات) لاسلكيا في منطقة دائرية يبلغ نصف قطرها حوالي ٢٠٠ كيلومتر.
- نظام الازدياد في مملكة البحرين ومكون من ٥ محطات.

أيضا تجدر الإشارة لوجود نظم ازدياد تجارية (بخلاف النظم السابقة والتي عادة تكون حكومية وتقدم خدماتها مجانا للمستخدمين) ومنهم - علي سبيل المثال – نظام شركة OminStar التي تتيح خدماتها علي المستوي العالمي مقابل اشتراكات مالية ، من خلال ٣ أنواع من الخدمة: خدمة VBS بدقة أقل من متر واحد ، خدمة HP بدقة حوالي ٣٠ سنتيمتر ، خدمة XP بدقة حوالي ١٠ سنتيمتر. ويغطي أحد أقمار OmniStar المنطقة العربية كلها بحيث يتيح خدماته لكل المستخدمين بها.



شكل (٢٢-٦) تغطية نظام الازدياد OmniStar في المنطقة العربية

الباب الرابع

المساحة التصويرية و الاستشعار عن بعد

Photogrammetry and Remote Sensing

الفصل الثالث و العشرين

القياس من الصور الجوية

٢٣-١ مقدمة

القياس من الصور (أو المساحة التصويرية) Photogrammetry هي تقنية تسمح بقياس معلم دون لمسه، حيث تجري القياسات من خلال الصور سواء الصور الجوية أو الصور من الأقمار الصناعية. إلا أن التصوير باستخدام الأقمار الصناعية قد أطلق عليه حديثا مصطلح الاستشعار عن بعد، مع أن التصوير الجوي هو أول تقنية من تقنيات الاستشعار عن بعد.

٢٣-٢ نبذة تاريخية

تعد الصور الجوية ابتكارا تقنيا غاية في الأهمية في تاريخ تقدم العلوم الجغرافية و الهندسية علي وجه الخصوص وعلوم أخري كثيرة. إن الصورة الجوية (الملتقطة بالة تصوير في الجو) تمثل كما هائلا من المعلومات الدقيقة عن الواقع الجغرافي و المعالم المكانية في المنطقة التي تظهر بها. ومن ثم فأن هذه الصورة يمكن استخدامها في العديد من التطبيقات العملية مثل إنتاج الخرائط بطريقة اقتصادية رخيصة عند مقارنتها بطرق القياسات المساحية الميدانية باهظة التكاليف. ومنذ اختراع التصوير الجوي فطن علماء الخرائط و الجغرافيا و المساحة لأهميته الجمة ومميزاته المتعددة، وصار الآن أحد أهم وأدق و أسرع طرق الحصول علي المعلومات المكانية المستخدمة في الكثير من التخصصات و التطبيقات البيئية و الهندسية و التنموية علي المستوي العالمي.

بدأ الإنسان يفكر في ماهية الضوء منذ زمن بعيد جدا، وكان العالم الإغريقي أرسطو في القرن الثاني قبل الميلاد أول من بدأ البحث عن طبيعة الضوء وأول من أشار الي أن الضوء قد يمر من بعض الأجسام دون الأخرى. وفي القرن العاشر الميلادي (القرن الرابع الهجري) كان العالم الكبير الحسن بن الهيثم أول من أشار الي أن الضوء يأتي من الأجسام الي العين وليس العكس كما كان شائعا في نظريات أرسطو ومن سبقه، وأيضا كان أول من تعرض لتفسير وإجراء تجربة عملية لطريقة عمل آلة - تشبه فكرة آلة التصوير- عن طريق مرور الضوء من ثقب صغير الي حجرة مظلمة حيث تتكون صورة كل ما هو موجود علي الجانب الآخر. وفي عام ١٦٦٦ (١٠٧٦ هـ تقريبا) كان اسحق نيوتن أول من أشار الي أن الضوء الأبيض - كما نراه - يمكن تحليله (من خلال المرور في منشور زجاجي) الي سبعة مكونات فرعية أو ألوان.

بدأ التصوير الضوئي في عام ١٨٣٩ (١٢٥٤ هـ) عندما قام كلا من نييس تالبوت و لويس داجور بأول عملية تصوير ضوئي أو تصوير فوتوغرافي حيث تم إسقاط الضوء علي صفائح معدنية مغطاة بمادة أيوديد الفضة كمادة حساسة للضوء. وكان العالم هيرشيل أو من استخدم مصطلح التصوير الضوئي أو الفوتوغرافيا photography وهو مشتق من مقطعين يونانيين: فوتو بمعني الضوء وجرافيا بمعني الرسم، أي أن الفوتوغرافيا هي الرسم بالضوء. أما أهم المراحل التاريخية في التصوير الجوي فقد بدأها الضابط الفرنسي ايمي لوسيه عندما بدأ في تثبيت آلة التصوير (الكاميرا) في بالون أو طائرة ورقية ترتفع عن سطح الأرض لتكون الصور الملتقطة لأول مرة من الجو وليس من علي سطح الأرض. وفي عام ١٨٥٩ (١٢٧٥ هـ) قام لوسيه بالتقاط عدد من الصور الجوية بكاميرا موضوعة في بالون ومن هذه الصور تمكن من

عمل خريطة لمدينة باريس العاصمة الفرنسية، ولذلك يطلق علي هذا العالم اسم رائد علم التصوير الجوي والمساحة التصويرية.

شكل (٢٣-١) صورة جوية لمدينة بوسطن الأمريكية في عام ١٨٦٠ (١٢٧٦هـ)

تم اختراع الطائرة في عام ١٩٠٢ (١٣١٩ هـ) علي يد الأخوين أورفيل و ويلبر رايت، مما دفع بعلم التصوير الجوي خطوات تقنية واسعة جدا باستبدال البالون و المنطاد بالطائرة لتوضع الكاميرا داخلها ويتم التقاط الصور الجوية من خلالها. والتقطت أول صورة جوية من الطائرة في عام ١٩٠٩ (١٣٢٦ هـ) لمنطقة في ايطاليا. ومع قيام الحرب العالمية الأولي ١٩١٤-١٩١٩ (١٣٣٢-١٣٣٧ هـ) تم الاعتماد علي التصوير الجوي كأحد وسائل الاستطلاع و الاستخبارات العسكرية خلف خطوط العدو، مما زاد من أهمية هذا العلم في التطبيقات العسكرية بصورة كبيرة. ودفعت أعمال الحرب العالمية الثانية (١٩٤١-١٩٥٥ الموافق ١٣٥٩-١٣٦٤ هـ) الي زيادة الاعتماد علي علوم التصوير الجوي والمساحة الجوية بهدف إنتاج الخرائط، مما ساعد علي تطور هذه العلوم و أجهزتها و معداتها من كاميرات و أفلام بصورة متسارعة. ومن هنا بدأ ظهور شركات تجارية متخصصة في أفرع التصوير الجوي و تطبيقاته، مثل شركة كوداك للكاميرات و الأفلام والتي تأسست في عام ١٩٤٢ (١٣٦٠ هـ).

شكل (٢٣-٢) نموذج لأول طائرة في التاريخ

شكل (٢٣-٣) التصوير الجوي

تقدم التصوير الجوي تقدما كبيرا مع اختراع الحاسبات الآلية في الخمسينات من القرن العشرين الميلادي، حيث تطورت بسرعة كبيرة أجهزة و معدات التصوير وتخزين و حفظ الصور الجوية الكترونيا و كذلك طرق إنتاج الخرائط المعتمدة علي الصور الجوية. ومع بداية الثمانينات من القرن العشرين الميلادي ظهر فرع المساحة التصويرية الرقمية Digital Photogrammetry كأحد فروع علم التصوير الجوي و إنتاج الخرائط اعتمادا علي الحاسبات الآلية. كما ظهر أيضا أحد تطبيقات الصور عالية الدقة واستخداماتها الهندسية وأطلق عليه اسم المسح التصويري الأرضي Terrestrial Photogrammetry، حيث توضع الكاميرا الدقيقة علي حامل ثلاثي علي الأرض لالتقاط صور للمعالم الجغرافية (خاصة المباني و المنشئات الهندسية) واستخدام هذه الصور بعد معالجتها في القياسات الهندسية لهذه المعالم.

شكل (٢٣-٤) المساحة التصويرية الرقمية

شكل (٢٣-٥) المسح التصويري الأرضي

٢٣-٣ مميزات و تطبيقات الصور الجوية

للصور الجوية العديد من المميزات و الخصائص التي تجعلها أداة تقنية مستخدمة في العديد من المجالات الهندسية و الجغرافية و البيئية و العسكرية، ومنها:

- تتميز الصورة الجوية بالدقة بصفة عامة مما يسمح بإجراء القياسات الدقيقة (مثل المسافات و المساحات) بدقة مناسبة.
- تغطي الصورة الجوية مساحة كبيرة من سطح الأرض مما يجعل من السهل والأرخص اقتصاديا رسم خريطة للمظاهر الجغرافية الموجودة.
- إنتاج الخرائط من الصور الجوية يستغرق وقتا أقل و بالتالي فهو أرخص تكلفة من استخدام القياسات المساحية الميدانية.
- توفر بعض أنواع من الصور الجوية صورة مجسمة ثلاثية الأبعاد للمعالم المكانية مما يسهل من التعرف علي طبيعة المظاهر بسرعة، وأيضا يوفر إمكانية رسم الخرائط الطبوغرافية التي تمثل تضاريس سطح الأرض.
- للصور الجوية الملتقطة في تواريخ متعددة ميزة أنها يمكننا من متابعة التغيرات الزمنية في المظاهر الجغرافية (مثل متابعة حركة الكثبان الرملية).
- توضح الصور الجوية معالم وخصائص لا يمكن للعين البشرية رؤيتها، خاصة عند التصوير بالأشعة تحت الحمراء (مثل التفرقة بين النبات السليم و النبات المريض في منطقة زراعية).
- الصورة الجوية لها مقياس رسم محدد مما يجعلها تبرز بدقة العلاقات المكانية بين الظواهر الجغرافية.
- الصور الجوية لا ترتبط بالواقع السياسي بين الدول حيث يمكن الحصول علي صور (شديدة الميل مثلا) لمنطقة حدودية بين دولتين.

- يمكن لبعض أنواع من الصور الجوية أن تبرز المعالم الموجودة تحت سطح الأرض علي أعماق بسيطة، مثل المياه الجوفية.
- تستطيع الصور الجوية إبراز المعالم المكانية في المناطق النائية التي لا يمكن للإنسان الوصول إليها بسهولة من سطح الأرض (مثل منطقة الربع الخالي في المملكة العربية السعودية).

يعد إنتاج و تحديث الخرائط أهم تطبيقات التصوير الجوي في المجالين الجغرافي و الهندسي لما تتميز به الصور من خصائص الدقة و الشمولية ورخص التكلفة. وأصبح التصوير الجوي أهم تقنيات إنتاج و تحديث الخرائط التفصيلية و الطبوغرافية في الكثير من دول العالم. كما يعد الاستفادة من الصور الجوية في تفسير المعالم الجغرافية و استنباط معلومات دقيقة و حديثة عنها من أهم تطبيقات الصور الجوية في عدد كبير من الأعمال و المشروعات التطبيقية و التنموية مثل:

- الزراعة: حصر مساحات مناطق المحاصيل المختلفة، تحديد النبات المريض أثناء فترة نموه، و عمليات مقاومة آفات النباتات في الوقت المناسب.
- التربة: تصنيف أنواع التربة و عمل الخرائط التي تبين أنواع التربة.
- البيئة: مراقبة التلوث البيئي، متابعة و مراقبة آثار انتشار الكوارث الطبيعية مثل الفيضانات.
- الجيولوجيا: تصنيف أنواع التراكيب الجيولوجية لسطح الأرض وعمل الخرائط الجيولوجية.
- الهندسة المدنية: تخطيط المشروعات الهندسية واختيار أنسب المواقع الجغرافية و تطوير خرائط استخدامات الأراضي.
- التخطيط العمراني: إعداد المخططات، تخطيط و متابعة تنفيذ مشروعات التوسع العمراني، تطوير خرائط استخدامات الأراضي.
- النقل: تخطيط المشروعات الجديدة لشبكات الطرق و الجسور و الأنفاق و السكك الحديدية.
- السكان: أعمال الحصر في تعدادات السكان و المساكن والتعدادات الزراعية و الصناعية.
- المرور: مراقبة و حل الاختناقات المرورية.
- التطبيقات العسكرية: الاستخبارات العسكرية خاصة علي الحدود بين الدول.

٢٣-٤ آلات و معدات التصوير الجوي

تتنوع الآلات و المعدات المستخدمة في التصوير الجوي بصورة كبيرة بتعدد الشركات المصنعة والتقنيات المستخدمة فيها. بصفة عامة يمكن تقسيم آلات التصوير الجوي (الكاميرات) الي قسمين رئيسين: (١) الكاميرا العادية أو التقليدية التي تستخدم الأفلام كوسيلة لتخزين وحفظ الصور الملتقطة، (٢) الكاميرا الرقمية التي تحفظ الصور بطريقة الكترونية علي أقراص ثابتة أو وسائل أخري للتخزين الرقمي. ومع أن النوع الثاني هو الأكثر تقدما والأعلى من حيث المواصفات التقنية، إلا أن الكاميرات التقليدية مازالت مستخدمة في أعمال التصوير الجوي.

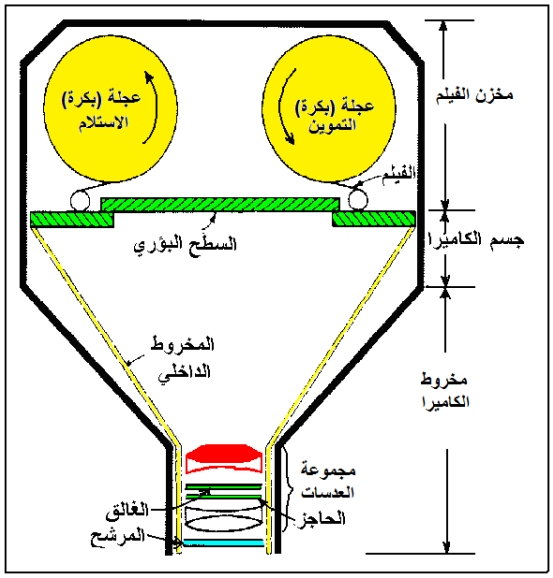
(أ) كاميرا عادية (ب) كاميرا رقمية

شكل (٢٣-٦) كاميرات التصوير الجوي

٢٣-٤-١ كاميرا التصوير الجوي

تتنوع كاميرات التصوير الجوي التقليدية تنوعا كبيرا، وبصفة عامة توجد (١) كاميرات تستخدم عدسة واحدة، (٢) كاميرات متعددة العدسات، أي تستطيع التقاط أكثر من صورة في نفس الوقت، (٣) كاميرات التصوير البانورامية أو الكاميرات شاملة الرؤية التي تستخدم في تصوير صور بانورامية تغطي الأفق، (٤) كاميرات التصوير الشريطية وهي التي تبقي عملية التصوير مستمرة من بداية الفيلم الي نهايته.

وتعد كاميرا التصوير الجوي ذات العدسة الواحدة هي الأكثر استخداما، وتشمل مكوناتها الرئيسية أربعة أجزاء وهي مجموعة العدسات و ملحقاتها و جسم الكاميرا و مخروط الكاميرا و مخزن الفيلم.



شكل (٢٣-٧) مكونات كاميرا التصوير الجوي

مجموعة العدسات و ملحقاتها Lenses

تصنع العدسات lenses المستخدمة في التصوير الجوي من زجاج عالي النقاء (أو مواد أخري شبيهه) بحيث تخلو العدسة من العيوب. وتتكون عدسة كاميرا التصوير الجوي إما من عدسة بسيطة (عدسة واحدة) أو عدسة مركبة (مجموعة من العدسات). ومع العدسة توجد مجموعة من الملحقات الأخرى و تشمل:

- الغالق (أو مصراع الكاميرا) shutter: جهاز يتحكم في الفترة الزمنية للسماح بمرور الضوء من العدسة (تتراوح هذه الفترة من ٠.٠١ الي ٠.٠٠١ من الثانية)، اي أن الغالق يتحكم في درجة سطوع الصورة وهو من أهم عوامل الصور الجوية.
- الحاجب (أو الحجاب الحاجز)diaphragm: جهاز ينظم كمية الضوء الذي يمر من العدسة الي الفيلم. وكمية الضوء الداخلة للفيلم هي حاصل ضرب مساحة فتحة الحاجب في زمن فتح العدسة، وهي كمية ثابتة طبقا لحساسية الفيلم المستخدم في التصوير.
- مرشح اللون filter: جهاز لجعل توزيع الضوء متساوي في كافة أنحاء الصورة مما يعطي تباين واضح للمعالم الأرضية المصورة. أيضا فمرشحات الألوان هي المتحكمة في انتقاء الطيف المراد استخلاص البيانات منه. كما توظف المرشحات أيضا في حماية سطح العدسة من الرهج (الجزئيات الطائرة من الأتربة) والتي من الممكن أن تقلل من كفاءة العدسة أو تصيبها بالضرر.

مخزن الفيلم Film Magazine

يحتوي بكرتين لشريط الفيلم الحساس الأولي (عجلة الاستلام) تحتوي الفيلم قبل التصوير بينما الثانية (عجلة التموين) تحتوي الفيلم بعد التصوير.

مخروط الكاميرا Camera Cone

يهدف مخروط الكاميرا الي ربط أجزاء مجموعة العدسات و ملحقاتها معا كما أنه يحمل العدسة علي مسافة معينة ثابتة من اللوح السالب (الفيلم) ولذلك فهو غالبا يصنع من معدن ذو معامل تمدد حراري صغير، بالإضافة الي أنه يمنع الضوء عن الفيلم نفسه.

جسم الكاميرا Camera Body

يشمل الإطار الخارجي للكاميرا بالإضافة الي الموتور و باقي الأجهزة الكهربائية و الميكانيكية اللازمة لإدارة الكاميرا.

وبالإضافة لكاميرا التصوير الجوي ذاتها توجد عدة أجهزة أخري تحتاجها عملية التصوير الجوي وتشمل:

- جهاز تثبيت الكاميرا في موضعها الصحيح بغض النظر عن انحراف الطائرة أو ميلها أثناء التصوير.
- جهاز قياس ارتفاع الطيران.
- جهاز تحديد الفترة الزمنية بين كل صورتين متتاليتين.

- جهاز التحكم الضوئي الذي يتحكم في زمن فتح العدسة طبقا لشدة إضاءة المنطقة الأرضية المصورة.
- جهاز فرد أو شد الفيلم والذي يجعل الفيلم مستويا تماما أثناء التصوير عن طريق تفريغ الهواء بين الفيلم و العدسة.

تستخدم الصور الجوية بصفة أساسية في إنتاج و تحديث الخرائط وذلك عن طريق عمل القياسات الدقيقة من الصورة لتحويلها الي خريطة. ويتطلب ذلك الهدف الرئيسي عدة مواصفات أو خصائص للكاميرات والأجهزة المستخدمة في التصوير الجوي للصول الي مستوي الدقة المنشود لإتمام عملية إنتاج الخرائط. ومن هذه الخصائص:

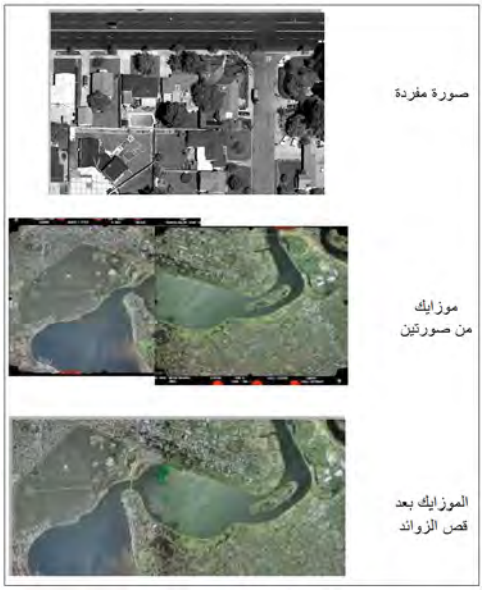
- أن تكون عدسات كاميرا التصوير الجوي علي درجة عالية من النقاء و خالية من التشوه حتى تكون الصور الجوية عالية الوضوح في إبراز المعالم الأرضية.
- أن تكون الكاميرا علي درجة تقنية عالية في مواصفاتها لتعطي قدرة عالية علي إظهار تفاصيل المعالم الأرضية.
- أن تتمتع الكاميرا و أجهزتها بالتحكم الدقيق في كمية الضوء المارة بالعدسة الي الفيلم حتى تنتج صور عالية الوضوح و الدقة.
- أن يكون الفيلم داخل الكاميرا علي استواء كامل أثناء عملية التقاط الصور لتفادي المناطق غير الواضحة التي قد تظهر علي الصورة.
- بصفة عامة يجب أن تتمتع كاميرا التصوير الجوي بكفاءة عالية في تشغيل مكوناتها و أجهزتها لالتقاط الصورة في زمن قليل حتى لا تتأثر جودة الصور بحركة الطائرة و اهتزازها.
- أن تقوم الكاميرا بتسجيل المعلومات الأساسية اللازمة لعملية التصوير والتي تشمل تسجيل كلا من:
  - رقم الصورة
  - رقم خط الطيران
  - تاريخ التصوير
  - وقت التصوير
  - ارتفاع الطيران
  - درجة الميل
  - رقم الكاميرا
  - البعد البؤري للكاميرا
  - علامات الإسناد (علامات إطار الصورة)

شكل (٢٣-٨) نماذج للمعلومات المسجلة علي الصورة الجوية

٢٣-٤-٢ أنواع الصور الجوية

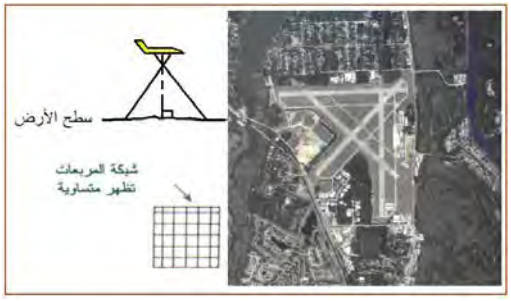
تصنف الصور الجوية الي عدة أنواع أو مجموعات طبقا لطرق تقسيم مختلفة ومنها التصنيف طبقا لاتساع زاوية التصوير و التصنيف طبقا لارتفاع الطيران و التصنيف طبقا لأبعاد الصورة والتصنيف طبقا لمقياس رسم الصورة والتصنيف طبقا لشكل الصورة وإمكانية تجسيمها والتصنيف طبقا لدرجة الميل وهذا الأخير هو أهم التصنيفات. ف طبقا لاتساع زاوية عدسة التصوير فتوجد صور ذات زاوية عادية، و صور ذات زاوية ضيقة، و صور ذات زاوية عريضة، و صور ذات زاوية عريضة جدا. وتستخدم الصور عريضة الزاوية لتصوير المناطق المتسعة و الصحاري ورسم الخرائط ذات مقاييس الرسم الصغيرة، بينما تكون الصور ذات الزاوية العادية لتصوير المدن بحيث ينتج عنها خرائط ذات مقياس رسم كبير الي متوسط. كما تصنف الصور الجوية طبقا لارتفاع الطيران الي ثلاثة أنواع: الصور الملتقطة من ارتفاع عال و الصور الملتقطة من ارتفاع متوسط و الصور الملتقطة من ارتفاع منخفض. وبالطبع فأنه كلما زاد ارتفاع الطيران زادت مساحة المنطقة الأرضية الظاهرة علي الصورة. أما تصنيف الصور الجوية طبقا لأبعادها فأن الصور أما أن تكون ذات أبعاد ٢٣×٢٣ سنتيمتر أو ذات أبعاد ١٨×١٨ سنتيمتر، وهناك نوع غير شائع وهو ذو أبعاد ١٨×٢٣ سنتيمتر. أما أنواع الصور الجوية طبقا لمقياس رسمها فيشمل الصور ذات مقاييس الرسم الصغيرة (١ : ٥٠،٠٠٠ و أصغر) والصور ذات مقاييس الرسم المتوسطة (١ : ٢٥،٠٠٠) والصور ذات مقاييس الرسم الكبيرة (١ : ١٠،٠٠٠ و أكبر). ومن حيث شكل الصور الجوية وإمكانيات تجسيمها (الحصول علي صورة مجسمة ثلاثية الأبعاد للمعالم الأرضية) فتوجد صور غير مجسمة و صور مجسمة. الصور الجوية غير المجسمة هي صورة ثنائية الأبعاد وتنقسم الي صورة مفردة أو موزايك.

الموزايك هو ضم أكثر من صورة جوية معا للحصول علي صورة تغطي منطقة أرضية أكبر. فعلي سبيل المثال إذا أردنا دراسة التوسع العمراني لمدينة معينة وكانت هذه المدينة تظهر في أكثر من صورة جوية فأننا نقوم بضم هذه الصور معا لنحصل علي صورة واحدة مجمعة (موزايك أو فسيفساء) للمدينة كلها. أما النوع الثاني من الصور الجوية فهي تلك الصور التي تسمح - بأجهزة وخطوات معينة - بالحصول علي رؤية مجسمة للمعالم الأرضية علي الصورة، وتسمي هذه الصور بأزواج الصور أو الصور المزدوجة.



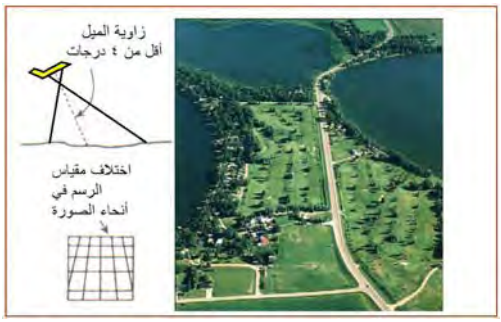
شكل (٢٣-٩) أنواع الصورة الجوية طبقا لشكلها

كما يعد تقسيم الصور طبقا لزاوية الميل هو أهم أنواع تصنيفات الصور الجوية من حيث طبيعة استخدام كل نوع من هذه الأنواع. تنقسم الصور الجوية في هذا التقسيم الي ثلاثة أنواع: الصور الرأسية والصور قليلة الميل (أو الصور المائلة) والصور شديدة الميل (أو الصور الميالة). الصورة الجوية الرأسية هي تلك الصورة الملتقطة ومحور الكاميرا في وضع رأسي مع سطح الأرض (أي محور الكاميرا عمودي تماما علي سطح الأرض). وتعد هذه الصور هي الأدق و الأنسب في إنتاج الخرائط حيث تكون الخصائص الهندسية للصورة متساوية، فإذا تخيلنا مجموعة من المربعات المتساوية علي سطح الأرض فأنها ستظهر مربعات متساوية علي الصورة الرأسية أيضا. كما أن مساحة المنطقة المصورة ستكون بسيطة في هذا النوع من الصور الجوية. لكن وعلي الجانب الآخر فأن الحصول علي صور جوية رأسية يعد أمرا صعب التحقيق بسبب ظروف التصوير و حركة الطائرة حيث لا يمكن التحكم في وضع الطائرة ووضع الكاميرا تماما أثناء الطيران.



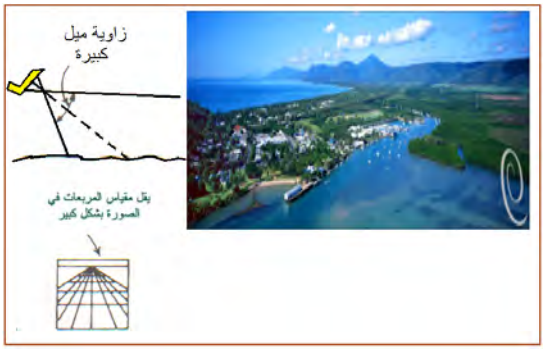
شكل (٢٣-١٠) الصورة الجوية الرأسية

الصورة الجوية قليلة الميل هي تلك الصورة الملتقطة بحيث يميل محور الكاميرا ميلا بسيطا - لا يتجاوز ٤ درجات - عن الوضع الرأسي. وفي هذه الصورة سيختلف شكل المعالم الأرضية عن شكلها الحقيقي، حيث لن تكون شبكة المربعات - التخيلية - المتساوية علي سطح الأرض ظاهرة متساوية علي الصورة وإنما ستختلف مساحة المربعات من مكان لآخر علي الصورة. لكن يمكن استخدام طرق علمية و أجهزة تقنية معينة لتحويل الصور الجوية قليلة الميل الي صور رأسية، ومن ثم استخدامها في إنتاج الخرائط.



شكل (٢٣-١١) الصورة الجوية قليلة الميل

الصور الجوية شديدة الميل هي تلك الصور الملتقطة ومحور الكاميرا يميل بدرجة كبيرة عن الوضع الرأسي، بحيث يظهر الأفق في الصورة. وفي هذه الصور سيختلف شكل المعالم الأرضية اختلافا كبيرا من جانب لآخر علي الصورة. وهذا النوع من الصور الجوية لا يمكن استخدامه في إنتاج الخرائط لكنه مفيد جدا في تطبيقات تفسير الصور الجوية للحصول علي معلومات عن الظواهر الجغرافية وخاصة و أن الصورة شديدة الميل تظهر منطقة جغرافية كبيرة بالمقارنة بالصور الرأسية أو الصور قليلة الميل.



شكل (٢٣-١٢) الصورة الجوية شديدة الميل

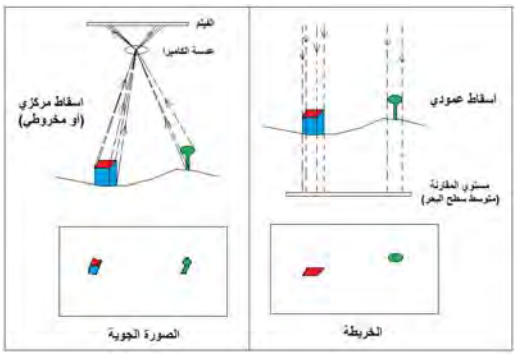
٢٣-٤-٣ الفروق بين الصورة الجوية و الخريطة

أكثر استخدامات الصور الجوية في المجالين الجغرافي و الهندسي هو إنتاج و تحديث الخرائط، ومن ثم فيجب فهم طبيعة وخصائص كلا من الخريطة و الصور الجوية والفروقات بينهما مما سيعطي صورة واضحة - وان كانت مبدئية في هذا الفصل - عن كيفية التعامل مع الصور الجوية وإمكانية إنتاج الخرائط منها.

يتمثل أهم الفروق بين الصورة و الخريطة في طبيعة الإسقاط projection المستخدم في تمثيل المعالم المكانية. فالخريطة يتم رسمها بناءا علي المسقط الأفقي للأشعة المتوازية التي تسقط عمودية علي سطح الأرض orthogonal projection. فعلي سبيل المثال فلو تخيلنا مبني علي سطح الأرض (كلية مثلا) فسيظهر علي الخريطة في مسقطه الأفقي (طوله و عرضه فقط) ولن يظهر ارتفاع المبني أو عدد أدواره، أو بمعني آخر فأن قمة المبني و قاع المبني سينطبقان علي الخريطة. وعلي الجانب الآخر فأن الصورة الجوية ملتقطة من مركز عدسة الكاميرا (أي أن كل الأشعة تمر بنقطة مركز العدسة ثم تسقط علي الفيلم بداخل الكاميرا) وبالتالي فأن طبيعة الإسقاط هنا هي المسقط المركزي أو المسقط المخروطي perspective projection. فلو تخيلنا نفس المثال السابق (مبني كلية) فمن الممكن أن تظهر التفاصيل الجانبية للمبني في الصورة المائلة ويمكننا تمييز ارتفاع المبني ذاته. أي أن الصورة الجوية من الممكن أن توضح قمة و قاع المعلم المكاني، وبالتالي ستكون مختلفة عن تمثيل نفس المعلم علي الخريطة بسبب طبيعة الإسقاط. بناءا علي ذلك فيمكننا القول أننا لا نستطيع رسم خريطة مباشرة من الصورة الجوية، ويجب أولا أن نزيل تأثير المسقط المركزي للصورة حتى يصبح من نوع المسقط الأفقي مثل الخريطة (وهو ما نسميه الصورة العمودية كما سيتم شرحها لاحقا).

يتمثل ثاني الفروق الهامة بين الخريطة و الصورة الجوية في تأثير ارتفاعات وتضاريس المعالم المكانية. في الخريطة يتم إسقاط جميع المظاهر الجغرافية علي مستوي المقارنة المتمثل في متوسط سطح البحر، وحيث أن الأشعة الساقطة علي هذا المستوي تكون عمودية فلن يحدث تأثير لفروق الارتفاعات بين المعالم الجغرافية علي شكلها و موقعها الصحيح علي الخريطة. في الصورة الجوية - وكما سبق الذكر - فأن مقياس رسم الصور يتغير من مكان لآخر علي نفس الصورة بسبب قرب أو بعد المعلم المكاني من مركز عدسة كاميرا التصوير الجوي، فكلما زاد منسوب المعلم كلما زاد مقياس الرسم علي الصورة وكلما كان المعلم منخفضا كلما قل مقياس رسمه علي الصورة. و بمعني آخر فأن ارتفاعات المظاهر الجغرافية عن سطح المقارنة (المناسيب) تؤثر علي موضع المعلم علي الصورة الجوية ذاتها. وبناءا علي ذلك فيمكننا القول مرة أخري أننا لا نستطيع رسم خريطة مباشرة من الصورة الجوية، ويجب أولا أن نزيل تأثير اختلاف مناسيب المعالم الجغرافية (وهو ما نسميه تأثير الإزاحة كما سيتم شرحها لاحقا) قبل أن نستخدم الصورة الجوية في رسم الخريطة.

أيضا يوجد فرق ثالث مهم بين الخريطة و الصورة الجوية حيث يتم رسم الخريطة باستخدام الرموز وتحتوي الخريطة علي أسماء المعالم الجغرافية (مثل الشوارع و الأحياء) واتجاه الشمال و شبكة الإحداثيات، بينما الصورة الجوية تمثل الواقع كما هو وبدون أية إضافات أو رموز خاصة.



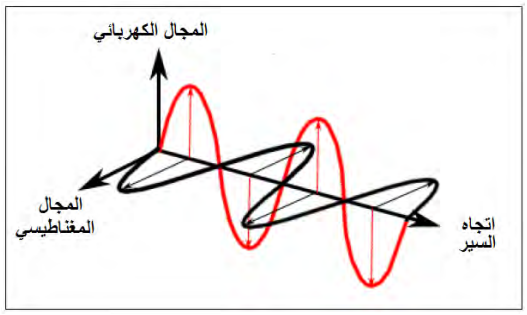
شكل (٢٣-١٣) فرق الإسقاط بين الخريطة والصورة الجوية

٢٣-٥ أسس التصوير الجوي

يعتمد التصوير الجوي علي عدة أسس علمية لعلوم الضوء و البصريات حيث أن كاميرات التصوير الجوي (التقليدية) تحتوي علي عدسة أو عدة عدسات تسمح بمرور الضوء الي الفيلم. يتعرض هذا الفصل للأسس العامة للضوء الكهرومغناطيسي و أجزاؤه وللعدسات و أنواعها وأيضا للأفلام ومكوناتها، وكلها معلومات هامة للغاية لدارس التصوير الجوي والاستشعار عن بعد.

٢٣-٥-١ الضوء الكهرومغناطيسي

تسير الموجات الضوئية في الفراغ مكونة مجالين من الطاقة: (١) المجال الكهربائي في اتجاه السير و (٢) المجال المغناطيسي العمودي علي اتجاه السير، وكلا المجالين يسيران بسرعة ثابتة في الفراغ وهي ما يطلق عليها اسم سرعة الضوء. من هنا يسمي الضوء بأنه ضوء كهرومغناطيسي أو أشعة كهرومغناطيسية.



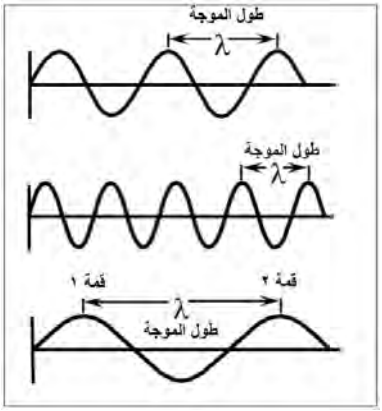
شكل (٢٣-١٤) الضوء الكهرومغناطيسي

الضوء الكهرومغناطيسي ليس نوعا واحدا، بل يوجد بداخله مئات من الأنواع أو الأقسام أو الأشعة التي تختلف في مواصفاتها وأيضا في استخداماتها. ولكي نفرق بين هذه الأنواع يجب وضع معيار محدد، وهناك معيارين أو قيمتين تمكننا من تقسيم الضوء الكهرومغناطيسي الي أقسم وهما (١) الطول الموجي، و (٢) التردد. وقبل الدخول في تفاصيلهما سنتعرض للوحدات المستخدمة في القياس حيث:

١ متر	= ١٠٠ أو $١٠^{٢}$	سنتيمتر (سم)
١ سنتيمتر	= ١٠	ملليمتر (مللي)
١ ملليمتر	= ١٠٠٠ أو $١٠^{٣}$	مايكرومتر (ميكرو أو الرمز اللاتيني μ)
١ مايكرومتر	= ١٠٠٠ أو $١٠^{٣}$	نانومتر

يسير الضوء المغناطيسي في الفراغ في صورة منحني (وليس خطا مستقيما) يشبه منحني دالة الجيب sin، أي أنه - وبصورة تخيلية - يزداد ليصل الي أقصي قيمة (قمة ١) ثم يبدأ في الانخفاض حتى يصل الي الصفر ثم يستمر ليصل الي أقصي قيمة سالبة في الجهة الأخرى (قمة ٢) ثم يبدأ في الزيادة ليصل لمستوي الصفر مرة أخري. وهذه الحركة أو الدورة نطلق عليها اسم "موجة"، وتتكرر هذه الموجات طوال خط سير الضوء. والمسافة التي تفصل بين قمتين متتاليتين هي ما يطلق عليها اسم "طول الموجة" أو "الطول الموجي wave length"

للضوء، وغالبا يستخدم الحرف اللاتيني (ينطق λ لامدا) للتعبير عن الطول الموجي. وبذلك فأن أنواع الضوء الكهرومغناطيسي تختلف في قيمة الطول الموجي لها من نوع الي آخر.



شكل (٢٣-١٥) الطول الموجي للضوء الكهرومغناطيسي

يعد التردد frequency هو المعيار الثاني المستخدم في التفرقة بين نوع ضوء كهرومغناطيسي و نوع آخر، ويعرف التردد علي أنه عدد الدورات الكاملة (الموجات) للضوء في فترة زمنية محددة، أو بصورة أخري فالتردد هو عدد الموجات في الثانية الواحدة. ويقاس التردد بوحدات الهرتز والذي يساوي ١ دورة/ثانية، ومضاعفاتها مثل الكيلو هرتز والمساوي ١٠٠٠ (أي ألف) دورة/ثانية أو الميجا هرتز والبالغ ١،٠٠٠،٠٠٠ (أي مليون) دورة/ثانية أو الجيجا هرتز والبالغ ١،٠٠٠،٠٠٠،٠٠٠ (أي مليار) دورة/ثانية.

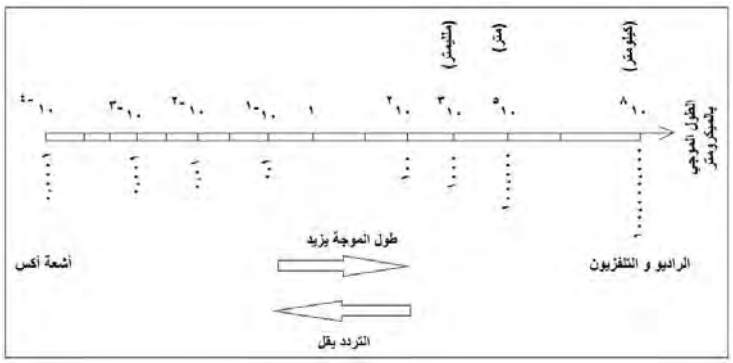
العلاقة بين الطول الموجي و التردد لأي نوع من أنواع الضوء الكهرومغناطيسي هي علاقة ثابتة حيث أن:

التردد × الطول الموجي = سرعة الضوء

frequency x wave length = light speed

من المعروف أن سرعة الضوء ثابتة (حوالي ٣٠٠،٠٠٠ كيلومتر/ثانية) فيمكننا حساب التردد أو الطول الموجي لنوع محدد من الضوء إذا علمنا قيمة الآخر. كما يدل ذلك علي أن العلاقة بين التردد و سرعة الضوء علاقة عكسية، فإذا زاد التردد قل الطول الموجي والعكس صحيح أيضا. ولذلك سنعتمد علي قيمة طول الموجة في تعريف أنواع أو أقسام الضوء المغناطيسي في الجزء التالي.

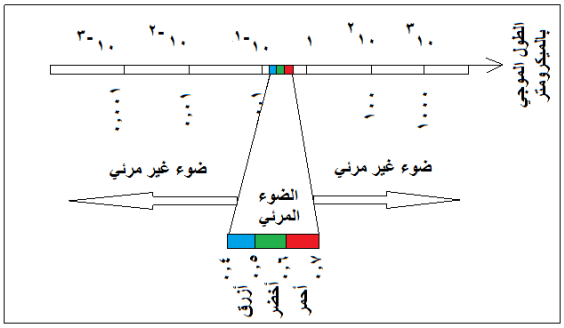
طبقا للطول الموجي فأن الضوء الكهرومغناطيسي يتراوح بين أطوال موجات قصيرة جدا (مثل أشعة جاما و أشعة اكس أو الأشعة السينية) الي أطوال موجات كبيرة جدا (مثل موجات بث الراديو و التلفزيون)، ومن هنا فيوجد عدد كبير جدا من أنواع أو أقسام الضوء.



شكل (٢٣-١٦) أقسام الضوء الكهرومغناطيسي بناءا علي طول الموجة

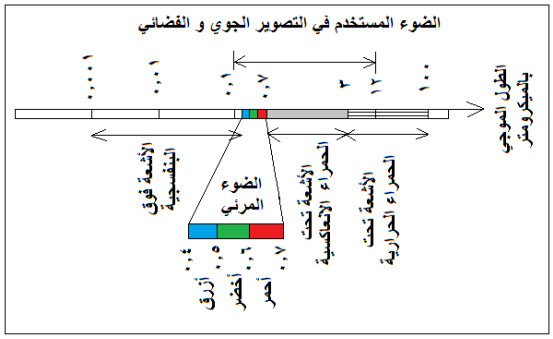
ما تستطيع عين الإنسان رؤيته من أنواع الضوء الكهرومغناطيسي هو ما نطلق عليه اسم الضوء المرئي، بينما كل الأشعة التي لا تستطيع العين البشرية التعامل معها تسمي الضوء غير المرئي. والضوء المرئي هو الضوء الذي يتراوح طوله الموجي بين ٠.٤ مايكرومتر و ٠.٧ مايكرومتر، أي أن أي ضوء له طول موجه أقل من ٠.٤ مايكرومتر وأي ضوء له طول موجه أكبر من ٠.٧ مايكرومتر لن نستطيع رؤيته ولذلك يسمي الضوء غير المرئي. ويتقسم الضوء المرئي الي ٣ أقسام رئيسية وهي:

- اللون الأزرق: يتراوح طول الموجة من ٠.٤ الي ٠.٥ مايكرومتر
- اللون الأخضر: يتراوح طول الموجة من ٠.٥ الي ٠.٦ مايكرومتر
- اللون الأحمر: يتراوح طول الموجة من ٠.٦ الي ٠.٧ مايكرومتر



شكل (٢٣-١٧) الضوء الكهرومغناطيسي المرئي وغير المرئي

يستخدم الضوء المرئي في التصوير الجوي بصفة أساسية، وان كانت هناك أنواع من معدات التصوير الجوي و أيضا التصوير الفضائي تستخدم بالإضافة للضوء المرئي أنواع من الضوء غير المرئي ذات أطوال موجات قريبة. فالأشعة فوق البنفسجية ultraviolet - التي تتراوح أطوال موجاتها بين ٠.١ مايكرومتر و ٠.٤ مايكرومتر - تستخدم في تطبيقات معينة من التصوير خاصة التصوير الفضائي (الاستشعار عن بعد) في مجال الجيولوجيا وتحديد أنواع الصخور. كما تستخدم الأشعة تحت الحمراء infrared سواء الانعكاسية (طول موجاتها يتراوح بين ٠.٧ و ٣ مايكرومتر) أو الأشعة تحت الحمراء الحرارية أو الانبعاثية (طول موجاتها يتراوح بين ٣ و ١٢ مايكرومتر) في التصوير الجوي و التصوير الفضائي خاصة في التطبيقات الزراعية و المائية و العسكرية.



شكل (٢٣-١٨) الضوء المستخدم في التصوير الجوي و التصوير الفضائي

٢٣-٥-٢ العدسات

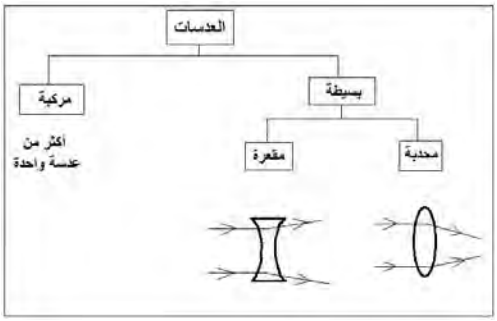
العدسة هي قطعة من الزجاج النقي التي عندما يسقط الضوء علي سطحها إما أن تسمح له بالانكسار (المرور) أو أن تعكسه (أو ترده) مرة أخري كما في حالة المرآة. وتتكون أنواع العدسات إما مع عدسة بسيطة (عدسة واحدة) أو عدسة مركبة (مجموعة من العدسات). وتتكون العدسة البسيطة من نوعين:

عدسة محدبة:

يكون وسط العدسة أسمك من أطرافها، وبذلك فهي تستخدم في تجميع الأشعة الضوئية بعد مرورها بالعدسة ومن ثم فيطلق عليها أيضا العدسة اللامة أو العدسة الموجبة.

عدسة مقعرة:

يكون وسط العدسة أقل سمكا من أطرافها، وبذلك فهي تستخدم في تفريق الأشعة الضوئية بعد مرورها بالعدسة ومن ثم فيطلق عليها أيضا العدسة المفرقة أو العدسة السالبة.

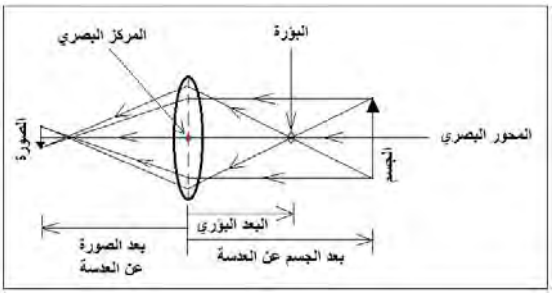


شكل (٢٣-١٩) أنواع العدسات

لكل عدسة مركز بصري optical center وهو النقطة التي إذا مر بها شعاع الضوء فلا يحدث له أي انكسار أو انحراف، أي أن اتجاه دخول الضوء الي العدسة هو نفس اتجاه خروجه من العدسة. والمركز البصري للعدسة ينطبق علي مركزها الهندسي أي مركز تكور سطح

العدسة. أما الخط الذي إذا مر شعاع الضوء من خلاله فلا يحدث له أي انكسار فيسمي المحور البصري optical axis للعدسة، وهو بالطبع يمر من خلال المركز البصري للعدسة.

البؤرة أو النقطة الأساسية focus للعدسة هي نقطة علي المحور البصري للعدسة تتجمع عندها الأشعة الموازية للمحور البصري. فإذا وضع أي هدف في موضع البؤرة فلن تتكون له صورة خلف العدسة. وتعرف المسافة بين المركز البصري للعدسة و بؤرة العدسة باسم البعد البؤري focal length للعدسة، حيث لكل عدسة بعد بؤري ثابت لا يتغير.



شكل (٢٣-٢٠) الخصائص الأساسية للعدسة

٢٣-٥-٣ الأفلام

الفيلم هو شريحة من البلاستيك المغطاة بطبقة من مادة نترات الفضة، وهي المادة التي تتميز بتأثرها أو حساسيتها للضوء طبقا لشدته. وبصفة عامة تنقسم الأفلام المستخدمة في التصوير الجوي - طبقا لاستخدامات التصوير الجوي - إلي عدة أنواع تشمل أساسا الأفلام الضوئية والأفلام غير الضوئية، وفي كل نوع منهما يوجد أفلام ملونة و أفلام غير ملونة. فالأفلام الضوئية هي تلك الحساسة لأنواع الطيف الكهرومغناطيسي المرئي فقط، بينما النوع الثاني من الأفلام يكون حساسا وقادرا علي تسجيل بعض أنواع الضوء غير المرئي خاصة الأشعة تحت الحمراء.

ومن أنواع أفلام التصوير الجوي:

- الفيلم البانكروماتي أو الفيلم الحساس للضوء المرئي: الفيلم المرئي العادي المستخدم في التصوير الأبيض و أسود ، وهو يتميز بسعره المنخفض، ومازال هو الأكثر استخداما في التصوير الجوي خاصة بهدف إنتاج الخرائط وأيضا في التطبيقات الجيولوجية و الهيدرولوجية و التربة.
- الفيلم الأبيض و الأسود الحساس للأشعة تحت الحمراء: تمتد حساسية مادة الفيلم لتشمل بالإضافة للضوء المرئي الأشعة تحت الحمراء أيضا. تستخدم هذه النوعية من الأفلام في التعرف علي جودة و صحة النباتات حيث تظهر النباتات ذات الأوراق الممتلئة بالكلورفور (اليخضور) تظهر بلون أبيض بينما النباتات المريضة تظهر بلون داكن. كما أن هذه النوعية من الأفلام تكون مفيدة في التمييز بين الماء و اليابسة واكتشاف المسطحات المائية مهما صغرت مساحتها.
- الفيلم الملون العادي: حيث تظهر المعالم الطبيعية في الصورة بألوانها الطبيعية المعتادة كما تراها العين البشرية، كما أن عين الإنسان تستطيع أن تميز بين ألوان أكثر كثيرا مما تستطيع أن تميز من تدرجات اللون الرمادي في الأفلام البانكروماتية.

وقديما كان سعر الأفلام الملونة مرتفعا ولم تكن هذه الأفلام منتشرة بكثرة في تطبيقات التصوير الجوي إلا أنها أصبحت الآن أكثر استخداما خاصة في تفسير الصور الجوية.

- الفيلم الملون الحساس للأشعة تحت الحمراء: وتسمي أيضا الأفلام الملونة الكاذبة حيث تظهر المعالم الخضراء بلون ازرق علي الصورة باستثناء النباتات كما تظهر المعالم الحمراء بلون اخضر علي الصورة وتظهر الأهداف التي لا تراها عين الإنسان (خارج نطاق الضوء المرئي) بلون أحمر علي الصورة. يستخدم هذا النوع من الأفلام في التطبيقات الزراعية لتحديد أنواع و أمراض النباتات وكذلك التمييز بين المياه الصافية أو العذبة و المياه العكرة أو شديدة الأملاح، وأيضا في التطبيقات العسكرية والمخابراتية.

٢٣-٦ القياس من الصور الجوية

٢٣-٦-١ حساب مقياس رسم الصور الجوية

مقياس رسم الصورة الجوية هو النسبة العددية بين أي طول علي الصورة و طوله الحقيقي علي الأرض. وتجدر الإشارة الي أن تعريف مقياس رسم الخريطة هو نفس التعريف إلا أننا نضيف عليه كلمة "النسبة العددية الثابتة"، ومن هنا نستنتج أن مقياس رسم الصورة الجوية غير ثابت لنفس الصورة و إنما يختلف من نقطة لأخرى عليها بعكس الخريطة. والسبب الرئيسي والأساسي وراء هذا الاختلاف هو طبيعة الإسقاط المركزي للصورة الجوية والذي يتسبب في أن مقياس رسمها سيعتمد علي منسوب كل نقطة (أي طبيعة تضاريس المنطقة الجغرافية المصورة). وتوجد عدة عوامل أخري وراء عدم ثبات قيمة مقياس رسم الصورة الجوية مثل ميل الصورة و أخطاء العدسة و أخطاء الفيلم وطبيعة تكور سطح الأرض ذاتها، إلا أن معظم هذه العوامل قد تم التغلب عليها بتقدم التقنيات الحديثة المستخدمة في إنتاج معدات و أفلام التصوير الجوي حاليا.

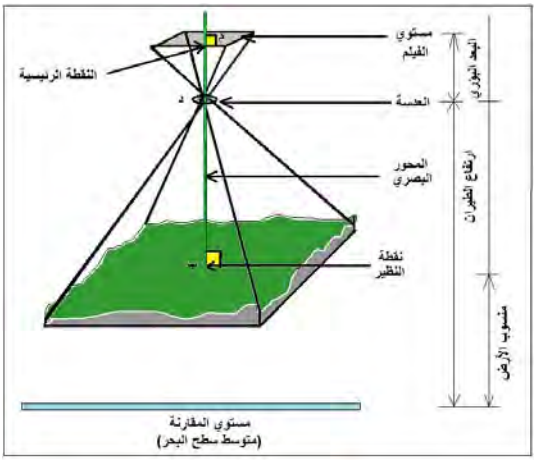
توجد عدة طرق لحساب مقياس رسم صورة جوية طبقا للمعلومات المتاحة و أيضا طبقا لتغير تضاريس سطح الأرض (المناسيب) للمنطقة الجغرافية الظاهرة علي الصورة.

مقياس الرسم لمنطقة مستوية

لقياس ارتفاع أي نقطة علي سطح الأرض فأننا نستخدم مستوي سطح البحر علي أنه مستوي المقارنة (الصفر) الذي يبدأ قياس الارتفاع من عنده، ومن هنا نطلق علي هذا الارتفاع مصطلح "المنسوب" لنفرق بينه وبين أي طريقة أخري لقياس الارتفاعات. فالمنسوب هو قيمة ارتفاع النقطة عن مستوي سطح البحر. فعند تصوير منطقة منبسطة أو مستوية التضاريس تكون مناسيب المعالم الجغرافية تقريبا واحدة أو قريبة من بعضها البعض مما يجعلنا نفترض أن فروق المناسيب لن يكون لها تأثير كبير علي حساب مقياس رسم الصورة الجوية.

بالنظر للشكل التالي نجد أن مركز الصورة أو النقطة الأساسية (م) ومركز العدسة (د) يقعان علي خط واحد وهو المحور البصري للعدسة. فإذا قمنا بمد المحور البصري علي استقامته حتى يقطع الأرض فأن مسقط مركز العدسة سيقع عند نقطة تسمي نقطة النظير (ب). أيضا يمكننا ملاحظة أن المنطقة الأرضية قد تم تصغيرها علي الصورة الجوية بنفس النسبة بين المسافة م د الي المسافة د ب، أو بمعني آخر فأن نسبة التصغير علي الصورة تساوي نفس

النسبة بين البعد البؤري للكاميرا (المسافة م د) وارتفاع الكاميرا عن سطح الأرض (المسافة د ب) وهذا الأخير ما هو الفرق بين ارتفاع الطيران و منسوب الأرض. ونسبة تصغير الصورة الجوية ما هي إلا مقياس رسم هذه الصورة، ومن ثم يمكننا القول أن مقياس رسم الصورة هو النسبة بين البعد البؤري و فرق ارتفاع الطيران و المنسوب.



شكل (٢٣-٢١) الخصائص الهندسية للصورة الجوية الرأسية

و في هذه الحالة تكون معادلة حساب مقياس رسم الصورة الجوية كالتالي:

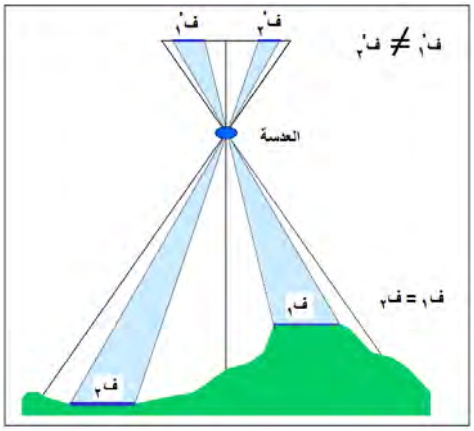
$$s = f / \ (h - H) \qquad 23\text{-}1$$

حيث:

s مقياس رسم الصورة الجوية
f البعد البؤري
h ارتفاع الطيران
H منسوب النقطة (ارتفاعها عن متوسط سطح البحر)

<u>مقياس الرسم لمنطقة مختلفة التضاريس</u>

في حالة اختلاف تضاريس المنطقة المصورة (أي اختلاف مناسيب معالمها عن مستوي سطح البحر) سيكون هناك مقياس رسم لكل نقطة يختلف عن مقياس رسم النقطة الأخرى. فبالنظر للشكل التالي سنجد أن المسافتين ف١ ، ف٢ متساويتين علي الأرض لكنهما مختلفتين في المنسوب مما سيجعل صورتيهما علي الصورة الجوية ف'١ ، ف'٢ لن يكونا متساويتين. أي أنه كلما كان الهدف أقرب للكاميرا (أي أعلي منسوبا) كلما ظهر علي الصورة الجوية بمقياس رسم أكبر.



شكل (٢٣-٢٢) اختلاف التضاريس و تأثيره علي مقياس رسم الصورة الجوية

وفي حالة اختلاف المناسيب (التضاريس) فنستخدم المعادلات التالية:

لحساب مقياس الرسم عند النقطة الأولي a:

$$s_a = f / \ (h - H_a)$$ 23-2

حيث:

s_a مقياس رسم الصورة الجوية عند النقطة a
H_a منسوب النقطة a

لحساب مقياس الرسم عند النقطة الثانية b:

$$s_b = f / \ (h - H_b)$$ 23-3

حيث:

s_b مقياس رسم الصورة الجوية عند النقطة b
H_b منسوب النقطة b

أما لحساب مقياس الرسم المتوسط للصورة الجوية:

$$s_m = f / \ (h - H_m)$$ 23-4

حيث:

s_m مقياس رسم الصورة الجوية المتوسط
H_m المنسوب المتوسط

طرق أخري لحساب مقياس رسم الصورة الجوية

يمكن حساب مقياس رسم تقريبي للصورة الجوية - في حالة عدم معرفة البعد البؤري للكاميرا و ارتفاع الطيران - بعدة طرق أخري:

(أ) قياس مسافة علي الصورة ومعرفة المسافة الحقيقية لها علي الأرض:

إذا قمنا بقياس مسافة (جزء من طريق مثلا) علي الصورة الجوية وكان معلوما الطول الحقيقي علي الأرض لهذه المسافة فيمكن حساب مقياس رسم الصورة كالتالي:

$$s = D_{photo} / D_{ground} \qquad 23\text{-}5$$

حيث:

D_{photo} المسافة علي الصورة الجوية
D_{ground} المسافة الحقيقية المناظرة علي الأرض

(ب) قياس مسافة علي الصورة وقياسها علي خريطة معلومة:

إذا قمنا بقياس مسافة (جزء من طريق مثلا) علي الصورة الجوية وقمنا بقياس طوله علي خريطة معلومة مقياس الرسم فيمكن حساب مقياس رسم الصورة كالتالي:

$$s = (L_{photo} / L_{map}) \times s_{map} \qquad 23\text{-}6$$

حيث:

L_{photo} الطول علي الصورة الجوية
L_{map} الطول المناظر علي الخريطة
S_{map} مقياس رسم الخريطة

(ج) قياس مسافة بين نقطتين علي الصورة ومعرفة الإحداثيات الأرضية لهما:

إذا قمنا بقياس مسافة بين نقطتين معلومتين علي الصورة الجوية وتوافر لدينا قيم الإحداثيات الأرضية (x,y) لكلتا النقطتين فيمكن حساب مقياس رسم الصورة كالتالي:

$$s = D_{photo} / \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \qquad 23\text{-}7$$

حيث:
D_{photo} المسافة علي الصورة الجوية بين النقطتين
x_1,y_1 الإحداثيات الأرضية للنقطة الأولي
x_2,y_2 الإحداثيات الأرضية للنقطة الثانية

٢٣-٦-٢ تطبيقات مقياس رسم الصور الجوية في تصميم الطيران

في حالة معرفة مقياس الرسم المطلوب لتصوير منطقة معينة يمكننا التحديد المسبق لارتفاع الطيران المطلوب أو البعد البؤري للكاميرا الواجب استخدامها لإتمام هذا التصوير.

حساب ارتفاع الطيران المناسب لمقياس رسم

تتطلب بعض تطبيقات التصوير الجوي التقاط الصور بمقياس رسم محدد سلفا طبقا لأهداف مشروع التصوير ذاته، ويتطلب هذا تحديد ارتفاع الطيران المناسب للحصول علي مقياس الرسم المطلوب. يعتمد حساب ارتفاع الطيران في هذه الحالة علي معرفة تضاريس المنطقة الجغرافية، وفي هذه الحالة نستخدم المعادلة ٢٣-٤ لنستنتج أن:

$$h = H_m + (f \div S_m) \qquad 23\text{-}8$$

حساب البعد البؤري المناسب لمقياس رسم

بنفس الطريقة السابقة فمن الممكن حساب البعد البؤري للكاميرا المطلوبة لإتمام تصوير جوي محدد المقياس ومعلوم ارتفاع الطيران:

$$f = (h - H_m) \times S_m \qquad 23\text{-}9$$

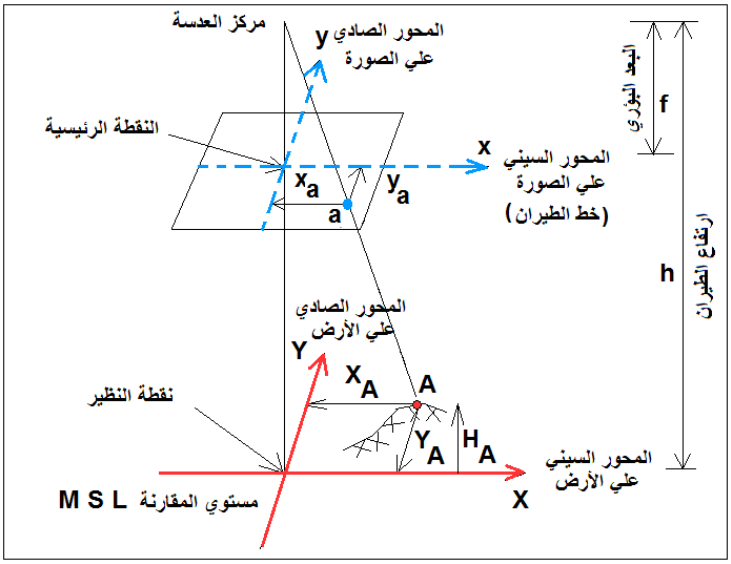
٢٣-٦-٣ حساب الإحداثيات الأرضية للمعالم

لقياس الإحداثيات علي الصورة الجوية يتم الاعتماد علي نظام إحداثيات يتكون من:

١. مركز النظام في النقطة الرئيسية أو مركز الصورة.
٢. المحور السيني الموجب x هو اتجاه الطيران.
٣. المحور الصادي الموجب y هو الاتجاه العمودي علي اتجاه الطيران.

تتكون الخطوة الأولي في حساب الإحداثيات الأرضية للمعالم الجغرافية الظاهرة علي الصورة الجوية من استخدام نظام إحداثيات أرضية نسبية (أي أنها منسوبة للإحداثيات الأرضية لنقطة النظير ذاتها) يتكون من:

١. مركز النظام في مسقط النقطة الرئيسية علي الأرض، أي نقطة النظير Nadir.
٢. المحور السيني علي الأرض X يقع في مستوي رأسي واحد مع المحور السيني للصورة.
٣. المحور الصادي علي الأرض Y يقع في مستوي رأسي واحد مع المحور الصادي للصورة.



شكل (٢٣-٢٣) الإحداثيات علي الصورة الجوية وعلي الأرض

من المعادلات التالية يمكننا حساب قيم الإحداثيين السيني و الصادي (النسبية) علي الأرض لأي معلم جغرافي (X_A, Y_A) تم قياس إحداثياته علي الصورة الجوية (x_A, y_A) :

$$X_A = (h - H_A) \times x_a / f \qquad 23\text{-}10$$

$$Y_A = (h - H_A) \times y_a / f \qquad 23\text{-}11$$

حيث:

X_A, Y_A	الإحداثيات الأرضية النسبية للنقطة A
x_A, y_A	الإحداثيات علي الصورة الجوية للنقطة A
H_A	منسوب النقطة A
h	ارتفاع الطيران
f	البعد البؤري للكاميرا

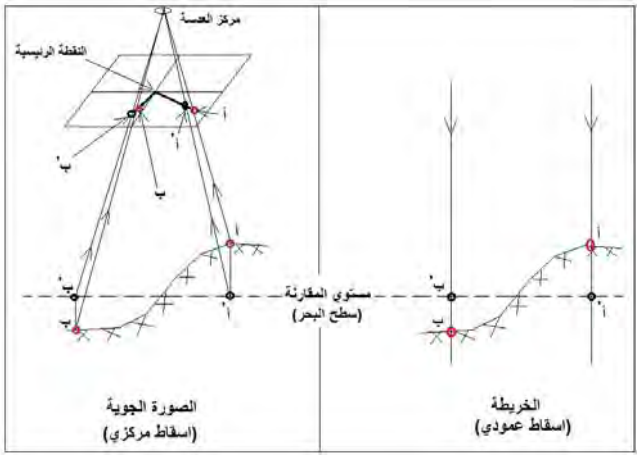
فإذا عرفنا الإحداثيات الأرضية الحقيقية لنقطة النظير (من خرائط قديمة أو باستخدام أجهزة الجي بي أس) يمكن حساب الإحداثيات الأرضية الحقيقية لأي معلم جغرافي علي الصورة الجوية.

٢٣-٦-٤ الإزاحة على الصور الجوية

تختلف الصورة الجوية عن الخريطة اختلافا جوهريا ناتجا من طبيعة الإسقاط المستخدم في كلاهما، فالخريطة ناتجة عن إسقاط عمودي Orthogonal Projection بينما الصورة ناتجة من إسقاط مركزي للمعالم الجغرافية Perspective Projection. تعرف الخريطة بأنها المسقط الأفقي الناتج عن إسقاط أشعة متوازية عمودية علي الأرض. وحيث أن تضاريس

سطح الأرض مختلفة من مكان الي آخر فأن الخريطة تمثل مسقط هذه الأشعة علي مستوي معين للمقارنة وهو مستوي سطح البحر. وحيث أن الأشعة متوازية في حالة إسقاط الخريطة فأن النقطة الأرضية (أ) في الجزء الأيمن من الشكل التالي ستقع هي و مسقطها علي سطح البحر (أ') في نفس الموضع علي الخريطة. وبمعني آخر فأن ما يظهر علي الخريطة - طبقا لتعريفها - هو مسقط النقطة علي سطح البحر، وهذا هو الأساس العلمي للخريطة أيا كان نوعها و مقياس رسمها. وبذلك فأنه لو كانت النقطة الأرضية تقع أعلي من مستوي سطح البحر (مثل النقطة أ) أو كانت تقع أسفل مستوي سطح البحر (مثل النقطة ب) فأن موقعها علي الخريطة لن يتغير. أي أن اختلاف تضاريس سطح الأرض لا يؤثر في إعداد الخرائط بسبب طبيعة و خصائص هذا الإسقاط العمودي المستخدم في إنتاج الخرائط.

علي الجانب الأخر فأن الصورة الجوية ملتقطة من نقطة مركزية ألا وهي مركز العدسة في الكاميرا الجوية حيث أن كل الأشعة تتجمع في هذا المركز قبل أن تصل الي مستوي الفيلم داخل الكاميرا. ولذلك فأن نوع الإسقاط المستخدم في التصوير الجوي هو الإسقاط المركزي كما يتضح من الجزء الأيسر في الشكل التالي. وبتدقيق النظر في هذا الشكل سنجد أن النقطة الحقيقية الظاهرة في الصورة الجوية هي نقطة (أ) أي النقطة الأرضية الحقيقية، بينما المطلوب لكي نتمكن من رسم الخريطة أن نعرف موضع النقطة أ' علي الصورة (وهي نقطة تخيلية غير موجودة فعلا) حيث أنها هي التي تعبر عن مسقط النقطة علي مستوي سطح البحر وهي التي يجب أن تكون ممثلة علي الخريطة. وبكلمات أخري فأن النقطة الافتراضية (أ') هي التي يجب أن تظهر علي الصورة في حالة أننا نريد أن نحول هذه الصورة الي خريطة، بينما الموجود فعلا علي الصورة هي النقطة (أ). ومن هنا نقول أن النقطة المطلوبة (أ') قد انزاحت أو تحركت من مكانها الحقيقي أو مكانها المفترض علي الخريطة الي موقع آخر (أ) هو الظاهر فعلا علي الصورة الجوية.



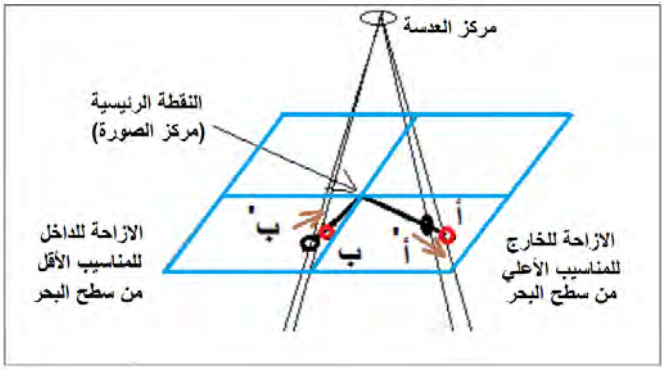
شكل (٢٣-٢٤) الإزاحة الناتجة عن التضاريس

تعرف الإزاحة Displacement بأنها ظهور تفاصيل سطح الأرض منزاحة أو متحركة عن مواقعها الحقيقية (المطلوبة علي الخريطة). فقيمة الإزاحة عند النقطة (أ) في الشكل هي المسافة بين كلا من النقطة الظاهرة (أ) و النقطة الافتراضية الحقيقية (أ'). وبالتالي فأن الإزاحة تتسبب في عدم احتفاظ الظاهرات الجغرافية علي الصور الجوية لمسافات و علاقات مكانية مماثلة للمسافات و العلاقات المناظرة علي الخريطة. ومن هنا فيجب إزالة أو تصحيح الإزاحة قبل التعامل مع الصور الجوية بهدف إنتاج الخرائط. تتعدد الأسباب التي تؤدي لوجود الإزاحة علي

الصور الجوية وتشمل اختلاف تضاريس سطح الأرض، واختلاف مقياس رسم الصور الجوية من موقع لآخر علي الصورة، و عيوب العدسات و الكاميرات، و ميل الطائرة أثناء التصوير، وأيضا عيوب الأفلام والورق المستخدم في تصوير و طباعة الصور الجوية. لكن كل هذه العوامل قد تم التغلب عليها بتقدم التقنيات المستخدمة في التصوير الجوي سواء في العدسات عالية الدقة والأجهزة و المعدات التقنية الحديثة. ويبقي اختلاف تضاريس سطح الأرض Relief Displacement هو أهم أسباب الإزاحة التي يجب حسابه و حذف تأثيره من الصور الجوية قبل استخدامها في إنتاج الخرائط.

للتعرف أكثر علي خصائص الإزاحة نلاحظ في الشكل التالي (وهو مجرد تكبير لجزء من الشكل السابق) أن:

- عند النقطة أ التي منسوبها أعلي من مستوي سطح البحر فأن موضع النقطة الحقيقية علي الصورة الجوية (أ') قد انزاح علي امتداد الخط الواصل بينها وبين مركز الصورة أو النقطة الرئيسية في الاتجاه للخارج - أي بعيدا عن مركز الصورة - و بمسافة تساوي أ' - أ.
- عند النقطة ب التي منسوبها أقل من مستوي سطح البحر فأن موضع النقطة الحقيقية علي الصورة الجوية (ب') قد انزاح علي امتداد الخط الواصل بينها وبين مركز الصورة أو النقطة الرئيسية في الاتجاه للداخل - أي مقتربا من مركز الصورة - و بمسافة تساوي ب'- ب.
- بذلك نستنتج أنه كلما زاد منسوب الظاهرة الجغرافية (ارتفاعها عن سطح البحر) كلما زادت قيمة الإزاحة عندها علي الصورة الجوية ، والعكس صحيح أيضا فكلما قل منسوب الظاهرة الجغرافية (ارتفاعها عن سطح البحر) كلما قلت قيمة الإزاحة عندها علي الصورة الجوية.



شكل (٢٣-٢٥) خصائص الإزاحة الناتجة عن التضاريس

حساب قيمة الإزاحة

يمكن حساب قيمة الإزاحة لأي معلم علي الصورة الجوية بمعرفة منسوب قمته (ارتفاع القمة عن مستوي سطح البحر) و ارتفاع الطيران للصورة الجوية ثم قياس بعد هذا المعلم عن النقطة الرئيسية (مركز) الصورة الجوية بالمعادلة التالية:

$$D = H_{top} \times d / h \qquad 23\text{-}12$$

حيث:

D الإزاحة
H_{top} منسوب قمة الظاهرة
d بعد قمة الظاهرة علي الصورة عن النقطة الرئيسية
h ارتفاع الطيران

الاستفادة من الإزاحة

المعالم الجغرافية الرأسية (أي لها ميل واحد ثابت وليست متدرجة الميول) مثل الأبراج و المباني السكنية تظهر أحيانا علي الصورة الجوية بحيث يمكن تحديد قمة المعلم و قاعه أيضا علي الصورة. وفي مثل هذه الحالة فأن الإزاحة الحادثة لهذا المعلم تعد هي المسافة علي الصورة الجوية بين قمة المعلم و قاعه، أي يمكن قياسها بالمسطرة علي الصورة. هنا يمكننا أن نستفيد من قياس الإزاحة لمثل هذه المعالم الرأسية في حساب ارتفاع المعلم، أي حساب ارتفاع قمة المعلم عن قاعه وليس منسوب المعلم (فالمنسوب مرة أخري هو الارتفاع عن سطح البحر).

شكل (٢٣-٢٦) مثال لصورة بها إزاحة ناتجة عن التضاريس

$$h_{item} = D \times h / d \qquad 23\text{-}13$$

حيث:

h_{item} ارتفاع الظاهرة الرأسية
D الإزاحة
d بعد قمة الظاهرة علي الصورة عن النقطة الرئيسية
h ارتفاع الطيران

الصور الجوية المصححة

تعد الإزاحة أحد أهم أخطاء الصور الجوية قليلة الميل والتي يجب معالجتها و تصحيحها قبل استخدام الصور الجوية في إنتاج الخرائط. وتتم هذه العملية باستخدام أجهزة خاصة تسمي أجهزة Orthophotoscope والذي يقوم بتحويل الصورة قليلة الميل الي صورة رأسية يطلق عليها اسم الصورة الجوية العمودية أو الأورثو فوتو Ortho Photo أو الصورة الجوية الخالية من تأثير إزاحة التضاريس و ميل الكاميرا. وتتميز الصورة الجوية العمودية بأنها مازالت تحتوي صورة جميع المعالم الجغرافية وكل معلومات الصورة الجوية الأصلية إلا أنها ذات مسقط عمودي وبالتالي يمكن استخدامها في إنتاج الخرائط.

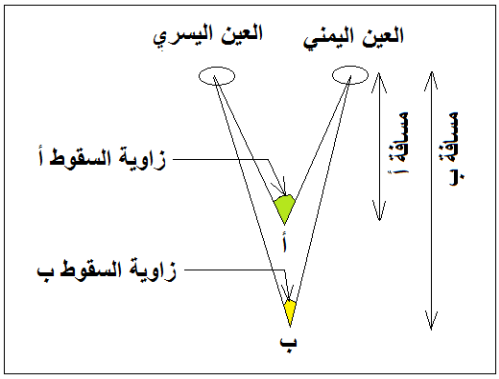
شكل (٢٣-٢٧) تصحيح الإزاحة و إنتاج الصور الجوية العمودية

ومن أنواع الخرائط ما يسمي بالخرائط المصورة الجوية أو Ortho Photomap وهي الصورة الجوية العمودية بعد إضافة أساسيات الخريطة عليها (مثل مقياس الرسم و اتجاه الشمال و شبكة الإحداثيات) مع أسماء المعالم الجغرافية (مثل أسماء الشوارع).

شكل (٢٣-٢٨) مثال للخرائط المصورة الجوية

٢٣-٦-٥ الإبصار المجسم

هل سألت نفسك مرة لماذا خلق الله عز و جل لك عينين و ليس عينا واحدة؟ هل سألت نفسك كيف تستطيع أن تشعر وأنت تعبر الطريق بأن السيارة القادمة مازالت بعيدة عنك؟ كيف يمكنك الإحساس بمدي بعد أو قرب الأشياء من حولك؟ كيف تتم عملية الرؤية عند الإنسان؟ تبدأ العملية بسقوط الأشعة الضوئية علي الأجسام ثم ترتد أو تنعكس منها الي عين الإنسان (مثل العدسة في الكاميرا) لتمر هذه الأشعة من بؤرة العين وتسقط علي الشبكية الموجودة داخل العين (مثل الفيلم في الكاميرا) لتتكون صورة داخل الشبكية لهذه الأجسام ثم يتم نقل هذه الصورة من خلال الأعصاب الي المخ الذي يقوم بتفسير هذه الصورة ومعرفة طبيعة كل جسم من هذه الأجسام (شجرة أم سيارة ..... الخ). حتى الآن فأن عملية الرؤية عند الإنسان لا تحتاج إلا صورة واحدة أو عين واحدة، فما الهدف من وجود العين الثانية أو تكوين الصورة الثانية (التي تتكون بنفس الطريقة من الأشعة الداخلة للعين الثانية) في المخ؟ فلننظر الي الشكل التالي: للنقطة (أ) ستتكون صورتين في المخ أحداهما صورة قادمة من العين اليمني والثانية صورة قادمة من العين اليسرى، ويستطيع المخ أن يقدر قيمة الزاوية بين الشعاعين الصادرين من النقطة (أ) ولنسميها زاوية السقوط (أو زاوية الابتعاد) عند أ. أما الهدف الثاني أو النقطة الثانية (ب) فستتكون لها صورتين أيضا من كل عين من العينين وأيضا يستطيع المخ أن يقدر قيمة زاوية السقوط عند ب. تأتي الخطوة الثانية من قيام المخ بمقارنة قيمة زاوية السقوط عند أ وزاوية السقوط عند ب، وحيث أن زاوية السقوط عند أ أكبر من زاوية السقوط عند ب فأن المخ يستنتج أن الهدف الموجود عند النقطة أ أقرب للإنسان من الهدف الموجود عند النقطة ب. وبذلك يستطيع المخ أن يشعر بالمسافات و يفرق بين الأهداف القريبة و الأهداف البعيدة، وهذه العملية تعتمد علي وجود صورتين لكل هدف حتى يمكن تقدير زاوية السقوط. إذن وجود عينين للإنسان هو الشرط الأساسي ليتمكن مخه من تقدير مسافات الأهداف المحيطة به، وهذا ما نطلق عليه اسم "الإبصار المجسم Stereoscopic Vision".



شكل (٢٣-٢٩) مفهوم الإبصار المجسم في العين البشرية

الإبصار المجسم هو القدرة علي تقدير الأبعاد الثلاثية للأهداف والحصول علي أشكالها الحقيقية في الفراغ، بمعني أنه القدرة علي رؤية وتقدير الأبعاد الثلاثية للأهداف والتي تشمل البعدين الأفقيين (الطول و العرض) والبعد الثالث العمودي وهو المسافات (مدي الاقتراب و الابتعاد). وتجدر الإشارة لوجود قدرة محددة للمخ البشري في تقدير قيمة زاوية السقوط وتتراوح تقريبا بين الحد الأدنى البالغ ٢٠ ثانية (الثانية = ١/٣٦٠٠ من الدرجة) و الحد الأقصى البالغ ١٦ درجة، ومن ثم فأن المسافات التي يستطيع المخ البشري تقديرها تتراوح تقريبا بين ٢٠ سنتيمتر

و ٧٠٠ سنتيمتر في المتوسط. أما ما هو خارج هذا النطاق فأن المخ يعتمد علي تقدير المسافات بطريقة تقريبية من خلال مقارنة الأحجام و المواقع النسبية للأهداف.

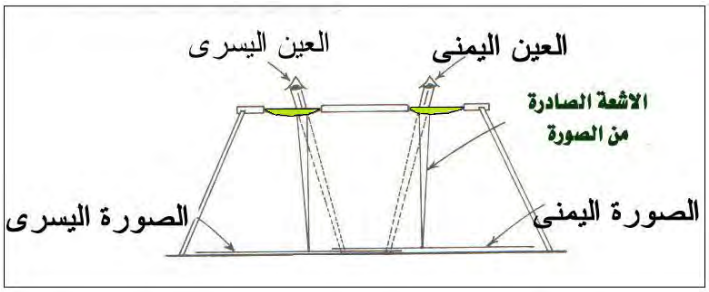
يأتي الآن السؤال الهام و الحيوي ألا وهو كيف يمكن الاستفادة من مفهوم الإبصار المجسم للإنسان في تطبيقات التصوير الجوي؟ أو بمعني آخر: هل يمكننا إبصار الأهداف علي الصور الجوية إبصارا مجسما بحيث نراها بشكلها الحقيقي وبأبعادها الثلاثية؟ نعم يمكن تحقيق ذلك لكن بعدة شروط تسمي شروط الإبصار المجسم وهي:

١. أن يتوافر صورتين جويتين لنفس المنطقة ملتقطتين من نفس الارتفاع وفي نفس اللحظة تقريبا.
٢. أن نضع الصورتين أمام عيني المستخدم بنفس ترتيب التقاطهم (أي نضع الصورة اليمني أمام العين اليمني و الصورة اليسري أمام العين اليسري).
٣. أن تنظر العين اليمني الي الصورة اليمني فقط (لا تري الصورة اليسري) وأيضا أن تنظر العين اليسري الي الصورة اليسري فقط.
٤. أن تكون قدرة أو قوة الرؤية لكلتا العينين متساوية أو متقاربة.

أجهزة و طرق الإبصار المجسم من الصور الجوية

(أ) أجهزة الاستريسكوب

أجهزة الاستريسكوب Stereoscopes هي أجهزة مخصصة لعملية الإبصار المجسم من الصور. تعتمد الفكرة العامة لأجهزة الاستريسكوب علي وجود عدستين كل واحدة مخصصة لأحدي عيني المستخدم بحيث توضع الصورتين تحت العدستين ويقوم المستخدم بملاصقة عينه اليمني علي العدسة اليمني وملاصقة عينه اليسري علي العدسة اليسري حتى يستطيع الحصول علي الإبصار المجسم للصور.



شكل (٢٣-٣٠) مفهوم عمل أجهزة الاستريسكوب

يوجد نوعين أساسين من أجهزة الاستريسكوب وهما استريسكوب الصور الصغيرة و استريسكوب الصور الكبيرة.

استريسكوب الصور الصغيرة:

يعد هذا النوع هو الأبسط و الأرخص من أنواع أجهزة الاستريسكوب للحصول علي الإبصار المجسم، ويتكون من عدستين صغيرتين مثبتتين في إطار معدني خفيف. ولحجمه البسيط فيطلق

علي هذا النوع اسم الاستريسكوب الجيبي Pocket Stereoscope حيث أنه يمكن وضعه في الجيب. ومن عيوبه أن عدساته بسيطة وذات قوة تكبير ليست عالية (تكبير بقوة ضعفين أو ثلاثة أضعاف بحد أقصي) ، كما أنه وبسبب حجمه فلا يصلح إلا للتعامل مع الصور الصغيرة فقط ولذلك فهو لا يستخدم إلا للتدريب، كما انه لا يصلح للقياسات الدقيقة من الصور.

شكل (٢٣-٣١) الاستريسكوب الجيبي

استريسكوب الصور الكبيرة:

تعتمد فكرة عمل هذه النوعية من أجهزة الاستريسكوب علي تكبير المسافة بين الأهداف المتناظرة علي الصورتين لتتناسب مع المسافة بين عيني المستخدم، وذلك عن طريق استخدام مجموعة من المرايا أو المناشير، وبالتالي فيمكن استخدام صور كبيرة للحصول منها علي الإبصار المجسم. كما تشتمل هذه النوعية أيضا من الأجهزة علي عدسات مكبرة تجعل المستخدم يري أدق تفاصيل الصور الجوية الكبيرة. لكن هذا النوع من الأجهزة أغلي سعرا من أجهزة الاستريسكوب الجيبي.

شكل (٢٣-٣٢) استريسكوب الصور الكبيرة

تنقسم أجهزة استريسكوب الصور الكبيرة الي نوعين: الاستريسكوب ذو المرايا Mirror Stereoscope و الاستريسكوب الزووم Zoom Stereoscope. في النوع الأول يتم وضع مرآتان خارجيتان في هيكل الجهاز وأيضا مرآتان صغيرتان داخليتان بهدف تكبير المسافات بين الصورتين و زيادة مجال الرؤية مما يسمح بالتعامل مع الصور الجوية الكبيرة وبقوة تكبير عالية. كما يضاف أيضا للجهاز منظار ذا قوة تكبير عالية (تصل الي ٨ أضعاف) ليسمح للمستخدم بتكبير تفاصيل معالم الصور الجوية. أما الاستريسكوب الزووم فيعد أكثر تقدما من الاستريسكوب ذو المرايا حيث أنه لديه إمكانية التحرك - في الاتجاهين - علي المنضدة

الموضوع عليها الصورتين وذلك بدلا من تحريك الصورتين في الاستريسكوب ذو المرايا، مما يجعل استخدامه أسهل وأسرع. أيضا فأن قوة التكبير في أجهزة الاستريسكوب الزووم قد تصل الي خمسة عشر ضعفا مما يسمح بروية دقيقة لمعالم الصور الجوية.

(ب) طرق أخري للإبصار المجسم

توجد طرق أخري للحصول علي الإبصار المجسم من الصور الجوية ومنها طريقة الألوان المتكاملة (أو الأناجليف). في هذه الطريقة يتم طباعة كل صورة جوية بلون متكامل مع لون الصورة الثانية (لونين مجموعهما يعطي اللون الأسود)، كأن يتم طباعة الصورة الأولي باللون الأحمر و الصورة الثانية باللون الأزرق. ولتطبيق شرط الإبصار المجسم - الذي يتطلب ألا تري عيني الراصد إلا الصورة المقابلة لها فقط - يتم استخدام نظارة لها عدسة حمراء و الأخرى زرقاء. فعندما تكون الصورة الحمراء أمام العين التي تضع العدسة الحمراء فأن هذه العدسة لا تسمح إلا بمرور الأشعة الحمراء فقط وبالتالي فأن هذه العين لن تري الأشعة الزرقاء القادمة من الصورة الثانية، ونفس الوضع سيتكرر مع العدسة الزرقاء التي لن تسمح إلا بمرور الأشعة الزرقاء القادمة من الصورة الثانية الي العين الثانية للمستخدم وبالتالي فأن كل عين لن تري إلا صورة واحدة فقط من الصورتين مما سينتج عته إبصارا مجسما في مخ المستخدم.

شكل (٢٣-٣٣) طريقة الألوان المتكاملة (الأناجليف)

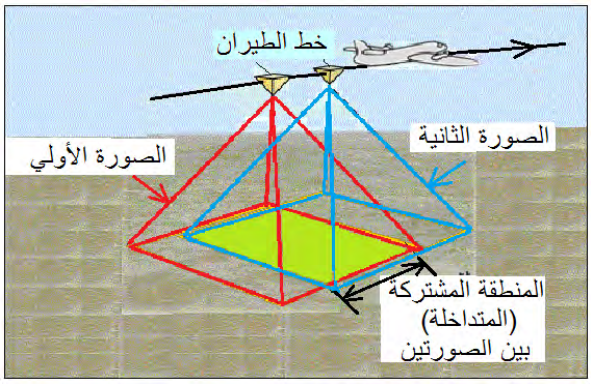
يمكن أيضا استخدام طريقة الألوان المتكاملة مع أجهزة الحاسوب حيث يتصل بالجهاز شاشتين ويتم عرض كل صورة من الصورتين الجويتين علي شاشة ويرتدي المستخدم النظارة المخصصة بحيث تكون عدستها الحمراء مقابلة للشاشة التي تعرض الصورة الحمراء وعدستها الزرقاء مقابلة للشاشة التي تعرض الصورة الزرقاء. حديثا يتم استخدام أجهزة حاسوب خاصة لتطبيقات القياس من الصور الجوية تسمي محطات العمل ذات الشاشتين، وهي أجهزة ذات تقنية عالية ولها برامج متخصصة تسمح بعرض الصور المتتالية في نفس المكان بسرعة فائقة جدا مما يسمح للمستخدم رؤية الصورتين لنفس المنطقة بطريقة مستمرة فينتج عنها إبصارا مجسما.

شكل (٢٣-٣٤) محطات العمل الرقمية ذات الشاشتين

٢٣-٦-٦ التداخل بين الصور الجوية

من أهم شروط الإبصار المجسم الحصول علي صورتين لنفس المنطقة ملتقطتين في نفس الوقت تقريبا (كما في الصورتين اللتين تتكونان من كلتا عيني الإنسان)، فكيف سيتم ذلك في الصور الجوية الملتقطة من الطائرة؟. تطير الطائرة بسرعة لا تسمح بالتقاط صورتين متتاليتين لنفس المنطقة الجغرافية، لكن إن استطعنا التحكم في عملية التقاط الصور بسرعة تتناسب مع سرعة الطائرة فستوجد منطقة مشتركة بين كل صورتين متتاليتين، أي أن نفس هذه المنطقة ستظهر في الصورة الأولي و ستظهر أيضا في الصورة الثانية. وهذا المبدأ هو ما يسمي بمبدأ التداخل بين الصور الجوية Overlap.

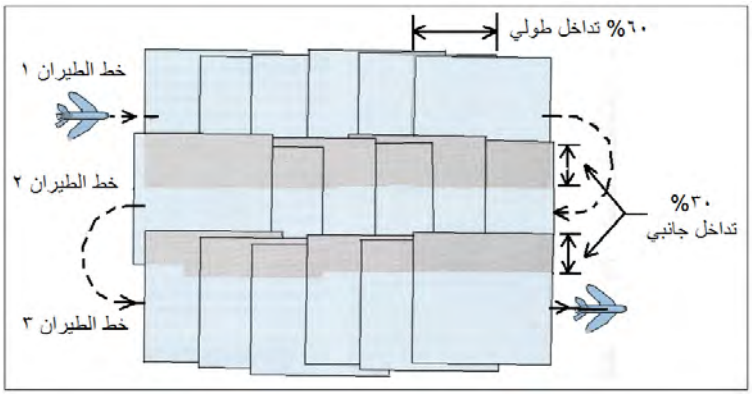
يوجد نوعين من أنواع التداخل بين الصور الجوية: (١) التداخل الطولي Longitudinal Overlap و (٢) التداخل الجانبي Side Overlap . التداخل الطولي هو وجود منطقة مشتركة بين كل صورتين متتاليتين في نفس خط الطيران. وغالبا تبلغ نسبة التداخل الطولي بين كل صورتين متتاليتين ٦٠% من مساحة المنطقة، أي أن ٦٠% من مساحة المنطقة الظاهرة في الصورة الأولي ستظهر أيضا في الصورة الثانية، وبالمثل فأن ٦٠% من مساحة المنطقة الظاهرة في الصورة الثانية ستظهر أيضا في الصورة الثالثة، .... وهكذا.



شكل (٢٣-٣٥) التداخل الطولي

التداخل الطولي هو الذي يحقق شروط الحصول علي الإبصار المجسم من الصور الجوية، وبالتالي فهو أساس من أساسيات القياسات الدقيقة بهدف إنتاج الخرائط من الصور الجوية. فالمنطقة المشتركة بين الصورتين المتتاليتين هي التي تحقق شروط الإبصار المجسم وهي التي يتم استخدامها في عمل القياسات الدقيقة لخصائص المعالم الجغرافية. أما في حالة التصوير الجوي بهدف تفسير المعالم الجغرافية (والذي لا يتطلب قياسات دقيقة من الصور) فالتداخل ليس شرطا أساسيا في مثل هذه المشروعات، لكن إذا تحقق تداخل بسيط (٢٠-٣٠%) فسيكون مفيدا عند عمل الموزايك أو الفسيفساء. كما يفيد التداخل أيضا في إمكانية الاستغناء عن أية صور بها عيوب (مثل ضعف الإضاءة أو شدة الميل) دون الحاجة لإعادة التصوير مرة أخري، حيث سيظهر هذا الجزء من سطح الأرض في عدة صور أخري.

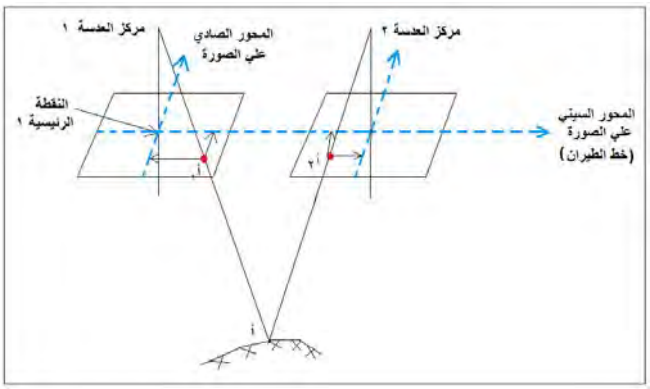
في حالة كون المنطقة المراد تصويرها لا تظهر كاملة في خط طيران واحد فيتم تنفيذ عدد من خطوط الطيران المتتالية لتصوير كامل هذه المنطقة. ولترتيب الصور بين خطوط الطيران المختلفة نلجأ الي النوع الثاني من أنواع التداخل وهو التداخل الجانبي. التداخل الجانبي هو توافر منطقة مشتركة بين كل خطي طيران متتاليين، وتبلغ نسبة التداخل الجانبي في الغالب ٣٠%.



شكل (٢٣-٣٦) التداخل الجانبي

٢٣-٦-٧ الابتعاد وقياس الارتفاعات من الصور الجوية

الابتعاد (أو الابتعاد الاستريسكوبي أو الابتعاد المطلق أو البارالاكس Parallax) هو اختلاف المواضع النسبية للنقاط علي الصور الجوية المتتالية نتيجة اختلاف موضع التصوير. ولنأخذ مثلا لنقطة ظهرت في الصورة الجوية الأولي عند إحداثيات (٥،-٤) علي سبيل المثال، ونتيجة حركة الكاميرا الموجودة في الطائرة فأنها ستقطع مسافة معينة في خط الطيران قبل أن تلتقط الصورة الثانية والتي فيها سيتغير موضع هذه النقطة لتظهر عند إحداثيات (-٣،-٤) علي سبيل المثال. لاحظ أن المحور السيني في نظام إحداثيات الصور الجوية يكون في اتجاه خط الطيران. ويحدث الابتعاد في المحور السيني (اتجاه خط الطيران) فتتغير قيمة الإحداثي السيني للنقطة من الصور الأولي الي الصورة الثانية نتيجة للابتعاد و تغير موضع التصوير نفسه بين الصورتين.



شكل (٢٣-٣٧) الابتعاد علي الصور الجوية

يعد الابتعاد من أساسيات الحصول علي الإبصار المجسم وبالتالي فهو مفيد جدا في إجراء القياسات الدقيقة من الصور الجوية. كما أن قيمة الابتعاد تتناسب طرديا مع منسوب النقطة، فكلما زاد منسوب النقطة (ارتفاعها غن مستوي سطح البحر) كلما زاد ابتعادها علي الصور الجوية المتتالية والعكس صحيح.

حساب الابتعاد

توجد عدة طرق لحساب قيمة الابتعاد للأهداف الظاهرة علي الصور الجوية، إلا أن أبسط هذه الطرق لحساب قيمة الابتعاد (أو الابتعاد المطلق) لأي نقطة يتم من خلال مقارنة قيم الإحداثي السيني لهذه النقطة علي الصورتين المتتاليتين، فالابتعاد ما هو إلا الفرق أو التغير في موقع النقطة علي كلتا الصورتين:

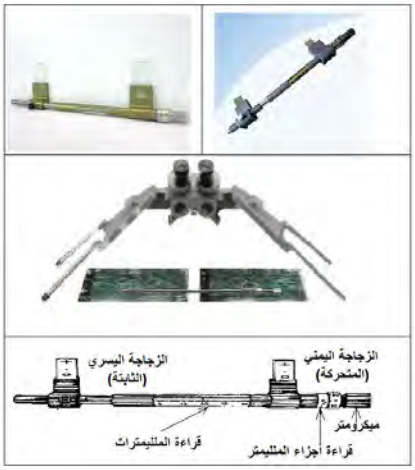
$$P = x_1 - x_2 \qquad 23\text{-}14$$

حيث:

P الابتعاد
x_1 الإحداثي السيني علي الصورة الأولي
x_2 الإحداثي السيني علي الصورة الثانية

قياس الابتعاد على الصور الجوية

يعد قياس فرق الابتعاد بين نقطتين أسهل و أسرع من قياس الابتعاد المطلق لكل نقطة منهما علي حدي. عمليا فأنه إذا توافرت نقطة معلومة الابتعاد (أي تم قياس الابتعاد المطلق لها) وأمكن قياس فرق الابتعاد بين هذه النقطة و نقطة أخري فيمكن حساب الابتعاد للنقطة الثانية، وهكذا فأن قياس فرق الابتعاد يمكننا من حساب قيم الابتعاد المطلق لكل النقاط في منطقة التداخل بصورة سريعة. وهذا المبدأ هو الذي تم تطبيقه لتطوير جهاز يستخدم في قياس الابتعاد علي الصور الجوية وهو ما أطلق عليه اسم "ذراع الابتعاد parallax bar" أو الاستريوميتر، ويستخدم مع أجهزة الاستريسكوب.



شكل (٢٣-٣٨) ذراع قياس الابتعاد علي الصور الجوية

الاستفادة من قيمة الابتعاد

يستخدم الابتعاد في حساب عدد من القياسات التي يمكن استنباطها من الصور الجوية والتي تكون أساسية في رسم الخرائط، فالابتعاد يستخدم في حساب الإحداثيات الأرضية لجميع المعالم المكانية الظاهرة في منطقة التداخل بين الصورتين وأيضا في حساب مناسيب هذه المعالم بالإضافة لقياس ارتفاع الأبراج و المنشئات الرأسية.

(أ) حساب المناسيب:
يمكن حساب منسوب أي نقطة من خلال قياس الابتعاد عندها ومعرفة قيمة كلا من خط القاعدة الجوية Air Base (المسافة الأرضية الحقيقية بين مركزي الصورتين) و ارتفاع الطيران و البعد البؤري للكاميرا المستخدمة كالتالي:

$$H_A = h - (B \times f \div P_A) \qquad 23\text{-}15$$

حيث:

H_A منسوب النقطة A
h ارتفاع الطيران
B خط القاعدة الجوية
f البعد البؤري
P_A ابتعاد النقطة A

(ب) حساب الإحداثيات الأرضية:

يمكن حساب الإحداثيات الأرضية لأي نقطة (منسوبة الي نقطة النظير) بمعرفة قيمة الابتعاد عند هذه النقطة بالإضافة الي إحداثيات هذه النقطة علي الصورة الجوية وقيمة خط القاعدة الجوية كالتالي:

$$X_A = x_a \times B \div P_A \qquad 23\text{-}16$$

$$Y_A = y_a \times B \div P_A \qquad 23\text{-}17$$

حيث:

X_A, Y_A	الإحداثيات الأرضية للنقطة A
x_a, y_a	الإحداثيات علي الصورة للنقطة A
B	خط القاعدة الجوية
P_A	ابتعاد النقطة A

٧-٢٣ تصميم خطة الطيران والتصوير الجوي

يتكون تصميم خط الطيران و التصوير الجوي من تحديد عدة عناصر مثل تحديد عدد خطوط الطيران و تحديد ارتفاع الطيران و تحديد الفترة الزمنية بين التقاط كل صورتين متتاليتين وعناصر أخري كثيرة. إلا أن تحديد الهدف من مشروع التصوير الجوي هو أهم العناصر المؤثرة في تصميم خطة الطيران و التصوير. فكما سبق الذكر أن التصوير الجوي وبصفة عامة إما أن يهدف الي إنتاج و تحديث الخرائط أو أن يهدف الي الحصول علي معلومات عن المعالم الجغرافية من تفسير الصور الجوية. ولكل هدف منهما متطلبات خاصة في الصور الجوية وعناصر محددة في خطة الطيران و طبيعة التصوير الجوي ذاته. فعلي سبيل المثال فأن إنتاج الخرائط وعمل القياسات الدقيقة من الصور الجوية يتطلب الحصول علي الإبصار المجسم مما يعني أنه لا بد من وجود ٦٠% تداخل طولي بين كل صورتين متتاليتين مما يتطلب تحديد فترة زمنية معينة بين التقاط كل صورتين متتاليتين. وعلي الجانب الآخر فان كان هدف مشروع التصوير الجوي هو تفسير الصور فالتداخل هنا ليس شرطا أساسيا أو علي الأقل ليس من الضروري الالتزام بقيمة ٦٠% من التداخل الطولي.

تشمل عناصر تصميم خطة الطيران النقاط الرئيسية التالية:

(١) تحديد مقياس الرسم المتوسط للصور:

يعتمد تحديد مقياس الرسم المتوسط للصور الجوية المطلوبة بهدف إنتاج الخرائط علي قيمة مقياس رسم الخرائط المطلوب إنتاجها. إن كان الهدف من التصوير هو إنتاج الخرائط التفصيلية فأن الصور الجوية تتطلب درجة تمييز عالية بين المعالم الجغرافية أي أن التصوير يجب أن يتم بمقاييس رسم كبيرة (مثلا ١ : ٥٠٠٠). بينما إن كانت الخرائط المطلوب إنتاجها خرائط جيولوجية أو خرائط تربة علي سبيل المثال فهي لا تتطلب الدقة العالية ومن ثم يمكن التصوير بمقاييس رسم صغيرة (مثلا ١ : ١٠٠،٠٠٠). وبصفة عامة فأن مقياس الرسم المتوسط للصور الجوية يكون أصغر من مقياس رسم الخريطة المطلوبة بحدود ٣-٥ مرات.

(٢) تحديد نوع الكاميرا:

يعتمد نوع الكاميرا المستخدمة في التصوير الجوي علي البعد البؤري لها بالإضافة الي مجال الرؤية لها. وكما سبق الذكر في الفصل السابق فأن البعد البؤري للكاميرا مؤثر ويدخل في حساب كلا من ارتفاع الطيران و مقياس الرسم المتوسط للصور الجوية.

(٣) تحديد ارتفاع الطيران:

بمعرفة كلا من البعد البؤري للكاميرا المستخدمة و متوسط منسوب المنطقة الجغرافية المراد تصويرها يمكن حساب قيمة ارتفاع الطيران المطلوب. وبصفة عامة فكلما كان مقياس الرسم المطلوب كبيرا كلما انخفض ارتفاع الطيران اللازم، والعكس صحيح.

الجدول التالي يقدم أمثلة للعلاقات بين ارتفاع الطيران و مقياس الرسم المتوسط للصور الجوية ومقياس الرسم المطلوب لإنتاج الخرائط بفرض أن التصوير سيتم بكاميرا ذات بعد بؤري ١٥٣ ملليمتر:

ارتفاع الطيران (متر)	مقياس الرسم المتوسط للصور الجوية	مقياس رسم الخريطة المطلوبة
٣٥٠	١ : ٢٠٠٠	١ : ٥٠٠
٧٥٠	١ : ٥٠٠٠	١ : ١٢٥٠
١٥٠٠	١ : ١٠،٠٠٠	١ : ٢٥٠٠
٣٠٠٠	١ : ٢٠،٠٠٠	١ : ٥٠٠٠
٦٠٠٠	١ : ٤٠،٠٠٠	١ : ١٠،٠٠٠
١٥٠٠٠	١ : ١٠٠،٠٠٠	١ : ٢٥،٠٠٠

ونلاحظ انه كلما زاد ارتفاع الطائرة كلما صغر مقياس رسم الصورة وبالتالي كلما زادت مساحة الأرض المغطاة بها. ومن الناحية التقنية فانه كلما زاد ارتفاع الطائرة كلما كانت طبقات الهواء أكثر استقرارا وقل بذلك اهتزاز الطائرة وكانت إمكانية الطيران في خطوط مستقيمة أكثر تحكما. وغالبا يتم التصوير الجوي من ارتفاعات لا تقل عن ١.٥ كيلومترا و لا تزيد عن ١٥ كيلومترا.

(٤) تحديد اتجاه خطوط الطيران:

في حالة كون المنطقة المراد تصويرها لا يمكن تغطيتها بخط طيران واحد فيتطلب التصوير عدد من خطوط الطيران المتوازية. يعتمد تحديد اتجاه خطوط الطيران علي: (١)اتجاه تضاريس المنطقة الجغرافية، فالأفضل أن يتم التصوير موازيا لاتجاه تضاريس الأرض، (٢) اتجاه سرعة الرياح في وقت التصوير حيث يتم اختيار الاتجاه الأكثر استقرارا لحركة الطائرة. أما في حالة عدم وجود رياح مؤثرة وكون تضاريس الأرض لا تتغير بصورة كبيرة فيتم اختيار خط الطيران في اتجاه الضلع الأطول للمنطقة بحيث يتم تقليل عدد خطوط الطيران المطلوبة لتغطية كامل المنطقة الجغرافية.

(٥) تحديد قيمة التداخل:

كما أشرنا من قبل فأن التداخل الطولي بنسبة ٦٠% و التداخل الجانبي بنسبة ٣٠% يكونان ضروريان للتصوير الجوي الذي يهدف الي إنتاج الخرائط و القياسات الدقيقة. أما لمشروعات التصوير الجوي الهادفة لتفسير الصور الجوية فقد تقل هذه النسب الي النصف أو أقل، حيث أن التداخل بين الصور الجوية في مثل هذه المشروعات يهدف فقط لوجود منطقة تداخل بسيطة بين كل صورتين متتاليتين لإتمام عملية تكوين الموزايك.

(٦) تحديد الفترة الزمنية بين كل صورتين:

يعتمد حساب الفترة الزمنية بين التقاط كل صورتين متتاليتين علي مقياس الرسم المتوسط المطلوب للصور الجوية و علي أبعاد الصور الجوية ذاتها و سرعة الطيران وأيضا علي إن كان التداخل الطولي مطلوبا أم لا.

(٧) تحديد عدد خطوط الطيران:

يعتمد عدد خطوط الطيران اللازمة لتصوير منطقة جغرافية معينة علي عرض المنطقة وأبعاد الصورة الجوية و نسبة التداخل الجانبي المطلوبة بالإضافة الي مقياس الرسم المتوسط للصور الجوية.

(٨) تحديد الوقت المناسب للتصوير:

يعتمد اختيار الوقت المناسب لعملية التصوير الجوي علي الظروف المناخية كالرياح و الأمطار والعواصف الترابية، ويجب اختيار أنسب الأوقات الملائمة لحركة الطائرة وعدم تعرضها لتقلبات مناخية تؤثر في طيرانها وميلها أثناء التصوير. وكما سبق الذكر فأن الصور الجوية المستخدمة في إنتاج الخرائط هي التي لا يزيد ميل محور التصوير فيها عن ٤ درجات. وان زاد الميل عن هذه الحدود فلا يمكن تقويم الصور المائلة الي صور رأسية وبالتالي فلن يمكن إتمام عملية الإبصار المجسم و القياس الدقيق من هذه الصور. كما أن اختيار أنسب وقت خلال اليوم لعملية التصوير يجب أن يتم بعناية شديدة حتى تظهر المعالم الجغرافية علي سطح الأرض واضحة من حيث الإضاءة وألا توجد سحب أو غيوم في السماء تؤثر علي وضوح هذه المعالم علي الصور الجوية.

(٩) وضع علامات أرضية قبل التصوير:

للحصول علي الإحداثيات الحقيقية لكافة المعالم الظاهرة علي الصور الجوية يجب أن نعرف الإحداثيات الحقيقية لبعض من هذه المعالم، فكما رأينا من قبل أن حسابات الإحداثيات الأرضية من الصور الجوية تتم أولا في صورة نسبية حيث يتم حساب إحداثيات أي نقطة علي الصورة نسبة لنقطة النظير في هذه الصورة. عند تصوير المناطق في المدن نقوم بقياس الإحداثيات الحقيقية لبعض المعالم الظاهرة علي الصورة باستخدام أجهزة و طرق المساحة الأرضية أو استخدام تقنية الرصد علي الأقمار الصناعية المعروفة باسم الجي بي أس. وتتم هذه العملية قبل أو بعد إتمام التصوير الجوي ذاته، ومن خلال برامج حاسوبية يتم مقارنة الإحداثيات الحقيقية لهذه المعالم بقيمة إحداثياتها علي الصورة الجوية ومن ثم يمكن حساب الإحداثيات الحقيقية لكافة المعالم الأخرى علي الصورة. أما عند تصوير المناطق الزراعية و الصحراوية والتي لا يتوافر

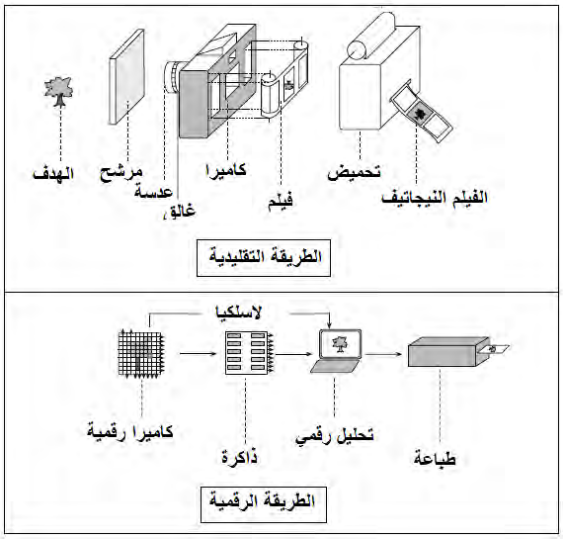
بها معالم محددة يمكن قياس إحداثياتها علي الصور فأننا نقوم قبل عملية التصوير بإنشاء علامات اصطناعية علي الأرض ونقيس إحداثياتها الحقيقية بحيث أنها تكون علامات واضحة تظهر فيما بعد علي الصور الجوية عند التصوير.

شكل (٢٣-٣٩) علامات أرضية اصطناعية

٢٣-٨ المساحة التصويرية الرقمية

تعد المساحة التصويرية الرقمية Digital Photogrammetry تطورا تقنيا لطرق المسح التصويري التقليدي بالاعتماد علي أجهزة الكمبيوتر في مراحل التصوير و التحليل و القياس من الصور الجوية. فبدلا من التصوير بالكاميرات التقليدية باستخدام الأفلام لتسجيل الصور فيتم استخدام الكاميرات الرقمية التي تسجل الصور بطريقة رقمية علي شريحة ذاكرة داخلية. وفي هذه الحالة لا توجد حاجة لعمليات تحميض الأفلام و طباعة الصور علي الورق حيث يتم نقل الصورة مباشرة من ذاكرة الكاميرا الرقمية الي جهاز الحاسب الآلي.

تتميز المساحة التصويرية الرقمية بعدة خصائص منها: درجة الوضوح المكاني resolution العالية، سرعة الحصول علي الصور، التشغيل والتحليل الآلي، إعادة إنتاج الصور بسرعة و تكلفة أقل، إمكانية الدمج المباشر في نظم المعلومات. كما ظهر أيضا أحد تطبيقات الصور عالية الدقة واستخداماتها الهندسية وأطلق عليه اسم المسح التصويري الأرضي Terrestrial Photogrammetry أو المسح التصويري القريب المدى Close Range Photogrammetry، حيث توضع الكاميرا الدقيقة علي حامل ثلاثي علي الأرض لالتقاط صور للمعالم الجغرافية (خاصة المباني و المنشئات الهندسية) واستخدام هذه الصور بعد معالجتها في القياسات الهندسية لهذه المعالم.



شكل (٢٣-٤٠) طرق الحصول علي الصور

وحديثا يتم الاعتماد علي أجهزة الماسحات scanners لتحويل الصور التقليدية (المطبوعة ورقيا) الي صور رقمية ومن ثم استخدام برامج المساحة التصويرية الرقمية في تحليلها و إنتاج الخرائط المساحية منها بصورة آلية. ويتكون نظام المساحة التصويرية الرقمية من عدة أجهزة تشمل: جهاز حاسب الي بمواصفات تقنية عالية من حيث سرعة المعالج و سعة التخزين وسرعة تداول أو نقل البيانات بين مكوناته المادية، شاشة (أو غالبا شاشتين) رؤية مجسمة لها القدرة علي عرض الصور بطريقة تسمح للمستخدم - من خلال أدوات بسيطة - رؤية النموذج المجسم، نظارات الرؤية المجسمة، أدوات القياس المجسم مثل الفأرة المخصصة لعمل القياسات ثلاثية الأبعاد لأي نقطة علي النموذج المجسم، بالإضافة لوحدات الإخراج مثل الطابعات Printers و الراسمات Plotters. وتوجد عدة برامج حاسوبية للمساحة التصويرية الرقمية ومنهم علي سبيل المثال برامج PS, PDV, Socetset.

شكل (٢٣-٤١) نماذج لنظم مساحة تصويرية رقمية

الفصل الرابع و العشرين

مقدمة عن الاستشعار عن بعد

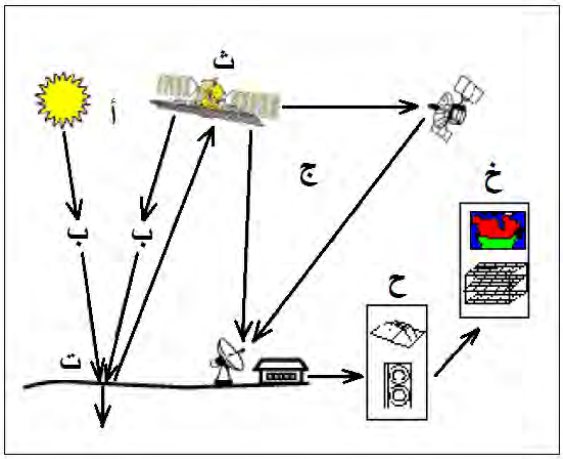
يقدم هذا الفصل نبذة مختصرة بسيطة عن الاستشعار عن بعد وتطبيقاته في تجميع البيانات المكانية.

٢٤-١ ما هو الاستشعار عن بعد ؟

الاستشعار عن بعد هو علم تجميع المعلومات عن سطح الأرض دون الاتصال أو التلامس الفعلي معه، وذلك من خلال تحسس و تسجيل الطاقة المنعكسة أو المنبعثة ومعالجتها و تحليلها وتطبيق هذه المعلومات.

Remote sensing is the science of acquiring information about the Earth's surface without actually being in contact with it. This is done by sensing and recording reflected or emitted energy and processing, analyzing, and applying that information.

في معظم تقنيات الاستشعار عن بعد فأن هذه العملية تشمل التفاعل بين الاشعاع الساقط و الأهداف ذاتها. ولتبسيط هذه العملية فسنتحدث عن نظم التصوير حيث توجد سبعة عناصر متفاعلة مع بعضها (لاحظ أن هناك تقنيات غير تصويرية للاستشعار عن بعد) وهي كالتالي:



شكل (٢٤-١) مكونات عملية الاستشعار عن بعد

أ. مصدر الطاقة أو مصدر الاضاءة:

يتمثل أول متطلبات عملية الاستشعار عن بعد في وجود مصدر طاقة Energy source يقوم بإضاءة أو توفير طاقة كهرومغناطيسية electromagnetic energy للأهداف المطلوبة.

ب. الاشعاع و الغلاف الجوي:

ستمر الطاقة من مصدرها و حتى وصولها للأهداف المطلوبة من خلال الغلاف الجوي atmosphere ومن ثم ستتفاعل معه. وقد يتم هذا التفاعل مرة أخري عندما تسير (أو تنعكس) الطاقة من الأهداف الي أجهزة الاستشعار أو المستشعرات sensors .

ت. التفاعل مع الأهداف:

عندما تمر الطاقة خلال الغلاف الجوي لتصل الي الاهداف فأنها تتفاعل مع كل هدف طبقا لخصائص كلا من الهدف و الاشعاع.

ث. تخزين الطاقة من خلال المستشعرات:

بعد أن تنعكس (أو تنبعث) الطاقة من الأهداف فأننا نحتاج لجهاز استشعار أو مستشعر sensor (من بعد و ليس متلامسا مع الهدف) لتجميع و تسجيل هذا الاشعاع الكهرومغناطيسي.

ج. الارسال و الاستقبال و المعالجة:

تحتاج الطاقة التي تم تسجيلها بواسطة المستشعرات الي ارسالها transmission في صورة الكترونية غالبا الي محطة استقبال reception و معالجة processing حيث يتم معالجة البيانات وتحويلها الي مرئية image (رقمية و أحيانا ورقية).

ح. التفسير و التحليل:

يتم تفسير interpretation و تحليل analysis المرئية المسجلة سواء بصريا أو رقميا بهدف استخراج المعلومات عن الأهداف التي تم تحسسها عن بعد.

خ. التطبيق:

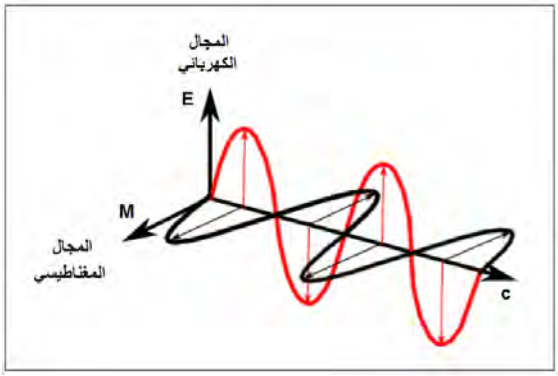
يتمثل العنصر الأخير من عناصر عملية الاستشعار عن بعد في تطبيق المعلومات التي تم الحصول عليها عن الأهداف بهدف الفهم الأفضل والحصول علي معلومات جديدة عن هذه الأهداف ومن ثم المساعدة في حل مشكلة معينة.

وسنستمر في تناول هذه العناصر السبعة لعملية الاستشعار عن بعد تفصيلا في الاجزاء القادمة.

٢٤-٢ الاشعاع الكهرومغناطيسي

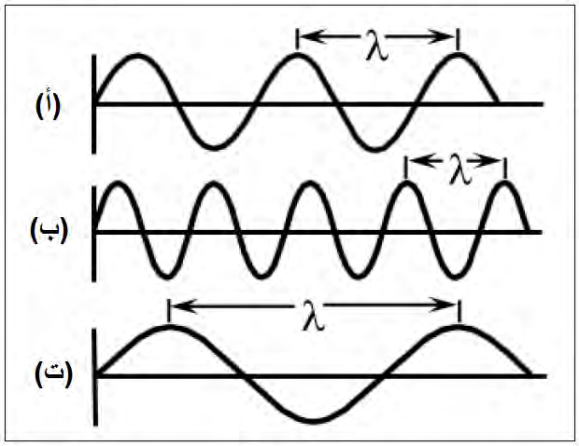
كما لاحظنا في الجزء السابق فأن أول متطلبات عملية الاستشعار عن بعد هو وجود مصدر طاقة يضئ الأهداف (في خالة أن الطاقة لا تنبعث من الأهداف ذاتها).وتكون هذه الطاقة في صورة اشعاع كهرومغناطيسي. وللإشعاع الكهرومغناطيسي خصائص أساسية و يتصرف بطريقة محددة طبقا لقوانين نظرية الموجات.

يتكون الاشعاع الكهرومغناطيسي من مجال كهربائي Electrical Field (E) والذي يتغير في القيمة في اتجاه عمودي علي اتجاه سريان الاشعاع و مجال مغناطيسي Magnetic Field (M) يتعامد علي المجال الكهربائي (ومن هنا جاء مصطلح الكهرومغناطيسي). و كلا المجالين الكهربائي و المغناطيسي يسيران بسرعة الضوء speed of light وتأخذ الرمز c.



شكل (٢٤-٢) الاشعاع الكهرومغناطيسي

وهناك خاصيتين أساسيتين للإشعاع الكهرومغناطيسي لهما أهمية خاصة في فهم عملية الاستشعار عن بعد، وهما خاصيتي: طول الموجة و التردد.



شكل (٢٤-٣) طول الموجة في الاشعاع الكهرومغناطيسي

طول الموجة wavelength هو طول دورة كاملة، ويمكن قياسه كمسافة بين قمتين متتاليتين، وعادة ما يرمز له بالحرف اللاتيني λ (لامدا). ويقاس طول الموجة بوحدات المتر (m) أو أجزاء منه مثل النانو متر (nm) الذي يساوي جزء من بليون (10^{-9}) من المتر، أو الميكرو متر (μm) الذي يساوي جزء من مليون (10^{-6}) من المتر، أو السنتيمتر (cm) الذي يساوي جزء من مائة (10^{-2}) من المتر.

أما التردد frequency فهو عدد موجات الموجة في فترة زمنية محددة. ويقاس التردد بوحدات الهرتز hertz (Hz) وهو موجة واحدة في الثانية، ومضاعفات الهرتز.

والعلاقة بين طول الموجة و التردد تعبر عنها المعادلة التالية:

$$c = \lambda v \qquad (1)$$

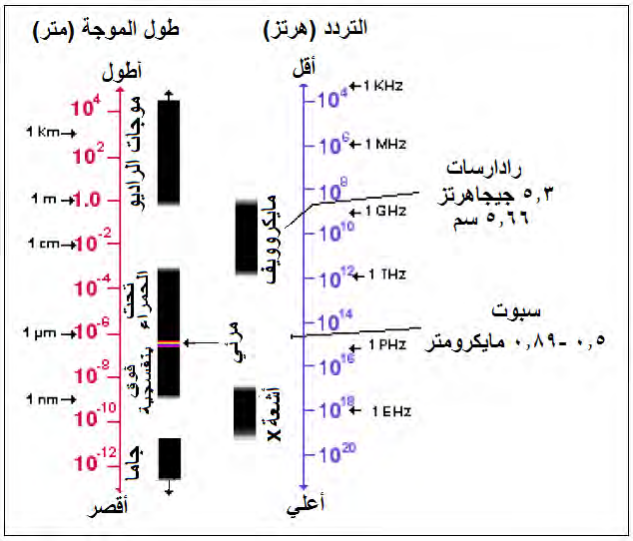
حيث:

- c سرعة الضوء = 3×10^{8} متر/ث،
- λ طول الموجة بالمتر،
- v التردد (بالهرتز أي عدد الموجات/ث).

ومن هذه المعادلة يمكننا أن نقول أن طول الموجة و التردد لهما علاقة عكسية، فكلما قصر طول الموجة أرتفع التردد وكلما زاد طول الموجة انخفض التردد. وتجدر الاشارة الي أن فهم خصائص الاشعاع المغناطيسي هام للغاية لفهم المعلومات التي يمكن الحصول عليها من عملية الاستشعار عن بعد.

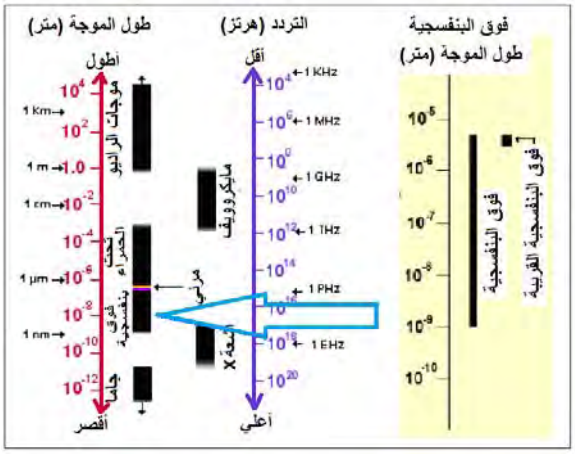
٣-٢٤ المجال الكهرومغناطيسي

يتراوح المجال الكهرومغناطيسي electromagnetic spectrum بين أطوال موجات قصيرة (مثل أشعة جاما gamma و الاشعة السينية x-ray) وأطوال موجات طويلة (مثل الموجات القصيرة أو المايكروويف microwaves و موجات الراديو radio waves). وهناك عدة مناطق في المجال الكهرومغناطيسي مفيدة للاستشعار عن بعد.



شكل (٢٤-٤) المجال الكهرومغناطيسي

لعدة أهداف فأن الاشعة فوق البنفسجية Ultraviolet (أو اختصارا UV) لها أقصر طول موجة مما يجعلها عملية لبعض أنواع الاستشعار عن بعد. وهذا الجزء من المجال الكهرومغناطيسي يقع مباشرة خلف الاشعة البنفسجية من الضوء المرئي، ومن هنا جاء أسمه. وتوجد بعض مواد سطح الأرض - خاصة الصخور والمعادن - ينبعث منها ضوءا مرئيا عندما تقع عليها الأشعة فوق البنفسجية.

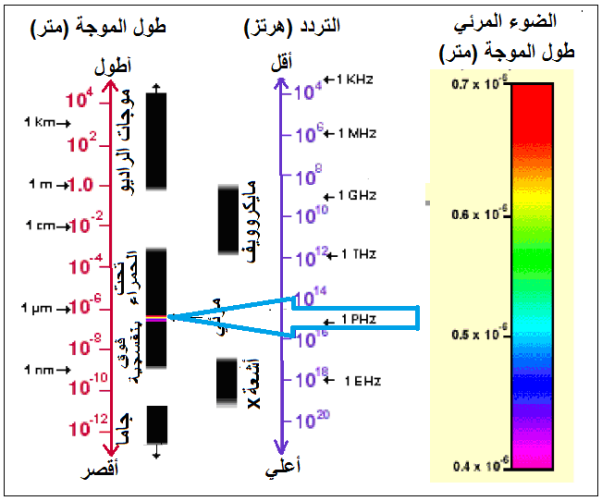


شكل (٢٤-٥) الأشعة فوق البنفسجية

ان الضوء الذي تراه أعيننا هو جزء من المجال الكهرومغناطيسي المرئي visible spectrum. ومن الجدير ملاحظة كم هو قليل بالمقارنة ببقية المجال الكهرومغناطيسي كما هو موضح بالشكل التالي. أي أن هناك الكثير من أنواع الاشعاع حولنا لكن أعيننا لا تستطيع رؤيتها، ولذلك تسمي أشعة غير مرئية invisible، لمن يمكن تحسسها أو استشعارها من خلال أجهزة الاستشعار ومن

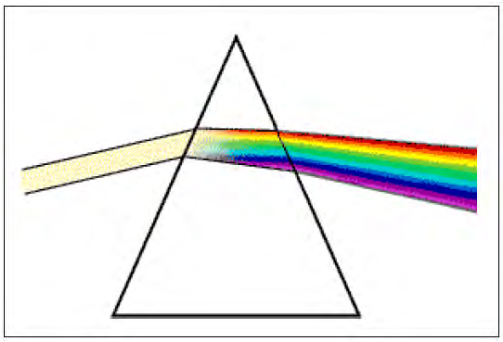
ثم الاستفادة منها. يغطي الضوء المرئي مجالا يتراوح بين ٠.٤ الي ٠.٧ مايكرومتر. واللون أو الضوء الأحمر له أطول موجة في مكونات الضوء المرئي، بينما اللون البنفسجي له أقصر طول موجة كما هو موضح بالشكل التالي. ونشمل مكونات الضوء المرئي الألوان التالية:

- البنفسجي violet : طول موجة ٠.٤ - ٠.٤٤٦ مايكرومتر
- الأزرق blue : طول موجة ٠.٤٤٦ - ٠.٥٠٠ مايكرومتر
- الأخضر green : طول موجة ٠.٥٠٠ - ٠.٥٧٨ مايكرومتر
- الأصفر yellow : طول موجة ٠.٥٧٨ - ٠.٥٩٢ مايكرومتر
- البرتقالي orange : طول موجة ٠.٥٩٢ - ٠.٦٢٠ مايكرومتر
- الأحمر red : طول موجة ٠.٦٢٠ - ٠.٧ مايكرومتر



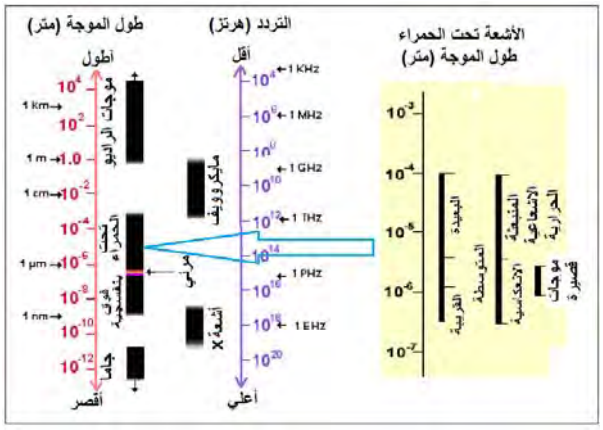
شكل (٢٤-٦) الضوء المرئي

ويعد الأزرق و الأخضر و الأحمر الألوان الأساسية في المجال المرئي، وذلك بسبب أن أي لون أساسي لا يمكن أن يتكون من الألوان الأخرى بينما كل الألوان الأخرى مركبة من هذه الألوان الأساسية. ومع أننا نري ضوء الشمس كأنه لون متجانس homogeneous أو منتظم uniform إلا أنه في الحقيقة مركب من عدة مركبات أو عدة أطوال موجة من مجال الاشعاع وخاصة الاشعة فوق البنفسجية و الضوء المرئي و الاشعة تحت الحمراء. ويمكن رؤية مكونات الجزء المرئي من الاشعاع الكهرومغناطيسي عندما نمرر الضوء من خلال منشور prism كما في الشكل التالي:



شكل (٢٤-٧) مركبات الضوء المرئي

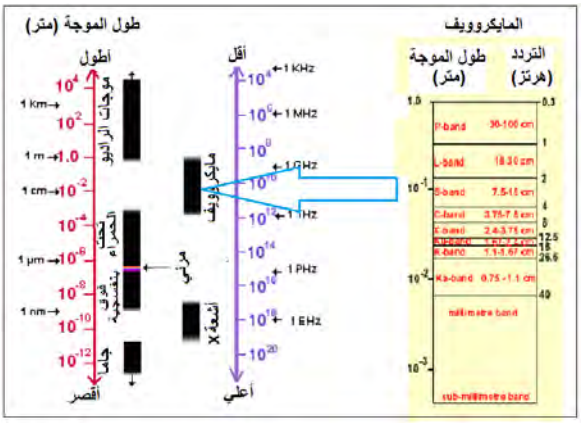
الجزء التالي الهام من المجال الكهرومغناطيسي هو الاشعة تحت الحمراء Infrared (أو اختصارا IR) والذي يغطي أطوال موجات من ٠.٧ تقريبا الي ١٠٠ مايكرومتر، أي أنه مائة مرة أعرض من الجزء المرئي. ويمكن تقسيم الاشعة تحت الحمراء الي مجموعتين بناءا علي خصائصهما الاشعاعية: تحت الحمراء الانعكاسية Reflected IR وتحت الحمراء الانبعاثية أو الحرارية Thermal IR. تستخدم الاشعة تحت الحمراء في الاستشعار عن بعد بطريقة تماثل استخدام الضوء المرئي. والأشعة تحت الحمراء الانعكاسية تغطي أطوال موجات تقريبا من ٠.٧ الي ٣.٠ مايكرومتر. أما الاشعة تحت الحمراء الحرارية فتختلف تماما عن الضوء المرئي و الاشعة تحت الحمراء الانعكاسية، فهذا الجزء من الطاقة الكهرومغناطيسية ينبعث أساسا من سطح الأرض في صورة حرارة. و تغطي الأشعة تحت الحمراء الحرارية أطوال موجات تقريبا من ٣.٠ الي ١٠٠ مايكرومتر.



شكل (٢٤-٨) الأشعة تحت الحمراء

الجزء الذي أصبح حديثا مثارا للاهتمام في الاستشعار عن بعد هو الأشعة القصيرة أو المايكروويف microwave والذي يتراوح طول موجته ما بين ١ ملليمتر الي ١ متر. وهذا يمثل أطول موجات الاشعة المستخدمة في الاستشعار عن بعد. وأشعة المايكروويف قصيرة طول الموجة لها خصائص

مماثلة لخصائص الاشعة تحت الحمراء الحرارية، بينما تستخدم الاشعة طويلة الموجة في البث التلفزيوني و الاذاعي.

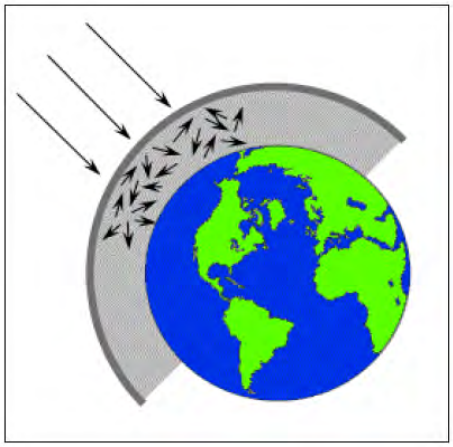


شكل (٢٤-٩) أشعة المايكروويف (الأشعة القصيرة)

٢٤-٤ التفاعل مع الغلاف الجوي

قبل أن يصل الاشعاع المستخدم في الاستشعار عن بعد الي سطح الأرض فأنه يمر بطبقات الغلاف الجوي، ومن الممكن أن تؤثر الجزئيات و الغازات الموجودة في الغلاف الجوي علي هذا الاشعاع. وتكون أسباب هذه التأثيرات ما يعرف بالتشتت و الامتصاص.

يحدث التشتت scattering عندما توجد جزئيات كبيرة من الغازات في الغلاف الجوي مما يجعل الاشعاع الكهرومغناطيسي ينحرف أو يتشتت عن مساره الأصلي. ويعتمد حجم هذا التشتت علي عدة عوامل منها طول موجة الاشعاع ووفرة جزئيات الغازات و المسافة التي يقطعها الاشعاع خلال الغلاف الجوي.



شكل (٢٤-١٠) التشتت في الغلاف الجوي

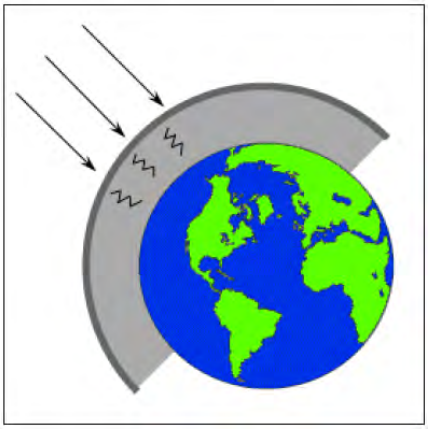
يوجد ثلاثة أنواع من التشتت:

- تشتت Rayleigh ويحدث عندما تكون الجزئيات صغيرة جدا بالمقارنة بطول موجة الاشعاع، مثل جزئيات النتروجين و الاكسجين و ذرات التراب. ويؤثر هذا النوع من التشتت علي الطاقة ذات أطوال الموجة القصيرة بدرجة أكبر من تلك ذات أطوال الموجة الكبيرة، وهو نوع التشتت الأكبر في الطبقات العليا من الغلاف الجوي. وهذا التشتت هو السبب في رؤيتنا السماء باللون الأزرق خلال النهار حيث أن ضوء الشمس عندما يمر بالغلاف الجوي فأن الموجات القصيرة (الأزرق) من الضوء المرئي ستشتت و تنتشر بدرجة أكبر من الموجات الأطول موجة.

- تشتت Mie ويحدث عندما تكون الجزئيات بنفس حجم طول موجة الاشعاع، مثل جزئيات التراب و الدخان و بخار الماء. ويؤثر هذا النوع من التشتت علي الطاقة ذات أطوال الموجة الطويلة بدرجة أكبر من تلك ذات أطوال الموجة القصيرة، ومن ثم فهو يحدث في الطبقات السفلي من الغلاف الجوي وخاصة عندما تكون السحب معتمة أو غائمة.

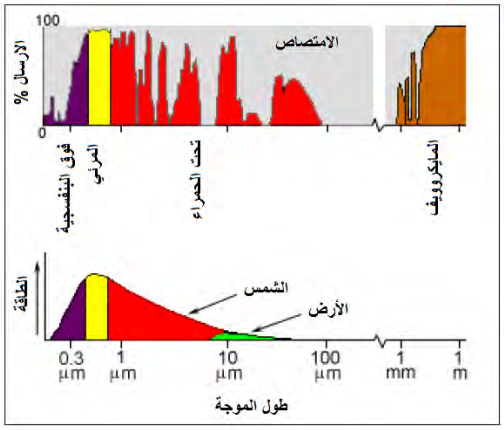
- التشتت غير الانتقائى nonselective ويحدث عندما تكون الجزئيات أكبر من حجم طول موجة الاشعاع، مثل جزئيات التراب الكبيرة وقطرات الماء. ويؤثر هذا النوع من التشتت علي جميع أنواع الطاقة لجميع أطوال الموجات بدرجة متساوية، وهو المسبب لظهور الضباب و السحب باللون الأبيض لأعيننا حيث أن الألوان الأزرق و الأخضر و الأحمر ستشتت بنفس الدرجة.

يحدث الامتصاص absorption بصورة مغايرة للتشتت، فالامتصاص يتسبب في أن تقوم جزئيات الغلاف الجوي بامتصاص الطاقة في أطوال الموجات المختلفة. ويعد الاوزون و ثاني أكسيد الكربون و بخار الماء العوامل الثلاثة المسببة للامتصاص. ان الاوزون يمتص الاشعاع فوق البنفسجي الضار للإنسان، ولولا وجود هذه الطبقة في الغلاف الجوي لاحترق جلد الانسان عند التعرض لأشعة الشمس. أما ثاني أكسيد الكربون فيمتص الاشعاع بقوة في نطلق الاشعة تحت الحمراء البعيدة من مجال الطاقة الكهرومغناطيسية مما يتسبب في احتفاظ الغلاف الجوي بالحرارة وهو المؤدي لظاهرة الاحتباس الحراري. أما بخار الماء فيمتص الطاقة في كلا من نطاق الاشعة تحت الحمراء طويلة الموجة و أيضا الموجات القصيرة أو الميكروويف (بين ٢٢ مايكرومتر و ١ متر). ويختلف وجود بخار الماء في الطبقات السفلي من الغلاف الجوي من مكان لآخر ومن وقت لآخر طوال العام، فعلي سبيل المثال فأن المناطق الصحراوية بها القليل من بخار الماء بينما المناطق المدارية بها تركيز أعلي من بخار الماء أي رطوبة عالية.



شكل (٢٤-١١) الامتصاص في الغلاف الجوي

حيث أن هذه الغازات تمتص الطاقة الكهرومغناطيسية بصور مختلفة في نطاق الطاقة فأنها تؤثر في تحديد النطاقات التي يمكن استخدامها في تطبيقات الاستشعار عن بعد. فالمناطق - داخل نطاق الطاقة الكهرومغناطيسية - التي لا تتأثر بشدة بالامتصاص في الغلاف الجوي تكون مناطق مفيدة للاستشعار عن بعد، ومن ثم يطلق عليها اسم "نوافذ الغلاف الجوي atmospheric windows". وبمقارنة خصائص مصدري الطاقة (أي الشمس و الأرض) مع نوافذ الغلاف الجوي المتاحة فيمكننا تحديد أطوال الموجات التي يمكن استخدامها بكفاءة في عملية الاستشعار عن بعد. فالجزء المرئي من نطاق الطاقة الكهرومغناطيسية يكون حساسا لنوافذ الغلاف الجوي و أيضا لقمة الطاقة الشمسية. أما الطاقة الحرارية المنبعثة من الأرض فأنها تكون في نافذة حوالي ١٠ مايكرومتر في نطاق الاشعة تحت الحمراء الحرارية، بينما النافذة الأكبر من أطوال الموجات بعد ١ ملليمتر تكون في نطاق الموجات القصيرة أو المايكروويف.



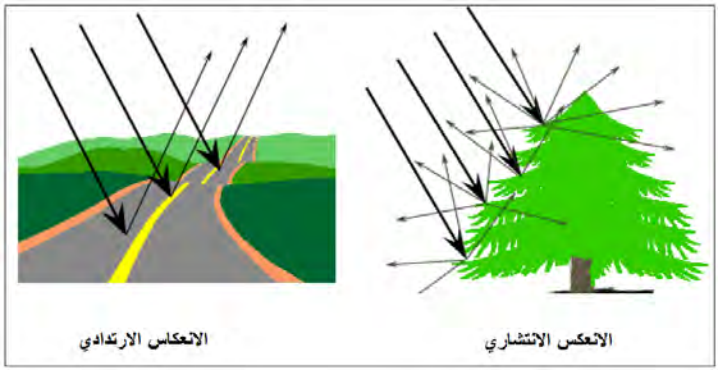
شكل (٢٤-١٢) نوافذ الغلاف الجوي

٢٤-٥ التفاعل مع الأهداف

يمكن للإشعاع الذي لا يمتص أو يتناثر في الغلاف الجوي أن يصل و يتفاعل مع الأهداف الموجودة علي سطح الأرض. وهناك ثلاثة صور للتفاعل هذه الطاقة الساقطة I (كما في الشكل التالي): الامتصاص A ، النفاذ T ، الانعكاس I ، ويتم التفاعل مع الاهداف في واحدة أو أكثر من هذه الصور بناءا علي طول موجة الاشعاع و خصائص الأهداف ذاتها.

شكل (٢٤-١٣) صور التفاعل مع الأهداف

يحدث الامتصاص absorption عندما يقوم الهدف بامتصاص الطاقة الساقطة بينما يحدث النفاذ transmission عندما يتم مرور الطاقة من خلال الهدف، ويحدث الانعكاس reflection عندما يعكس الهدف هذه الطاقة و يعيد توجيهها. وفي الاستشعار عن بعد فأننا نهتم بقياس الاشعاع المنعكس من هذه الأهداف الأرضية، وهنا يوجد نوعين من الانعكاس: الانعكاس الارتدادي specular reflection و الانعكاس الانتشاري diffuse reflection



شكل (٢٤-١٤) أنواع الانعكاس

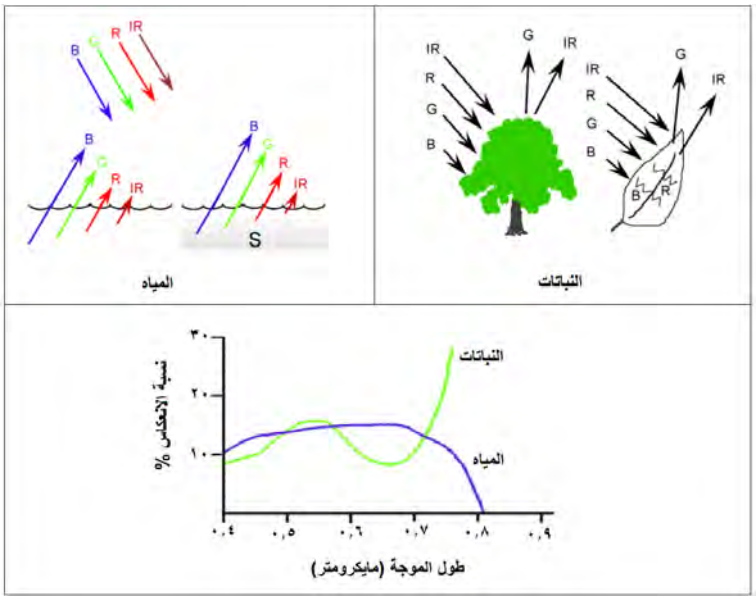
عندما يكون الهدف أملس أو ناعم smooth فيحدث الانعكاس الارتدادي أو ما يمكن تسميته الانعكاس كشبه المرآة حيث تنعكس كل أو معظم الطاقة الساقطة بعيدا عن سطح الهدف في اتجاه واحد. أما الانعكاس الانتشاري فيحدث عندما يكون سطح الهدف خشن rough حيث تنعكس الطاقة

تقريبا بانتظام في جميع الاتجاهات. وكل الأهداف الأرضية تقع فيما بين حالتي الانعكاس هاتين اعتمادا علي درجة خشونة roughness الهدف مقارنة بطول موجة الاشعاع الساقط عليه. فإذا كان طول الموجة صغير جدا بالمقارنة بتغيرات السطح أو حجم الجزئ particle size الذي يتكون منه سطح هذا الهدف فأن الانعكاس الانتشاري يكون هو الغالب. فعلي سبيل المثال فأن الرمال الدقيقة ستظهر ناعمة جدا بالمقارنة لموجات الميكروويف (طول موجة كبير) لكنها ستكون خشنة بالمقارنة لموجات الضوء المرئي.

لنأخذ الان مثالين تفصلين لأهداف سطح الأرض وكيف ستتفاعل مع الطاقة في نطاق الضوء المرئي و نطاق الأشعة تحت الحمراء (الشكل التالي).

- أوراق النباتات leaves: وفيها فأن مادة الكلوروفيل ستمتص بقوة الاشعاع في أطوال الموجة للون الأزرق و الأحمر وستعكس طول موجة اللون الأخضر، وهذا ما يجعلنا نري النباتات خضراء اللون ويزداد اخضرارها في فصل الصيف حيث تكون مادة الكلوروفيل في أقصي قيمها. بينما في فصل الخريف فيكون هناك كلوروفيل أقل مما يجعل انعكاس اللون الأخضر أقل بينما يكون هناك انعكس أكثر (أو امتصاص أقل) في اللون الأحمر مما يجعل لون النباتات أحمر أو أصفر (لاحظ أن اللون الأصفر ما هو إلا مكون من كلا اللونين الأحمر و الأخضر). أيضا فأن التركيب الداخلي لصحة النبات يعمل كعاكس انتشاري مثالي في الأشعة تحت الحمراء القريبة near infrared، أي أنه اذا كانت عين الانسان حساسة لهذه الأشعة فأننا كنا سنري النباتات أكثر لمعانا لطول الموجة هذه. وفي الحقيقة فأن قياس و متابعة الاشعة تحت الحمراء القريبة المنعكسة يعد مقياسا لمدي صحة how healthy النباتات في تطبيقات الاستشعار عن بعد.

- المياه water: وفيها سيتم امتصاص أطوال الموجات الكبيرة من الضوء المرئي و الأشعة تحت الحمراء القريبة بدرجة أكبر من تلك الأشعة ذات أطوال الموجة القصيرة. ومن ثم فأن المياه تظهر باللون الأزرق أو الأزرق-الأخضر نتيجة الانعكاس القوي لهذه الموجات القصيرة، وتظهر المياه داكنة عند رؤيتها بالأشعة تحت الحمراء. فإذا وجدت مواد عالقة suspended sediments (S) في الطبقة العليا من المسطح المائي فأنها ستسبب في انعكاس أفضل و مظهر أكثر لمعانا. لكن هذه المواد العالقة S قد تسبب ارتباكا مع المياه الضحلة النظيفة، حيث أن كلاهما سيظهران متشابهين بدرجة كبيرة. ان الكلوروفيل في الطحالب يمتص الأشعة الزرقاء بدرجة أكبر ويعكس اللون الأخضر مما يجعل المياه تظهر أكثر اخضرارا عند وجود الطحالب. أيضا فأن تضاريس المسحات المائية (النعومة و الخشونة والمواد العائمة) قد تسبب في تعقيدات أكثر عند تفسير مكونات هذه المسطحات وتفاعلها في ظاهرة الانعكاس الارتدادي.



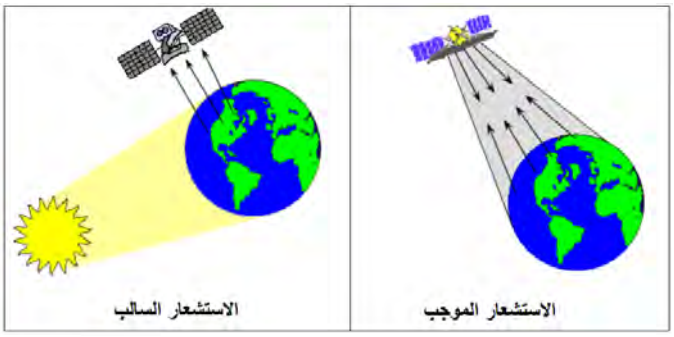
شكل (٢٤-١٥) أمثلة لتفاعلات الانعكاس مع الأهداف

ومن هذين المثالين فيمكننا أن نلاحظ أنه و طبقا لطبيعة الهدف و لطول موجة الاشعاع المستخدم فيمكننا أن نري صور مختلفة من تفاعلات الامتصاص و النفاذ و الانعكاس. ومن ثم فأننا وبقياس الطاقة المنعكسة (أو المنبعثة) من أهداف سطح الأرض في عدة أطوال موجات فنستطيع بناء أو تكوين قاعدة للتفاعل الطيفي spectral response لكل هدف. فإذا قارننا هذا التفاعل الطيفي لعدة أهداف أرضية فيمكننا أن نفرق بينهم بصورة أفضل من التفرقة بينهم في طول موجة واحد فقط. فعلي سبيل المثال فأن المياه و النباتات قد يعكسان الأشعة بصورة متشابهه في الضوء المرئي، لكنهما منفصلان تماما و مختلفان عند التعامل مع الاشعة تحت الحمراء. فبمعرفة في أي جزء من نطاق الضوء الكهرومغناطيسي يجب أن نبحث فيمكنا الوصول الي تفسير و تحليل أفضل و أدق للإشعاع وكيفية تفاعله مع الأهداف الأرضية.

٢٤-٦ الاستشعار الموجب و السالب

تمثل الشمس مصدرا هاما من مصادر الطاقة أو الاضاءة المستخدمة في الاستشعار عن بعد، فطاقة الشمس اما أن تنعكس عند سقوطها علي سطح الأرض كما في حالة أشعة الضوء المرئي أو أن يتم امتصاصها ثم انبعاثها مرة أخري كما في حالة الاشعة تحت الحمراء الحرارية. ومن ثم فأن أجهزة الاستشعار عن بعد التي تقيس الطاقة الطبيعية المتاحة - مثل طاقة الشمس - يطلق عليه اسم مستشعرات سالبة أو سلبية passive sensors. أي أن هذه المستشعرات السالبة تقيس الطاقة فقط عندما يكون هذا المصدر الطبيعي متاحا، وبالنسبة للطاقة المنعكسة فأن هذا يحدث فقط في النهار فلا توجد طاقة منعكسة في الليل. أما الطاقة المنبعثة فمن الممكن قياسها و تحسسها نهارا أو ليلا طالما كانت كميتها كافية بحيث تسمح بالتحسس.

علي الجانب الاخر فأن أجهزة الاستشعار أو المستشعرات الموجبة أو الايجابية active sensors تستخدم طاقتها الخاصة للإضاءة أو التحسس، فهي تبث الاشعاع الموجهه الي الأهداف الأرضية ثم تستقبله و تسجله بعد انعكاسه. ومن مميزات المستشعرات الموجبة أنها تعمل في أي وقت من اليوم أو فصول السنة، كما أنها تستخدم لفحص أطوال موجات لا يمكن توافرها في طاقة الشمس الطبيعية، مثل الموجات القصيرة أو المايكروويف. لكن هذه المستشعرات الموجبة تتطلب توليد كمية كبيرة من الطاقة تكفي لإضاءة الأهداف، ومن أمثلتها مستشعرات الليزر و مستشعرات الرادار المعروفة باسم Synthetic Aperture Radar (SAR).



شكل (٢٤-١٦) الاستشعار الموجب و السالب

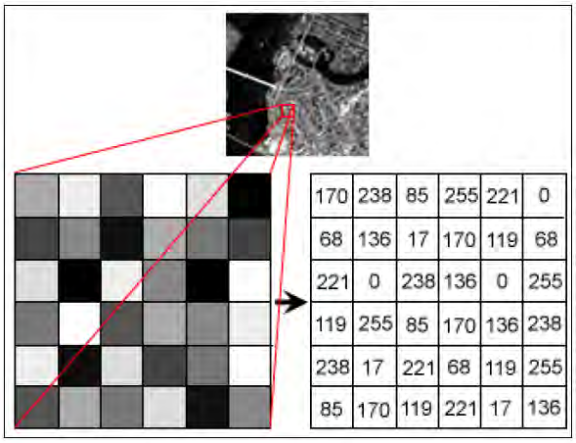
٢٤-٧ خصائص المرئيات

قبل المضي قدما في تفاصيل الاستشعار عن بعد علينا أن نتعرض سريعا لبعض المبادئ و المصطلحات الفنية المتعلقة بمرئيات images الاستشعار عن بعد.

ان الطاقة الكهرومغناطيسية يمكن بيانها أو تحسسها سواء فوتوغرافيا photographically او الكترونيا electronically. تستخدم عملية التصوير الفوتوغرافي التفاعلات الكيمائية علي سطح الفيلم الحساس لبيان و تسجيل تغيرات الطاقة. ومن المهم أن نفرق بين مصطلحي الصور photographs و المرئيات images في الاستشعار عن بعد. فالمرئية تعبر عن التمثيل الصوري pictorial representation بغض النظر عن طول الموجة أو الجهاز المستخدم في بيان و تسجيل الطاقة الكهرومغناطيسية. أما الصورة فتعود الي نوع محدد من المرئيات وهي التي تم فيها استخدام الأفلام لبيان و تسجيل الطاقة. وعادة فأن الصور يتم تسجيلها في نطاق أطوال الموجات من ٠.٣ الي ٠.٩ مايكرومتر، أي نطاق الضوء المرئي و الاشعة تحت الحمراء. ومن هنا فيمكننا القول ان كل الصور هي مرئيات بينما ليست كل المرئيات صورا. وبالتالي فأن المصطلح الأوسع انتشارا هو المرئية طالما أننا لا نتحدث خصيصا عن صور تم تسجيلها فوتوغرافيا.

يمكن للصورة أن يتم تمثيلها و عرضها بصورة رقمية digital format من خلال تقسيم الصورة الي اقسام صغيرة متساوية المساحة و الشكل وهي ما يطلق عليها اسم الخلايا او البكسل pixels. وهذه الخلايا تمثل درجة اللمعان brightness لكل مساحة بواسطة قيمة رقمية digital number (الشكل التالي). أي أننا قد حولنا الصورة الفوتوغرافية الأصلية الي مرئية رقمية، وهو

ما يحدث عندما نقوم بعملية المسح الضوئي scanning للصورة. أما المستشعرات التي تتحسس و تسجل الطاقة بصورة الكترونية فأنها تتبع نفس المنهج من خلال تسجيل الطاقة في مصفوفة رقمية من البداية.



شكل (٢٤-١٧) تحويل الصورة الفوتوغرافية الي نسخة رقمية

يتم تجميع و تسجيل الطاقة في جزء صغير أو ضيق من مجال الاشعة الكهرومغناطيسية فيما يسمي القناة channel أو النطاق band. ويمكن تجميع و عرض معلومات عدة قنوات أو عدة نطاقات باستخدام الألوان الاساسية الثلاثة (الأزرق و الأخضر و الأحمر) حيث يتم تمثيل معلومات كل نطاق أو كل قناة كواحد من هذه الألوان، وطبقا لدرجة اللمعان النسبي (أي القيمة الرقمية) لكل خلية أو بكسب في كل قناة فأن الألوان الثلاثة سيتم دمجهم بصور مختلفة لتمثيل الألوان المختلفة. وعندما نستخدم هذه الطريقة لعرض معلومات قناة واحدة أو نطاق من أطوال الموجات فأننا نقوم بعرض محتويات هذه القناة من خلال الألوان الرئيسية الثلاثة. وبسبب أن درجة اللمعان في كل خلية تكون متساوية للألوان الثلاثة فأنها تتجمع في مرئية أبيض و أسود black and white image. أما عندما يتم عرض أكثر من قناة أو نطاق و لكلا منهم لون أساسي مختلف فأن درجة اللمعان ستختلف من قناة الي أخري في طريقة دمج الألوان ومن ثم فأنهم سينتجون مرئية ملونة color image.

شكل (٢٤-١٨) المرئيات الملونة و غير الملونة

الفصل الخامس و العشرين

الأقمار الصناعية و المستشعرات

يتعرض هذا الفصل لأنواع الأقمار الصناعية و أيضا أجهزة الاستشعار (أو المستشعرات) المستخدمة في الاستشعار عن بعد.

٢٥-١ الاستشعار من على الأرض و من الجو و من الفضاء

في الفصل السابق تعلمنا بعض المفاهيم الأساسية لعملية الاستشعار عن بعد وشرحنا بقليل من التفصيل المكونات الثلاثة الأولي لهذه العملية وهي مصدر الطاقة والتفاعل مع الغلاف الجوي و التفاعل مع الأهداف الأرضية. وعندما تعرضنا للاستشعار عن بعد الموجب و السالب فقد بدأنا ندخل في شرح المكون الرابع ألا وهو تسجيل الطاقة من خلال المستشعرات sensors. وفي الفصل الحالي سنتوسع في شرح هذا الجزء.

لكي يمكن للمستشعر أن يجمع و يسجل الطاقة المنعكسة أو المنبعثة من الهدف أو السطح المطلوب فيجب أن يكون موضوعا في منصة platform لا تلامس هذا الهدف أو هذا السطح. وتتعدد المنصات المستخدمة في الاستشعار عن بعد بحيث يمكن أن تكون موضوعة علي الأرض أو في الجو أي داخل الغلاف الجوي (طائرة أو بالون) أو في الفضاء أي خارج الغلاف الجوي (قمر صناعي أو مكوك الفضاء).

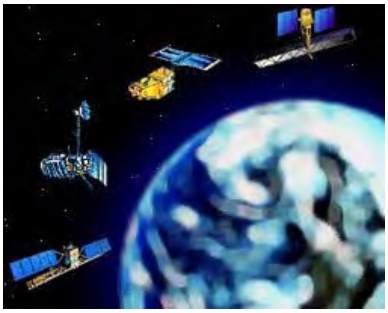
تستخدم المستشعرات الأرضية ground-based sensors في تسجيل معلومات تفصيلية عن السطح بالمقارنة بالمستشعرات الجوية أو الفضائية. وفي بعض الأحيان فأن هذا يستخدم بغرض التعرف التفصيلي علي خصائص الأهداف التي تم تحسسها بمستشعرات أخري حتى نستطيع أن نفهم و نحلل جيدا معلومات المرئيات.

شكل (٢٥-١) المستشعرات الأرضية

أما المستشعرات الجوية فغالبا ما تكون موضوعة في طائرات ذات أجنحة متزنة stable-wing aircraft مع أن طائرات الهليكوبتر تستخدم أحيانا. ويتم استخدام الطائرات في تجميع و تسجيل معلومات تفصيلية

شكل (٢٥-٢) المستشعرات الجوية

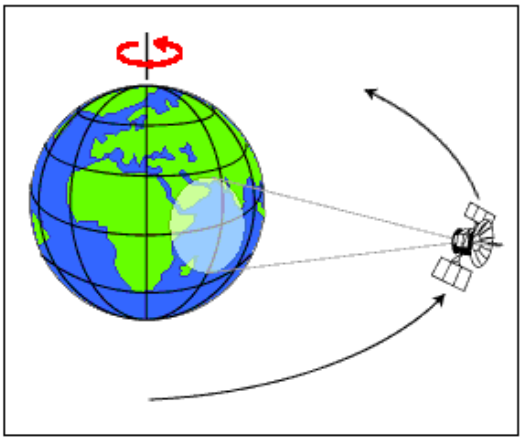
عادة فأن الاستشعار عن بعد من الفضاء يتم باستخدام المستشعرات في الأقمار الصناعية satellites وأيضا في مكوك الفضاء space shuttle. وتتعدد أنواع الأقمار الصناعية بصفة عامة لتشمل/ أقمار الملاحة، أقمار الاتصالات، أقمار دراسة الأرض وهي المجموعة التي تشمل أقمار الاستشعار عن بعد. وبسبب مدارها حول الأرض فأن الاقمار الصناعية تتيح لنا تغطية متكررة للأرض وبصورة مستمرة.



شكل (٢٥-٣) المستشعرات الفضائية

٢٥-٢ خصائص الأقمار الصناعية

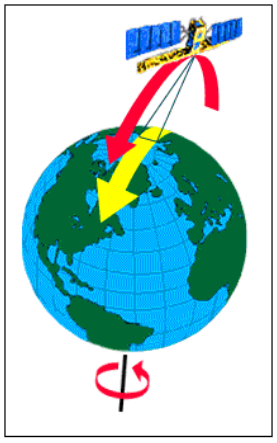
لكل قمر صناعي مدار orbit يناسب الهدف من المستشعر الذي يحمله القمر الصناعي، وتختلف المدارات طبقا للارتفاع altitude (ارتفاع المدار عن سطح الارض) والتوجيه orientation و الدوران rotation بالنسبة للأرض. فالأقمار الصناعية الموضوعة علي ارتفاعات عالية جدا بحيث انها تري نفس المنطقة من الارض في كل الاوقات يكون لها ما يسمي بالمدارات الثابتة مع الارض geostationary orbits. وهذه الاقمار الثابتة مع الارض تكون علي ارتفاعات تقريبا ٣٦٠٠٠ كيلومتر و تدور بنفس سرعة الارض بحيث انها تكون كما لو كانت "ثابتة" بالنسبة لسطح الارض. ومن ثم فان هذه المدارات تسمح للأقمار الصناعية بتجميع معلومات مستمرة عن منطقة محددة من الارض، وتعد اقمار الاتصالات و اقمار المناخ من نوعية الاقمار الصناعية التي لها مدارات ثابتة.



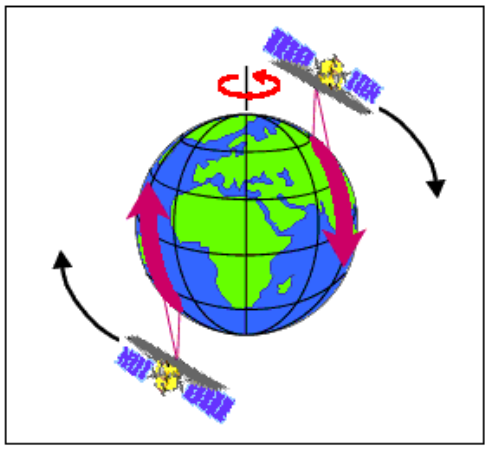
شكل (٢٥-٤) المدارات الثابتة للأقمار الصناعية

توجد عدة منصات للاستشعار عن بعد مصممة لتدور في مدار (غالبا من الشمال الي الجنوب) بحيث أنها ومع دوران الأرض تتيح تغطية معظم سطح الأرض في فترة زمنية معينة. وهذه المدارات تسمي بالمدارات شبه القطبية near-polar orbits، وجاء هذا المصطلح بسبب ان المدار يميل علي الخط الواصل بين القطبين الشمالي و الجنوبي للأرض. كما ان كثير من هذه المدارات تكون ايضا متزامنة مع الشمس sun-synchronous بحيث انها تغطي كل منطقة من العالم في وقت محلي ثابت constant local time وهو ما يطلق عليه اسم الوقت الشمسي المحلي. ففي اي دائرة عرض latitude فان موقع الشمس في السماء عندما يمر القمر الصناعي فوقه سيكون واحدا في نفس الفصل المناخي. وهذا يضمن ظروف اضاءة متناسقة عند الحصول علي المرئيات في فصل مناخي محدد علي سنوات متتالية. وهذا الأمر هام جدا لمتابعة التغيرات change detection بين مرئيات متعاقبة زمنيا وأيضا لدمج (عمل موزايك) لعدة مرئيات معا حيث أنهم في هذه الحالة لن يحتاجوا لتصحيح ظروف اضاءة مختلفة.

ان معظم الاقمار الصناعية للاستشعار عن بعد اليوم تكون من ذات المدارات شبه القطبية، اي ان القمر يسير باتجاه القطب الشمالي في احد اوجه الارض ثم يسير باتجاه القطب الجنوبي في النصف الثاني من مداره، وهذا ما يسمي بالمسار الصاعد ascending pass و المسار الهابط descending pass. فإذا كان المدار متزامن مع الشمس ايضا فعادة ما يكون المسار الصاعد في الجانب ذو الظل من الارض بينما يكون المسار الهابط في الجانب المضاء (المواجه للشمس) من الارض. ومن ثم فان المستشعرات التي تقوم بتحسس و تسجيل الطاقة الشمسية الانعكاسية فستسجل الطاقة في المسار الهابط فقط. اما المستشعرات الموجبة التي لها مصدر اضاءة خاص بها او المستشعرات السالبة التي تسجل الاشعاع المنبعث (الحراري) فيمكنها ايضا التحسس في المسار الصاعد.

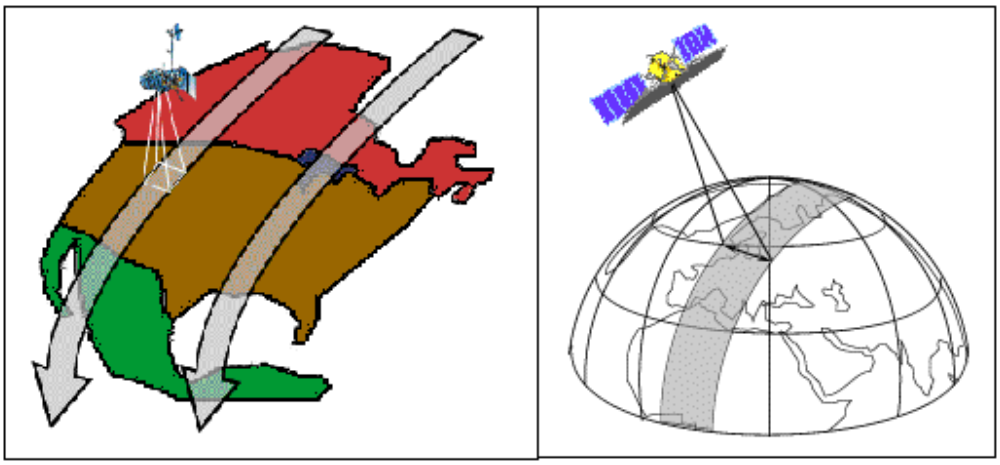


شكل (٢٥-٥) المدارات شبه القطبية للأقمار الصناعية



شكل (٢٥-٦) المسار الصاعد و المسار الهابط للأقمار الصناعية

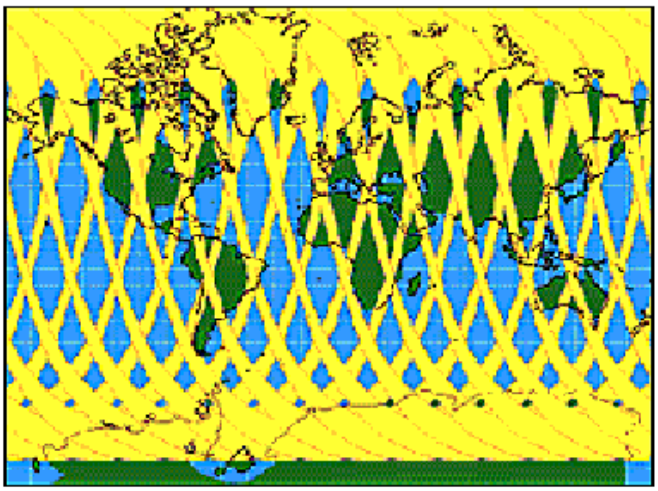
كلما يدور القمر الصناعي حول الأرض فأن المستشعر "يري" جزءا من سطح الأرض، وهذه المنطقة هي ما يطلق عليه اسم "صف التحسس swath". وتختلف صفوف التحسس التي يمكن استشعارها من مستشعر الي اخر بحيث يتراوح عرضها ما بين عشرات و مئات من الكيلومترات. وبالطبع فأن حركة دوران الأرض حول نفسها (من الغرب الي الشرق) فأن صف التحسس سيتحرك ناحية الغرب، مما يجعل القمر الصناعي يمر فوق صف تحسس اخر عند تتابع المسارات. ومن ثم فأن مدار القمر الصناعي و حركة الأرض معا يتيحان التغطية الكاملة لتحسس و استشعار لسطح الأرض من بعد.



شكل (٢٥-٧) صفوف تحسس الأقمار الصناعية

تكتمل دورة كاملة من المدارات orbital cycle عندما يعود القمر الصناعي للمرور مرة ثانية فوق نفس النقطة علي سطح الأرض (تسمي نقطة النديرnadir point). وتختلف الفترة الزمنية

لدورة المدارات من قمر صناعي الي اخر، ويطلق علي هذه الدورة اسم "فترة اعادة الزيارة revisit period". أما في حالة استخدام مستشعرات متحركة steerable sensors فأن المستشعر يستطيع رؤية بقعة أرضية خارج نقطة النديرoff-nadir قبل و بعد مسارات المدار، مما يجعل فترة اعادة الزيارة أقل زمنيا من زمن دورة المدارات. وتعد فترة اعادة الزيارة هامة للغاية في عديد من تطبيقات الاستشعار عن بعد خاصة عند الحاجة لمرئيات متتالية، ومنها علي سبيل المثال مراقبة انتشار تسرب بقعة من الزيت أو مراقبة اثار الفيضانات. وفي حالة المدارات شبه القطبية near-polar orbits فأن المناطق مرتفعة دوائر العرض high latitude سيتم تحسسها بتكرار أكبر من المناطق الاستوائية نتيجة التداخل بين المسارات المتجاورة للقمر الصناعي حيث أن المسارات يتكون متقاربة عند القطبين.



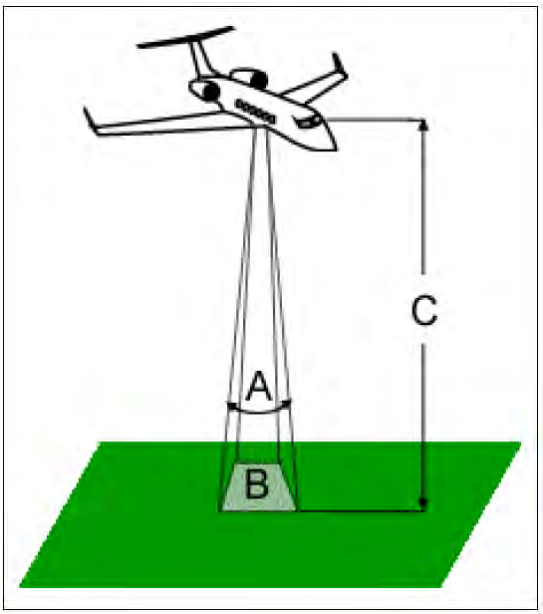
شكل (٢٥-٨) دورة مدارات الأقمار الصناعية

٢٥-٣ درجة الوضوح المكانية و حجم الخلية والمقياس

لعدة أجهزة من أجهزة الاستشعار عن بعد فأن المسافة بين الهدف و منصة الاستشعار تلعب دورا بالغ الأهمية في تحديد تفاصيل المعلومات التي تظهر المنطقة التي يتم تحسسها. ان المستشعرات الموجودة في المنصة تكون بعيدة جدا عن الهدف أي أنها تستشعر منطقة كبيرة ولا تستطيع اظهار التفاصيل كاملة. ويمكنك المقارنة ما بين ما يراه رائد الفضاء من داخل مكوك الفضاء و ما تراه أنت من داخل الطائرة، فرائد الفضاء يمكنه رؤية دولة بأكملها في منظر واحد لكنه لا يمكنه التمييز بين المباني المختلفة، بينما من بداخل الطائرة عند الطيران فوق مدينة يمكنه تمييز المباني والسيارات بوضوح لكن لا يمكنه رؤية منطقة كبيرة مثل رائد الفضاء . وهذا الفرق موجود أيضا ما بين الصور الجوية و مرئيات الأقمار الصناعية.

تعتمد تفاصيل المرئية علي درجة الوضوح المكانية spatial resolution لجهاز الاستشعار والتي تعرف بأنها مساحة أو حجم size أصغر ظاهرة يمكن تحسسها smallest possible feature can be detected. وتعتمد درجة الوضوح المكانية للمستشعرات اللايجابية علي ما يعرف باسم مجال الرؤية اللحظية Instantaneous Field of View (أو اختصارا IFOW)،

وهو مخروط الرؤية للمستشعر A ويحدد المنطقة الأرضية التي يمكن رؤيتها من ارتفاع محدد في لحظة زمنية محددة B. ويتم حساب مساحة المنطقة المرئية بضرب IFOW في ارتفاع المستشعر من سطح الأرض C، وهذه المنطقة علي الأرض تسمي خلية الوضوح resolution cell أي أقصي درجة وضوح مكاني للمستشعر. ومن ثم فأنه حتى يمكن استشعار هدف محدد فأن مساحته أو حجمه size يجب أن تساوي أو أن تكون أكبر من خلية الوضوح. أي أنه في حالة أن مساحة الهدف أقل من مساحة خلية الوضوح فلن يمكن تحسسه او استشعاره.



شكل (٢٥-٩) درجة الوضوح المكانية

كما سبق الاشارة في الفصل الأول فأن مرئيات الاستشعار عن بعد تتكون من مصفوفة من العناصر أو الخلايا (بكسل) pixels، وهي أصغر وحدة علي المرئية. وعادة تكون الخلايا مربعة وتمثل مساحة محددة من المرئية. ومن المهم التفرقة بين حجم البكسل pixel size و درجة الوضوح المكانية spatial resolution فهما ليسا شيئا واحدا في جميع الحالات. ففي حالة أن المستشعر له درجة وضوح مكانية ٢٠ متر والمرئية من هذا المستشعر تظهر بوضوح كامل full resolution فأن كل بكسل ستمثل ٢٠×٢٠ متر علي الأرض. وفي هذه الحالة فأن حجم البكسل يساوي درجة الوضوح المكانية. لكن من الممكن أن نظهر مرئية باستخدام حجم بكسل مختلف عن درجة وضوحها المكانية، فمثلا في حالة عرض ملصقات (بوستر) لمرئيات سطح الأرض فنستخدم حجم خليه يمثل مساحة كبيرة (أكبر من درجة الوضوح المكانية الأصلية لهذه المرئية).

يقال للمرئيات التي تعتمد علي اظهار الأهداف الكبيرة فقط أن لها درجة وضوح مكانية خشنة أو قليلة coarse or low resolution، بينما في المرئيات التي لها درجة وضوح مكانية دقيقة أو عالية fine or high resolution فيمكن اظهار الأهداف الصغيرة. فأقمار الاستشعار عن بعد العسكرية علي سبيل المثال مصممة بحيث يمكنها تحسس كل ما يمكن من التفاصيل، أي أن لها درجة وضوح مكانية عالية أو دقيقة. أما الأقمار الصناعية التجارية فتوفر مرئيات لها درجة

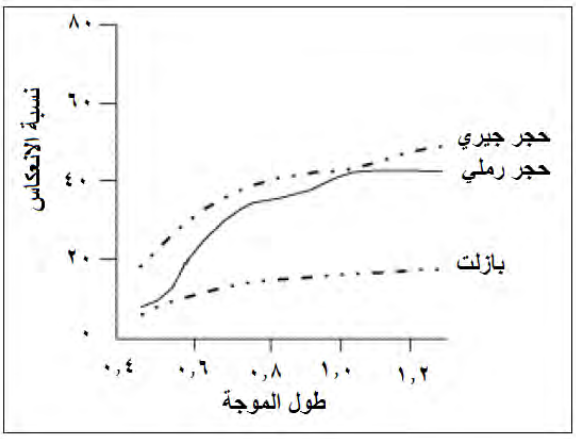
وضوح مكانية تتراوح بين عدة أمتار الي عدة كيلومترات. وكقاعدة عامة فكلما زادت درجة الوضوح المكانية كلما قلت المساحة الأرضية التي يمكن رؤيتها.

شكل (٢٥-١٠) اختلاف درجات الوضوح المكانية

تعرف نسبة المسافة علي المرئية أو الخريطة الي المسافة الأرضية الحقيقية المناظرة باسم مقياس الرسم scale. فإذا كان لديك خريطة لها مقياس رسم ١ : ١٠٠،٠٠٠ (مثلا) فأن الهدف الذي يبلغ طوله علي الخريطة ١ سنتيمتر سيكون طوله الحقيقي علي الأرض ١٠٠،٠٠٠ سنتيمتر (أي ١ كيلومتر). ومن ثم فأن الخرائط أو المرئيات الفضائية التي لها قيمة صغيرة من نسبة "الخريطة/الأرض" (١ / ١٠٠،٠٠٠ علي سبيل المثال) يطلق عليها اسم الخرائط أو المرئيات صغيرة المقياس small scale ، بينما تلك التي لها نسبة أكبر (مثلا ١ / ٥،٠٠٠) تسمي كبيرة المقياس large scale.

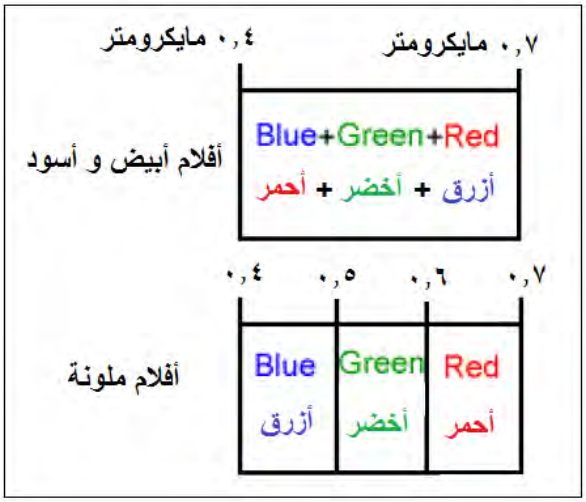
٢٥-٤ درجة الوضوح الطيفية

أشرنا في الفصل السابق الي أن الاستجابة الطيفية spectral response أو منحنيات الانبعاث الطيفي spectral emissivity curves تميز الانعكاس أو الانبعاث للهدف باستخدام أطوال موجات مختلفة. ويمكن تمييز الاهداف المختلفة في مرئية من خلال مقارنة استجابتها الطيفية في مجال من أطوال الموجات. فالمجموعات الكبيرة مثل المياه و النباتات يمكنها أن تنفصل في مجالات مختلفة من أطوال الموجات مثل الضوء المرئي و الاشعة تحت الحمراء.



شكل (٢٥-١١) اختلاف الاستجابة الطيفية للأهداف

لكن بعض المجموعات الدقيقة أو التفصيلية مثل أنواع الصخور قد لا يمكن تمييزها بسهولة باستخدام هاتين المجموعتين أو هذين المجالين من أطوال الموجات وقد تحتاج لعمل مقارنة في مجال ضيق من مجالات الضوء الكهرومغناطيسي. ومن ثم فأننا نحتاج لمستشعر يكون له "درجة وضوح طيفية spectral resolution" عالية. فدرجة الوضوح الطيفية تعبر عن قدرة المستشعر في تحديد فترات دقيقة من أطوال الموجات، أي أنه كلما كانت درجة الوضوح الطيفية أدق كلما ضاق مجال أطوال الموجات لقناة أو نطاق محدد. فالأفلام الأبيض و الأسود تسجل أطوال الموجات الممتدة علي نطاق الضوء المرئي، أي أن درجة وضوحها الطيفية خشنة coarse فهي لا تستطيع التمييز بين أطوال الموجات المختلفة داخل هذا النطاق وتسجل فقط الانعاس في كل مجال الضوء المرئي. بينما علي الجانب الاخر فأن الافلام الملونة لها درجة وضوح طيفية عالية بحيث أنها تستطيع تحسس الطاقة المنعكسة في أطوال الموجات الزرقاء و الخضراء و الحمراء كلا علي حدي. ومن ثم فهي تستطيع تمثيل الأهداف في عدة ألوان اعتمادا علي مدي الانعكاس في كل نطاق من أطوال الموجات.



شكل (٢٥-١٢) درجات الوضوح الطيفية للأفلام المختلفة

ان العديد من نظم الاستشعار عن بعد تسجل الطاقة في فترات متعددة من أطوال الموجات باستخدام درجات وضوح طيفية مختلفة، وهذه النظم يطلق عليها اسم "المستشعرات متعددة الوضوح الطيفي multi-spectral sensors". أما المستشعرات المتقدمة فيطلق عليها اسم "المستشعرات عالية الوضوح الطيفي hyperspectral sensors" حيث أنها تستطيع تحسس مئات من النطاقات الطيفية الضيقة أو الدقيقة في الضوء المرئي و الاشعة تحت الحمراء القريبة و المتوسطة. ومن ثم فأن درجة وضوحها الطيفية العالية تسهل من التمييز بين الأهداف المختلفة اعتمادا علي الاستجابة الطيفية لكل هدف في كل نطاق طيفي ضيق.

٢٥-٥ درجة الوضوح الراديومترية

بينما ترتيب البكسل أو الخلايا يصف تكوين المرئية ذاتها، فأن الخصائص الراديومترية هي التي تصف المعلومات الحقيقية لمحتوي المرئية الفضائية. في كل مرة يتم الحصول علي مرئية (سواء علي فيلم أو باستخدام مستشعر) فأن حساسيتها لكمية الطاقة الكهرومغناطيسية هي التي تحدد درجة الوضوح الراديومترية radiometric resolution. فالوضوح الراديودمتري لمرئية يصف قدرتها علي التمييز بين الفروقات البسيطة جدا من الطاقة، فكلما زادت درجة الوضوح الراديومترية لمستشعر كلما زادت حساسيته لاكتشاف الفروق في الطاقة المنعكسة أو المنبعثة.

يتم تسجيل بيانات الطاقة من خلال أعداد موجبة تتراوح بين الصفر الي أس محدد للعدد ٢. وهذا النطاق يقابل عدد البت bit المستخدمة في ترميز الأرقام في النظام الثنائي binary format. فكل بت تسجل الأس المرفوع له الرقم ٢ (مثلا: ١ بت = ٢ ^{١} = ٢). ويعتمد الحد الأقصى المتاح لمستويات اللمعان علي عدد البت المستخدم في تمثيل الطاقة المنعكسة. فعلي سبيل المثال فان كان مستشعر يستخدم ٨ بت في تسجيل البيانات، فهناك ٢ ^{٨} = ٢٥٦ قيمة رقمية متاحة وستتراوح ما بين الصفر و ٢٥٥. أما في حالة استخدام ٤ بت فقط فسيكون هناك ٢ ^{٤} = ١٦ قيمة رقمية متاحة فقط وستتراوح ما بين الصفر و ١٥، ومن ثم فستكون درجة الوضوح الراديومترية أقل. وعادة ما يتم تمثيل بيانات المرئية باستخدام نطاق من درجات اللون الرمادي grey tones ، حيث يكون اللون الأسود ممثلا بالرقم صفر واللون الأبيض ممثلا بالرقم الأقصى المتاح (مثل رقم ٢٥٥ في البيانات ذات الثمانية بت). وبمقارنة مرئية بدرجة وضوح راديومترية ٢-بت بمرئية أخري لها درجة وضوح راديومترية ٨-بت فيمكننا رؤية أن هناك فروق كبيرة في مستوي التفاصيل في كلا منهما.

شكل (٢٥-١٣) الاختلاف في درجات الوضوح الراديومترية

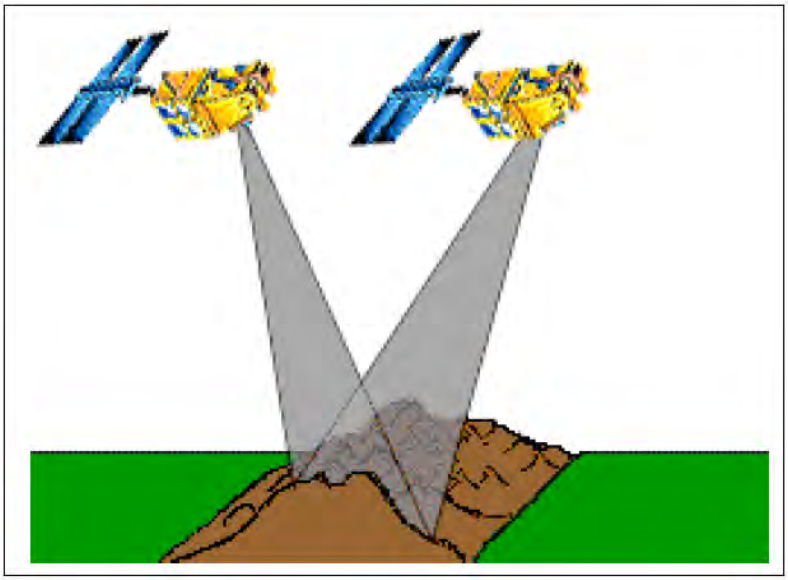
٢٥-٦ درجة الوضوح المؤقتة/الزمنية

بالإضافة لدرجة الوضوح المكانية و درجة الوضوح الراديومترية فأن درجة الوضوح المؤقتة أو الزمنية temporal resolution تعد مهمة في الاستشعار عن بعد. وقد سبق أن تعرضنا لهذا المفهوم في الجزء ٢-٢ عندما تحدثنا عن فترة اعادة الزيارة revisit period والتي عادة ما تكون عدة أيام بالنسبة للأقمار الصناعية. ومن ثم فأن القيمة المطلقة لدرجة الوضوح المؤقتة أو الزمنية لنظام استشعار عن بعد لكي يقوم بتحسس نفس البقعة الأرضية مرة أخري هي هذه الفترة. لكن وبسبب التداخل overlap بين صفوف التحسس swaths للمدارات المتعاقبة كلما زادت دوائر العرض فأن هناك مناطق من الأرض سيتم تحسسها بتردد أكبر. أيضا فأن بعض أنواع الاقمار الصناعية لديها القدرة علي توجيه مستشعراتها لتحسس نفس البقعة الأرضية في مدارات مختلفة بفترات تتراوح ما بين يوم الي خمسة أيام. ومن ثم فأن درجة الوضوح الزمنية الحقيقية لمستشعر تعتمد علي عدة عوامل ومنها قردة القمر الصناعي و المستشعر ذاته وأيضا تداخل صفوف التحسس و دائرة العرض.

ان القدرة علي تجميع مرئيات لنفس المنطقة من سطح الأرض في فترات زمنية متعددة تعد من أهم عناصر تطبيق معلومات الاستشعار عن بعد. فالخصائص المكانية للأهداف قد تتغير مع مرور الوقت، وهذا ما يمكن اكتشافه من خلال تجميع و مقارنة المرئيات متعددة الوضوح الزمني multi-temporal images. فعلي سبيل المثال فأنه وفي خلال موسم النمو فأن النباتات المختلفة تكون في حالة تغير مستمر ومن ثم فأن قدرتنا علي متابعة هذا التغير تعتمد علي " متي وبأي تردد when and how frequently " يمكننا الحصول علي المرئيات. وباستخدام التحسس في فترات زمنية مختلفة وبصفة دورية فيمكننا متابعة التغيرات التي تحدث علي سطح الأرض سواء

كانت تغيرات طبيعية (مثل التغير في الغطاء النباتي أو الفيضان) أو تغيرات بشرية (مثل النمو العمراني و التصحر). فعامل الزمن في الاستشعار عن بعد يكون هاما عندما:

- السحب المستمرة تعطي مجال رؤية محدود لسطح الارض.
- الحاجة لمتابعة الظواهر السريعة (مثل الفيضان و تسرب الزيت ... الخ)
- الحاجة للمتبعة المستمرة (مثل معدلات انتشار مرض نباتي معين من سنة لآخري)
- خصائص التغير لبعض الأهداف علي مدار الزمن قد تستخدم لتمييزها عن الأهداف المماثلة.



شكل (٢٥-١٤) درجة الوضوح المؤقتة أو الزمنية

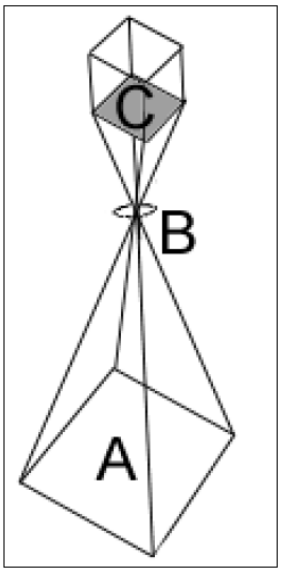
يقدم الجدول التالي بعض خصائص عدة اقمار صناعية للاستشعار عن بعد:

أمثلة لبعض خصائص عدة اقمار صناعية للاستشعار عن بعد

القمر	الاطلاق	الوضوح المكاني (م)		عدد النطاقات	طول البكسل (كم)	ارتفاع القمر (كم)	اعادة الزيارة (يوم)
		بانكروماتية	متعدد الاطياف				
WorldView-3	٢٠١٤	٠.٣١	١.٢٤	٢٩	١٣.١	٦١٧	١
GeoEye-1	٢٠٠٨	٠.٤١	١.٦٥	٤	١٥.٢	٧٧٠	٨.٣
WorldView-2	٢٠٠٩	٠.٤٦	١.٨٤	١٣	١٧.٦	٧٧٠	١.١
Pleiades-1B	٢٠١٢	٠.٥	٢.٠	٥	٢٠	٦٩٤	١
QuickBird	٢٠٠١	٠.٦٥	٢.٦	٥	١٦.٨	٤٥٠	٣.٥
IKONOS	١٩٩٩	٠.٨٢	٣.٢	٥	١١.٣	٦٨١	٣
EgyptSat-2	٢٠١٤	١.٠	٤.٠	٤	٤٦.٦	٧٢٠	
SkySat-2	٢٠١٤	١.١	٢.٠	٥	٨	٤٥٠	١
SPOT-7	٢٠١٤	١.٥	٦.٠	٥	٦٠	٦٩٤	١
SPOT-6	٢٠١٢	١.٥	٦.٠	٥	٦٠	٦٩٤	١
RapidEye	٢٠٠٨	٥.٠	١٠.٠	٥	٧٧	٦٣٠	٥.٥
ASTER	١٩٩٩	١٥	٣٠	١٤	٦٠	٧٠٥	١٦
LandSat-8	٢٠١٣	١٥	٣٠	١١	١٨٥	٧٠٥	١٦
LandSat-7 ETM	١٩٩٩	١٥	٣٠	٨	١٨٥	٧٠٥	١٦

٢٥-٧ الكاميرات و التصوير الجوي

يعد استخدام الكاميرات في التصوير الجوي أبسط و أقدم المستشعرات المستخدمة في الاستشعار عن بعد لسطح الأرض. فالكاميرات هي نظم اطارية framing systems تحصل علي صورة شبه لحظية near-instantaneous snapshot لبقعة أرضية A. أي أن الكاميرا هي مستشعر بصري سالب optical passive sensor يستخدم عدسة B (أو مجموعة من العدسات) لتكوين صورة عند C المستوي البؤري focal plane.

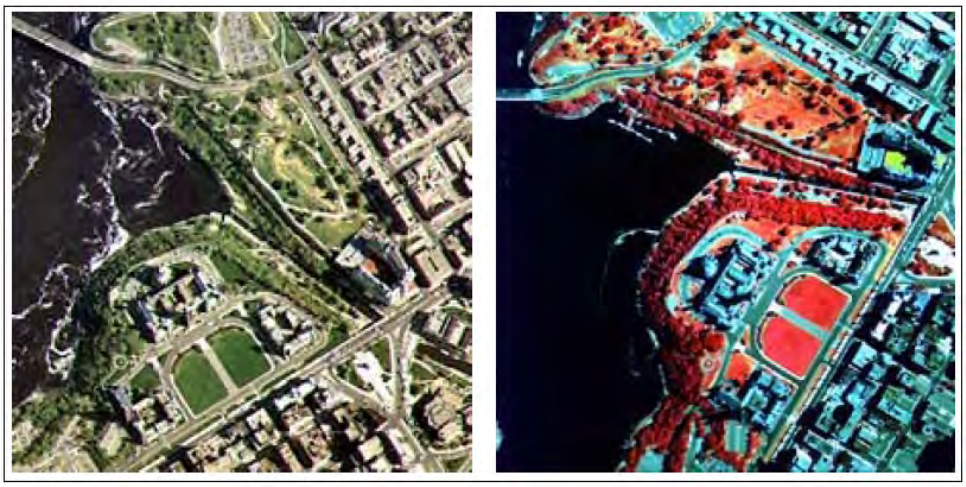


شكل (٢٥-١٥) مفهوم التصوير الجوي

تكون الأفلام التصويرية حساسة للضوء ما بين ٠.٣ مايكرومتر و ٠.٩ مايكرومتر في نطاق الطول الموجي المتراوح ما بين الأشعة فوق البنفسجية والضوء المرئي و الأشعة تحت الحمراء القريبة. فالأفلام الأبيض و أسود - ويطلق عليها اسم الأفلام البانكروماتية panchromatic - تستشعر الأشعة فوق البنفسجية و الضوء المرئي، وتنتج الصور غير الملونة وهي الأكثر استخداما في التصوير الجوي. والصور فوق البنفسجية تستخدم نفس الأفلام البانكروماتية لكن مع وجود فلتر (أو مصفاة) لامتصاص و منع طاقة الضوء المرئي من الوصول الي الفيلم ذاته، ومن ثم فأن الاشعة فوق البنفسجية فقط هي التي يتم تسجيلها. لكن هذا النوع من الأفلام غير شائع الاستخدام حيث أن الامتصاص و التشتت في طبقات الغلاف الجوي يؤثر عليها بشدة. أما التصوير الأبيض و أسود الحساس للأشعة تحت الحمراء فيستخدم أفلاما حساسة للنطاق الكلي ما بين ٠.٣ - ٠.٩ مايكرومتر وهو مفيد جدا لاكتشاف الفروق بين النباتات المختلفة نتيجة لحساسية هذه الأفلام لنعطس الاشعة تحت الحمراء القريبة.

يشمل التصوير الملون العادي color photography والتصوير الملون الزائف false color photography (أو التصوير الملون تحت الحمراء color infrared أو اختصارا CIR) استخدام أفلام لها ثلاثة طبقات layers بحيث أن كل طبقة تكون حساسة لمجال مختلف من

الضوء. ففي التصوير الملون العادي فأن الطبقات تكون حساسة للضوء الأزرق و الأخضر و الأحمر مثل أعيننا، وبالتالي فأن هذه الصور تظهر بنفس الطريقة التي نري نحن بها المعالم الأرضية (مثلا الشجر يظهر باللون الأخضر ... الخ). أما في التصوير الملون تحت الحمراء CIR فأن الطبقات تكون حساسة للأخضر و الأحمر وللأشعة تحت الحمراء القريبة، وهي التي ستظهر بعد معالجتها بالألوان الأزرق و الأخضر و الأحمر علي الترتيب. أي أن في الصور الملونة الزائفة false color photographs فأن الأهداف التي لها انعكاس كبير للأشعة تحت الحمراء ستظهر علي الصورة حمراء، بينما الأهداف التي لها انعكاس أحمر كبير ستظهر علي الصورة خضراء، والأهداف التي لها انعكاس أخضر كبير ستظهر علي الصورة زرقاء. ومن هنا فأن هذه الصور تعطينا تمثيلا "زائفا" للأهداف مقارنة بالألوان المعتادة لنا.



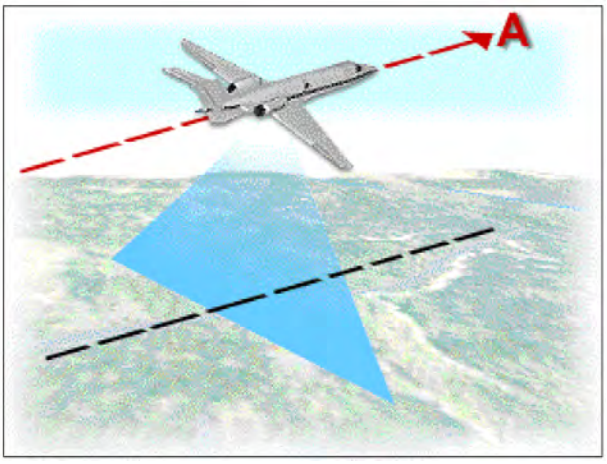
شكل (٢٥-١٦) الصور الملونة العادية و الصور الملونة الزائفة

يمكن تركيب الكاميرات علي منصات عديدة منها المنصات الارضية و طائرات الهليكوبتر و الطائرات العادية و الاقمار الصناعية. وللصور الجوية الدقيقة او التفصيلية المأخوذة من الطائرات استخدامات متعددة خاصة عندما تكون التفاصيل ضرورية. ويعتمد الغطاء الارضي للصورة علي عدة عوامل تشمل البعد البؤري للعدسة و ارتفاع المنصة وخصائص و مساحة الفيلم المستخدم. يؤثر البعد البؤري focal length علي مجال الرؤية الزاوية angular field of view للعدسة (يماثل مفهوم مجال الرؤية اللحظي المشار اليه في الجزء ١٢-٣) و يحدد المنطقة التي تراها الكاميرا. وعادة ما يتراوح البعد البؤري ما بين ٩٠ و ٢١٠ ملليمتر، والأكثر شيوعا هو ١٥٢ ملليمتر. وكلما زاد البعد البؤري كلما قلت مساحة المنطقة المغطاة علي الارض لكن مع مستوي عالي من التفاصيل (أي بمقياس رسم كبير). كما تعتمد المنطقة المغطاة ايضا علي ارتفاع منصة التصوير، فعلي ارتفاعات كبيرة تستطيع الكاميرا رؤية منطقة أكبر من الأرض من تلك المنطقة التي يمكن رؤيتها علي ارتفاعات أصغر، لكن مع تفاصيل أقل (أي مقياس رسم صغير). ويمكن للصور الجوية أن تمدنا بتفاصيل دقيقة حتى درجة وضوح مكانية تبلغ ٥٠ سنتيمتر. لكن درجة الوضوح المكاني الحقيقية للصور الجوية تختلف باختلاف عوامل متعددة بصورة عامة.

يتم تصنيف معظم الصور الجوية اما مائلة oblique أو رأسية vertical اعتمادا علي توجيه الكاميرا نسبة الي الأرضَ أثناء لحظة التصوير. فالصور الجوية المائلة عادة ما يتم التقاطها وتكون الكاميرا موجهه الي جانب الطائرة. وتؤخذ الصور شديدة الميل high oblique بحيث يظهر الأفق في الصورة بخلاف الصور المائلة التي لا يظهر بها الأفق. والصور المائلة مفيدة لتغطية منطقة كبيرة من سطح الأرض في صورة واحدة ولبيان تضاريس سطح الأرض. لكن هذا النوع من الصور الجوية غير مستخدم في انتاج الخرائط بسبب التشوه الكبير في مقياس رسم الصورة والذي يمنع القياسات الدقيقة للمسافات و المساحات و الارتفاعات.

شكل (٢٥-١٧) مثال لصورة جوية مائلة

ان الصور الجوية الرأسية المأخوذة بكاميرا أحادية العدسة هي الاكثر استخداما في التصوير الجوي لأغراض الاستشعار عن بعد وإنتاج الخرائط. وهذه الكاميرات تكون مصممة بحيث تلتقط عدد كبير من الصور المتتالية مع تقليل التشوه بقدر الامكان، وعادة ما تكون مربوطة بنظام ملاحي لتحديد المواقع للحصول علي الاحداثيات الجغرافية الدقيقة لكل صورة. وتطير الطائرة في عدد من الخطوط يسمي كلا منها "خط طيران flight line" ويتم التقاط الصور بحيث تكون الكاميرا موجهه لأسفل وذلك بتداخل يبلغ ٥٠ - ٦٠% بين كل صورتين متتاليتين. وهذا التداخل يضمن التغطية الكاملة للمنطقة، كما أنه يسهل الرؤية الاستراسكوبية (المجسمة) stereoscopic viewing. فكل صورتين متتاليتين تظهران منطقة التداخل بينهما من منظرين مختلفين، وبالتالي يمكن استخدام جهاز يسمي الاستريسكوب stereoscope للحصول علي منظر مجسم ثلاثي الأبعاد للمنطقة و يسمي النموذج الاستريسكوبي stereoscopic model.



شكل (٢٥-١٨) خطوط الطيران في التصوير الجوي

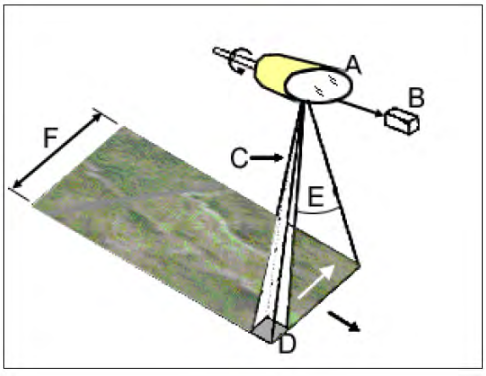
تكون الصور الجوية مفيدة أكثر عندما نحتاج درجة وضوح مكاني دقيقة أو عالية بغض النظر عن درجة الوضوح الطيفية والتي عادة ما تكون خشنة أو قليلة بالمقارنة ببيانات المستشعرات الالكترونية. ويتم استخدام الصور الجوية الرأسية في عمل القياسات الدقيقة منها وذلك لعدة تطبيقات مثل الخرائط و الجيولوجيا و الغابات. ويطلق علي علم القياس من الصور الجوية مصطلح photogrammetry وهو علم قديم يتم تطبيقه منذ بداية التصوير الجوي. وعادة ما يتم تفسير الصور بطريقة بصرية من خلال شخص ذو خبرة في التفسير، كما أنها يمكن مسحها ضوئيا للحصول علي نسخة رقمية منها و من ثم تفسيرها باستخدام برامج الكمبيوتر المتخصصة.

يستخدم التصوير متعدد النطاقات multi-band photography عدد من النظم متعددة النطاقات باستخدام عدة افلام للحصول علي صور لحظية متعددة في عدة نطاقات من المجال الكهرومغناطيسي. وتكون اهم مميزات هذا النوع من الكاميرات قدرتها علي تسجيل الاشعة المنعكسة بصورة منفصلة في نطاقات متعددة من اطوال الموجات، مما يسمح بتمييز افضل بين الاهداف المختلفة. أما الكاميرات الرقمية digital cameras التي تسجل الطاقة المنعكسة الكترونيا فتختلف بصورة كبيرة عن تلك الكاميرات التي تستخدم الافلام. فبدلا من الافلام فان هذه الكاميرات تستخدم مصفوفة مدرجة مغطاة بالسيليكون gridded array of silicon coated او ما يعرف باسم الاجهزة ثنائية الشحن charge-coupled devices (اختصارا CCD) والتي تستجيب بصورة منفصلة للإشعاع الكهرومغناطيسي. فالطاقة التي تصل الي سطح أجهزة CCD تسبب توليد شحنة كهربائية يتناسب مع درجة اللمعان للمنطقة الأرضية. ويتم تحديد رقم لكل نطاق في كل خلية أو بكسل بناءا علي هذه الشحنة الكهربائية. ومن ثم فأن هذه الصيغة الرقمية للمرئية الناتجة يمكن التعامل معها و تفسيرها باستخدام برامج الكمبيوتر. وعادة ما تكون الصور الرقمية لها درجة وضوح مكانية في حدود ٠.٣ متر و درجة وضوح طيفية ما بين ٠.٠١٢ و ٠.٣ ملليمتر، وعادة ما يتراوح عرض مصفوفة الخلايا size of pixel arrays بين ٥١٢×٥١٢ و ٢٠٤٨×٢٠٤٨.

٢٥-٨ المسح متعدد الأطياف

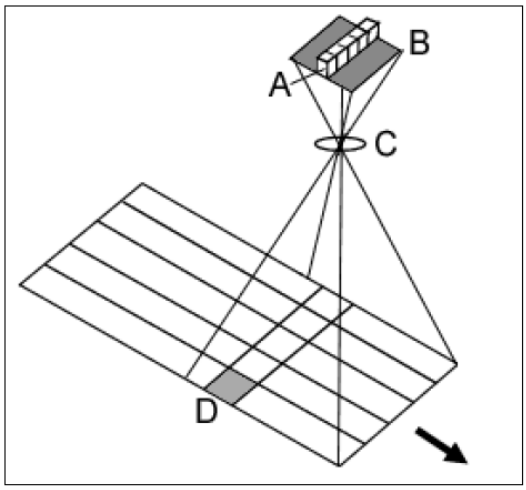
تقوم عدة نظم استشعار عن بعد بتجميع البيانات باستخدام نظم المسح scanning systems التي تستخدم مستشعر له مجال رؤية ضيق IFOV يمسح سطح الأرض لبناء مرئية ثنائية الأبعاد. ويمكن استخدام نظم المسح سواء من الطائرة أو من القمر الصناعي. ونظام المسح الذي يسمح بتجميع البيانات في عدة نطاقات من الطاقة يطلق عليه اسم "ماسح متعدد النطاقات multi-spectral scanner" أو اختصارا MSS، وهذا هو النوع الأكثر شيوعا من نظم المسح. ويوجد نوعين أو طريقتين للمسح في الماسحات متعددة النطاقات: المسح ضد المسار across-track scanning والمسح عبر المسار along-track scanning.

تقوم ماسحات ضد المسار بمسح الأرض في عدة خطوط تكون موجهة عموديا علي اتجاه حركة منصة الاستشعار (أي عمودية علي اتجاه مسار القمر الصناعي). وكل خط يتم مسحه بالتأرجح sweep من أحد جانبي المستشعر الي الجانب الاخر باستخدام مرآه متحركة rotating mirror (A)، وكلما تقدم القمر للأمام تتم عمليات مسح متعاقبة لبناء مرئية ثنائية الابعاد لسطح الارض. ويتم فصل الطاقة المنعكسة أو المنبعثة الي عدة مكونات كهرومغناطيسية بحيث يتم تحسس كلا منها بصورة مستقلة. وتوجد متحسسات داخلية internal detectors (B) كلا منها حساس لنطاق محدد من اطوال الموجات بحيث يقوم كلا متحسس بقياس الطاقة لنطاق معين من النطاقات وتحويل هذه الطاقة الي بيانات رقمية يقوم بتخزينها. ويحدد مجال الرؤية IFOV للمستشعر (C) وارتفاع منصة الاستشعار قيمة الدقة المكانية للخلية الأرضية التي يتم استشعارها (D). أما المجال الزاوي للرؤية angular field of view (E) فهو قيمة تأرجح المرآه بالدرجات المستخدمة في مسح خط، ومن ثم فهو يحدد عرض مسار التحسس swath علي الأرض (F). فالماسحات في الطائرات عادة ما تستطيع التأرجح لزوايا كبيرة (بين ٩٠ و ١٢٠ درجة) بينما ماسحات الأقمار الصناعية وبسبب ارتفاعاتها العالية فلا يمكنها التأرجح الا لزوايا صغيرة (ما بين ١٠ و ٢٠ درجة). وحيث أن المسافة ما بين المستشعر والهدف تزيد في حواف مسار الاستشعار فأن درجة الوضوح المكانية (حجم الخلية) يصبح أكبر أيضا مما يتسبب في حدوث تشوه هندسي geometric distortion في المرئية. أيضا وحيث أن زمن مجال الرؤية للخلية الواحدة (يسمي زمن الكمون dwell time) يكون قصيرا جدا فأنه يكون مؤثرا في تحديد درجات الوضوح المكانية و الراديومترية و الطيفية للمستشعر.



شكل (٢٥-١٩) المسح بطريقة ضد المسار

تقوم ماسحات عبر المسار along-track scanners باستخدام الحركة الامامية للمستشعر لتسجيل خطوط مسح متعاقبة وبناء المرئية ثنائية الأبعاد عموديا علي اتجاه الطيران. لكن و بدلا من استخدام مرآة المسح المتأرجحة فأن هذه الماسحات تستخدم مجموعة خطية من المتحسسات a linear array of detectors (A) موضوعة علي المستوي البؤري focal plane للمرئية (B) الذي يكونه نظام العدسات lens system (C) والذي يتحرك في نفس اتجاه حركة المسار (أي عبر المسار). ويقوم كل متحسس بقياس الطاقة لخلية أرضية محددة (D)، وبالتالي فأن حجم المتحسس و مجال الرؤية IFOV يحددان درجة الوضوح المكانية للنظام. وبالطبع فهناك حاجة لعدة مجموعات خطية من المتحسسات حتى يمكن قياس عدة نطاقات من الطاقة الكهرومغناطيسية. وبالتالي فأن الطاقة المستشعرة من كل متحسس في كل مجموعة خطية يتم تسجيلها رقميا لبناء المرئية المطلوبة.



شكل (٢٥-٢٠) المسح بطريقة عبر المسار

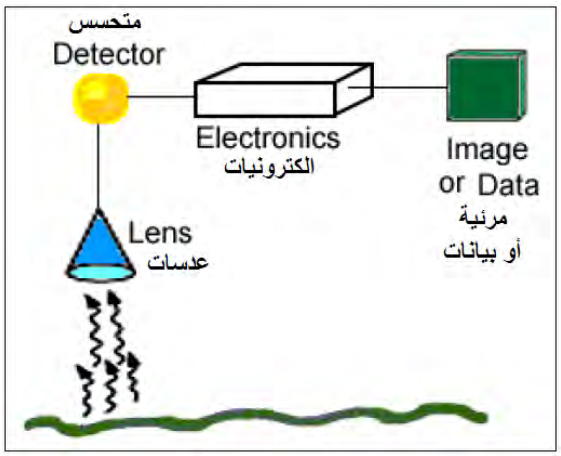
وللماسحات عبر المسار عدة مميزات عن الماسحات ضد المسار، فوجود مجموعات من المتحسسات يسمح بان يقوم كللا منهم باستشعار الطاقة لكل خلية ارضية في فترة زمنية اطول (زمن الكمون) وهذا يزيد من كمية الطاقة المستشعرة وأيضا من درجة الوضوح الراديومترية. كما أن زمن الكمون الأطول يسهل مجال الرؤية IFOV أصغر ومن ثم يحسن كثيرا من درجة الوضوح المكانية ودرجة الوضوح الطيفية. وحيث أن المتحسسات تكون أجهزة الكترونية فهي عادة ما تكون أصغر حجما و أخف وزنا و أقل استهلاكا للطاقة، وبالتالي فهي أكثر كفاءة ولها عمر افتراضي أطول حيث أنها لا تتكون من أية أجزاء متحركة (مثل مرآة التأرجح).

في كل الأحوال (بطريقة التحسس ضد المسار أو عبر المسار) فأن نظم المسح scanning systems تتفوق علي نظم التصوير photographic systems. فالمجال الطيفي لنظم التصوير مقصور فقط علي الضوء المرئي و الأشعة تحت الحمراء القريبة، بينما الماسحات متعددة النطاقات MSS تستطيع زيادة هذا المجال الي الاشعة تحت الحمراء الحرارية. كما أن لها درجات وضوح طيفية أكبر من نظم التصوير. أيضا فأن نظم المسح تقوم بتسجيل الطاقة الكترونيا مما يسمح بقياس و تسجيل هذه الطاقة بدقة عالية. وتتطلب نظم التصوير الامداد المستمر بالأفلام و

تحتاج لعمليات معالجة الأفلام علي الأرض بعد التقاط الصور، بينما التسجيل الالكتروني لنظم المسح يسهل من ارسال البيانات الي محطات الاستقبال والمعالجة الفورية لها علي الكمبيوتر.

٢٥-٩ التصوير الحراري

توجد عدة مستشعرات متعددة النطاقات MSS يمكنها تحسس الاشعة تحت الحمراء الحرارية thermal infrared بالإضافة لنطاقات الضوء المرئي و الاشعة تحت الحمراء القريبة. لكن استشعار الطاقة المنبعثة من الأرض في نطاق الاشعة تحت الحمراء الحرارية (بين ٣ و ١٥ مايكرومتر) يختلف عن استشعار الاشعة المنعكسة. فالمستشعرات الحرارية thermal sensors تستخدم متحسسات ضوئية تكون حساسة للتفاعل المباشر مع الوحدات الضوئية (الفوتونات photons) الموجودة علي سطحها ومن ثم يمكنها قياس الاشعاع الحراري المنبعث. ويتم تبريد هذه المتحسسات في درجة حرارة تقترب من الصفر المطلق حتى يمكن تقليل الانبعاث الحراري الداخلي لها. وبصفة اساسية فان المستشعرات الحرارية تقيس درجة حرارة السطح و الخصائص الحرارية للأهداف.



شكل (٢٥-٢١) الاستشعار الحراري

عادة ما تكون المرئيات الحرارية مستشعرة باستخدام ماسحات ضد المسار تقوم بتحسس الاشعاع المنبعث فقط في النطاق الحراري من الطاقة الكهرومغناطيسية. وتستخدم المستشعرات الحرارية واحد او اكثر من المراجع الحرارية الداخلية internal temperature references حتى يمكنها مقارنة الاشعاع المستشعر وتحديد الحرارة المستشعرة المطلقة. وعادة ما يتم تسجيل البيانات علي أفلام او شرائط ممغنطة، وتكون درجة الوضوح الحرارية temperature resolution في حدود درجة مئوية واحدة. وللتحليل فيتم اظهار المرئية الحرارية النسبية (تسمي thermogram) بدرجات اللون الرمادي حيث تظهر الحرارة الدافئة بلون فاتح و تظهر الحرارة الباردة بلون داكن. وعادة ما يتم استخدام هذه المرئيات الحرارية النسبية في تطبيقات الاستشعار عن بعد. اما قياسات الحرارة المطلقة فيمكن حسابها لكنها تحتاج لمعايرة دقيقة للمراجع الحرارية الداخلية وأيضا لمعلومات تفصيلية عن الخصائص الحرارية للأهداف الارضية بالإضافة لتصحيح كلا من التشوه الهندسي و التأثيرات الراديومترية للمرئية.

شكل (٢٥-٢٢) مرئية حرارية

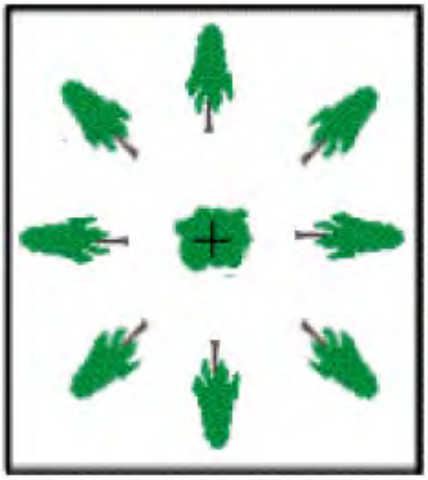
حيث ان نطاق الاشعة تحت الحمراء الحرارية كبير نسبيا (بالمقارنة بنطاق الضوء المرئي) فان تأثير التشتت في الغلاف الجوي يكون قليلا لهذه الاشعة. لكن علي الجانب الاخر فأن الامتصاص يؤثر بقوة علي نطاقين الاول من ٣ -٥ مايكرومتر و الثاني من ٨-١٤ مايكرومتر. وبما أن الطاقة تنخفض كلما زاد طول الموجة فان المستشعرات الحرارية عادة ما يكون لها مجال رؤية IFOV كبير وذلك لضمان وصول كمية كافية من الطاقة الي المتحسس. وبالتالي فان درجة الوضوح المكانية للمستشعرات الحرارية غالبة ما تكون خشنة بالمقارنة لدرجة وضوح المرئيات في نطاق الضوء المرئي و نطاق الاشعة الحمراء اللقريبة. ويمكن الحصول علي المرئيات الحرارية نهارا او ليلا (بسبب ان الاشعاع منبعث و ليس منعكس) وتستخدم لعدة انواع من التطبيقات في الاستكشاف العسكري و المخابراتي و ادارة الكوارث (مثل متابعة حرائق الغابات) ومراقبة فقدان الحرارة.

٢٥-١٠ التشوه الهندسي في المرئيات

يتعرض أي نوع من المرئيات (سواء نظم التصوير من الطائرات او نظم المسح متعدد النطاقات من الاقمار الصناعية) الي عدة تشوهات هندسية geometric distortions. وهذه التشوهات موجودة في اي نظام استشعار عن بعد حيث اننا نحاول تمثيل سطح الارض المجسمة ثلاثية الأبعاد من خلال مرئية ثنائية الأبعاد. وهذه الأخطاء قد تكون بسبب عدة عوامل تشمل علي سبيل المثال:

- منظور بصريات المستشعر perspective of sensor optics
- حركة نظام المسح motion of scanning systems
- حركة و عدم ثبات المنصة motion and instability of platform
- دائرة عرض و ارتفاع و سرعة المنصة latitude, altitude, and velocity of platform
- تغير تضاريس سطح الارض terrain relief
- تكور و دوران الأرض curvature and rotation of the Earth

تقدم النظم الاطارية framing systems (مثل الكاميرات في التصوير الجوي) لقطة snapshot لحظية لسطح الأرض أسفل الكاميرا، ومن ثم فأن التشوه الهندسي الاساسي هنا سيكون بسبب ازاحة التضاريس relief displacement. فالأهداف الموجودة تحت مركز الكاميرا مباشرة (أي عند نقطة النديرِ) سيمكن رؤية قمتها فقط، بينما الأهداف الأخرى سيظهر علي الصورة قمتها و جزء من جوانبها. وعندما يكون الهدف طويلا أو بعيدا جدا عن مركز الصورة سيكون التشوه المكاني له كبيرا.



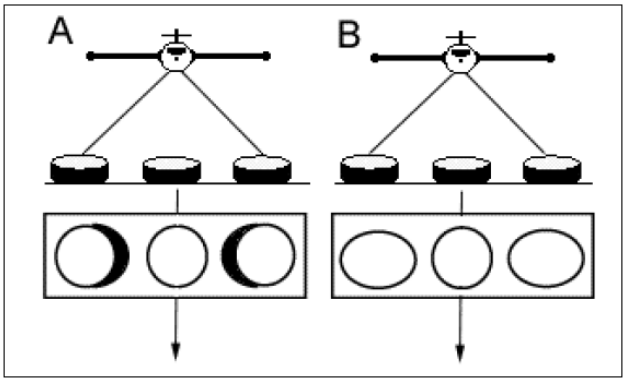
شكل (٢٥-٢٣) التشوه الهندسي في الصور الجوية

ان البناء الهندسي لماسحات عبر المسار مشابه لبناء الصور الجوية/ حيث أن كل متحسس في كل خط يأخذ لقطة snapshot للخلية الأرضية المستشعرة. وتكون التغيرات الهندسي بين الخطوط بسبب التغير في ارتفاع و دائرة عرض المنصة علي مسار الطيران.

أما نظم المسح ضد المسار فيكون بها نوعين من التشوهات الهندسية، أولهما الازاحة التضاريسية (A) المشابه للتصوير الجوي لكن في اتجاه واحد فقط وهو الموازي لاتجاه المسح. وهنا لا يكون هناك اي تشوه مباشرة تحت المستشعر (عند نقطة النديرِ). وكلما تم التحسس بعيدا عن نقطة النديرِ كلما ظهر التشوه او الازاحة والتي تزيد باتجاه اطراف مسار التحسس. أما النوع الثاني من التشوه (B) فيحدث نتيجة دوران بصريات الماسح scanning optics. فكلما تم تحسس ضد (عمودي علي) المسار كلما زادت المسافة بين المستشعر و الهدف الارضي. ومع أن مرآة التحسس تدور بسرعة ثابتة، الا أن مجال الرؤية IFOV للمستشعر سيتحرك بسرعة (بالمقارنة بالأرض) ويستشعر منطقة أكبر كلما كان قريبا من الأطراف. ويؤدي هذا التأثير الي ضغط صورة الاهداف البعيدة عن نقطة النديرِ، وهذا ما يسمي تشوه مقياس المماس tangential scale distortion. كما ان كل المرئيات تخضع لتشوهات هندسية بسبب التغيرات في ثبات المنصة والذي يشمل تغير سرعتها و ارتفاعها اثناء التحسس او الاستشعار. وهذه التأثيرات مؤثرة عند استخدام الطائرات كمنصات للاستشعار إلا انها اقل تأثيرا بدرجة كبيرة مع منصات الاقمار الصناعية التي يكون لها مدارات اكثر ثباتا. لكن وعلي الجانب الاخر فان حركة دوران الارض ناحية الشرق تتسبب في ان تأرجح نظم المسح سيغطي منطقة الي الغرب قليلا من الخط السابق. ومن ثم فأن المرئية الناتجة

ستكون منحرفة skewed وهو ما يعرف بالتشوه الانحرافي skew distortion والذي يكون شائعا في مرئيات الماسحات متعددة النطاقات.

مع أن مصادر التشوه الهندسي تختلف من حالة لآخري و من نظام استشعار لآخر ألا أنها موجودة في مرئيات الاستشعار عن بعد. وفي معظم الحالات يمكننا ازالة ا، تقليل هذه الأخطاء بدرجة كبيرة إلا أن هذه الحقيقة يجب وضعها في الاعتبار قبل أية محاولات للقياس أو استنباط أية معلومات من المرئيات.

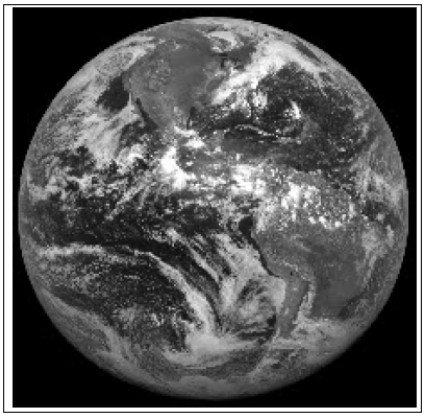


شكل (٢٥-٢٤) التشوهات الهندسية في المرئيات

حيث أننا انتهينا الان من استعراض الخصائص العامة للمستشعرات و الأقمار الصناعية فسنتحدث في الأجزاء القادمة عن أنواع محددة من المستشعرات (باستخدام الأقمار الصناعية) التي تعمل في نطاق الضوء المرئي و الاشعة تحت الحمراء القريبة.

٢٥-١١ أقمار و مستشعرات الطقس

تعد أقمار مراقبة الطقس واحدة من أوليات الأقمار الصناعية المدنية في الاستشعار عن بعد حيث تم اطلاق أول قمر للطقس (قمر TIROS-1) في عام ١٩٦٠ بواسطة الولايات المتحدة الامريكية. وفي خلال الخمس سنوات التالية تم اطلاق عدد من هذه الأقمار في مدارات شبه قطبية near-polar orbits تقدم تغطية عالمية كاملة لنماذج الطقس. وقدمت وكالة الفضاء الأمريكية (المعروفة اختصارا باسم ناسا NASA) في عام ١٩٦٦ أول مرئية تغطي نصف الكرة الأرضية تبين توزيع السحب كل نصف ساعة. والآن توجد عدة دول تدير نظم أقمار صناعية لمراقبة و متابعة الظروف المناخية حول العالم. وبصفة عامة فأن هذه الأقمار تستخدم مستشعرات لها دقة وضوح مكانية قليلة أو خشنة (بالمقارنة بأقمار رصد الأرض) وتقدم تغطية مكانية كبيرة. أما درجة وضوحها الزمنية/المؤقتة فتكون عالية حتى يمكنها تقديم أرصاد متكررة لسطح الأرض والرطوبة و غطاء السحب مما يسمح بمراقبة شبة مستمرة للظروف المناخية العالمية ومن ثم امكانية التنبؤ. وسنستعرض الان بعضا من هذه التطبيقات المترولوجية.



شكل (٢٥-٢٥) التطبيقات المناخية ومراقبة الطقس

أقمار GOES:

تم تصميم القمر GOES (أو القمر البيئي العامل الثابت Geostationary Operational Environmental Satellite) بواسطة وكالة الفضاء الأمريكية - ناسا - ليقدم مرئيات متكررة صغيرة المقياس لسطح الأرض و غطاء السحب. وتم استخدام أجيال هذا القمر الصناعي علي مدار ٢٠ عاما في مراقبة الطقس و التنبؤ به. وهذه الأقمار الصناعية جزءا من منظومة أو شبكة عالمية من أقمار الطقس تتباعد بقيمة تقريبية ٧٠ درجة في خطوط الطول حول الأرض ليمكنها تغطية شبه كاملة للأرض. ويوجد قمرين GOES موضوعين في مدارات ثابتة مع الأرض geostationary علي ارتفاع ٣٦٠٠٠ كيلومتر بحيث أن كلا منهما يري تقريبا ثلث الأرض. وأحد هذين القمرين موضوع عند خط طول ٧٥ درجة غرب ليراقب الأمريكيتين الشمالية و الجنوبية وجزء كبير من المحيط الأطلنطي، بينما القمر الاخر موضوع عند خط طول ١٣٥ درجة غرب ليراقب أمريكا الشمالية و المحيط الهادي. ومن ثم فهما معا يغطيان المنطقة من خط طول ٢٠ غربا الي خط طول ١٦٥ غربا. والصورة التالية توضح مرئية GOES تظهر الاعصار الذي حدث بالجنوب الشرقي من الولايات المتحدة في سبتمبر ١٩٩٦.

شكل (٢٥-٢٦) تطبيقات القمر الصناعي GOES لمراقبة الطقس

تم اطلاق جيلين من أقمار GOES وكلاهما يقيس الاشعاع المنبعث و المنعكس ومنه يمكن استنباط درجة حرارة الغلاف الجوي و الرياح و الرطوبة و غطاء السحب. يتكون الجيل الأول من GOES-1 الذي تم اطلاقه في ١٩٧٥ وحتى GOES-7 المطلق في ١٩٩٢. أما الجيل الثاني فبدأ مع GOES-8 في ١٩٩٤ وكان له مميزات متقدمة عديدة، مثل الرصد شبه المستمر لسطح الأرض مما يسمح بالحصول علي المرئيات كل ١٥ دقيقة، بالإضافة لتحسن كبير في كلا من درجة الوضوح المكانية و الراديومترية. ويقيس المستشعر من خلال ٥ قنوات الاشعاع المنعكس و المنبعث في نطاق الضوء المرئي و نطاق الاشعة تحت الحمراء القريبة باستخدام درجة وضوح راديومترية ١٠ بت، كما في الجدول التالي:

خصائص مرئيات أقمار الطقس GOES

النطاق	طول الموجة (مايكرومتر)	الوضوح المكاني (كم)	الاستخدام
١	٠.٥٢ - ٠.٧٢ النطاق المرئي	١	السحب، التلوث، العواصف
٢	٣.٧٨ - ٤.٠٣ الاشعة تحت الحمراء القصيرة	٤	الضباب أثناء الليل، سحب المياه و الثلوج أثناء النهار، الحرائق والبراكين، درجة حرارة سطح البحر ليلا
٣	٦.٤٧ - ٧.٠٢ المستوي العالي لبخار الماء	٤	المناطق متوسطة الرطوبة، مراقبة حركة المستوي المتوسط من الغلاف الجوي
٤	١٠.٢ - ١١.٢ الاشعة تحت الحمراء الطويلة	٤	الرياح، العواصف القوية، المطر الغزير
٥	١١.٥ - ١٢.٥ نطاق الاشعة تحت الحمراء الحساسة لبخار الماء	٤	الرطوبة منخفضة المستوي، درجة حرارة سطح البحر، التراب المحمول جوا والرماد البركاني

و بالإضافة لقنوات المرئيات imaging channels يوجد أيضا ١٩ قناة أخري sounding channels تقوم بقياس الاشعاع المنبعث في ١٨ نطاق من الاشعة تحت الحمراء الحرارية و نطاق واحد من الاشعاع المنعكس في النطاق المرئي، وذلك بدرجة وضوح مكاني ٨ كيلومترات و درجة وضوح راديومترية ١٣ بت. وتستخدم هذه البيانات في تحديد درجات الحرارة السطحية و درجات حرارة السحب العليا ونماذج الرطوبة متعددة المستويات في الغلاف الجوي بالإضافة لتحليل توزيع الأوزون.

أقمار NOAA AVHRR

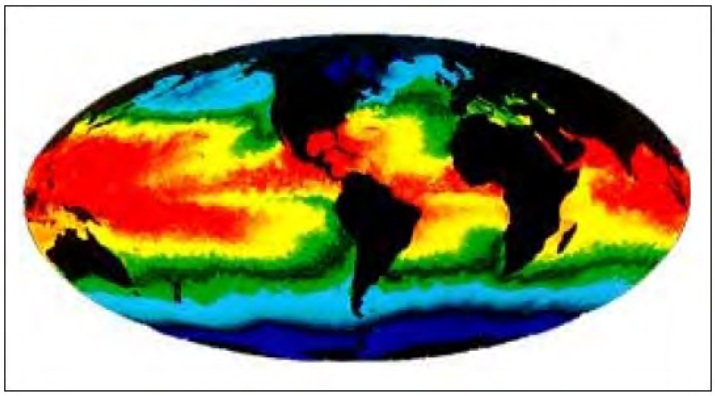
تتبني وكالة الفضاء الأمريكية عدة نظم أخري من الأقمار الصناعية المخصصة للتطبيقات المناخية تسمح بالحصول علي تغطية كاملة للأرض وفي فترات مستمرة لا تتجاوز ٦ ساعات لأي بقعة في العالم. والمستشعر الرئيسي الموجود في هذه الأقمار يسمي الراديومتر المتقدم عالي الدقة جدا

Advanced Very High Resolution Radiometer أو اختصارا AVHRR. ويستشعر هذا المستشعر الاشعاع في النطاق المرئي و الاشعة تحت الحمراء القريبة و المتوسطة والحرارية من خلال مسار يبلغ عرضه ٣٠٠٠ كيلومتر كما في الجدول التالي:

خصائص مرئيات أقمار الطقس NOAA AVHRR

النطاق	طول الموجة (مايكرومتر)	الوضوح المكاني (كم)	الاستخدام
١	٠.٥٨ - ٠.٦٨	١.١	السحب، الغيوم، الثلوج
٢	٠.٧٢٥؟ - ١.١ الاشعة تحت الحمراء القصيرة	١.١	المياه، النباتات، المسح الزراعي
٣	٣.٥٥ - ٣.٩٣ الأشعة تحت الحمراء المتوسطة	١.١	حرارة سطح البحر، البراكين، حرائق الغابات
٤	١٠.٣ - ١١.٣ الاشعة تحت الحمراء الحرارية	١.١	حرارة سطح البحر، رطوبة التربة
٥	١١.٥ - ١٢.٥ الاشعة تحت الحمراء الحرارية	١.١	حرارة سطح البحر، رطوبة التربة

ومع أن بيانات AVHRR مستخدمة علي نطاق واسع في نظم التنبؤ و التحليل للطقس، الا أنها أيضا مناسبة لتطبيقات أخري تشمل درجات حرارة سطح البحر ومراقبة النبات الطبيعي وظروف نمو المحاصيل. فعملية انشاء موزايك mosaic من مرئيات هذا القمر الصناعي لتغطي مساحات كبيرة من الأرض تسمح بعمل خرائط و اجراء التحليل صغير المقياس للغطاء النباتي.

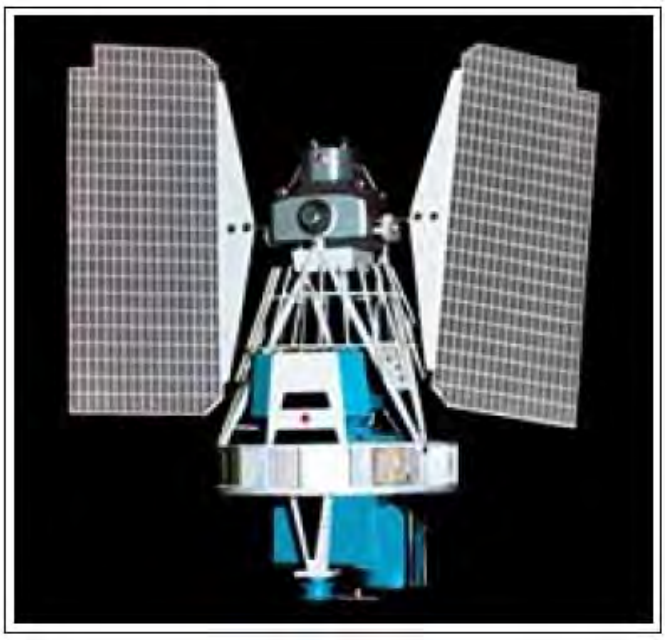


شكل (٢٥-٢٧) تطبيقات القمر الصناعي NOAA VHHRR لمراقبة حرارة سطح البحار

٢٥-١٢ أقمار و مستشعرات أرصاد الأرض

أقمار لاندسات:

أطلقت ناسا أول قمر صناعي للاستشعار عن بعد مصمم ومخصص لدراسة و مراقبة سطح الأرض في عام ١٩٧٢ وهو القمر الصناعي لاندسات Landsat-1 (كان اسمه الأولي هو قمر تقنية موارد الأرض Earth Resources Technology Satellite أو اختصارا ERTS-1). وتم تصميم لاندسات كقمر تجريبي لدراسة امكانية تجميع بيانات متعددة النطاقات لسطح الأرض من خلال الأقمار الصناعية. ومنذ ذلك الحين فقد تمكن هذا البرنامج الناجح في تجميع كم هائل من البيانات حول العالم باستخدام عدة أقمار صناعية. وفي عام ١٩٨٣ انتقلت مسئولية ادارة برنامج لاندسات من ناسا الي الهيئة الامريكية للطقس و المحيطات NOAA، وفي عام ١٩٨٥ تحول البرنامج الي برنامج تجاري يسمح بتقديم البيانات للمستخدمين المدنيين. وكل أقمار لاندسات موضوعة في مدارات شبه قطبية متزامنة مع الشمس near-polar sun-synchronous orbits وكانت الأقمار الثلاثة الاولي علي ارتفاع ٩٠٠ كيلومتر بينما باقي الأقمار التالية علي ارتفاع ٧٠٠ كيلومتر مما يسمح بفترة اعادة زيارة تبلغ ١٦ يوم.



شكل (٢٥-٢٨) أحد الأجيال الأولي لأقمار لاندسات

توجد عدة مستشعرات علي متن أقمار لاندسات وتشمل نظم كاميرات تسمي BRV ونظم ماسحات متعددة الأطياف MSS والماسح الموضوعي Thematic Mapper أو TM. وكل مستشعر يجمع بيانات علي مسار يبلغ عرضه ١٨٥ كيلومتر، أي أن عرض المرئية الواحدة يبلغ ١٨٥×١٨٥ كيلومتر. ويقوم الماسح متعدد الأطياف بتحسس الأهداف في أربعة نطاقات طيفية ولكلا منهم درجة وضوح مكانية تقريبا ٦٠×٨٠ متر ودرجة وضوح راديومترية ٦ بت (أي ٦٤

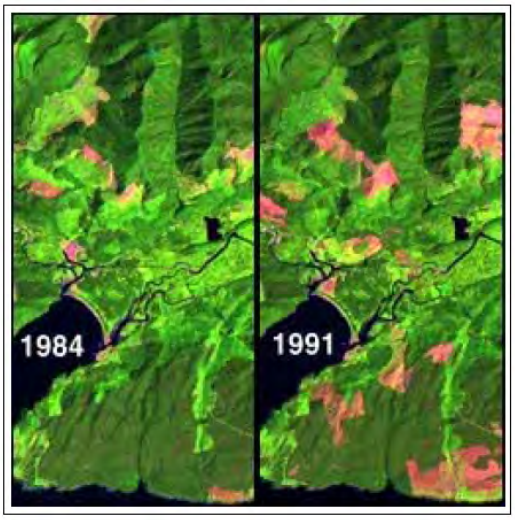
رقم). وبدءا من عام ١٩٩٢ تم ايقاف العامل بالماسح المتعدد MSS وإحلاله بالمساح الموضوعي TM بدءا من القمر لاندسات ٤. وقد زاد عدد المتحسسات لكل نطاق فأصبح ١٦ متحسسا (بدلا من ٦ متحسسات فقط في مستشعرات MSS). وباستخدام المرآة المتأرجحة فقد أصبح هناك ١٦ خط تحسس يمكن تجميعهم بالتبادل للنطاق غير الحراري (٤ خطوط للنطاق الحراري). وبالتالي فقد زاد زمن الكمون dwell time وتحسن الوضوح الهندسي و الراديومتري للبيانات. وتبلغ درجة الوضوح المكانية للماسح الموضوعي ٣٠ متر (١٢٠ متر لنطاق الاشعة تحت الحمراء الحرارية)، وتبلغ درجة الوضوح الراديومترية لكل النطاقات ٨ بت (أي ٢٥٦ رقم). وتستخدم بيانات كلا المستشعرين TM و MSS في عدد كبير من تطبيقات الاستشعار عن بعد والتي تشمل ادارة الموارد و الخرائط و مراقبة البيئة و اكتشاف التغيرات.

نطاقات المستشعر MSS في أقمار لاندسات

القناة		طول الموجة (مايكرومتر)
لاندسات ١، ٢، ٣	لاندسات ٤، ٥	
MSS 4	MSS 1	٠.٥ - ٠.٦ (أخضر)
MSS 5	MSS 2	٠.٦ - ٠.٧ (أحمر)
MSS 6	MSS 3	٠.٧ - ٠.٨ (تحت الحمراء القريبة)
MSS 7	MSS 4	٠.٨ - ١.١ (تحت الحمراء القريبة)

نطاقات المستشعر TM في أقمار لاندسات

القناة	طول الموجة (مايكرومتر)	الاستخدام
TM 1	٠.٤٥ - ٠.٥٢ أزرق	التمييز بين التربة و النباتات، رسم خطوط الشواطئ، تحديد الأهداف العمرانية
TM 2	٠.٥٢ - ٠.٦٠ أخضر	خرائط النبات الأخضر(قمة الانعكاس)، تحديد الأهداف العمرانية
TM 3	٠.٦٣ - ٠.٦٩ أحمر	التمييز بين النباتات و غير النباتات حتي وان كانت خضراء اللون، تحديد الأهداف العمرانية
TM 4	٠.٧٦ - ٠.٩٠ تحت حمراء قريبة	تحديد أنواع و صحة و محتوي النباتات، رطوبة التربة
TM 5	١.٥٥ - ١.٧٥ تحت حمراء قصيرة	رطوبة التربة ورطوبة النبات، التمييز بين المناطق المغطاة بالسحب و المغطاة بالثلوج
TM 6	١٠.٤ - ١٢.٥ تحت حمراء حرارية	رطوبة التربة وعمل الخرائط الحرارية
TM 7	٢.٠٨ - ٢.٣٥ تحت حمراء قصيرة	التمييز بين أنواع الصخور والمعادن، محتوي الرطوبة في التربة



شكل (٢٥-٢٩) مراقبة التغيرات أحد تطبيقات مرئيات لاندسات

يعد لاندسات-٨ أحدث أقمار سلسلة لاندسات وتم اطلاقه في ١١ فبراير ٢٠١٣، وهو يمسح الأرض كاملة كل ١٦ يوم، وتسمح هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية USGS بالتحميل المجاني لمرئياته بعد ٢٤ ساعة وذلك من الرابط:

http://landsatlook.usgs.gov/

أو من الرابط:

http://earthexplorer.usgs.gov/

كما تم اضافة مستشعرات جديدة في لاندسات-٨ منهم مستشعر مصور الأرض الفعال Operational Land Imager (اختصارا OLI) و مستشعر الاشعة تحت الحمراء الحرارية Thermal Infrared Sensor (اختصارا TIRS):

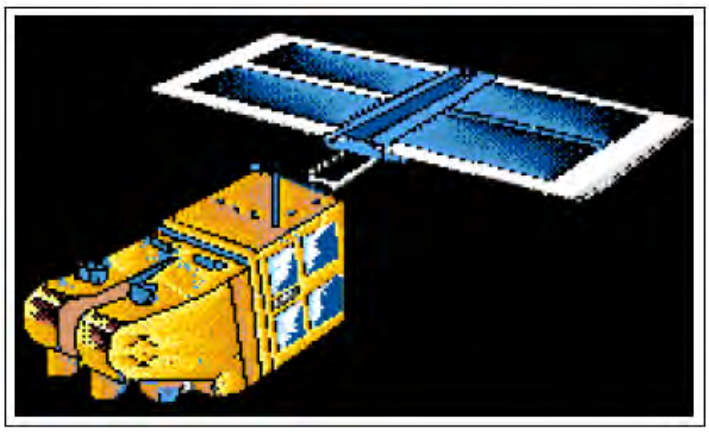
شكل (٢٥-٣٠) قمر لاندسات-٨

نطاقات المستشعرات الجديدة في قمر لاندسات-٨

النطاق	طول الموجة (مايكرومتر)	الدقة المكانية (متر)
Band 1 ضباب الشواطئ	٠.٤٣ - ٠.٤٥	٣٠
Band 2 الأزرق	٠.٤٥ - ٠.٥١	٣٠
Band 3 الأخضر	٠.٥٣ - ٠.٥٩	٣٠
Band 4 الأحمر	٠.٦٤ - ٠.٦٧	٣٠
Band 5 تحت الحمراء القريبة	٠.٨٥ - ٠.٨٨	٣٠
Band 6 تحت الحمراء القصيرة ١	١.٥٧ - ١.٦٥	٣٠
Band 7 تحت الحمراء القصيرة ٢	٢.١١ - ٢.٢٩	٣٠
Band 8 البانكروماتي	٠.٥٠ - ٠.٦٨	١٥
Band 9 السحاب الرقيق	١.٣٦ - ١.٣٨	٣٠
Band 10 تحت الحمراء الحرارية ١	١٠.٦٠ - ١١.١٩	١٠٠ ثم يعاد معالجتها لتصبح ٣٠
Band 11 تحت الحمراء الحرارية ٢	١١.٥٠ - ١٢.٥١	١٠٠ ثم يعاد معالجتها لتصبح ٣٠

أقمار سبوت:

تعد سلسلة أقمار سبوت SPOT (اختصار الاسم الفرنسي Systeme Pour l'Observation del la Terre) من نظم الأقمار الصناعية المخصصة للاستشعار عن بعد والمصممة والمطلقة بواسطة المركز الوطني لنظم الأرض بفرنسا وبدعم من كلا من السويد و بلجيكا. تم اطلاق سبوت-١ في عام ١٩٨٦ مع احلاله باستمرار بقمر اخر كل ٣-٤ سنوات. وجميع الأقمار في مدارات شبه قطبية ومتزامنة مع الشمس علي ارتفاع ٨٣٠ كيلومتر من سطح الأرض، مما يسمح بفترة اعادة الزيارة كل ٢٦ يوم.



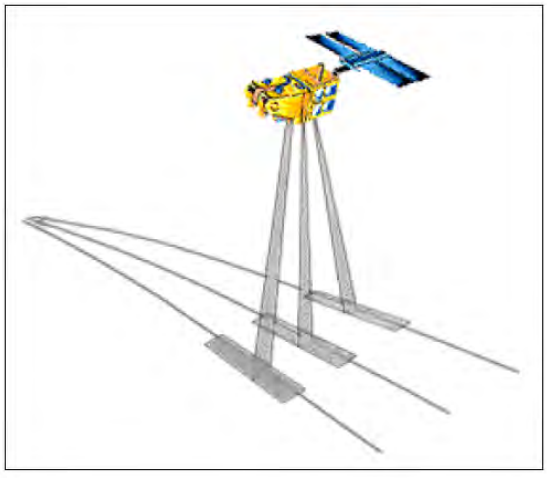
شكل (٢٥-٣١) أحد أقمار سبوت

لأقمار سبوت نظامين من نوع النظام المرئي عالي الدقة High Resolution Visible (أو اختصارا HRV) للحصول علي للمرئيات، وكلا منهما قادر علي التحسس بطريقة القناة الأحادية (البانكروماتية) و طريقة تعدد النطاقات في ثلاثة قنوات. وكل مستشعر مع-المسار يتكون من ٤ مصفوفات خطية من المحددات: صف من ٦٠٠٠ عنصر للطريقة البانكروماتية تستطيع تحسس درجة وضوح مكانية ١٠ متر، صف من ٣٠٠٠ عنصر لكل نطاق من النطاقات المتعددة تستطيع تحسس درجة وضوح مكانية ٢٠ متر. ويبلغ عرض المسار لكلا الطريقتين ٦٠ كيلومتر.

نطاقات المستشعر HRV في أقمار سبوت

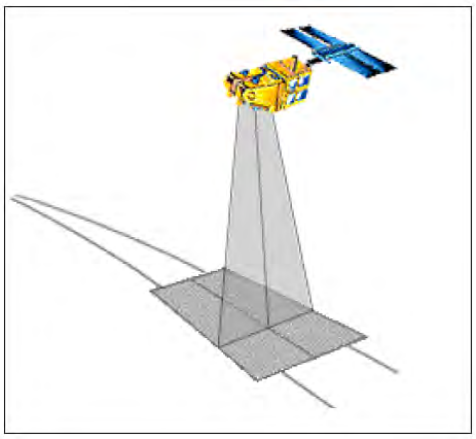
النطاق/الطريقة	طول الموجة (مايكرومتر)
الطريقة البانكروماتية PLA	٠.٥١ - ٠.٧٣ (أزرق-أخضر-أحمر)
الطريقة متعددة النطاقات MLA	
Band 1	٠.٥٠ - ٠.٥٩ (أخضر)
Band 2	٠.٦١ - ٠.٦٨ (أحمر)
Band 3	٠.٧٩ - ٠.٨٩ (تحت الحمراء القريبة)

يمكن ضبط زاوية رؤية المستشعر علي كلا جانبي المسار الرأسي للقمر الصناعي (النديز) مما يسمح برؤية أو تحسس المنطقة خارج النديز وهذا يزيد من قدرة القمر علي اعادة الزيارة. وهذه الامكانية للمستشعر لكي يتحسس ٢٧ درجة خارج النديز تسمح لأقمار سبوت بتغطية مسار يبلغ ٩٥٠ كيلومتر ومن ثم اعادة الزيارة عدة مرات أسبوعيا. وعند توجيه المستشعر خارج النديز فأن عرض المسار يتراوح بين ٦٠ و ٨٠ كيلومتر، وهذا يسمح بمراقبة مناطق محددة و يزيد أيضا من امكانية الحصول علي مرئيات خالية من السحب cloud-free scenes، بالإضافة لإمكانية الحصول علي مرئيات متداخلة أو استريوسكوبية حيث أن الحصول علي مرئيتين لنفس المنطقة من زاويتين مختلفتين يمكننا من اجراء التحليل ثلاثي الأبعاد لتضاريس سطح الأرض.



شكل (٢٥-٣٢) مسارات أقمار سبوت

تزيد هذه الرؤية المائلة من تردد زيارة المناطق الاستوائية الي ثلاثة أيام (٧ مرات خلال الدورة الكاملة البالغة ٢٦ يوم)، بينما المناطق الواقعة علي دائرة عرض ٤٥ درجة يمكن رؤيتها بتردد أكبر يبلغ ١١ مرة كل ٢٦ يوم (نتيجة تقارب مسارات القمر ناحية القطب). وعند توجيه المستشعر ليغطي مسارات أرضية متجاورة فيمكن رؤية مسار يبلغ عرضه ١١٧ كيلومتر (مع تداخل ٣ كيلومترات بين كل مسارين متتاليين). وفي هذه الطريقة فيمكن تجميع البيانات اما في النطاق البانكروماتي أو في النطاق المتعدد وليس في كلاهما في نفس الوقت.



شكل (٢٥-٣٣) تغير عرض المسار في أقمار سبوت

تتميز مرئيات سبوت بدرجة الوضوح المكانية الدقيقة، واستخدام النطاقات الثلاثة في الحصول علي المرئيات زائفة الألوان false-color images. كما تستخدم المرئية البانكروماتية في زيادة وضوح sharpness المرئية الملونة. وتستخدم مرئيات سبوت في التطبيقات التي تحتاج لوضوح تفصيلي مثل خرائط النمو العمراني، وأيضا لتطبيقات التي تحتاج مراقبة متكررة (مثل التطبيقات الزراعية). كما أن مرئيات سبوت الاستريسكوبية تلعب دورا هاما في تطبيقات الخرائط الطبوغرافية و عمل نماذج ارتفاعات رقمية DEM (اختصار Digital Elevation Model).

حديثا تم اطلاق القمر سبوت-٧ في ٣٠ يونيه ٢٠١٤ ليبعد ١٨٠ درجة في نفس المدار مع القمر سبوت-٦ (الذي تم اطلاقه في ٢٠١٢) ليغطيان معا منطقة تبلغ ستة ملايين كيلومتر مربعا في اليوم بحيث تكون فترة إعادة الزيارة الي يوم واحد. وتبلغ قدرة الوضوح المكانية لكلاهما ١.٥ متر للنطاق البانكروماتي (مناسبة لإنتاج الخرائط بمقياس رسم ١:٢٥٠٠٠) و ٦.٠ أمتار للنطاقات الأربعة المتعددة (الأزرق و الأخضر و الأحمر وتحت الحمراء القريبة)، و يبلغ عرض المسار ٦٠ كيلومتر عند النديد.

شكل (٢٥-٣٤) قمر سبوت-٧

شكل (٢٥-٣٥) مرئية سبوت-٧ لمدينة سيدني الاسترالية في ٣ يوليه ٢٠١٤

أقمار IRS

تدمج مجموعة الأقمار الهندية للاستشعار عن بعد Indian Remote Sensing (أو اختصارا IRS التي بدأ اطلاق أول أقمارها في ١٩٨٨) مميزات من كلا من أقمار لاندسات و أقمار سبوت. القمر الرابع من هذه المجموعة IRS-1D الذي تم اطلاقه في سبتمبر ١٩٩٧ له ثلاثة مستشعرات: كاميرا عالية الوضوح ذات نطاق واحد بانكروماتي PAN، ومستشعر متوسط الوضوح ذو أربعة قنوات LISS-III، ومستشعر متوسط الوضوح ذو قناتين لمجال رؤية كبير WiFS.

وبالإضافة لدرجة وضوحه المكانية العالية فأن المستشعر البانكروماتي في أقمار IRS يمكنه الحركة حتى ٢٦ درجة عمودي علي المسار مما يسمح بالتحسس الاستريسكوبي وتقليل فترة اعادة الزيارة (مثل القمر سبوت). وتستخدم مرئيات IRS عالية الوضوح المكاني في تطبيقات التخطيط

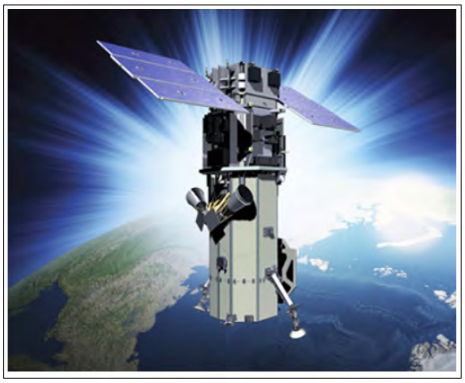
العمراني و الخرائط. أما النطاقات الأربعة للمستشعر LISS-III فهي مماثلة لنطاقات المستشعر TM في أقمار سبوت، ومن ثم فهي ممتازة لتطبيقات تمييز أنواع النباتات وخرائط الغطاء الأرضي وتخطيط الموارد الطبيعية. أما مستشعر WiFS المماثل لنطاقات مستشعر NOAA AVHRR من حيث الوضوح المكاني و التغطية فهو مناسب لتطبيقات مراقبة النباتات علي مستوي اقليمي.

خصائص مستشعرات أقمار IRS

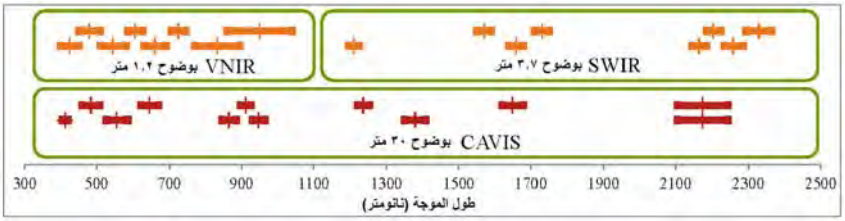
المستشعر	طول الموجة (مايكرومتر)	درجة الوضوح المكانية (م)	عرض المسار (كيلومتر)	فترة اعادة الزيارة (يوم) عند خط الاستواء
بانكروماتي **PAN**	٠.٥ - ٠.٧٥	٥.٨	٧٠	٢٤
LISS-III				
الأخضر	٠.٥٢ - ٠.٥٩	٢٣	١٤٢	٢٤
الأحمر	٠.٦٢ - ٠.٦٨	٢٣	١٤٢	٢٤
تجث الحمراء القريبة	٠.٧٧ - ٠.٨٦	٢٣	١٤٢	٢٤
تحت الحمراء القصيرة	١.٥٥ - ١.٧٠	٧٠	١٤٨	٢٤
WiFS				
الأحمر	٠.٦٢ - ٠.٦٨	١٨٨	٧٧٤	٥
تحت الحمراء القريبة	٠.٧٧ - ٠.٨٦	١٨٨	٧٧٤	٥

أقمار Worldview

يعد WorldView-3 القمر الثالث من هذه السلسة من الأقمار الصناعية التجارية من شركة Digital Globe (و أطلق في ١٣ أغسطس ٢٠١٤) من أحدث الأقمار الصناعية للاستشعار عن بعد وأفضلها من حيث الوضوح المكاني. وتصل دقة الوضوح المكاني لهذا القمر الي ٠.٣١ متر للنطاق البانكروماتي و ١.٢٤ متر للنطاقات المتعددة و ٣.٧ متر لنطاق الاشعة تحت الحمراء القصيرة. ويتميز هذا القمر بالإضافة للمستشعر البانكروماتي (٠.٤٥ - ٠.٨٠ مايكرومتر) و المستشعر متعدد النطاقات VNIR (وعددهم ٨ للنطاقات ٠.٤٠ - ١.٠٤ مايكرومتر) باستشعار الأشعة تحت الحمراء القصيرة SWIR في ٨ نطاقات (١.١٩٥ - ٢.٣٦٥ مايكرومتر) و مستشعر من نوع CAVIS يتحسس الضباب و السحب و محتوي بخار الماء وعدة مركبات مناخية أخري في ١٢ نطاق (٠.٤٠٥ - ٢.٢٤٥ مايكرومتر). كما يتميز WorldView-3 بفترة اعادة زيارة أقل من يوم ويمكنه جمع بيانات لمساحة ٦٨٠ ألف كيلومتر مربع يوميا، وبقدرة وضوح راديومترية ١١ بت للنطاق البانكروماتي و ١٤ بت للنطاقات المتعددة.



شكل (٢٥-٣٦) قمر WorldView-3



شكل (٢٥-٣٧) نطاقات الاستشعار في قمر WorldView-3

أقمار SkySat

سلسلة أخري من الأقمار التجارية المخصصة للاستشعار عن بعد المملوكة لشركة SkySat Imaging والتي أطلقت أول أقمارها في ٢٠١٣ ثم القمر الثاني SkySat-2 في ٨ يوليه ٢٠١٤ علي ارتفاع ٤٥٠ كيلومتر من سطح الأرض. وبالإضافة للمرئيات فيقدم هذا القمر أيضا لقطات فيديو بالأبيض و الأسود بجودة ٣٠ لقطة/ثانية لمدة تصل الي ٩٠ ثانية. أما درجة الوضوح المكانية للنطاق البانكروماتي فتبلغ ١.١ متر وللنطاق المتعدد تبلغ ٢.٠ متر، ويبلغ عرض المسار ٢ و ٨ كيلومترات علي الترتيب.

شكل (٢٥-٣٨) قمر SkySat-2

نطاقات الاستشعار في قمر SkySat-2

النطاق	طول الموجة (مايكرومتر)
البانكروماتي	٠.٤٥ - ٠.٩٠
الأزرق	٠.٤٥ - ٠.٥١٥
الأخضر	٠.٥١٥ - ٠.٥٩٥
الأحمر	٠.٦٠٥ - ٠.٦٩٥
تحت الحمراء القريبة	٠.٧٤ - ٠.٩٠

نظم MEIS-11 and CASI

من المفيد أيضا التعرض لبعض تطبيقات الاستشعار عن بعد المعتمدة علي الطائرات (وليس الأقمار الصناعية) كمنصات. فعلي سبيل المثال فأن النظام الكندي MEIS-II (الذي يرمز الي الماسح البصري-الالكتروني متعدد النطاقات أو Multispectral Electro-optical Imaging Scanner) فيعتمد علي تركيب هذا الماسح في الطائرات. ويسمح النظام بتجميع البيانات في ٨ بت (أي ٢٥٦ رقم) في ثمانية نطاقات تتراوح بين ٠.٣٩ و ١.١ مايكرومتر باستخدام مصفوفة خطية مكونة من ١٧٢٨ متحسس لكل نطاق. كما توجد امكانية التصوير الاستريسكوبي من خط طيران واحد، بالإضافة لإمكانية اختيار نطاق معين متغير من الطاقة للتعامل معه كل مرة.

أما النظام الكندي CASI (يرمز الي النظام الاستريسكوبي المضغوط للتصوير الجوي Compact Airborne Spectrographic Imager) فيعد من أوليات نظم الاستشعار الجوي التجاري. فالمستشعر متعدد النطاقات يسمح بتحسس النطاقات في الضوء المرئي و الاشعة تحت الحمراء باستخدام ماسح عبر-المسار به ٢٨٨ قناة تغطي أطوال موجات من ٠.٤ الي ٠.٩ مايكرومتر. وتعتمد درجة الوضوح المكانية علي ارتفاع الطيران إلا أن تحديد نطاقات الاستشعار تعتمد علي احتياجات المستخدم ذاته. وقد كانت هذه النظم الجوية مفيدة للغاية في تطوير المستشعرات متعددة النطاقات التي تم استخدامها في نظم الاقمار الصناعية.

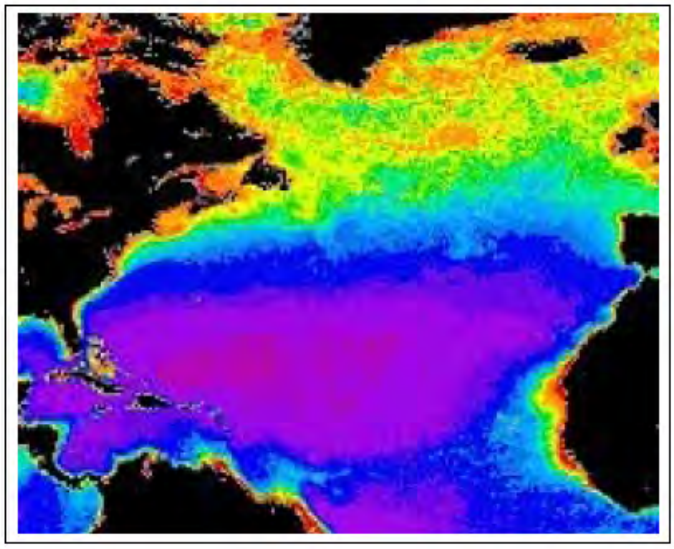
١٣-٢٥ أقمار و مستشعرات الارصاد البحرية

قمر Nimbus-7

تشكل المحيطات ثلثي الكرة الأرضية وتلعب دورا هاما في النظام المناخي العالمي، ومن ثم فتوجد عدة نظم أقمار صناعية مخصصة لدراسة المحيطات. تم اطلاق أول قمر من هذه الفئة (القمر Nimbus-7) في ١٩٧٨ حاملا مستشعر من نوع الماسح الملون لمناطق الشواطئ Costal Zone Color Scanner (أو اختصاراCZCS). ويسمح مدار هذا القمر الصناعي بتغطية كاملة للأرض كل ستة أيام، ويتم التحسس في ستة نطاقات طيفية كما في الجدول التالي. هذا و قد توقف هذا القمر الصناعي في عام ١٩٨٦.

نطاقات الاستشعار لمستشعر CZCS

القناة	طول الموجة (مايكرومتر)	العناصر المستشعرة
١	٠.٤٣ - ٠.٤٥	امتصاص الكلوروفيل
٢	٠.٥١ - ٠.٥٣	امتصاص الكلوروفيل
٣	٠.٥٤ - ٠.٥٦	المادة العضوية gelbstoff
٤	٠.٦٦ - ٠.٦٨	تركيز الكلوروفيل
٥	٠.٧٠ - ٠.٨٠	النبات السطحي
٦	١٠.٥٠ - ١٢.٥٠	الحرارة السطحية



شكل (٢٥-٣٩) أحد مرئيات أقمار CZCS

أقمار MOS

تم اطلاق أول أقمار هذه السلسلة من الأقمار الصناعية للأرصاد البحرية Marine Observation Satellite (أو اختصارا MOS) في ١٩٨٧ بواسطة اليابان، ثم جاء القمر الثاني في ١٩٩٠. ويبلغ ارتفاع القمر ٩٠٠ كيلومتر، ومن ثم فأن فترة اعادة الزيارة تصل الي ١٧ يوم. وتحمل هذه الأقمار الصناعية ثلاثة أنواع من المستشعرات: (١) ماسح راديومتري متعدد النطاقات ذو أربعة قنوات MESSR، (٢) ماسح راديومتري مرئي و حراري ذو أربعة قنوات VTIR، (٣) ماسح راديومتري للأشعة القصيرة ذو قناتين MSR. وتماثل نطاقات المستشعر MESSR نطاقات المستشعر MSS في أقمار لاندسات مما يجعل هذه البيانات مفيدة لتطبيقات الأراضي كما هي مفيدة للتطبيقات البحرية.

نطاقات الاستشعار المرئية و الاشعة تحت الحمراء في أقمار MOS

المستشعر	طول الموجة (مايكرومتر)	الوضوح المكاني (متر)	عرض المسار (كيلومتر)
MESSR	٠.٥١ - ٠.٥٩	٥٠	١٠٠
	٠.٦١ - ٠.٦٩	٥٠	١٠٠
	٠.٧٢ - ٠.٨٠	٥٠	١٠٠
	٠.٨٠ - ١.١٠	٥٠	١٠٠
VTIR	٠.٥٠ - ٠.٧٠	٩٠٠	١٥٠٠
	٦.٠ - ٧.٠	٢٧٠٠	١٥٠٠
	١٠.٥ - ١١.٥	٢٧٠٠	١٥٠٠
	١١.٥ - ١٢.٥	٢٧٠٠	١٥٠٠

مستشعر SeaWiFS

تم تصميم هذا المستشعر (اختصار المستشعر عريض المجال لرؤية البحار Sea-Viewing Wide-Field-of View Sensor) خصيصا لمراقبة المحيطات وتم وضعه علي متن القمر الصناعي SeaStar في مدار يرتفع ٧٠٥ كيلومتر عن سطح الأرض. وتسمح البيانات المستشعرة في ثمانية قنوات ضيقة بدراسة عناصر مناخية محددة في المحيطات (مثل المخزون الحراري وتكون الضباب) وبدرجة وضوح مكانية عالية تبلغ ١.١ كيلومتر عند النديد من خلال مسار يبلغ عرضه ٢٨٠٠ كيلومتر، وأيضا بدرجة وضوح مكانية أقل تبلغ ٤.٥ كيلومتر لمسار عرضه ١٥٠٠ كيلومتر.

نطاقات الاستشعار لمستشعر SeaWiFS

القناة	طول الموجة (مايكرومتر)
١	٠.٤٠٢ - ٠.٤٢٢
٢	٠.٤٣٣ - ٠.٤٥٣
٣	٠.٤٨٠ - ٠.٥٠٠
٤	٠.٥٠٠ - ٠.٥٢٠
٥	٠.٥٤٥ - ٠.٥٦٥
٦	٠.٦٦٠ - ٠.٦٨٠
٧	٠.٧٤٥ - ٠.٧٨٥
٨	٠.٨٤٥ - ٠.٨٨٥

١٤-٢٥ مستشعرات أخرى

قدمت الاجزاء الثلاثة السابقة نبذة عن أشهر المستشعرات و الأقمار الصناعية المستخدمة في تطبيقات الاستشعار عن بعد الشائعة. الا أنه يوجد أنواع أخري من المستشعرات الأقل شيوعا لأغراض أخري من الاستشعار عن بعد، ومنهم المستشعرات الاتية.

الفيديو

مع أنها أقل من حيث درجة الوضوح المكانية من التصوير الجوي التقليدي أو اللاستشعار الرقمي، إلا أن كاميرات الفيديو تقدم وسيلة مفيدة للحصول علي البيانات. ومن التطبيقات التي تستفيد من الفيديو عمليات مراقبة الكوارث الطبيعية (مثل الحرائق و الفيضانات) وتقدير المحاصيل و أمراضها ومراقبة المخاطر البيئية وأيضا المراقبة الأمنية لأجهزة الشرطة. وتسجل كاميرات الفيديو الاشعاع في النطاق المرئي وأيضا الأشعة تحت الحمراء القريبة وفي بعض الأحيان الأشعة تحت الحمراء المتوسطة.

نظم FLIR

تعمل نظم FLIR (اختصار الاشعة تحت الحمراء للحركة الأمامية Forward Looking Infrared) مثل المستشعرات الحرارية بنظام ضد المسار، لكنها تقدم منظر مائل وليس منظر النذير لسطح الأرض. وعادة ما تستخدم هذه المستشعرات في الطائرات أو الهليكوبتر لتحسس المنطقة التي تقع أمام الطائرة. ومن أمثلة تطبيقات هذه المستشعرات عمليات البحث و الانقاذ والعمليات العسكرية و أيضا مراقبة حرائق الغابات.

تقنية LiDAR

تعمل تقنية التحسس و قياس المسافات بالضوء Light Detection And Ranging كنظام استشعار عن بعد موجب active sensor بطريقة مشابهه للرادار. وهنا يتم اطلاق أشعة ليزر من المستشعر ومن ثم تحسس وقياس الطاقة المنعكسة من الأهداف التي يقع عليها الليزر. وبقياس الزمن المستغرق من لحظة الاطلاق الي لحظة عودة الليزر للمستشعر يمكن حساب المسافة بينهما. وبصورة عالية الكفاءة يتم استخدام هذه التقنية في قياس الارتفاعات و أعماق المياه. كما تستخدم هذه التقنية أيضا في دراسات الغلاف الجوي مثل قياس محتوي الجزئيات في كل طبقة من طبقات الغلاف الجوي و مراقبة التيارات الهوائية وتقدير كثافة الهواء.

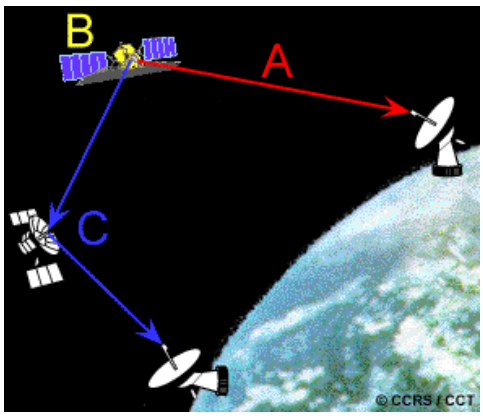
تقنية RADAR

تعمل تقنية التحسس و قياس المسافات بالراديو Radio Detection And Ranging (الرادار) كمستشعر موجب active sensor ، حيث يتم اطلاق أشعة قصيرة من المستشعر ومن ثم تحسس وقياس الطاقة المنعكسة من الأهداف. وبقياس الزمن المستغرق من لحظة الاطلاق الي لحظة عودة الليزر للمستشعر وأيضا بقياس كمية الطاقة المنعكسة فيمكن تكوين مرئية ثنائية الأبعاد لسطح

الأرض. ومن مميزات الرادار أنها تقنية تعتمد علي مصدر طاقة خاص بها ومن ثم يمكنها العمل نهارا أو ليلا، كما أن الاشعة القصيرة قادرة علي اختراق السحب والمطر. وسنستعرض هذه التقنية بالتفصيل لاحقا.

٢٥-١٥ استقبال و بث و معالجة البيانات

في الاستشعار عن بعد باستخدام الطائرات فأن البيانات المستشعرة يتم استرجاعها و تحليلها بمجرد هبوط الطائرة. أما بيانات الأقمار الصناعية فتحتاج للبث الرقمي الي سطح الأرض وذلك من خلال ثلاثة بدائل: (A) بث البيانات مباشرة الي محطة استقبال أرضية Ground Receiving Station (اختصارا GRS) اذا كانت في مجال رؤية القمر الصناعي، فان لم تكن المحطة الأرضية في مجال رؤية القمر فيتم تخزين البيانات علي متن القمر ذاته لحين بثها للمحطة الأرضية في وقت لاحق (B)، كما يمكن أيضا ارسال البيانات للمحطة الأرضية من خلال نظام للأقمار الصناعية لحمل و بث البيانات (C)، أي يتم نقل البيانات من قمر صناعي الي اخر لحين بثها للمحطة الأرضية المناسبة.



شكل (٢٥-٤٠) طرق بث بيانات الاستشعار عن بعد

تصل البيانات للمحطة الأرضية في صورة رقمية خام raw digital format، وعند الحاجة يتم معالجة هذه البيانات لتصحيح الأخطاء والتشوهات المنتظمة الهندسية و تشوهات الغلاف الجوي ثم وضعها في صورة قياسية. وعادة ما يتم كتابة البيانات علي وسائط تخزين مثل الاسطوانات المدمجة CD أو الشرائط من خلال نظام أرشيف تفصيلي معين.

للعديد من المستشعرات يمكن امداد العملاء بمرئيات شبه لحظية near real-time اذا كانت الحاجة تتطلب ذلك، وعادة ما يتم استخدام نظم معالجة سريعة لهذا الغرض بهدف انتاج مرئيات قليلة الوضوح بعد ساعات قليلة من استشعار البيانات عن بعد. ومن أمثلة هذه التطبيقات عمليات ابحار السفن في محيطات المناطق القطبية والتي تتطلب معلومات سريعة عن التيارات البحرية وحركة الجبال الثلجية حتى يمكن تحديد مسارات امنة للسفن. كما أن هذه المرئيات قليلة الوضوح تستخدم للمعاينة قبل أن يقوم العملاء بشراء المرئيات الأصلية عالية الجودة.

الفصل السادس و العشرين

تحليل المرئيات

في هذا الفصل يتم تقديم الخطوات الأساسية لعملية تحليل و تفسير مرئيات الاستشعار عن بعد واستنباط المعلومات منها.

٢٦-١ مقدمة

حتى يمكننا الاستفادة من مميزات الاستشعار عن بعد و الاستفادة من البيانات المستشعرة فيجب أن نكون قادرين علي استخراج المعلومات المفيدة من المرئيات وهو ما يعرف باسم تفسير interpretation و تحليل analysis المرئيات. وهذا هو المكون السادس من مكونات عملية الاستشعار التي ذكرناها في الفصل الأول. وتشمل هذه الخطوة تحديد أو تعريف الأهداف المختلفة و قياسها من أجل استنباط معلومات مفيدة عنهم. وهذه الأهداف التي يمكن ظهورها علي المرئية:

- أهداف قد تكون في صورة نقطة أو خط أو مساحة، أي أنها تأخذ أي صورة مثل أتوبيس في موقف أو طائرة علي مدرج أو كوبري أو طريق وحتى المسطحات المائية و الحقول الزراعية.
- يجب أن تكون الأهداف قابلة للتمييز distinguishable أي أنها مختلفة عن الأهداف المحيطة بها علي نفس المرئية.

يتم معظم تفسير و تحليل المرئيات بصورة بصرية أو بشرية visual interpretation، وعادة ما تتم هذه العملية بعد طباعة المرئيات علي الورق. ومن ثم تسمي هذه الصيغة بالصيغة التناظرية analog format للبيانات، وكما ذكرنا في الفصل الأول أن هناك بيانات استشعار تكون مباشرة في صيغة رقمية digital format. ويمكن للتفسير البصري أو البشري أن يتم لفحص البيانات الرقمية المعروضة علي شاشة الكمبيوتر. وفي حالة توافر البيانات في الصيغة الرقمية فمن الممكن عمل المعالجة و التحليل الرقمي أو الآلي digital processing and analysis باستخدام الكمبيوتر والبرامج المتخصصة. و تاريخيا كانت عملية التفسير و التحليل البشري تتم بداية علي الصور الجوية، ولم تبدأ عمليات التفسير الالي إلا حديثا بعد التوصل لعمليات تسجيل البيانات رقميا و ابتكار الكمبيوتر. ويتميز التفسير البصري بأنه لا يحتاج لأجهزة متقدمة أو غالية الثمن مثل التفسير الرقمي، لكنه عادة مقصور علي تحليل قناة واحدة أو صورة واحدة في نفس الوقت. لكن وعلي الجانب الاخر فأن التحليل الرقمي في بيئة الكمبيوتر يمكننا من التعامل مع مرئيات مركبة من عدة قنوات أو من عدة أزمنة. ومن هنا فأن التحليل الآلي مفيد جدا لتحليل عدة نطاقات و التعامل مع كم هائل من البيانات المستشعرة وبسرعة أكبر كثيرا من التحليل البشري.

٢٦-٢ عناصر التفسير البصري

ان تحديد الأهداف هو مفتاح عملية التفسير و استخراج المعلومات. وتشمل هذه العملية محاولة رصد الاختلافات بين الأهداف و محيطها والمقارنة بين الأهداف المختلفة من خلال رصد بعض العناصر المرئية/البصرية ومنها: درجة اللون، الشكل، الحجم، النمط، النسيج، الظل و التواجد.

درجة اللون tone:

درجة اللون هي اللمعان النسبي (للمرئيات غير الملونة) أو اللون (للمرئيات الملونة) لهدف معين علي المرئية. بصفة عامة فأن درجة اللون هو العامل الرئيسي للتمييز بين عدة أهداف أو عدة معالم.

شكل (٢٦-١) درجة اللون

الشكل shape:

وهو الهيئة العامة أو تكوين أو الاطار الخارجي للهدف، وهو عنصر هام للتمييز بين عدة أهداف. فعلي سبيل المثال فأن الحواف المستقيمة عادة ما تدل علي أهداف عمرانية أو أهداف زراعية (حقول) بينما الأهداف الطبيعية مثل حواف الغابات عادة ما تكون متعرجة في الشكل. وكمثال اخر فأن الحقول الزراعية التي يتم ريها باستخدام نظم الري الدائرية ستظهر علي صورة أشكال دائرية في المرئية.

شكل (٢٦-٢) الشكل

الحجم size:

يعتمد حجم الأهداف علي المرئية علي مقياس رسمها، لكن بالإضافة للحجم المطلق فأن تقييم أو مقارنة حجم هدف معين بصورة نسبية مع حجم الأهداف المحيطة به علي المرئية يكون عاملا هاما في عملية التفسير. فعلي سبيل المثال فأنه في مرئية تظهر منطقة مدنية بها العديد من المباني فأن الأهداف أو المباني الكبيرة ترجح وجود منشئات صناعية بينما الأهداف الصغيرة قد تشير الي مباني سكنية.

شكل (٢٦-٣) الحجم

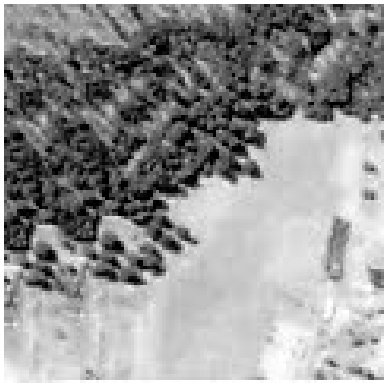
النمط pattern:

النمط هو الترتيب المكاني spatial arrangement للأهداف القابلة للتمييز. عادة فأن التكرار المتماثل لنفس درجات اللون و النسيج ينتج عنه أنماط يمكن تمييزها. فعلي سبيل المثال فأن بساتين الفاكهة تتميز بالأشجار المتباعدة بصورة منتظمة وأيضا الشوارع في مدينة والمساكن منتظمة المسافات تقدم بعض أمثلة للنمط.

شكل (٢٦-٤) النمط

النسيج texture:

يمثل النسيج ترتيب و تكرار الاختلافات في درجة اللون في منطقة معينة علي المرئية. فالنسيج الخشن rough texture يتكون من درجات لون مزركشة أو متعددة حيث تتغير درجة اللون بصورة مفاجئة في منطقة صغيرة، بينما النسيج الناعم smooth texture سيكون له تغير بسيط جدا في درجة اللون. عادة ما يكون النسيج الناعم نتيجة أسطح منتظمة مثل الحقول الزراعية و الأسفلت والأرض العشبية. وعلي الجانب الآخر فأن النسيج الخشن يكون للأسطح الخشنة و التركيبات غير المنتظمة مثل الغابات علي سبيل المثال.



شكل (٢٦-٥) النسيج

الظل shadow:

الظل عامل مهم من عوامل التفسير البصري ويعطينا فكرة عن الارتفاعات النسبية للأهداف علي المرئية، ومن ثم يسهل تمييزها. لكن الظل قد يكون عائقا أيضا في عملية التفسير لأنه قد يؤثر علي الأهداف الواقعة في منطقة الظل ذاتها. أيضا فأن الظلال مفيدة لتفسير التضاريس خاصة في مرئيات الرادار.

شكل (٢٦-٦) الظل

التواجد association:

يؤخذ عامل التواجد أو الترابط أو المصادقة في عملية التفسير حيث يدل علي العلاقة بين الأهداف المحيطة بالهدف المراد تمييزه. فعلي سبيل المثال فأن المنشئات الصناعية عادة ما تتواجد بالقرب من خطوط المواصلات، بينما المناطق السكنية تتواجد أو تترابط مع المدارس و الملاعب. ففي الصورة التالية يمكن تمييز وجود بحيرة مترابطة مع القوارب والمنطقة الترفيهية المجاورة.

شكل (٢٦-٧) التواجد

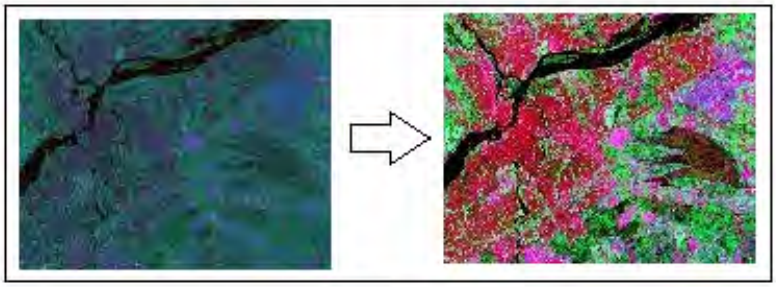
٢٦-٣ المعالجة الرقمية للمرئيات

للاستفادة من التقنيات المتوافرة في عصرنا الحالي فأن معظم بيانات الاستشعار عن بعد يتم تخزينها في صورة رقمية. ومن ثم فأن عملية معالجة المرئيات صارت تتم في صورة رقمية باستخدام أجهزة الكمبيوتر و برامجها المتخصصة. وعادة ما تشمل هذه العملية عدة وظائف أو مراحل يمكن تقسيمها الي أربعة مجموعات رئيسية تشمل:

- المعالجة الأولية pre-processing
- تحسين المرئية image enhancement
- تحويل المرئية image transformation
- تصنيف و تحليل المرئية image classification and analysis

تشمل مرحلة المعالجة الأولية الخطوات اللازمة قبل البدء في التحليل و استنباط المعلومات. وهذه الوظائف تنقسم الي التصحيح الراديومتري و التصحيح الهندسي للمرئية. فالتصحيح الراديومتري radiometric correction يشمل تصحيح التعرجات أو التشوهات لبيانات المستشعر والضجيج أو التشوه الناتج عن طبقات الغلاف الجوي ثم تحويل البيانات لصورة تماثل وبدقة الطاقة المنبعثة أو المنعكسة للمستشعر. أما التصحيح الهندسي فيشمل تصحيح التشوهات الهندسية الناتجة عن العلاقة الهندسية بين الأرض و المستشعر ثم تحويل البيانات الي نظام احداثيات يمثل العالم الحقيقي (خطوط الطول و دوائر العرض) علي سطح الأرض.

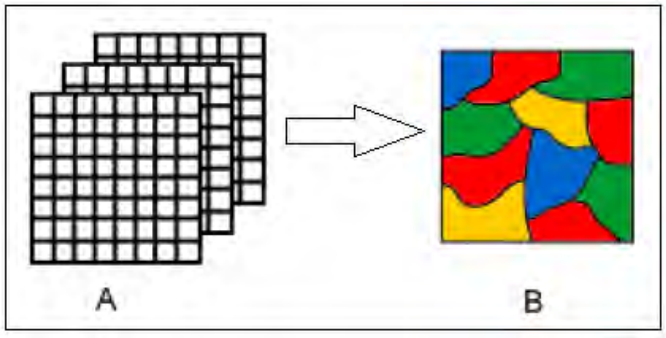
تهدف المرحلة الثانية من مراحل معالجة المرئية - مرحلة تحسين المرئية - تهدف الي تحسين جودة تمثيل المرئية للمساعدة في تفسيرها و تحليلها بصريا. ومن أمثلة وظائف هذه المرحلة وظيفة زيادة تباين contrast stretching المرئية و وظيفة الفلتر (أو المصفاة) المكاني spatial filtering ليسهل التمييز بين الأهداف.



شكل (٢٦-٨) تحسين المرئية

تشبع عمليات تحويل المرئية في مفهومها عمليات تحسين المرئية، إلا أن تحسين المرئية غالبا ما يتم علي مرئية واحدة بينما عادة ما تشتمل عمليات التحويل معالجة بيانات عدة مرئيات. وتتم عمليات رياضية (مثل الجمع و الطرح و الضرب و القسمة) بهدف تكوين و تحويل النطاقات الأصلية للمرئية الي مرئية "جديدة" تمثل مظاهر أو أهداف المرئية بصورة جيدة.

تهدف عمليات مرحلة التصنيف و التحليل الي التحديد الرقمي وتصنيف خلايا (البكسل) البيانات. فعادة ما يتم التصنيف علي بيانات متعددة القنوات (A) وتحديد فئة لكل خلية/بكسل (B) طبقا لخصائص احصائية عن قيمة اللمعان لكل خلية.



شكل (٢٦-٩) تصنيف المرئية

وفي الاجزاء التالية سنلقي الضوء علي هذه العمليات بتفصيل أكثر.

٢٦-٤ المعالجة الأولية

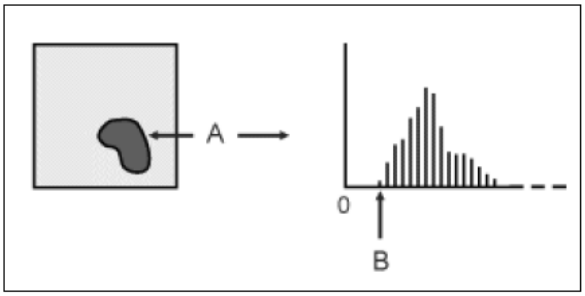
تهدف عمليات المعالجة الأولية (وتعرف أيضا بعمليات استعادة و تقويم المرئية image restoration and rectification) لتصحيح الأخطاء و التشوهات الراديومترية و الهندسية للمستشعر و الغلاف الجوي المؤثرة علي البيانات. تكون التصحيحات الراديومترية ضرورية بسبب التغير في اضاءة المشهد و هندسة الرؤية و ظروف الطقس وأخطاء المستشعر ذاته. وتختلف هذه الأخطاء بناءا علي المستشعر و المنصة المستخدمين في استشعار البيانات بالإضافة للظروف أثناء عملية الاستشعار. أيضا يكون من المرغوب فيه أن تتم تحويل و معايرة البيانات مقارنة بوحدات مطلقة للإشعاع و الانعكاس وذلك بهدف تسهيل عملية المقارنة بين البيانات.

يمكن تصحيح تغيرات الاضاءة و هندسة الرؤية (للمستشعرات البصرية) بعمل نمذجة للعلاقات الهندسية و المسافة بين كلا من المنطقة الأرضية المصورة و الشمس و المستشعر. وهذه غالبا ما يكون مطلوبا ليمكننا مقارنة مرئيات عدة مستشعرات لعدة فترات زمنية أو ليمكننا عمل موزايك مرئيات متعددة لنفس المستشعر مع الاحتفاظ بظروف اضاءة منتظمة من مشهد الي آخر.

شكل (٢٦-١٠) المعالجة الأولية للمرئية

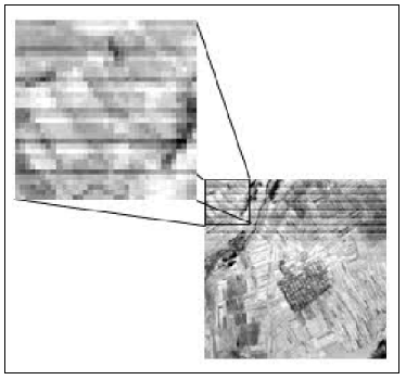
سبق الذكر في الفصل السابق أن تشتت الاشعاع قد يحدث أثناء مرور و تفاعل الاشعاع مع الغلاف الجوي. وقد يؤدي هذا التشتت الي تقليل أو اضعاف جزء من الطاقة التي تضئ المشهد. أيضا فأن طبقات الغلاف الجوي تضعف الأشعة التي تسير من الهدف الي المستشعر. ويمكن تطبيق عدة طرق لتصحيح أخطاء الغلاف الجوي atmospheric correction تتراوح ما بين من خلال النمذجة التفصيلية لظروف الطقس أثناء عملية الاستشعار و الحسابات البسيطة التي تعتمد فقط علي المرئية ذاتها. وكمثال لهذه الطريقة الأخيرة نقوم بفحص قيم الاضاءة المرصودة (أي القيم الرقمية digital numbers) لمنطقة تقع في الظل أو لهدف داكن جدا (مثل بحيرة A) وتحديد أقل قيمة (B). ويتم التصحيح من خلال طرح هذه القيمة (المحسوبة لكل نطاق band) من جميع الخلايا في النطاق المناظر. وحيث أن التشتت يعتمد علي طول الموجة فأن أقل قيمة ستختلف من نطاق الي نطاق اخر. وهذه الطريقة مبنية علي الفرض بأن الانعكاس من هذه الأهداف (في حالة كون الغلاف

الجوي صحو) سيكون صغير جدا (ان لم صفرا). ومن ثم فنحن اذا استطعنا رصد القيم الأكبر كثيرا من الصفر فستكون خالية من التشتت.

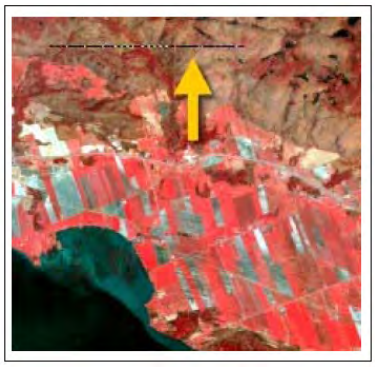


شكل (٢٦-١١) تصحيح أخطاء تشتت الغلاف الجوي

يحدث الضجيج noise في المرئية اما بسبب عدم الانتظام أو بسبب أخطاء تحدث في سواء في استجابة المستشعر أو في تسجيل و بث البيانات. ومن الأنواع الشائعة للضجيج الشرائح المنتظمة systematic striping و الخطوط المتساقطة dropped lines. ويجب تصحيح هذين الخطأين قبل البدء في عمليات التحسين و التحليل. كانت الشرائح المنتظمة شائعة في مرئيات مستشعر MSS لأقمار اللاندسات القديمة بسبب خطأ انحراف drift يحدث مع مرور الزمن في المتحسسات الستة لهذا النظام. وكان هذا الانحراف مختلفا في كل متحسس ومن ثم يسبب اختلافا في اللمعان وتمثيله في كل متحسس، ومن هنا فأن المظهر العام أو الاجمالي سيكون هو التأثير الشرائحي striped effect. أما الخطوط المتساقطة فتحدث عند وجود أخطاء منتظمة تتسبب في وجود فجوات أو بيانات معيبة علي خط المسح أثناء عملية الاستشعار. وعادة ما يتم معالجة هذا العين من خلال احلال خلايا الخط المعيب بخلايا الخط الأعلى منه أو الخط الأسفل منه أو بمتوسط كلاهما.



شكل (٢٦-١٢) خطأ الشرائح المنتظمة



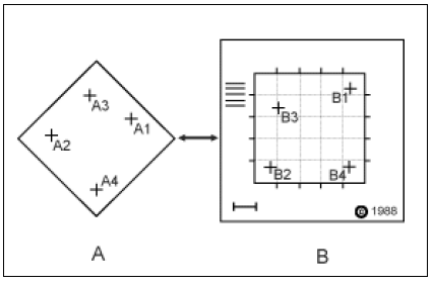
شكل (٢٦-١٣) خطأ الخطوط المتساقطة

للتطبيقات الكمية لبيانات الاستشعار عن بعد فمن الضروري تحويل القيم الرقمية الي قياسات بوحدات تمثل الانعكاس أو الانبعاث الحقيقي من سطح الأرض. ويتم ذلك بالاستعانة بمعلومات تفصيلية عن استجابة المستشعر والطريقة التي يتم بها تحويل الاشارات التناظرية analog

signals (أي الاشعاع المنعكس أو المنبعث) الي القيم الرقمية، وهو ما يعرف بطريقة التحويل تناظري-الي-رقمي analog-to-digital (أو اختصارا A-to-D). وبحل هذه العلاقة بطريقة عكسية فيمكننا حساب قيمة الاشعاع المطلق لكل خلية، وهذا ما يمكننا من عمل مقارنة دقيقة بين عدة مرئيات مختلفة في التاريخ أو من مستشعرات مختلفة.

في الجزء ١٣-١ تعلمنا أن كل المرئيات المستشعرة تتعرض ضمنيا لتشوهات هندسية. وهذه التشوهات ناتجة عن عدة عوامل منها: منظور عدسات المستشعر، حركة نظام المسح، حركة المنصة، ارتفاع و سرعة المنصة، تأثير أو ازاحة التضاريس، وتكور سطح الأرض. وتهدف التصحيحات الهندسية geometric corrections الي التغلب علي هذه الأخطاء أو التشوهات حتى يكون التمثيل الهندسي للمرئية أقرب ما يكون للعالم الحقيقي. والكثير من هذه التشوهات يكون منتظما systematic أو يمكن التنبؤ به predictable في طبيعته ومن ثم يمكن معالجته من خلال النمذجة الدقيقة للعلاقة الهندسية بين المستشعر و المنصة و الأرض. لكن يوجد بعض التشوهات التي تكون غير منتظمة un-systematic أو عشوائية random وهي ما لا يمكن نمذجتها بهذه الطريقة. وهنا يتم ما يعرف بعملية التسجيل الهندسي geometric registration للمرئية لنظام احداثيات أرضية معلوم.

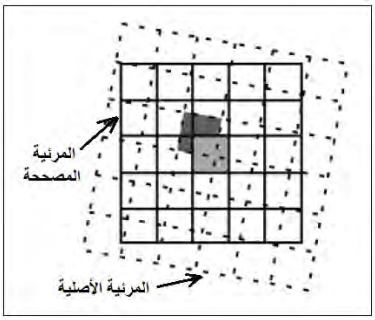
تشمل عملية التسجيل الهندسي تحديد الاحداثيات علي المرئية image coordinates (أي الصف و العمود) لبعض النقاط الواضحة علي المرئية (A) والتي يطلق عليها اسم نقاط الضبط الأرضي ground control points (أو اختصارا GCP) ومطابقة احداثياتهم في نظام احداثيات أرضية (مثلا خط الطول و دائرة العرض). وعادة ما يتم الحصول علي الاحداثيات الأرضية الحقيقية لهذه النقاط من خريطة (B) سواء كانت ورقية أو رقمية، ومن ثم تسمي هذه العملية بالتسجيل من المرئية الي الخريطة image-to-map registration. وبمجرد تحديد مجموعة من نقاط الضبط الموزعة توزيعا جيدا علي المرئية فيقوم برنامج الكمبيوتر بحساب معادلات تحويل الاحداثيات ليمكن بع ذلك تطبيقها علي الاحداثيات الأصلية للمرئية (الصف و العمود) واستنتاج الاحداثيات الأرضية الحقيقية. أيضا يمكن لعملية التسجيل الهندسي أن تتم بتسجيل مرئية الي مرئية أخري سبق تحديد احداثياتها الأرضية الحقيقية. وهذا ما يسمي بالتسجيل من مرئية الي مرئية image-to-image registration.



شكل (٢٦-١٤) التسجيل الهندسي من مرئية الي خريطة

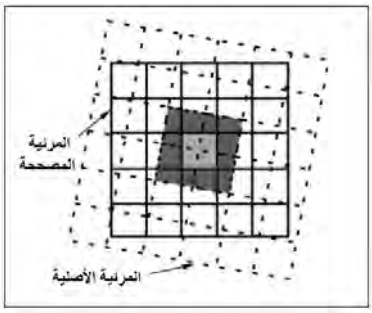
حتى يمكننا اتمام التصحيح الهندسي للمرئية الأصلية المشوهه فأن عملية تسمي اعادة أخذ العينة re-sampling يتم تطبيقها لتحديد القيم الرقمية التي سيتم وضعها في كل خلية أو بكسل للمرئية

الجديدة الناتجة. وهذه العملية تقوم بحساب قيمة الخلايا الجديدة بناءا علي قيم الخلايا في المرئية الأصلية، وهناك ثلاثة طرق شائعة الاستخدام في عملية اعادة أخذ العينة وهي: الجار الأقرب nearest neighbor، الاستنباط الخطي المزدوج bilinear interpolation، الالتفاف التكعيبي cubic convolution. ان طريقة الجار الأقرب تستخدم للخلية الجديدة القيمة الرقمية للخلية التي تكون أقرب ما يكون لها في المرئية الأصلية. وهذه الطريقة هي أبسط طرق اعادة أخذ العينة، وهي لا تقوم بتغيير القيم الأصلية الا أن بعض قيم الخلايا قد تتكرر بينما البعض الاخر قد يفقد.

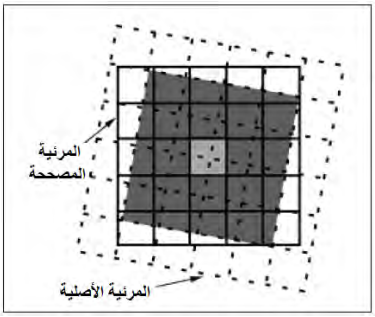


شكل (٢٦-١٥) طريقة الاستنباط الخطي المزدوج لإعادة أخذ العينة

تعتمد طريقة الاستنباط الخطي المزدوج علي حساب المتوسط الموزون لأقرب أربعة خلايا علي المرئية الأصلية لحساب قيمة الخلية في المرئية الجديدة. وبسبب عملية المتوسط فأن المرئية الجديدة ستكون ذات قيم جديدة (مختلفة) تماما. وهذا التأثير قد يكون غير مرغوبا به في حالة اتمام التصنيف و التحليل المعتمد علي الاستجابة الطيفية. وهنا فقد يكون اتمام عملية اعادة أخذ العينة لاحقا بعد اتمام التصنيف. أما طريقة الالتفاف التكعيبي فتقوم بحساب المتوسط لعدد ١٦ خلية مجاورة علي المرئية الأصلية للخلية علي المرئية الجديدة. ومثل الطريقة السابقة فأن المرئية الناتجة عن تطبيق طريقة الالتفاف التكعيبي ستكون جديدة تماما وذات قيم خلية مختلفة تماما عن المرئية الأصلية. لكن كلتا هاتين الطريقتين تتميزان بالنتاج مرئيات أكثر وضوحا و تفاديا المظهر الداكن الذي قد ينتج عن تطبيق طريقة الجار الأقرب.



شكل (٢٦-١٦) طريقة الجار الأقرب لإعادة أخذ العينة

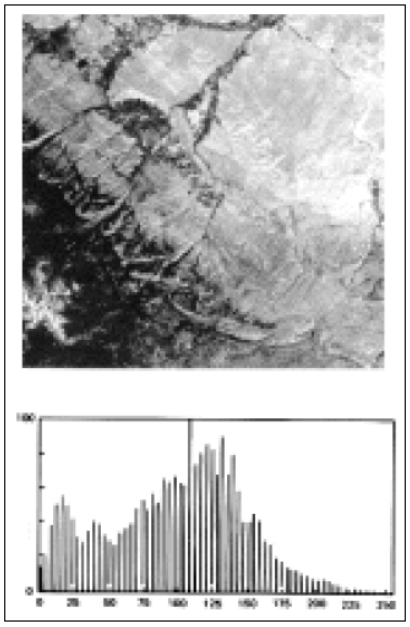


شكل (٢٦-١٧) طريقة الالتفاف التكعيبي لإعادة أخذ العينة

٢٦-٥ تحسين المرئية

يستخدم تحسين المرئية لجعل التفسير البصري أسهل، ومع أن عمليات التصحيحات الراديومترية و الهندسية قد تكون قد تمت قبل أن يتم توفير المرئيات للمستخدم إلا أن المرئية قد تكون مازالت غير ملائمة تماما للتفسير البصري. ان أجهزة الاستشعار عن بعد - خاصة في الأقمار الصناعية - تكون مصممة للتعامل مع مستويات عدة من طاقة الأهداف والتي غالبا تناسب جميع الظروف التي يمكن مواجهتها. ومع التغيرات الكبيرة في الاستجابة الطيفية لمجال واسع من الأهداف (غابات و صحراء و ثلوج و مياه ....الخ) فأنه لا يوجد تصحيح راديومتري يستطيع أن يتعامل مع كل هذه الأنواع ليوفر لنا مجال اضاءة و تباين مناسب لجميع هذه الأهداف. ومن ثم فأن لكل تطبيق و لكل مرئية يكون هناك تصحيح مخصص لجعل قيم الاضاءة أفضل ما يكون.

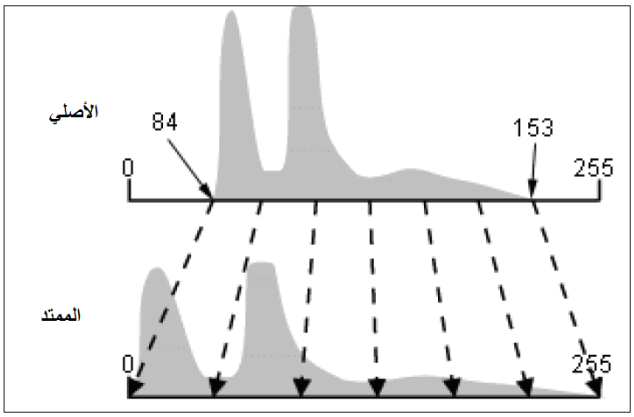
في المرئية الخام raw image فأن البيانات المفيدة تغطي جزء صغير من مجال القيم الرقمية (غالبا ٨ بت أي ٢٥٦ مستوي). يشمل تحسين التباين contrast enhancement تغيير القيم الأصلية ليمكن التعامل مع مجال أكبر ومن ثم زيادة التباين بين الأهداف و خلفياتها. ولكي نفهم تحسين التباين نبدأ أولا بمفهوم الرسم البياني للمرئية image histogram. فالرسم البياني ما هو إلا تمثيل تصويري (أو بياني) لقيم الاضاءة التي تتكون منها المرئية، حيث تكون قيم الاضاءة (أي من صفر الي ٢٥٥) ممثلة علي المحور السيني ويكون عدد مرات تكرار كل قيمة من هذه القيم ممثلا علي المحور الصادي للرسم البياني.



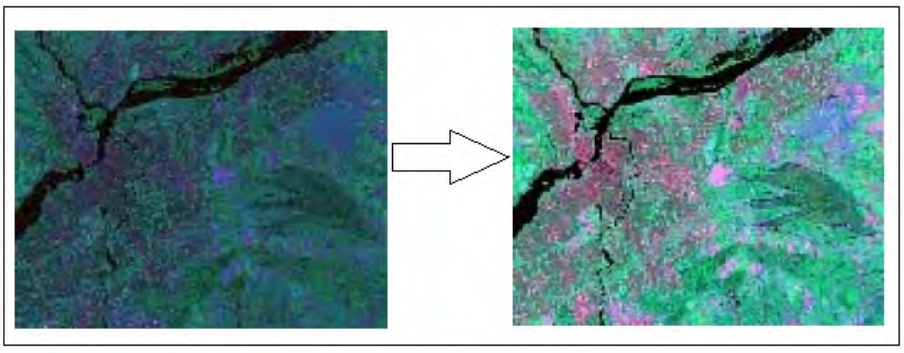
شكل (٢٦-١٨) الرسم البياني للمرئية

توجد عدة طرق لتحسين تباين المرئية، و سنتعرض هنا لبعضها. أبسط طرق التحسين هو طريقة الامتداد الخطي للتباين linear contrast stretch. وتشمل هذه الطريقة تحديد أقل و أعلي قيمة

للرسم البياني للمرئية ثم تطبيق تحويل معين لتمديد هذا المجال لكي يقع داخل المجال الكلي. ففي الشكل التالي فأن المجال الأصلي يتراوح بين ٨٤ و ١٥٣ (أي ٧٠ مستوي) بينما سنحوله لكي يغطي المجال الكلي ما بين الصفر و ٢٥٥. وكنتيجة لتطبيق هذا الأسلوب فأن المناطق الفاتحة علي المرئية ستبدو أفتح و المناطق الداكنة ستبدو أدكن، مما يجعل التفسير البصري للمرئية أسهل.

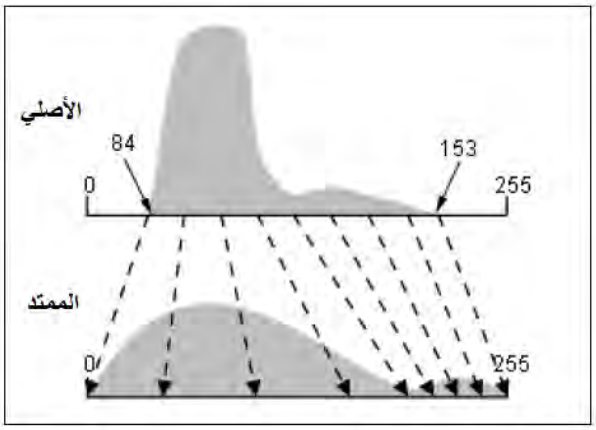


شكل (٢٦-١٩) طريقة الامتداد الخطي للتباين



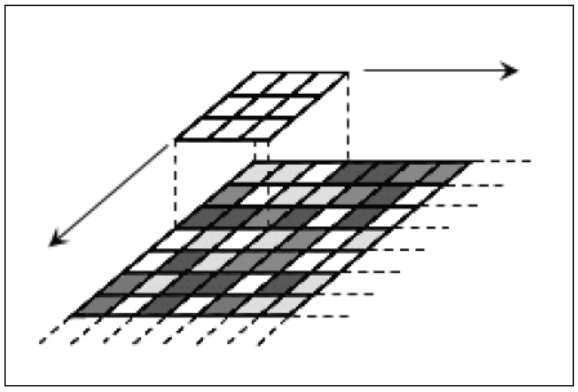
شكل (٢٦-٢٠) نتيجة تطبيق الامتداد الخطي للتباين

ان التوزيع المنتظم للمجال في المرئية الناتجة قد لا يكون هو أفضل طرق تحسين المرئية خاصة اذا كان المرئية الأصلية غير منتظمة التوزيع. وهنا نستخدم طريقة أخري تسمي الامتداد المتساوي البياني histogram-equalized stretch. وهنا فأن الامتداد سيعطي قيم أكثر (أي مجال أكبر) للجزء المتكرر من الرسم البياني. وبهذا الأسلوب فأن تفاصيل هذا الجزء ستكون أكثر تباينا من جزء الرسم البياني الأقل تكرارا أو حدوثا. فعلي سبيل المثال اذا كان لدينا مرئية يظهر بها جزء من نهر والمناطق المحيطة به وكانت المياه تغطي المجال الرقمي من ٤٠ الي ٧٦، فيمكننا عمل امتداد لهذا الجزء فقط لكي يغطي المجال الكلي (من صفر الي ٢٥٥) لكي يمكننا زيادة تباين المنطقة المائية فقط و تفسير ما بها من تفاصيل مثل التغير في الترسيب في قاع النهر. لكن في هذا المثال فأن جميع الخلايا التي لها قيم رقمية أقل من ٤٠ أو أكبر من ٧٦ سيتم تحديد قيم اما صفر أو ٢٥٥ علي الترتيب لها، أي أنها تفاصيل هذه المناطق ستختفي علي المرئية الجديدة.



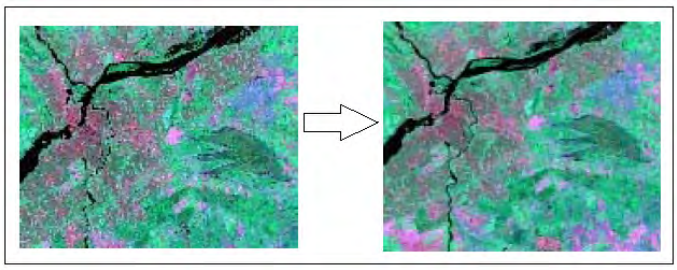
شكل (٢٦-٢١) طريقة الامتداد المتساوي البياني للتباين

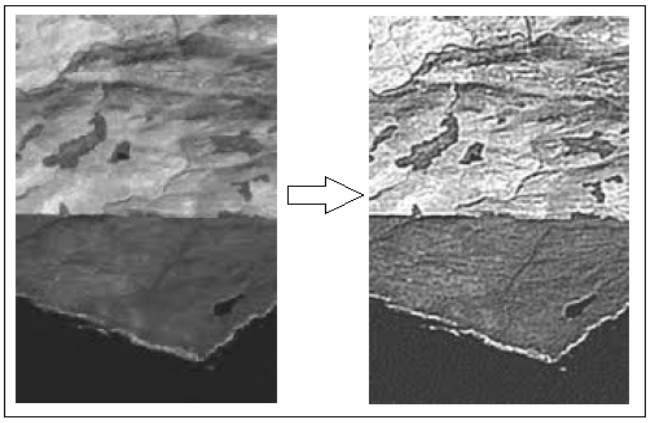
تشمل طريقة التصفية المكانية spatial filtering وظائف أخري للمعالجة بهدف تحسين مظهر المرئية. وتعتمد هذه الطريقة علي تعظيم اظهار أهداف محددة بناءا علي ترددها المكاني spatial frequency، وهي طريقة متعلقة بمفهوم النسيج texture الذي سبق التعرض له. فمناطق النسيج الخشن علي المرئية -حيث يكون التغير في درجة اللون كبيرا وبصورة مفاجئة- يكون لها تردد مكاني عالي بينما مناطق النسيج الناعم يكون لها تردد مكاني منخفض. ومن الطرق الشائعة للتصفية المكانية امرار "نافذة" تتكون من عدد قليل من الصفوف والأعمدة (مثلا ٣×٣ أو ٥×٥) علي كل خلية أو بكسل في المرئية مع تطبيق نموذج رياضي يعتمد علي قيم الخلايا أسفل هذه النافذة. وتتحرك النافذة علي كل صف وعلي كل عمود بحيث تطبق النموذج الرياضي مرة واحدة كل مرة، وتتكرر هذه الحسابات خلية بخلية علي كل أنحاء المرئية. ونتيجة تغير الحسابات وتغير وزن كل خليه في النافذة فأن طريقة التصفية المكانية يمكنها تحسين عدة أنواع من الأهداف علي المرئية.



شكل (٢٦-٢٢) طريقة التصفية المكانية

من طرق التصفية المكانية طريقة الفلتر منخفض المسار low-pass filter والذي يستخدم لتعظيم و تحسين المناطق الكبيرة المتجانسة في درجة اللون وتقليل كم التفاصيل علي المرئية. أي أن هذا الفلتر غالبا ما يقوم بتنعيم مظهر المرئية، ومن أمثلة النماذج الرياضية للفلتر منخفض المسار نماذج المتوسط و الوسيط (عادة ما تستخدم في مرئيات الرادار). وعلي الجانب الاخر فأن الفلتر عالي المسار high-pass filter يهدف تعظيم مظهر تفاصيل المرئية، مثل تعظيم اظهار الطرق والتراكيب الجيولوجية خطية الشكل.





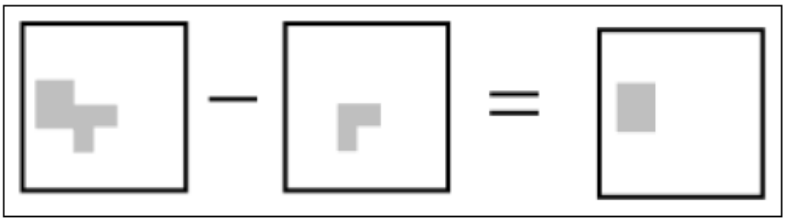
شكل (٢٦-٢٣) أمثلة لتطبيق طريقة التصفية المكانية

٦-٢٦ تحويل المرئية

عادة ما تشتمل عمليات تحويل المرئية علي وظائف ادارة النطاقات المتعددة للبيانات سواء كانت من مرئية واحدة متعددة النطاقات أو من عدة مرئيات لنفس المنطقة تن استشعارها في عدة أزمنة. وفي كلتا الحالتين فأن تحويل المرئية ينتج عنه مرئية "جديدة" تهدف للتركيز علي أهداف محددة أو خصائص هامة وإظهارها بصورة أفضل من المرئية (أو المرئيات) الأصلية.

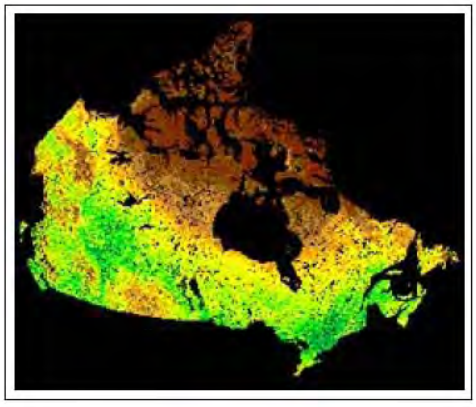
تقوم الوظائف الأساسية لتحويل المرئية بتطبيق عمليات حسابية بسيطة علي بيانات المرئية. فعلي سبيل المثال فأن طرح المرئيات image subtraction عادة ما يستخدم لبيان التغيرات التي حدثت لمرئيات متعددة التاريخ. ففي الشكل التالي يتم طرح قيمة اضاءة الخلية في المرئية الأولي من قيمة اضاءة الخلية للمرئية الثانية. وبإعادة المقياس scaling للمرئية الناتجة بإضافة قيمة ثابتة (١٢٧ في حالتنا وهي قيمة الاضاءة للون الرمادي المتوسط) الي القيم الناتجة من عملية الطرح،

فأننا علي مرئية جديدة مختلفة. ففي هذه المرئية فأن الخلايا التي لها تغير بسيط أو لا يوجد بها تغير بين المرئيتين الأصليتين سيكون لها قيمة اضاءة حول ١٢٧، بينما المناطق أو الخلايا التي لها تغير كبير سيكون لها قيم أعلي أو أقل من ١٢٧. وكأمثلة فأن هذا النوع من حالات تحويل المرئية يستخدم في اكتشاف التغيرات في التنمية العمرانية حول المدن وفي اكتشاف مناطق التصحر.



شكل (٢٦-٢٤) طرح مرئيتين

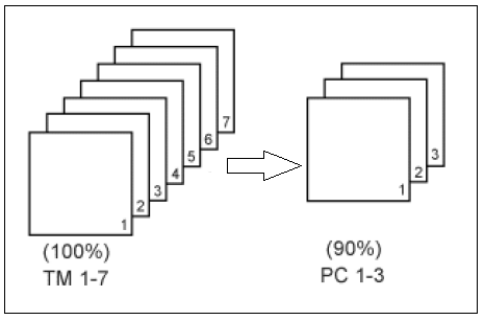
أيضا يعد قسمة المرئيات image division (ويعرف أيضا باسم التنسيب [من النسبة] الطيفي spectral rationing) من الطرق الشائعة في تحويل المرئيات، وهو يهدف الي القاء الضوء علي التغيرات الدقيقة في الاستجابة الطيفية لغطاءات السطح المختلفة. بقسمة بيانات نطاقين طيفين مختلفين فأن المرئية الناتجة تحسن التغيرات في ميول منحنيات الانعكاس الطيفي بين النطاقين المختلفين والتي قد تكون في الأساس غير ظاهرة نتيجة تغير الاضاءة أو اللمعان في كل نطاق منهما. المثال التالي يوضح هذا المفهوم: النباتات الصحية تعكس الطاقة بقوة في نطاق الاشعة تحت الحمراء القريبة وتمتص بقوة الاشعة الحمراء المرئية، بينما الاسطح الأخرى مثل الرطوبة و المياه تظهر انعكاسات متساوية تقريبا في كلا هذين النطاقين. أي أن قسمة النطاق ٧ من مرئية لاندسات MSS (نطاق الاشعة تحت الحمراء القريبة من ٠.٨ الي ١.١ ملليمتر) علي النطاق ٥ (نطاق اللون الأحمر من الضوء المرئي من ٠.٦ الي ٠.٧ ملليمتر) سينتج لنا الأقسام الأكبر من ١.٠ للنباتات و الاقسام القريبة من ١.٠ للتربة و المياه. ومن ثم فأن التمييز بين النباتات و الأسطح الأخرى سيتحسن بصورة ملموسة. أيضا فربما يكون ممكنا لدينا أن نميز بين مناطق النباتات المريضة أو غير الصحية والتي سيكون قسمها أقل من ذلك للنباتات الصحية.



شكل (٢٦-٢٥) مثال لقسمة نطاقين

من المميزات الأخرى للتنسيب الطيفي أننا و بسبب أننا ننظر للقيم النسبية (أي النسب ratios) بدلا من قيمها المطلقة فأن التغيرات في اضاءة المشهد بسبب التأثيرات الطبوغرافية تنقص. ومن ثم فأنه وبالرغم من أن الانعكاس المطلق لغطاء الغابات في منطقة متغيرة الميول سيعتمد علي الاتجاه لمصدر الاضاءة و هو الشمس، إلا أن نسبة الانعكاسات بين نطاقين ستكون متقاربة جدا. أما التنسيب باستخدام مجموع أو الفرق بين نطاقين من عدة مستشعرات فقد تم تطويره لمراقبة ظروف وحالة النباتات.ومن أشهر طرق تحويل المرئيات ما يعرف باسم المعامل الطبيعي الفرقي للنباتات Normalized Difference Vegetation Index (أو اختصارا NDVI) والذي يتم استخدامه لمراقبة الغطاء النباتي علي مستوي اقليمي و مستوي عالمي باستخدام مستشعر الراديومتر المتقدم عالي الوضوح جدا Advanced Very High Resolution Radiometer (اختصارا AVHRR) الموجود في سلسلة أقمار NOAA (أرجع للجزء ٢-١ من الفصل الثاني).

عادة ما تكون بيانات النطاقات المختلفة مرتبطة correlated (أي بينها ارتباط احصائي) ومن ثم فهي تحتوي معلومات متشابهه. فعلي سبيل المثال فأن بيانات النطاقين ٤ و ٥ لمستشعر MSS في مرئيات القمر لاندسات (أي النطاقين الأخضر و الأحمر بالترتيب) عادة ما تحتوي مظاهر بصرية متشابهه حيث أن انعكاسات نفس الأهداف عادة ما ستكون متساوية. ومن هنا فأن طرق تحويل المرئيات من الممكن استخدامها امعالجة الخصائص الاحصائية للبيانات متعددة النطاقات بهدف تقليل التكرار و الارتباط بين النطاقات. ومن هذه الطرق تحليل المركبات الرئيسية principal components analysis والذي يهدف أساسا الي تقليل عدد نطاقات هذه البيانات و ضم أكبر كم ممكن من البيانات في عدد صغير من النطاقات. ففي الشكل التالي يمكن تحويل بيانات النطاقات السبعة لمستشعر TM بحيث أن المكونات الرئيسية الثلاثة الاولي تحتوي تقريبا ٩٠% من البيانات الأصلية. وبالطبع فأن تفسير و تحليل بيانات هذه النطاقات الثلاثة (سواء بصريا أو رقميا) سيكون أبسط و أكثر كفاءة من تحليل النطاقات الأصلية السبعة.

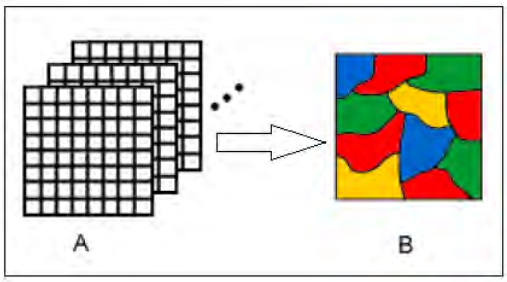


شكل (٢٦-٢٦) تحليل المركبات الرئيسية

٢٦-٧ تصنيف و تحليل المرئيات

يهدف المحلل البشري الي تقسيم الاهداف علي المرئية باستخدام عوامل التفسير البصري لكي يقوم بتحديد مجموعات متجانسة من الخلايا أو البكسل تمثل الأهداف المختلفة أو غطاءات الأرض. ويستخدم التصنيف الرقمي للمرئيات Digital Image Classification معلومات طيفية تمثل

القيم الرقمية لنطاق أو أكثر ومن ثم يحاول تقسيم كل خلية أو بكسل طبقا لهذه المعلومات الطيفية. ويسمي هذا النوع من التصنيف الرقمي باسم ادراك الأنماط الطيفية Spectral Pattern Recognition، أي أنه يهدف الي اعطاء مجموعة محددة لجميع الخلايا التي تنتمي لنمط طيفي معين علي المرئية (مياه، غابات، قمح ذرة ...الخ). ومن هنا فأن المرئية المصنفة تتكون من موزايك من الخلايا كلا منها تمثل موضوع theme معين ولذلك فهي تمثل خريطة موضوعية thematic map من المرئية الأصلية.

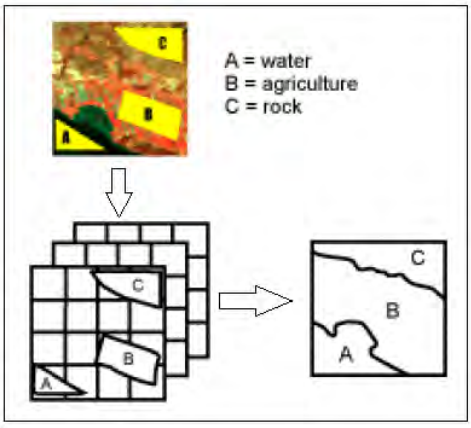


شكل (٢٦-٢٧) تصنيف المرئيات

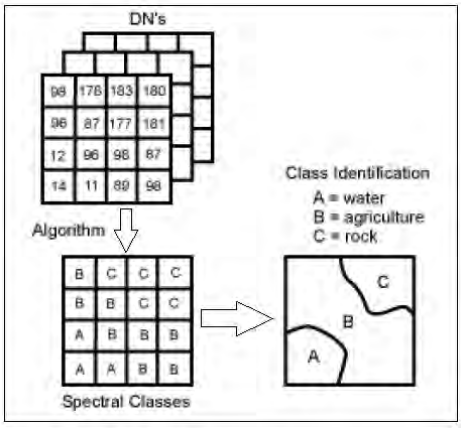
عندما نتحدث عن الفئات أو المجموعات فيجب أن نفرق بين أصناف أو طبقات المعلومات information classes و الأصناف أو الطبقات الطيفية spectral classes. فطبقات المعلومات هي الفئات التي يهدف التحليل الي تحديدها علي المرئية مثل أنواع المحاصيل المختلفة والأنواع المختلفة من الأشجار وأنواع الصخور المختلفة ... الخ. أما الطبقات الطيفية فهي مجموعات من الخلايا المتجانسة (أو القريبة) بالنسبة لدرجات الاضاءة في القنوات الطيفية المختلفة للبيانات. والهدف هنا هو المزاوجة أو الملائمة بين الطبقات الطيفية لبيانات المرئية و طبقات المعلومات المطلوبة. ومن الصعب أن يوجد ملائمة دقيقة كاملة بين طبقتين محددتين. فقد توجد طبقة معلومات واسعة (مثل الغابات) تتكون من عدة طبقات طيفية فرعية spectral sub-classes. ففي مثالنا هذا فأن الطبقات الطيفية الفرعية قد تعود الي التغير في العمر و الكثافة والنوع و الشكل. ومن هنا فيكون هدف المحلل أن يقرر كيف يزاوج ما بين الطبقات أو الفئات الطيفية وطبقات المعلومات.

يمكن تقسيم أنواع التصنيف الي مجموعتين رئيسيتين وهما التصنيف المراقب supervised classification و التصنيف غير المراقب unsupervised classification. ففي التصنيف المراقب يقوم المفسر بتحديد عينات متجانسة (علي المرئية) لأنواع الغطاءات أو طبقات المعلومات المنشودة. ويطلق علي هذه العينات اسم منطقة التدريب training areas. ويكون اختيار منطقة التدريب قائما علي معرفة المفسر بالمنطقة الجغرافية لهذه المرئية ومعلوماته عن الغطاءات الأرضية الظاهرة علي المرئية. ومن هنا فأن المفسر يقوم بمراقبة supervise عملية تقسيم أو تصنيف الطبقات. ثم يتم استخدام المعلومات لكافة النطاقات في هذه المنطقة "لتدريب" الكمبيوتر علي كيفية تمييز المناطق المتشابهه لكل مجموعة أو فئة. ومن هنا فيقوم الكمبيوتر من خلال برامج معينة متخصصة لتحديد البصمة الرقمية numerical signature لكل منطقة تدريب، ثم يقوم بتحديد أي فئة (من فئات هذه البصمة) أقرب لكل خلية أو بكسل علي المرئية. أي

أننا في التصنيف المراقب نقوم أولا بتحديد طبقات المعلومات التي يتم استخدامها لاحقا لتحديد الطبقات الطيفية التي تمثلها.



شكل (٢٦-٢٨) التصنيف المراقب

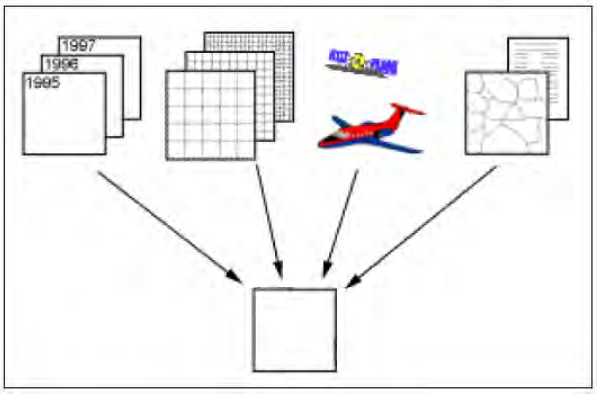


شكل (٢٦-٢٩) التصنيف غير المراقب

أما التصنيف غير المراقب فهو عكس التصنيف المراقب من حيث أن الطبقات الطيفية يتم تجميعها أولا طبقا لمعلومات المرئيات فقط ثم لاحقا يتم ملائمتها أو مزاوجتها لطبقات المعلومات. وتستخدم برامج كمبيوتر تسمي برامج أو طرق التجميع clustering algorithms لتحديد المجموعات الرقمية (أو الاحصائية) في البيانات. وعادة ما يحدد المفسر عدد المجموعات التي سيتم البحث عنها أو تصنيفها، وقد يحدد أيضا الحدود الفاصلة بين هذه المجموعات والتغير داخل كل مجموعة. ويكون المنتج النهائي لهذه العملية التكرارية هو مجموعة من المجموعات أو الطبقات التي قد يرغب المفسر في دمجها معا أو مجموعة من الطبقات التي يرغب في تقسيمها الي طبقات فرعية لاحقا (من خلال تطبيق برنامج التجميع مرة أخري). ومن ثم فأن التصنيف غير المراقب لا ينتهي بدون تدخل بشري، لكنه في نفس الوقت لا يبدأ بمعرفة تقسيم مبدئي للبيانات كما في حالة التصنيف المراقب.

٨-٢٦ دمج و تكامل و تحليل البيانات

في الأيام الاولي للاستشعار عن بعد التناظري (عندما كان مصدر البيانات الوحيد هو التصوير الجوي) كان دمج و تكامل البيانات من المصادر المتعددة صعبا. بينما في وقتنا المعاصر فأن معظم البيانات تكون في صورة رقمية ومن عدة مستشعرات مما يجعل دمج البيانات طريقة معتادة للتفسير و التحليل. يشمل دمج و تكامل البيانات Data integration دمج عدة أنواع من البيانات مختلفة المصادر في محاولة لاستخراج معلومات جديدة أو معلومات أفضل. وقد يشمل الدمج بيانات تكون في طبيعتها متعددة النطاقات و متعددة الفترة الزمنية و متعددة الوضوح المكاني و متعددة المستشعرات.



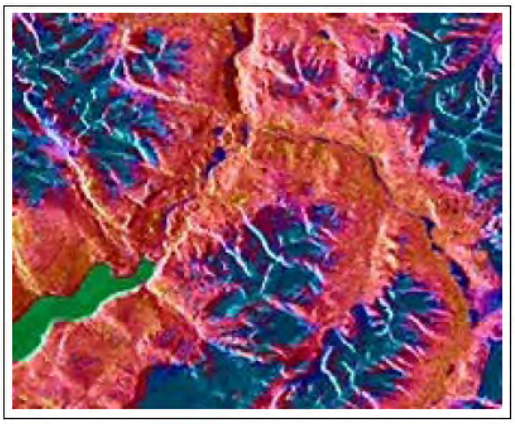
شكل (٢٦-٣٠) دمج و تكامل البيانات

سبق التعرض لدمج البيانات متعددة التاريخ عندما شرحنا طرح المرئيات. ان المرئيات المستشعرة في تواريخ مختلفة multi-temporal images يمكن تطبيقها لبيان التغيرات الزمنية من خلال طرق بسيطة مثل طرح البيانات أو من خلال طرق أكثر تعقيدا مثل المقارنات المتعددة لتصنيفات مختلفة. أيضا فأن دمج و تكامل المرئيات متعددة الوضوح المكاني multi-resolution images يكون مفيدا في عدد من التطبيقات. فدمج بيانات عالية الوضوح المكاني مع بيانات منخفضة الوضوح يزيد بدرجة ملحوظة من وضوح التفاصيل المكانية مما يزيد من القدرة علي تمييز الأهداف. وتعد بيانات القمر سبوت مناسبة لمثل هذا التطبيق حيث يتم دمج البيانات أحادية النطاق أو الأبيض و أسود panchromatic ذات الوضوح المكاني ١٠ أمتار مع البيانات متعددة النطاقات ذات الوضوح المكاني ٢٠ متر. فهنا فأن البيانات متعددة النطاق تؤمن الوضوح الطيفي الجيد بينما البيانات أحادية النطاق تؤمن وضوحا مكانيا أفضل.

شكل (٢٦-٣١) دمج البيانات متعددة الوضوح المكاني

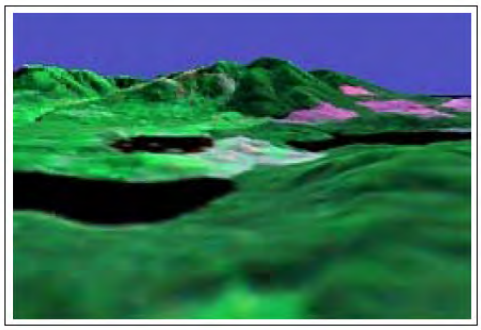
أيضا يمكن دمج بيانات من عدة مستشعرات، ومن أمثلة هذا التطبيق دمج بيانات بصرية متعددة النطاقات مع بيانات مرئيات الرادار. فهذين المصدرين من مصادر البيانات يقدمان لنا كما هائلا من

البيانات عن السطح، فالبيانات البصرية تؤمن لنا معلومات طيفية تفصيلية تفيدنا في التمييز بين أنواع غطاءات السطح بينما المرئيات ارادارية تركز علي التفاصيل التركيبية في المرئية.



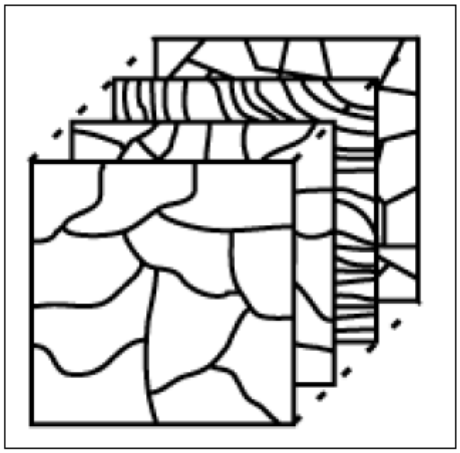
شكل (٢٦-٣٢) دمج مرئيات استشعار بصرية و مرئيات رادارية

يتطلب دمج بيانات متعددة المصادر أن تكون هذه البيانات مسجلة هندسيا (أي مرجعة جغرافية) سواء بتسجيل كل مصدر الي المصادر الأخرى أو بتسجيلهم الي نظام احداثيات جغرافية واحد أو الي خريطة أساس base map. أيضا يمكن دمج مصادر أخري من البيانات مع بيانات الاستشعار عن بعد. فعلي سبيل المثال يمكن دمج بيانات نماذج الارتفاعات الرقمية Digital Elevation Models (أو اختصارا DEM) أو نماذج التضاريس الرقمية Digital Terrain Models (أو اختصارا DTM) مع بيانات المرئيات ليخدم هذا الدمج عدة تطبيقات. فنماذج الارتفاعات الرقمية قد تكون مفيدة في عمليات تصنيف المرئية حيث يمكن تصحيح تغيرات التضاريس و الميول باستخدام هذه النماذج مما يزيد من دقة تصنيف المرئية. أيضا فأن نماذج الارتفاعات و التضاريس الرقمية تكون مفيدة في تطوير المشاهد ثلاثية الأبعاد (المجسمات) من خلال اسقاط مرئية الاستشعار عن بعد علي بيانات الارتفاعات لتحسين رؤية المنطقة الجغرافية بصورة مجسمة.



شكل (٢٦-٣٣) دمج بيانات الاستشعار مع نماذج الارتفاعات الرقمية

يعد دمج بيانات متعددة الأنواع و من مصادر مختلفة هو ذروة تحليل البيانات. ففي بيئة رقمية حيث تكون كافة البيانات مرجعة هندسيا (أو جغرافيا) فأن امكانيات استخراج و استنباط المعلومات تكون أعلي بكثير. وهذا المفهوم هو أساس التحليل في بيئة نظم المعلومات الجغرافية Geographic Information Systems (أو اختصارا GIS). فأي نوع معلومات يمكن ارجاعه هندسيا/جغرافيا يمكن من ثم وضعه داخل هذا الاطار الرقمي/ كما في مثال بيانات نماذج الارتفاعات الرقمية. وكمثال اخر فيمكن دمج الخرائط الرقمية للتربة و غطاءات الأرض و شبكات الطرق و المواصلات ... الخ طبقا للهدف المنشود. أيضا فأن نتائج تصنيف مرئية فضائية يمكن أن يستخدم لاحقا كمصدر جديد داخل نظام المعلومات الجغرافية ومن ثم يمكن تحديث الخرائط الموجودة بالفعل. وكقاعدة عامة فأنه كلما زادت البيانات أثناء التحليل تحسنت النتائج وزادت دقتها بدرجة أكثر كثيرا من استخدام مصدر واحد للبيانات.



شكل (٢٦-٣٤) مفهوم تعدد أنواع البيانات داخل نظم المعلومات الجغرافية

الفصل السابع و العشرين

تطبيقات الاستشعار عن بعد

يستعرض هذا الفصل بعض تطبيقات الاستشعار عن بعد واستنباط المعلومات منها.

٢٧-١ مقدمة

لكل مستشعر من المستشعرات هدفا مخصصا، فالمستشعرات البصرية مصممة بالتركيز علي النطاقات الطيفية التي سيتم جمع بياناتها بينما لمستشعرات الرادار فأن زاوية السقوط و نطاق الموجات القصيرة يلعبان دورا حيويا في تحديد التطبيقات المناسبة لهذه المرئيات. ان لكل تطبيق من تطبيقات الاستشعار عن بعد متطلباته في درجة الوضوح المكانية و درجة الوضوح الطيفية و درجة الوضوح الزمنية (فترة اعادة الزيارة). فعلي سبيل المثال فأن مرئية أحادية النطاق (أي غير ملونة) لن تكون حساسة لتمييز صحة النباتات بسبب ان تغير مستوي الكلوروفيل لن يكون كبيرا في النطاق الاحمر من الاشعة المرئية. وكمثال اخر فان تطوير خرائط يتطلب مستوي دقيق من درجات الوضوح المكانية. أيضا فهناك العديد من التطبيقات التي تتطلب فترة قصيرة لإعادة الزيارة مثل تطبيقات متابعة تسرب الزيت وحرائق الغابات وحركة الكتل الجليدية في المحيطات، بينما هناك تطبيقات أخري قد يكون مناسبا لها اعادة الزيارة بصفة موسمية فقط (مثل تمييز المحاصيل الزراعية). بل ربما يتم استخدام أكثر من مستشعر لمعالجة متطلبات تطبيق معين.

٢٧-٢ تطوير الخرائط

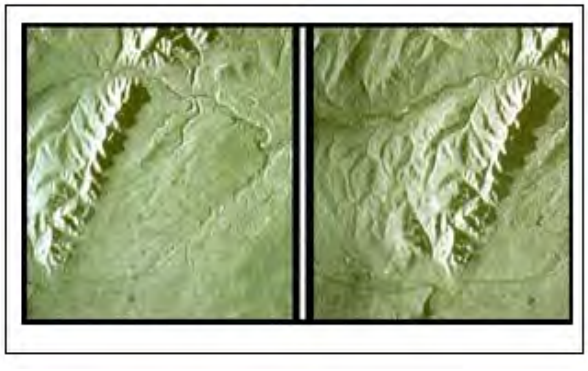
تعد الخرائط مكونا رئيسا من مكونات ادارة موارد الأرض، والخرائط في نفس الوقت هي أحد منتجات عملية تحليل بيانات الاستشعار عن بعد. فالخرائط الجغرافية و الموضوعية وخرائط الأساس لها أهمية كبيرة في عمليات التخطيط و المتابعة و التقييم لعمليات الادارة و الاستكشاف والتخطيط. كما أن التمثيل الرقمي للارتفاعات و التضاريس (أي نماذج الارتفاعات الرقمية DEM) ودمجها في اطار نظم معلومات جغرافية حيوية في التطبيقات المدنية و العسكرية المعاصرة. والآن هناك طلب متزايد علي منتجات الاستشعار عن بعد للاستخدام في مجال تطوير الخرائط. وتشمل تطبيقات الخرائط:

- الخرائط البلانيمترية
- الخرائط الطبوغرافية
- الخرائط الموضوعية
- نماذج الارتفاعات الرقمية

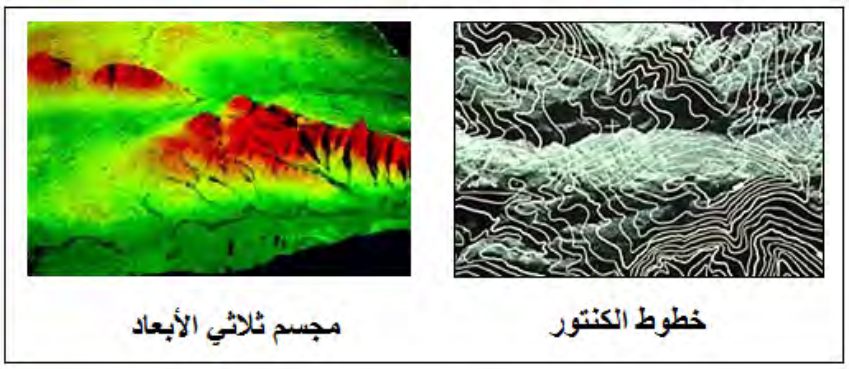
يشمل تطوير الخرائط البلانيمترية planimetry من تحديد و توقيع غطاءات الأرض الاساسية و شبكات الصرف والبنية التحتية و شبكات النقل و المواصلات في المستوي الأفقي x-y. وبصفة عامة فأن البيانات البلانيمترية (ثنائية الأبعاد) ضرورية للتطبيقات علي مستوي كبير large scale مثل التخطيط العمراني و ادارة الخدمات. يمكن استخدام طرق المساحة الأرضية وأيضا

طرق الرصد علي الأقمار الصناعية مثل تقنية النظام العالمي لتحديد المواقع GPS في الحصول علي بيانات و قياسات عالية الدقة. إلا أن هناك قيود عديدة تحد من استخدام هذه التقنيات خاصة أنها طرق مكلفة اقتصادية وتواجه مشاكل في مسح مناطق كبيرة أو مناطق نائية. وهنا يبرز الاستشعار عن بعد كوسيلة تقنية هامة في تطوير هذا النوع من الخرائط. وفي مثل هذا التطبيق فأن المرئيات عالية الوضوح المكاني تكون مطلبا أساسيا للحصول علي دقة عالية لهذه الخرائط. وفي حالة المناطق المغطاة بالسحب و الغيوم فأن المرئيات الرادارية تكون بديلا مناسبا.

يعد توافر نموذج ارتفاعات رقمي DEM مطلبا حيويا لعمل التصحيحات الهندسية و الراديومترية لمرئيات الاستشعار عن بعد، وأيضا لتطوير الخرائط الكنتورية ولتحليل تضاريس سطح الأرض. ففي العصر الحالي فأن معظم التطبيقات الخرائطية لا تعتمد فقط علي الخرائط البلانيمترية ثنائية الأبعاد. وقد تزايد الطلب علي نماذج الارتفاعات الرقمية مع انتشار تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية. وتوجد عدة مصادر لتطوير نموذج ارتفاعات رقمي مثل عمل قياسات لعدة نقاط باستخدام طرق المسح الأرضي و GPS، ثم تطبيق الطرق الرياضية لاستنباط interpolation اللارتفاعات بين هذه النقاط. لكن هذه الطرق التقليدية تستهلك الكثير من الوقت ومكلفة اقتصاديا و من الصعب التعامل معها في تطوير الخرائط علي مستوي اقليمي. ومن ثم فأن تطوير نماذج الارتفاعات الرقمية من بيانات الاستشعار عن بعد يقدم بديلا عالي الكفاءة. وهناك طريقتين رئيسيتين يتم تطبيقهما وهما: (١) القياس من الصور المزدوجة المتداخلة stereo-grammetry، (٢) التحليل الفرقي لبيانات الرادار Interferometry. فالأسلوب الأول يعتمد علي استخراج معلومات الارتفاعات (المناسيب) من المرئيات المتداخلة سواء من الصور الجوية أو من بعض أنواع المرئيات مثل SPOT و SAR. أما الطريقة الثانية فتعتمد علي تحليل بيانات عدة مسارات متتالية (أو طريقة الأنتنا المزدوجة) لمستشعرات SAR سواء الجوية أو الفضائية. وهذه الطريقة الأخيرة يمكنها توفير مستويات عالية من الدقة قد تصل الي عدة سنتيمترات للرادار الجوي أو عدة ديسيمترات للرادار الفضائي. ومن أمثل تطبيقات نماذج الارتفاعات الرقمية مراقبة تصدعات القشرة الأرضية وانخفاض الأراضي (نتيجة سحب المياه الجوفية) وحركة القشرة الأرضية نتيجة الزلازل و البراكين ومراقبة المنشئات الضخمة مثل السدود.



شكل (٢٧-١) مرئيات رادار متداخلة



شكل (٢٧-٢) طرق تمثيل الارتفاعات

حديثا تزايد الطلب علي قواعد البيانات الرقمية الجغرافية والخرائط الرقمية سواء الطبوغرافية أو الموضوعية. وتتكون الخريطة الطبوغرافية من خطوط الكنتور بالإضافة للمعلومات البلانيمترية التفصيلية، وتخدم كقاعدة بيانات عامة للاستخدام المدني و العسكري أيضا. تطوير الخريطة الموضوعية الأساسية Baseline Thematic Mapping (أو اختصارا BTM) هي تكامل أو دمج بين مرئيات فضائية رقمية مع استخدامات و غطاءات الأرض ومعلومات طبوغرافية لكي تكون ما يعرف باسم الخريطة المصورة image map. وقد تم تطوير هذا النوع الجديد من الخرائط الموضوعية thematic maps لكي يأخذ في الاعتبار مميزات معالجة المرئيات و مميزات دمج عدة أنواع من المعلومات المكانية من عدة مصادر مما يزيد من امكانية عرض كم أكبر من المعلومات في صورة كارتوجرافية (أو خرائطية). وعادة ما تتكون الخريطة الموضوعية الأساسية (أو خريطة الأساس الموضوعية) من قواعد بيانات طبوغرافية و غطاء أرض و بنية تحتية. ويتم عرض معلومات موضوعية معينة علي خريطة الأساس لكي تخدم نوعا معينا من المستخدمين. أما عن دور الاستشعار عن بعد في هذا الموضوع فأن المرئيات تقدم معلومات مكملة للتفاصيل الموضوعية المعروضة، ومن ثم فتعمل كخريطة أساس base map. فعلي سبيل المثال فأن المرئيات متعددة النطاقات تعد ممتازة لتوفير معلومات تكميلية عن غطاء الأرض.

شكل (٢٧-٣) مفهوم خريطة الأساس الموضوعية

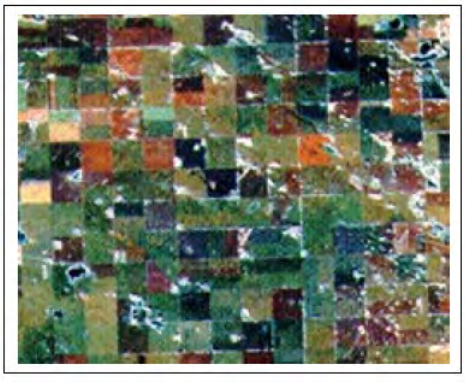
٢٧-٣ تطبيقات زراعية

تلعب الزراعة دورا رئيسا في اقتصاد الدول المتقدمة و الدول النامية علي السواء. فإنتاج الغذاء هام لكل فرد، والإنتاج بصورة اقتصادية هو الهدف للمزارع البسيط و للمؤسسات الزراعية الكبري. ومن ثم فهناك حاجة رئيسية لمعرفة او تقدير المنتج (كما و جودة) للتحكم في السعر ومتطلبات التجارة الدولية.

تستخدم الصور الجوية و المرئيات الفضائية كأدوات تقنية لتطوير الخرائط الخاصة بتحديد انواع المحاصيل و فحص صحتها و جودتها ومراقبة العمليات الزراعية، وتضم التطبيقات الزراعية للاستشعار عن بعد:

- تحديد أنواع المحاصيل
- تقييم حالات المحاصيل
- تقدير الانتاج
- خرائط حالات التربة
- خرائط ادارة التربة
- متابعة خطوات الزراعة

يعد تحديد نوع المحصول عاملا هاما لعدة أسباب منها ان معرفة نوع حصول معين سيستخدم في تقدير انتاجه ومعرفة وقت حصاده وأيضا متابعة حالة التربة وتقدير الخسائر في حالة التعرض لعناصر طبيعية مثل العواصف و الفيضانات. وكانت الطرق التقليدية لمعرفة انواع المحاصيل تعتمد علي السجلات الزراعية و الزيارات الميدانية. والآن اصبح الاستشعار عن بعد وسيلة اقتصادية عالية الكفاءة لتجميع المعلومات وتحديد انواع المحاصيل. بل ان الاستشعار عن بعد يقدم اكثر من ذلك حيث يمكن الحصول علي معلومات عن صحة المحصول ومتابعة مراحل نموه من خلال المرئيات متعددة النطاقات. أيضا فان مرئيات الرادار يمكنها توفير معلومات اضافية عن التوزيع و التركيب و محتوي الرطوبة، ومن ثم فأن دمج بيانات من كلا نوعي المستشعرات (البصرية و الرادارية) يوفر كفاءة افضل في التصنيف الدقيق لأنواع المحاصيل. وتعد نتائج تفسير و تحليل المرئيات كبيانات مدخلة input لنظم المعلومات الجغرافية GIS لتكوين قواعد بيانات زراعية رقمية.

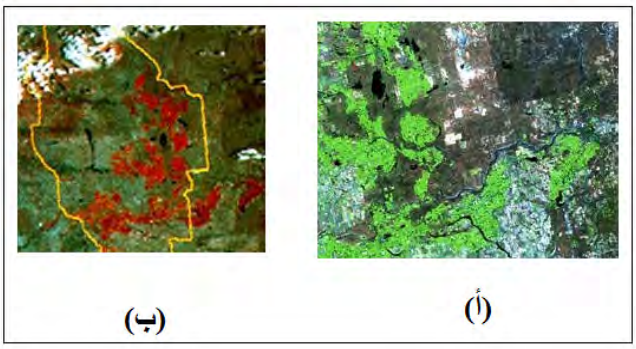


شكل (٢٧-٤) تحديد أنواع المحاصيل

يعد تقدير صحة المحصول و الاكتشاف المبكر لأي أمراض من العوامل الهامة للحصول علي انتاج وراعي جيد. فمن الضروري اكتشاف ومعالجة أية عوامل اجهاد ناتجة عن قلة المحتوي المائي بالإضافة لأية أمراض أو اصابات قد تحدث للمحصول. وهذه المراقبة تتطلب الحصول علي مرئيات بصورة متكررة (بحد أقصي أسبوعيا) وتوفيرها للمزارعين بسرعة (عادة في خلال يومين). أيضا تستخدم بيانات الاستشعار عن بعد في تحديد معدلات نمو النباتات فقد تكون هناك معدلات نمو مختلفة في المزرعة الواحدة نتيجة نقص النترات أو الأسمدة علي سبيل المثال. وبتوفير هذه البيانات للمزارعين فيمكنهم اتخاذ القرار السليم وتحديد نوع و كمية السماد المطلوب. أيضا فأن بيانات الاستشعار عن بعد تساعد في تحديد الضرر الناتج عن ظروف الطقس مثل تأثير الجفاف أو الرطوبة العالية. فالمرئيات لا تساعد فقط في اكتشاف المشكلات بل انها تستخدم للإدارة الجيدة للعملية الزراعية.

شكل (٢٧-٥) تحديد مشكلات المحاصيل

تحتوي النباتات الصحيحة (ذات صحة جيدة) علي كميات كبيرة من مادة الكلوروفيل، ومن ثم فأن انعكاساتها في النطاقين الأزرق و الأحمر من الضوء المرئي سيكون قليلا حيث أن الكلوروفيل يمتص الطاقة في هذين النطاقين. إلا أن الانعكاس في اللوم الأخضر و في الأشعة تحت الحمراء القريبة سيكون عاليا. وعلي العكس فأن النبات المريض لن يحتوي علي كم كبير من الكلوروفيل، ومن هنا فأن استخدام النطق الأخضر المرئي و نطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة في المرئيات سيكون مفيدا لاكتشاف أمراض النباتات. ومن خلال فحص المعامل الطبيعي الفرقي للنباتات Normalized Difference Vegetation Index (المعروف اختصارا بمصطلح NDVI كما ذكرنا في الفصل الثالث) بجد أن النبات السليم سيكون له معامل NDVI عالي بينما النبات المريض سيكون معامل NDVI له منخفضا. ففي المثال التالي "أ" (مرئية ملونة) نري أن المنطقة المروية ستظهر بلون أخضر فاتح بينما المنطقة الجافة ستكون بلون غامق. أما المثال الثاني "ب" (مرئية ملونة وأشعة تحت حمراء) فالنبات الصحي السليم سيظهر بلون أحمر فاتح.

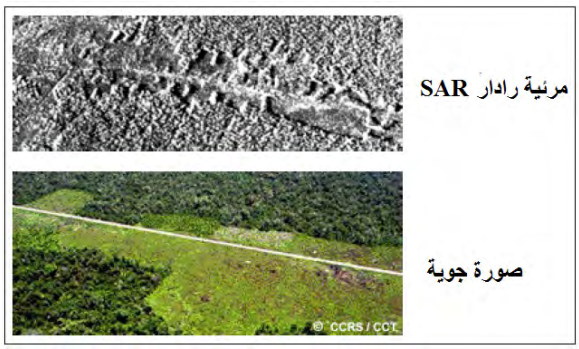


شكل (٢٧-٦) تحديد صحة النباتات

٢٧-٤ تطبيقات مراقبة ازالة الغابات

يعد ازالة الغابات deforestation مشكلة عالمية كبري لها تأثيرات متعددة. فعلي سبيل المثال ففي أوروبا فأن التلوث الصناعي قد دمر نسبة كبيرة من أراضي الغابات وخاصة في جمهوريات التشيك و ألمانيا و بولندا. أيضا ففي البلدان الاستوائية فأن ازالة الغابات قد دمر الكثير من الاراضي الزراعية و المراعي في أفريقيا و اسيا و أمريكا اللاتينية. وجدير بالذكر فأن فقدان الغابات يؤدي الي زيادة تعرية التربة و ملوحة الأنهار ويؤثر علي الحياة البرية ومصادر مياه الشرب بالإضافة للإنتاج الزراعي.

يعد الاستشعار عن بعد - مع أدوات أخري - الي تحليل أفضل لمشكلة ازالة الغابات. فالمرئيات متعددة النطاقات توفر وسيلة جيدة لتحليل التغيرات change detection analysis، حيث يتم دمج مرئيات من سنوات سابقة مع مرئيات حديثة ومن ثم قياس الفروق في مساحة و امتداد الغابات. أيضا يمكن الاستفادة من المرئيات الرادارية في تحديد المناطق الأكثر عرضة لهذه المشكلة وتحديد أسبابها. وفي البلدان التي يسمح بها بقطع الأشجار فأن الاستشعار عن بعد يكون أداة جيدة لمراقبة مناطق و مواصفات هذه الأنشطة. وعلي النطاق العالمي وخاصة لمبادرات منظمة الأمم المتحدة فأن مرئيات الاستشعار عن بعد توفر غطاء مكانيا واسعا كما أنها توفر تكامل البيانات و اتصالها.



شكل (٢٧-٧) مراقبة ازالة الغابات حول طريق

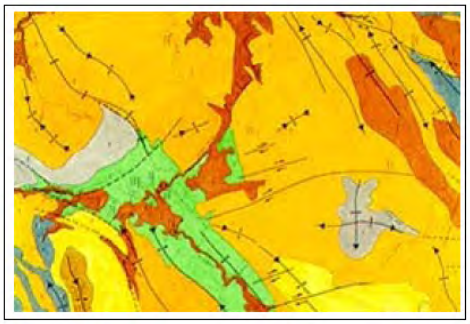
٢٧-٥ تطبيقات جيولوجية

يهتم علم الجيولوجيا بدراسة تراكيب و انواع سطح الارض والأسطح التحتية subsurface بهدف فهم العمليات الفيزيقية للقشرة الارضية. والصورة التقليدية للجيولوجيا هي استكشاف exploration و استخراج exploitation المعادن والموارد الهيدروكربونية مثل البترول. أيضا تشمل الجيولوجيا دراسة المخاطر الطبيعية مثل البراكين و الانزلاقات الارضية و الزلازل، ومن ثم فأن الدراسات الجيوتقنية تعد عاملا مهما في مشروعات الهندسة المدنية.

يقدم الاستشعار عن بعد وسيلة جيدة لاستخراج معلومات عن تراكيب سطح الارض والأسطح التحتية، لكنه عادة ما يكون مدعوما بمصادر أخري للبيانات تقدم قياسات مكملة. وتشمل التطبيقات الجيولوجية للاستشعار عن بعد:

- خرائط طبقة العمق bedrock mapping
- خرائط التراكيب الجيولوجية structural mapping
- استكشاف المعادن mineral exploration
- استكشاف موارد الهيدروكربونات hydrocarbon exploration
- استكشاف و استخراج الرمال والحصى sand and gravel exploration
- الجيولوجيا البيئية environmental geology

تلعب الجيولوجيا الانشائية structural geology دورا هاما في استخراج المعادن و البترول وأيضا في مراقبة المخاطر الطبيعية. وخرائط التراكيب الجيولوجية (الخرائط الانشائية) تحدد خصائص التراكيب مثل الفوالق و الصدوع، وهو ما يفيد في تفسير و مراقبة حركات القشرة الارضية crustal movements. وبالاستعانة بالقياسات التفصيلية للتراكيب الجيولوجية (مثل المسح الزلزالي seismic surveying) فيمكن تحديد الاماكن المحتملة للبترول و الغاز. ويقدم الاستشعار عن بعد رؤية أمثر شمولا لعناصر الخرائط الانشائية في منطقة اقليمية بدلا من مجرد معلومات عند نقاط أرضية محددة. وفي المناطق كثيفة الغطاء النباتي فأن مرئيات الرادار (وبسبب أنها حساسة للتغير في التضاريس) تقدم وسيلة عالية الكفاءة لبيان التراكيب الجيولوجية



شكل (٢٧-٨) مثال لخريطة التراكيب الجيولوجية

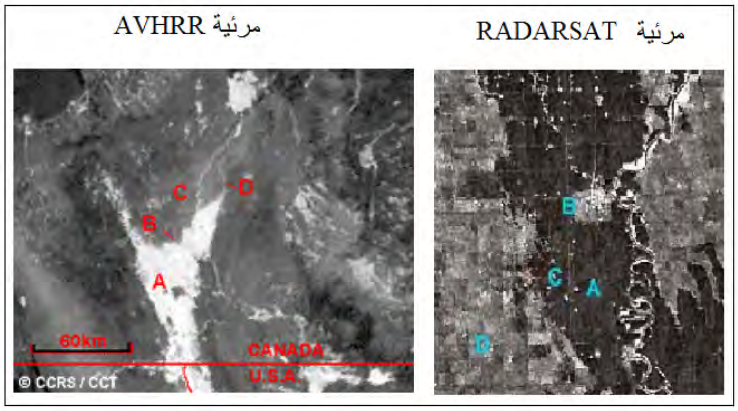
شكل (٢٧-٩) مثال لمرئية رادارية تبرز التراكيب الجيولوجية

٦-٢٧ تطبيقات هيدرولوجية

يهتم علم الهيدرولوجيا بدراسة المياه علي الأرض، سواء كانت مياه جوفية أو سطحية أو أمطار أو ثلوج. وعادة فأن معظم العمليات الهيدرولوجية تكون ديناميكية ليس فقط علي مر السنوات انما أيضا ما بين الفصول، ومن ثم فهي تتطلب أرصاد متكررة. وهذا أحد مميزات استخدام بيانات الاستشعار عن بعد في الدراسات الهيدرولوجية، بالإضافة الي أن المرئيات قدم صورة واسعة عن طبيعة الظواهر الهيدرولوجية و تغيراتها. وتشمل التطبيقات الهيدرولوجية:

- مراقبة الانهار و البحيرات
- مراقبة و تطوير خرائط الفيضانات
- مراقبة حركة الجبال الثلجية glacier
- تحديد التغيرات في دلتا الأنهار
- تطوير الخرائط و مراقبة الأراضي المبللة
- تقدير رطوبة التربة
- مراقبة امتداد الثلوج
- قياس عمق الثلوج
- تطوير خرائط شبكات التصريف
- نمذجة الأحواض الهيدرولوجية
- اكتشاف التسرب في قنوات الري
- جدولة مواعيد الري

تعد الفيضانات ظاهرة طبيعية في الدورة الهيدرولوجية. والفيضان ضروري لزيادة خصوبة التربة من خلال اضافة مواد مغذية nutrients ورواسب صغيرة. لكن وعلي الجانب الاخر فأن الفيضانات قد تكون مدمرة وتتسبب في وفيات وأضرار كبيرة للبنية التحتية المدنية و الحضرية. وتستخدم تطبيقات الاستشعار عن بعد في مراقبة و قياس الحدود المكانية للمناطق التي تعرضت للفيضان، ومن ثم تحديد طرق الاخلاء والإنقاذ. ومع دمج بيانات الاستشعار عن بعد في اطار نظام معلومات جغرافي GIS فيمكن الحصول علي تقييم دقيق و سريع لمناسيب المياه و الأضرار والمناطق التي تعرضت لمخاطر الفيضانات. وتشمل قائمة المستفيدين من هذه التطبيقات علي سبيل المثال هيئات تخطيط المدن و إدارات الدفاع المدني و إدارات الأرصاد الجوية و شركات النقل و المواصلات و شركات التأمين. ويحتاج معظم هؤلاء المستخدمين الحصول علي البيانات بصورة شبه لحظية near real-time فعادة ما تكون فترة حدوث الفيضان فترة زمنية صغيرة نسبيا ويكون الطقس مشبعا بالغيوم و السحب الكثيفة. وفي مثل هذه الحالات يبرز دور المرئيات الرادارية للاستفادة منها في مراقبة الفيضانات. ومع اسقاط مرئيات تقنية SAR علي مرئيات بصرية سابقة لما قبل حدوث الفيضان، فيمكن تحديد المناطق التي تعرضت للغرق وتقييم مخاطر الفيضان.



شكل (٢٧-١٠) أمثلة لتطبيقات المرئيات في مراقبة الفيضان

٢٧-٧ تطبيقات غطاءات و استخدامات الأرض

مع أن مصطلحي غطاء الأرض Land Cover و استخدام الأرض Land Use يستخدمان كما لو كانا يؤديان نفس المعني، إلا أن هناك فارقا بينهما. فغطاء الأرض يشير الي كل غطاء لسطح الأرض مثل النباتات و المنشئات المدنية و المياه و التربة ....الخ. ومن ثم فأن تحديد و تطوير خرائط لغطاء الأرض هام لدراسات المراقبة علي الصعيدين الاقليمي و الدولي ولإدارة الموارد الطبيعية ولأنشطة التخطيط. أما علي الجانب الآخر فأن استخدامات الأرض تشير الي الهدف الذي تخدمه الأرض مثل الزراعة و الحياة البرية. وتشمل تطبيقات استخدامات الأرض المراقبة و وتطوير الخرائط لبيان استخدام كل بقعة أرض وما يطرأ علي هذا الاستخدام من تغير مع مرور الزمن. ومن هنا فأن القياسات الناتجة من بيانات الاستشعار عن بعد تستخدم في استنباط بيانات غطاء الأرض ومنها يمكن استنباط استخدامات الأرض خاصة مع استخدام مصادر أخري من البيانات المكملة و المعرفة السابقة. وتشمل تطبيقات استخدامات الأرض:

- ادارة الموارد الطبيعية
- حماية الحياة البرية
- تطوير الخرائط كمدخل لنظم المعلومات الجغرافية
- التوسعات المدنية و الحضرية
- اكتشاف المخاطر و الأضرار (للحرائق و الفيضانات .... الخ)
- الحدود القانونية وحساب الضرائب

مع زيادة السكان يزداد التوسع العمراني للمدن، ومن ثم تتناقص استخدامات الأرض الزراعية علي أطراف هذه المدن. فتوسع المدن يعد مؤشرا للتمدن urbanization والتوسع الصناعي industrialization (أي التنمية development)، لكنه غادة ما يكون له أثرا سلبيا علي بيئة المنطقة. ويتم قياس التغير في استخدام الأرض (من الحضري الي المدني) بهدف تقدير زيادة السكان و التنبؤ والتخطيط لهذا التوسع العمراني من قبل المخططين. ومن هنا فأن تحليل استخدام الأرض الزراعي و المدني هام للتأكد من أن خطط التنمية العمرانية لا تجير علي الأرض

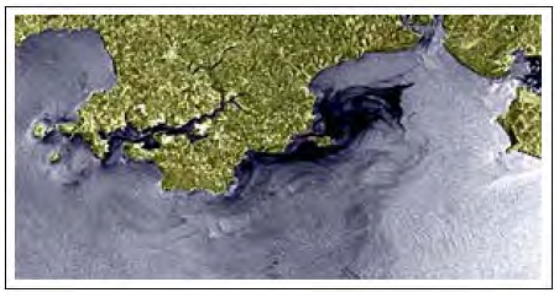
الزراعية. وهنا يأتي دور تحليل بيانات الاستشعار عن بعد متعددة التاريخ، والتي توفر رؤية منطقية لتوسع المدن و امتدادها. والعامل الأساسي هنا في اكتشاف تغير استخدام الأرض (من الحضري الي المدني) هو التمييز بين الاستخدامات الحضرية (المزارع و الغابات) والاستخدامات المدنية للأرض (المناطق السكنية والمناطق الصناعية). وهنا يتم تطبيق طرق الاستشعار عن بعد لتصنيف أنواع استخدامات الأرض بصورة جيدة و دقيقة لمساحات شاسعة من الأرض وبصورة متكررة. وعادة فأن مثل هذه التطبيقات تعتمد علي درجة وضوح مكانية عالية بهدف تحديد التفاصيل المكانية وأيضا بيانات متعددة النطاقات لكي يمكن التمييز بين الاستخدامات المتعددة للأرض.

٨-٢٧ تطبيقات مراقبة المحيطات و الشواطئ

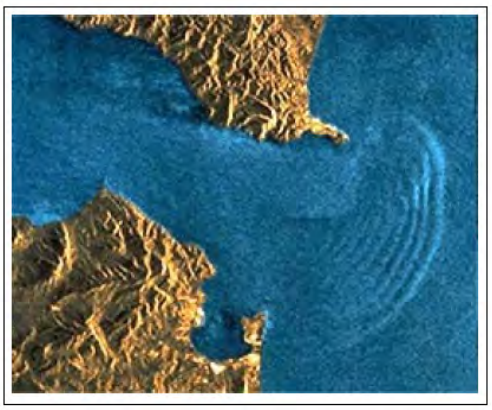
لا يقدم المحيط لنا الطعام فقط انما يعمل كخطوط نقل و مواصلات وله أهمية بالغة في نظام الطقس علي الأرض والحفاظ علي الدورة الهيدرولوجية للمياه. ومن هنا فأن فهم الطبيعة الديناميكية للمحيطات هام لتقدير حجم المخزون السمكي ولخطوط النقل البحرية ودراسة آثار الظواهر المناخية والتنبؤ بالعواصف ومن ثم تقليل مخاطرها. وتشمل دراسات المحيط: دراسة الرياح و التيارات (من حيث الاتجاه و السرعة و الارتفاع) وتحديد الأعماق البحرية bathymetry وأيضا دراسة حرارة المياه. وتشمل تطبيقات الاستشعار عن بعد في مجال مراقبة المحيطات:

- تحديد أنماط المحيط (التيارات، أعماق المحيطات، مناطق المياه الضحلة، الموجات ...الخ).
- التنبؤ بالعواصف
- تقدير المخزون السمكي
- مراقبة درجات حرارة المياه
- مراقبة جودة المياه
- مراقبة تسرب الزيت من مواقع استخراجه البحرية
- الملاحة البحرية
- مراقبة تأثيرات المد و الجزر و العواصف
- تحديد الخط الفاصل بين البحر و الأرض
- مراقبة حركة خطوط الشواطئ
- تطوير خرائط الأهداف الشاطئية

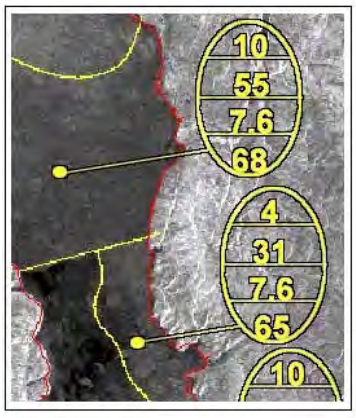
تعد خطوط الشواطئ coastlines فاصلا حساسا بين المياه و الأرض وتتأثر بالتغيرات التي تحدث من العمليات الديناميكية للبحار و المحيطات. ومن المعلوم أن ٦٠% من سكان الأرض يعيشون في مناطق قريبة من المحيطات. ومن ثم فأنه من الضروري متابعة مراقبة تغيرات خطوط الشواطئ مثل التعرية الشاطئية و التمدن و التلوث. وهذه التطبيقات يمكن مراقبتها و اتطوير خرائط لها من خلال بيانات الاستشعار عن بعد.



شكل (٢٧-١١) مراقبة تسرب الزيت باستخدام المرئيات



شكل (٢٧-١٢) مراقبة التيارات البحرية باستخدام المرئيات



شكل (٢٧-١٣) تقدير أعماق الثلوج باستخدام المرئيات

الباب الخامس

الخرائط و الكارتوجرافيا

Maps and Cartography

الفصل الثامن و العشرين

علم الخرائط

٢٨-١ مقدمة

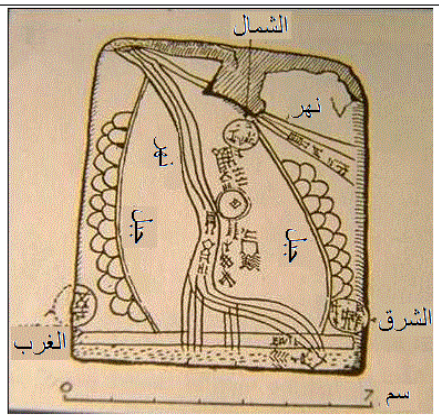
تعد الخرائط جسرا يربط بين العالم الداخلي لعقل الإنسان والعالم الخارجي والبيئة المحيطة به، كما أنها من أقدم وسائل الاتصال ونقل المعلومات بين جماعات البشر. يقول المؤرخون أن الإنسان قد عرف الخرائط حتى قبل أن يعرف الكتابة، فقد درج الإنسان منذ قديم الأزل أن"يرسم" طريقا الي هدفا أو موقعا جغرافيا معينا ليسهل عليه الوصول إلى هذا المكان أو الهدف. وقد كانت الجماعات البشرية في العصر البدائي تتجول في مناطق شاسعة بهدف الحصول علي الطعام و الماء مما جعل معرفة الاتجاهات و المسافات و "رسمها" في غاية الأهمية لهم. وقد أكتشف الإنسان القديم أن "الرسم" يمكنه من توثيق و نقل الكثير من المعلومات وخاصة المكانية بطريقة أكثر سهولة و دقة من "الكلام". وقد وجد الأثريون العديد مما يمكن أن نطلق عليه "خرائط" للحضارات البدائية أو حضارات ما قبل التاريخ، مما جعل البعض يرجع عمر الخرائط لحوالي ٨٠٠٠ عام. ومع أن البعض يعيد التاريخ المعروف للخرائط الي الخرائط البابلية، إلا أنه قد تم العثور في عام ١٩٦٣م علي ما يمكن أن نطلق عليه "رسم خرائطي" علي الجدران بطول تسعة أقدام في أنقرة بتركيا و يعود تقريبا لعام ٦٢٠٠ قبل الميلاد، ووجد أن هذا "الرسم" يصف قلعة هيوك في الأناضول وأمكن التعرف علي حوالي ثمانين مبني داخل القلعة والجبال البركانية المحيطة بها. وتوجد هذه اللوحة الجدارية في متحف جامعة هارفارد الأمريكية.

شكل (٢٨-١) أقدم "رسم خرائطي" يعود لعام ٦٢٠٠ قبل الميلاد

٢٨-٢ خرائط الحضارات القديمة

تعود أقدم الخرائط المعروفة الى الحضارة البابلية في العراق (حوالي ٢٥٠٠ عام قبل الميلاد) حيث أنشأت الخرائط كأساس لتقدير الضرائب وكانت ترسم علي لوحات من الصلصال المحروق. وتوجد في متحف آثار جامعة هارفارد الأمريكية أقدم خريطة بابلية معروفة باسم "خريطة جاسور" التي تم اكتشافها في مدينة جاسور شمال بابل في عام ١٩٣٠م وهي عبارة عن لوح من الصلصال مساحته ٧.٦ × ٦.٨ سنتيمتر موضحا عليها جزء من نهر و ما يحيط به من مرتفعات و تلال.

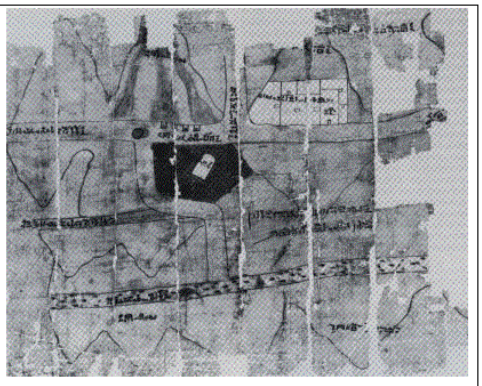
الخريطة الأصلية



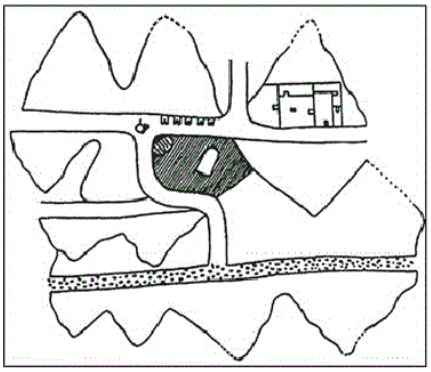
توضيح مصطلحات الخريطة

شكل (٢٨-٢) خريطة جاسور لعام ٢٥٠٠ قبل الميلاد

كما أسهمت الحضارة الفرعونية في مصر القديمة إسهاما قويا في تطور علم الخرائط حيث برع قدماء المصريين في علوم المساحة و الفلك و الرياضيات. أيضا كان الهدف الأساسي من وضع الخرائط حينئذ هو تقدير الضرائب علي الأراضي الزراعية، إلا أن قدماء المصريين كانوا يرسمون الخرائط علي ورق البردي المعرض للتلف سريعا مما جعل الخرائط المصرية القديمة نادرة في وجودها حتى اليوم. وتوجد أقدم الخرائط المصرية المعروفة في متحف تورينو ويعود تاريخها إلي عام ١٣٢٠ قبل الميلاد وتوضح موقع أحد مناجم الذهب في جنوب مصر وما يحيط بهذه المنطقة من معالم جغرافية حيث يظهر بها طريقين متوازيين يمران بمناطق جبلية، بينما يظهر أحد الأودية يربط بين نهر النيل و البحر الأحمر، ويظهر موقع منجم الذهب باللون الأحمر علي الخريطة. وتعبر هذه الخريطة التاريخية عن فهم الإنسان القديم لأهمية الخرائط وما يمكنها أن تحتوي من معلومات جغرافية عن مكان محدد حتى لو كان هذا المكان تحت سطح الأرض.



الخريطة الأصلية



توضيح مصطلحات الخريطة

شكل (٢٨-٣) خريطة المنجم الفرعوني لعام ١٣٢٠ قبل الميلاد

أيضا ساهمت الحضارة الصينية القديمة في علم الخرائط إسهاما فاعلا حيث قام العالم "بي هيسين" في حوالي عام ٢٢٧ قبل الميلاد بوضع أسس لعلم صناعة الخرائط (علم الكارتوجرافيا) عند صنع الخرائط لكافة مناطق الحضارة الصينية التي امتدت من إيران غربا

إلـي اليابـان شـرقا. وربمـا ترجـع البدايـة العلميـة الحقيقيـة لعلـم الكارتوجرافيـا إلـي الحـضارة الإغريقية التي بنيت علي مبادئ المساحة و الفلك و الرياضيات التي عرفتها الحضارات البابلية و الفرعونية و الصينية ثم محاولة رسم خرائط للعالم كله (المعروف في ذلك الوقت). ومن أشـهر الخـرائط العالميـة الإغريقيـة "خريطـة هيـرودوت" حـوالي عـام ٤٥٠ قبـل الميلاد والتـي رسمها بنـاءا علـي المعلومـات الجغرافيـة الحقيقيـة التـي جمعهـا مـن البحـارة، وأيـضا "خريطـة ايراتوستين" حوالي ٢٠٠ عام قبل الميلاد وهو الذي شغل منصب أمين مكتبة الإسكندرية في ذلك الوقت وقام بأول محاولة علمية لحساب محيط الأرض. أما رائد علم الكارتوجرافيا العلمية فهو العالم الكبير "بطليموس" – حوالي ١٠٠ عام قبل الميلاد - والذي ظلت نظرياته عن الجغرافيا و الخرائط قائمة لمدة أربعة عشر قرنا حتى حلت مكانها نظريات نيوتن في العصر الحديث. وتجدر الإشارة الي أن مفهوم الأرض في الحضارات القديمة كان أنها عبارة عن قرص من اليابسة يطفو فوق سطح مياه البحار و المحيطات.

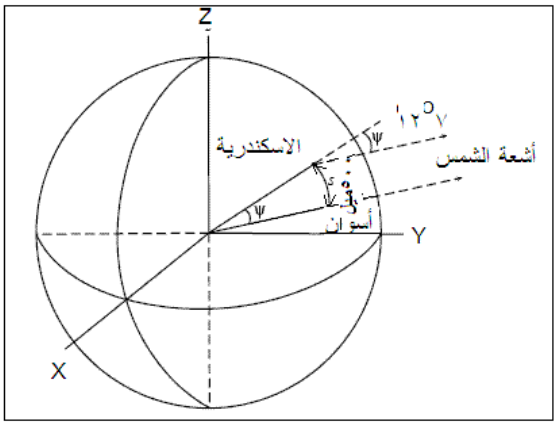
شكل (٢٨-٤) خريطة العالم لهيرودوت ٤٥٠ قبل الميلاد

شكل (٢٨-٥) خريطة العالم لبطليموس ١٠٠ قبل الميلاد

شكل (٢٨-٦) تصور الأرض كقرص من اليابسة يطفو فوق سطح المياه

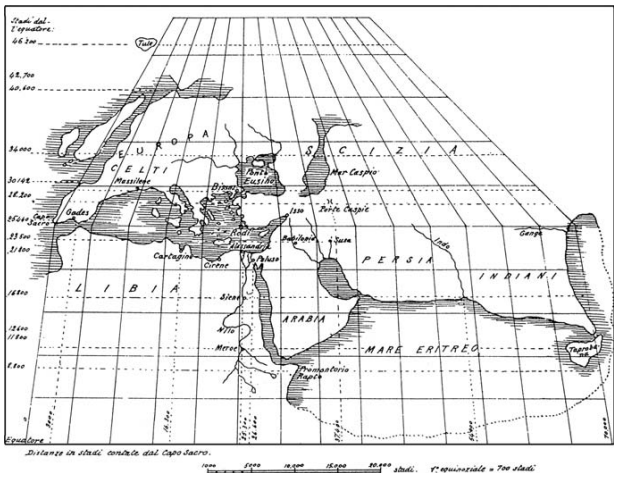
يعتمد رسم الخريطة علي معرفة شكل الأرض و حجمها حيث أن الخريطة ما هي الا رسم مصغر للأرض أو جزء منها. لذلك أسهم الرياضيون و الفلكيون اسهاما علميا كبيرا في علم الخرائط، وتعد تجربة العالم اليوناني ايراتوستين حوالي ٢٠٠ عام قبل الميلاد أول تجربة علمية لتقدير محيط الأرض باعتبار أنها كرة وليست قرص. لاحظ ايراتوستين أن الشمس في يوم ٢١ يونيو (حزيران) من كل عام تكون مرئية في مياه بئر بمدينة أسوان ، أي أنها تكون عمودية

تماما في هذا الموقع ، وبعد ذلك أفترض أن مدينة الإسكندرية تقع إلي الشمال مباشرة من مدينة أسوان. ثم قام بقياس زاوية ميل أشعة الشمس عند الإسكندرية ووجدها ٧.٢ درجة ، وقدر أن هذا الجزء – بين الإسكندرية و أسوان – يعادل ١/٥٠ من الدائرة التي تمثل الأرض (شكل ٢٨-٧). وبعد ذلك قام بقياس المسافة بين كلا المدينتين فكانت حوالي ٥٠٠٠ أستاديا (وحدة قياس المسافات في ذلك الوقت) أي ما يعادل ٥٠٠ ميل أو ٨٠٠ كيلومتر، ومن ثم تمكن هذا العالم من حساب محيط الأرض (٥٠ ضعف المسافة المقاسه بين أسوان و الإسكندرية) ليكون في تقديره حوالي ٢٥٠٠٠ ميلا. ومن المذهل أن نعرف أن هذه التجربة الجيوديسية في ذلك الزمن البعيد و باستخدام آلات بدائية لم تكن بعيدة إلا قليلا عن طول محيط الأرض الذي نعرفه اليوم وهو ٢٤٩٠١ ميلا.



شكل (٢٨-٧) تجربة العالم ايراتوستين لتقدير محيط الأرض

وبعد ذلك وتقريبا في عام ١٥٠ قبل الميلاد تمكن عالم الرياضيات اليوناني أبرخش (أو هيبارخوس) من وضع أول نظام إحداثيات للخرائط حيث قسم الأرض الي شبكة من الخطوط العرضية و الطولية علي مسافات متساوية بناءا علي الحسابات الفلكية.



شكل (٢٨-٨) خريطة أبرخش ١٥٠ قبل الميلاد: أول خريطة لها نظام إحداثيات

٢٨-٣ خرائط الحضارة الإسلامية

عني الدين الإسلامي منذ بدايته بالعلم علي اختلاف أنواعه و مذاهبه وحث المسلمين علي التعلم و طلب العلم مهما بعد المكان. ومع ازدياد رقعة الدولة والحضارة الإسلامية أهتم علماء المسلمين بعلوم الخرائط و الجغرافيا و الفلك و الرياضيات، فقاموا أولا بترجمة الكتب والنظريات الجغرافية السابقة إلي اللغة العربية ثم قاموا بالإبداع العلمي و تطوير هذه الأسس بصورة علمية دقيقة للغاية. فقد قام العالم الإسلامي الكبير "محمد بن موسي الخوارزمي" بوضع الأسس الرياضية لعلم الجغرافيا في كتابه "صور الأرض" في النصف الأول من القرن التاسع الميلادي. تجدر الإشارة إلي أن الحضارة الأوروبية قد أنصف إسهامات هذا العالم الكبير وتخليدا له فقد تم إطلاق أسم خوارزم Algorithm علي عملية و خطوات تطوير برامج الكمبيوتر. أيضا أهتم علماء المسلمين بالقياسات الدقيقة التي من شأنها زيادة دقة و جودة الخرائط المرسومة، فقاموا باختراع أول جهاز لقياس الزوايا و الاتجاهات وهو جهاز الإسطرلاب. وبجمع قياسات فلكية عديدة و دقيقة للأجرام السماوية و أماكنها و حركاتها تمكن علماء المسلمين من صنع أول نموذج مجسم للكرة السماوية مما أدي لتأسيس قواعد علمية جديدة لعلم الفلك.

جهاز الإسطرلاب لقياس الاتجاهات **نموذج مجسم للكرة السماوية**

شكل (٢٨-٩) من ابتكارات علماء المسلمين في الخرائط و الفلك

أيضا قام "أبو زيد أحمد بن سهل البلخي" بإعداد أطلس يضم مجموعة من الخرائط وهو المعروف باسم أطلس البلخي أو أطلس الإسلام. وفي المراجع العلمية و كتب تاريخ الخرائط أطلق الجغرافيين مصطلح "مدرسة البلخي" علي عدد كبير من صناع الخرائط في الحضارة الإسلامية لما تميز به هذا العالم الجليل من ابتكارات علمية ورؤية دقيقة لعملية رسم الخرائط، واستمرت هذه المدرسة عدة قرون. أما أشهر صناع الخرائط المسلمين فهو "أبو حسن علي المسعودي" والذي تعتبر خريطته أدق الخرائط العربية التي تحدد معالم العالم في ذلك الوقت، وأيضا العالم الكبير احمد بن عبد الله الإدريسي - في النصف الأول من القرن الثاني عشر الميلادي - والذي يعد كتابه "نزهة المشتاق في أخبار الآفاق" من أعمدة الكتب الجغرافية النفيسة

وأحتوي الكتاب علي خريطته الشهيرة للعالم. كما دأب علماء المسلمين علي وضع جداول تحدد المواقع الجغرافية (خطوط الطول و العرض) للمعالم الجغرافية حتى يمكن استخدام هذه "الإحداثيات" في إعداد الخرائط و في الترحال في الدولة الإسلامية المترامية الأطراف، وكانت هذه الجداول النصية من أهم الابتكارات الجغرافية للحضارة الإسلامية. أيضا ابتكر علماء المسلمين ما يعرف الآن باسم "الخرائط المناخية" حيث كانوا يقسمون المناطق الجغرافية الظاهرة علي الخرائط الي نطاقات مناخية. وبالإضافة لذلك فقد أسهم علماء المسلمين إسهامات علمية كبيرة في ابتكار معادلات و قوانين رياضية جديدة في علم المساحة و الجيوديسيا (علم القياسات علي سطح الأرض) وخاصة العالم الكبير أبو الريحان محمد بن أحمد البيروني الذي كان له انجازات قوية في تحديد الإحداثيات الدقيقة (خطوط الطول و العرض) للمواقع الجغرافية علي الأرض وذلك في القرن الحادي عشر الميلادي (القرن الخامس الهجري)، و ظلت نظرياته العلمية مطبقة حول العالم حتى مطلع القرن السابع عشر الميلادي (القرن الحادي عشر الهجري).

خريطة العالم للإصطخري
تقريبا ٥٨٨هـ / ١١٩٣م

خريطة العالم للإدريسي
تقريبا ٥٦٦ هـ / ١١٧٠ م

خريطة العالم للقزويني
في القرن ٩ هـ / القرن ١٥ ميلادي

خريطة العالم لابن السعيدي
تقريبا ٩٧٨ هـ / ١٥٧٠ م

شكل (٢٨-١٠) بعض الخرائط الإسلامية القديمة

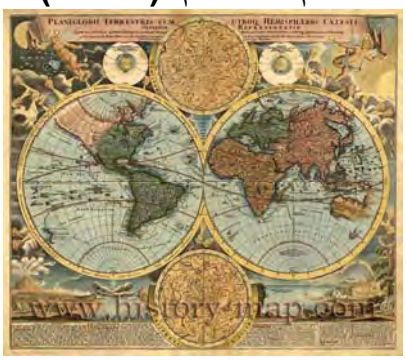
٢٨-٤ خرائط الحضارة الأوروبية

مع بدء عصر النهضة في أوروبا تم ترجمة الكتب العربية إلي اللغات الأوروبية ومن ثم انتقلت أسس الجغرافيا والخرائط التي سادت الحضارة الإسلامية إلي أوروبا، وبدأ العلماء في تحسين الخرائط القديمة وإضافة المعالم والمناطق الجغرافية التي لم تكن معروفة سابقا وتوالت ظهور الخرائط في الدول الأوروبية فيما بين عامي ١٤٢٥م و ١٤٦٠م. وظهرت الطباعة في هذه الفترة مما ساعد علي إنتاج مئات بل آلاف الخرائط بسهولة لم تكن معروفة فيما قبل حيث كانت الخرائط تعتمد علي الرسم اليدوي. ويعد "جيرار ميريكاتور" من أشهر علماء الكارتوجرافيا في أوروبا بعد بطليموس حيث صنع خريطة لأوروبا في عام ١٥٥٤م وأعقبها بنشر خريطته للعالم في عام ١٥٦٩م (٩٧٦ هـ) ثم ظهر الجزء الأول من الأطلس الذي قام بإعداده في عام ١٥٨٥م.

عام ١٤٨٢ م (٨٨٧ هـ)

عام ١٥٦٥ م (٩٧٢ هـ)

عام ١٦٦٤ م (١٠٧٤ هـ)



عام ١٧١٦ م (١١٢٨ هـ)

عام ١٨٠٨ م (١٢٢٣ هـ)

شكل (٢٨-١١) نماذج للخرائط التاريخية للعالم

خريطة عام ١٦٦٦م (١٠٧٦ هـ) لشبة الجزيرة العربية

خريطة عام ١٨٥١ م (١٢٦٧ هـ) لمصر

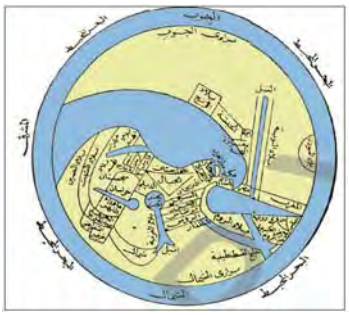
شكل (٢٨-١٢) نماذج للخرائط التاريخية للعالم العربي

٢٨-٥ مكة المكرمة في الخرائط القديمة

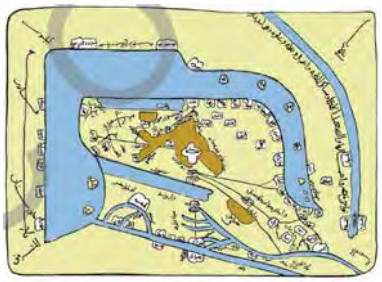
ظهرت مدينة مكة المكرمة في خرائط بطليموس وتحديدا في الخريطة السادسة من خرائط قارة آسيا في كتابه "الجغرافيا" حيث ظهرت مكة المكرمة باسم ماكورابا Macoraba وعرفها ضمن نص الكتاب علي أنها مدينة مقدسة. أما الخرائط الإسلامية – مثل الخريطة المأمونية للعالم التي وضعت في عهد الخليفة المأمون في القرن الثاني الهجري (التاسع الميلادي) – فقد اعتمدت علي وضع مكة المكرمة في مركز الخريطة احتراما لقدسيتها و موقعها في قلوب المسلمين. أيضا ظهرت مكة المكرمة في وسط خريطة أبو إسحاق الاصطخري حيث لم يذكر من أسماء المدن إلا مكة المكرمة لقدسيتها. ومن أقدم الخرائط التفصيلية لمدينة مكة المكرمة خريطة الرحالة السويسري "بوركهارت" في عام ١٨١٤م (١٢٢٩ هـ) و الخريطة التي أنشأتها هيئة أركان الجيش العثماني في عام ١٨٨٠م (١٢٩٨ هـ) بمقياس رسم ١: ٢٠٠٠ وتمثل تفاصيل معالم المدينة المقدسة من شوارع و أزقة و مباني والقلاع العسكرية التي تحيط بالمدينة. وفي عام ١٩٦٤م (١٣٨٤ هـ) بدأ إنتاج الخرائط المعتمدة علي التصوير الجوي وتم إنتاج عدة خرائط بمقاييس رسم مختلفة للمدينة المقدسة. كما قامت الإدارة العامة للمساحة العسكرية بوزارة الدفاع والطيران ومنذ عام ١٩٨٥م (١٤٠٦ هـ) بتطوير عدة خرائط طبوغرافية لمكة المكرمة.

٢٨-٦ عوامل تطور الخرائط الحديثة

تميزت صناعة الخرائط مع بداية القرن التاسع عشر الميلادي بالدقة مع قيام الدول بإجراء عمليات مساحية (قياسات) منتظمة لقياس معالم سطح الأرض وذلك مع بدء الحكومات في الاعتماد علي الخرائط في مجالات الإدارة والحكم وإدارة الموارد الطبيعية. وساعدت عدة عناصر علي تطور الخرائط في العصر الحديث و منها:



الاصطخري القرن ٢ هجري



ابن حوقل القرن ٣ هجري

عام ١٨١٤ م (١٢٢٩ هـ)

عام ١٨٨٠ م (١٢٩٨ هـ)

شكل (٢٨-١٣) نماذج للخرائط التاريخية لمدينة مكة المكرمة

(١) تطور الطباعة: أخترع العالم الألماني جوهانس جوتنبرج عملية الطباعة في عام ١٤٤٥م (٨٨٤ هـ)، وظهرت أول خريطة مطبوعة في عام ١٤٧٢م. ومع ظهور أولي الماكينات المخصصة لطباعة الخرائط علي مستوي تجاري في عام ١٧٩٦م (١٢١٠ هـ) أصبح إنتاج الخرائط أكثر سهولة و يسر مما ساعد علي انتشار الاعتماد علي الخرائط في الكثير من التطبيقات.

شكل (٢٨-١٤) أول ماكينة طباعة خرائط في عام ١٧٩٦م

(٢) التصوير الجوي: عرف الإنسان فكرة التصوير الفوتوغرافي بصفة عامة منذ فترة طويلة جدا (قبل الميلاد) إلا أن أول صورة فوتوغرافية بالمعني المعروف تم إنتاجها في فرنسا في عام ١٨٢٦م (١٢٤١ هـ) علي يد جوزيف نيبيس Joeswph Niepce. وفي عام ١٨٥٩م قام

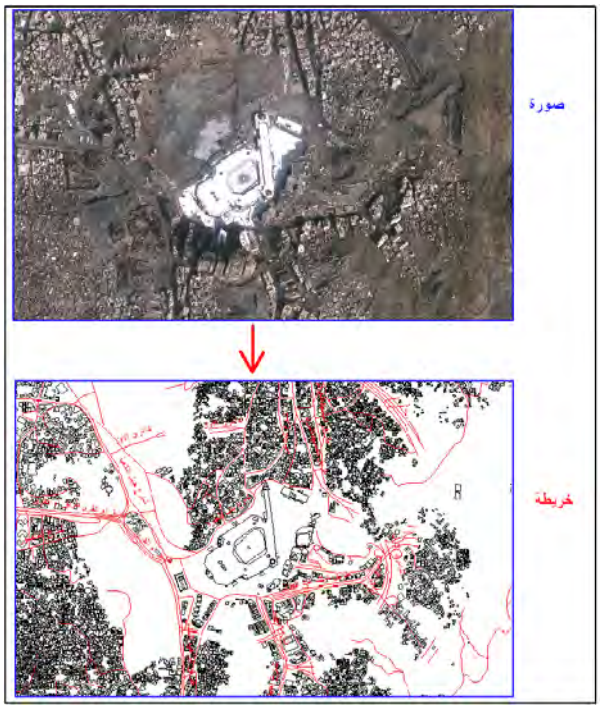
المهندس الفرنسي لويزداه Laussedat بعمل أول تجربة لالتقاط صور من الجو من خلال كاميرا موضوعة في منطاد (بالون) وعمل خرائط منها لأجزاء من مدينة باريس. و مع اختراع الطائرة علي يد الأخوان رايت Wright في عام ١٩٠٣م (١٣٢٠ هـ) بدأت فكرة وضع الكاميرا في الطائرات بهدف رسم خريطة - لمنطقة كبيرة - من هذه الصور. وأخذت أول صورة من طائرة في احدي مناطق ايطاليا في عام ١٩٠٩م. وبهذا دخلت الخرائط منعطفا تقنيا جديدا كان له أبلغ الأثر في تطورها وذلك باستخدام الصور الجوية كوسيلة تقنية لإظهار كافة المعالم الجغرافية في منطقة محددة و من ثم إنتاج خريطة دقيقة لهذه البقعة الجغرافية. وبذلك فيعد الاعتماد علي التصوير الجوي في إنشاء الخرائط من أهم أسباب تطور صناعة الخرائط في القرن العشرين حيث توفر الصور الجوية كما هائلا من البيانات المكانية في وقت سريع و بتكلفة مناسبة.

(٣) الحاسبات الآلية: مع اختراع الكمبيوتر في نهاية الخمسينات من القرن العشرين الميلادي قفز علم إنتاج الخرائط خطوات واسعة في عمليات القياس من الصور الجوية ومن ثم إنتاج خرائط منها.

(٤) تطور أجهزة المساحة: تعد القياسات المساحية المصدر الأول و الأساسي لتجميع البيانات الجغرافية اللازمة لإنتاج الخرائط، وكلما تطورت أجهزة القياسات المساحية ساعد ذلك علي سرعة و دقة و جودة إنتاج الخرائط. ومع منتصف القرن العشرين الميلادي شهدت الأجهزة المساحية ثورة تقنية هائلة وخاصة مع تطوير تقنيات الرصد بالاعتماد علي الأقمار الصناعية ومنها النظام العالمي لتحديد المواقع Global Positioning System والمعروف اختصارا باسم الجي بي أس GPS. وبدمج تقنية الجي بي أس مع الحاسبات الآلية في إطار واحد ظهرت تطبيقات تعرف باسم "الخرائط المحمولة أو الخرائط الالكترونية Portable Maps or eMaps" وانتشرت بشدة في السنوات الأخيرة علي أجهزة الهاتف المحمول (الجوال).

شكل (٢٨-١٥) نموذج للخرائط الالكترونية المحمولة

(٥) الأقمار الصناعية: مع ظهور الأقمار الصناعية في ١٩٥٧م (١٣٧٦ هـ) بدأ وضع كاميرات عالية الدقة بها لتصوير معالم سطح الأرض بقدرة وضوح عالية ومن ثم بدأ ظهور ما يمكن أن نطلق عليه علم التصوير الفضائي Satellite Photogrammetry أو ما يعرف الآن باسم الاستشعار عن بعد Remote Sensing.



شكل (٢٨-١٦) إنتاج الخرائط من الصور الجوية و المرئيات الفضائية

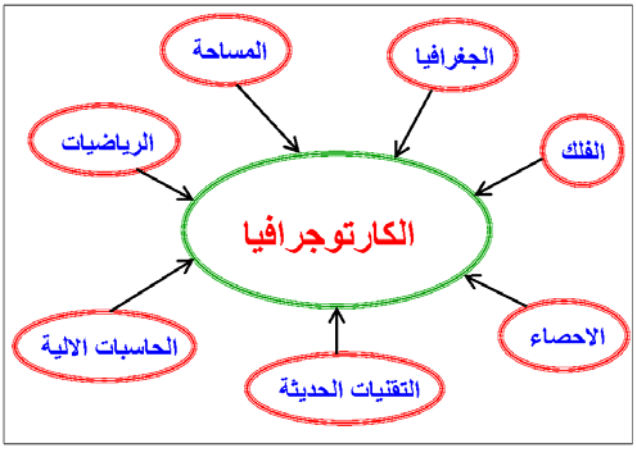
٢٨-٧ علم الكارتوجرافيا

تتكون الكلمة اللاتينية "كارتوجرافيا Cartography" من مقطعين: "كارتو" بمعني خريطة و "جرافيا" بمعني رسم، وبذلك فأن مصطلح الكارتوجرافيا (الذي ظهر في عام ١٨٤٩م علي يد العالم البرتغالي مانويل سوسا Manuel Francisco e Sousa) يعني رسم أو صناعة الخرائط ويكون علم الكارتوجرافيا هو علم صناعة الخرائط، ويطلق علي المشتغل بصناعة الخرائط اسم الكارتوجرافي.

يعتمد علم الكارتوجرافيا علي عدد من العلوم الأساسية التي تدخل في عمليات القياس علي سطح الأرض ورسم هذه البيانات علي الخريطة لتكون تمثيلا مصغرا للواقع الجغرافي. إن أولي هذه العلوم التي يجب علي الكارتوجرافي الإلمام بها هو علم الجغرافيا بما أن الخريطة في حد ذاتها ما هي إلا تمثيل مصغر للمعالم الجغرافيا الموجودة علي سطح الأرض. أما ثاني هذه العلوم التي يجب علي الكارتوجرافي الإلمام بها فهو علم المساحة حيث أنه العلم الذي يختص بإجراء القياسات (الأطوال و المسافات و المساحات) علي سطح الأرض بدقة تتناسب مع دقة الخريطة المطلوب إعدادها. وحيث أن الخريطة تمثل رسما مصغرا لسطح الأرض و ما يحتويه من معالم فهناك الكثير من المعادلات الرياضية التي يتطلبها إعداد الخريطة، ومن ثم فأن الكارتوجرافيا تعتمد علي علم الرياضيات بصورة كبيرة. أيضا من الضروري للكارتوجرافي أن يلم بأسس علم الإحصاء حيث أن إعداد بعض أنواع الخريطة كثيرا ما يحتوي علي الكثير من البيانات الإحصائية المطلوب تمثيلها. وقديما كان تحديد المواقع لأي معلم جغرافي علي الأرض يتم من خلال الأرصاد الفلكية مما جعل الإلمام بأسس علم الفلك من واجبات الكارتوجرافي أيضا. لكن تغير هذا الوضع في العقود القليلة الماضية حيث أصبح تحديد المواقع يتم من خلال استخدام تقنيات الرصد علي الأقمار الصناعية والتي أصبح الإلمام بأسسها من واجبات الكارتوجرافي الحديث. كما أصبح إعداد و تصميم الخرائط في العصر الحالي يعتمد علي الحاسبات الإلية و

برامجها المتخصصة بحيث أنه صار مطلبا رئيسا أن يتعلم الكارتوجرافي أسس الحاسبات الإلية و استخدامها بحرفية. وبالإضافة لذلك فعلي الكارتوجرافي أن يجيد التعامل مع الأجهزة التقنية الحديثة ومنها علي سبيل المثال الراسمات Plotters و الطابعات Printers و الماسحات الضوئية Scanners.

و تتعدد مهام الكارتوجرافي لتشمل: (١) الرسم: رسم المعالم و المظاهر الجغرافية بكل دقة، (٢) تمثيل المظاهر الجغرافية الموجودة علي الأرض المجسمة تمثيلا دقيقا علي سطح مستوي وهو الخريطة، وهذا ما يطلق عليه الإسقاط، (٣) اختيار المعالم المناسبة و حذف المعالم غير المناسبة للخريطة وهو ما يطلق عليه اسم التعميم، (٤) تصميم الخريطة في أنسب صورة ممكنه بحيث تؤدي الغرض منها بيسر و سلاسة لقارئ الخريطة. والنقطة الأخيرة هامة جدا وهي التي أدت الي أن يعرف البعض الكارتوجرافيا علي أنها "علم و فن صناعة الخرائط"، فهو علم قائم علي أسس و نظريات كما أنه فن تصميم الخريطة و إظهارها في أفضل و أنسب صورة. فعلي سبيل المثال كلما كانت ألوان الخريطة متناسقة و متجانسة في مظهرها كلما كانت مريحة لعين القارئ مما يساعد علي قراءتها و تحليلها واستنباط المعلومات منها بسهولة و يسر.



شكل (٢٨-١٧) الكارتوجرافيا و العلوم المرتبطة بها

٨-٢٨ تعريف الخريطة

تتعدد تعريفات كلمة "خريطة" بسبب تعدد استخدامات الخرائط في العديد من المجالات العلمية و العملية، وكل تخصص يستخدم الخريطة يقدم لها تعريفا طبقا لوجهة نظره و كيفية استخدامه لها، حيث لم تعد الخريطة ذات طابع جغرافي فقط (مع أن الجغرافيين هم أكثر من يستخدمون الخرائط بصفة عامة) فقد ظهرت في السنوات الأخيرة خرائط للمجرات السماوية و خرائط لكوكب المريخ و خرائط للمخ البشري ....الخ. ومن الطريف أن أحد الباحثين في مقال له بأحدي المجلات العلمية قد قام بحصر ٣٢١ تعريفا مختلفا للخريطة تم استخدامهم فيما بين عامي ١٦٤٩ و ١٩٩٦م. لكن التعريف البسيط للخريطة المنتشر في معظم المراجع والقواميس هو:

> الخريطة هو رسم دقيق لسطح الأرض أو جزء منه باستخدام مقياس رسم مصغر وطريقة رياضية للإسقاط يظهر الحقائق الجغرافية.

أما قاموس جامعة أكسفورد الذائع الصيت عالميا فيقدم تعريف أكثر اتساعا و شمولا للخريطة كالتالي:

> الخريطة هي رسم مصغر لسطح الأرض (أو السماء) أو جزء منه يظهر المعالم الطبيعية و السياسية ... الخ ، مرسوما علي سطح مستوي من الورق أو مواد أخري حيث تمثل كل نقطة علي هذا الرسم موقعا جغرافيا أو سماويا محددا وذلك بناءا علي مقياس رسم و طريقة إسقاط.

ومن تعريفات الخريطة أيضا ما يلي:

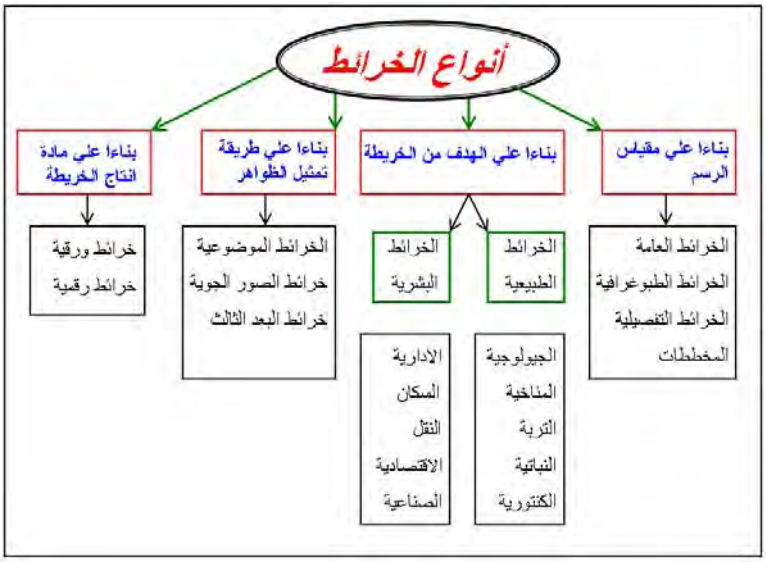
- الخريطة هي وسيلة بالرسم لتبادل المعلومات المفيدة
- الخريطة هي وعاء لحفظ المعلومات توضع فيه و تؤخذ منه
- الخريطة هي تمثيل بالرسم للعلاقات والتكوينات المكانية
- الخريطة هي تمثيل بالرسم للمعالم الجغرافية علي سطح الأرض وذلك علي سطح مستوي
- الخريطة هي لغة خاصة تعتمد علي الرموز (بدلا من الأحرف) لاختصار المعلومات المكانية
- الخريطة هي تمثيل علي سطح مستوي (غالبا ورقة) للمعالم الموجودة علي سطح الأرض أو جزء منه مرسومة بمقياس محدد
- الخريطة هي تلخيص للواقع الحقيقي يهدف الي تحليل و تخزين و نقل المعلومات عن الأماكن و العلاقات بين الظواهر الطبيعية و البشرية الموزعة علي سطح الأرض

ويمكن جمع أكثر من تعريف في إطار جغرافي واحد للخريطة بحيث تكون:

> ***الخريطة هي نموذج (أو رسم) مصغر لسطح الأرض أو جزء منه مبني علي أساس رياضي خاص ويظهر حالة و توزيع و العلاقات بين المعالم الطبيعية و البشرية و الاقتصادية باستخدام رموز خاصة منتقاة طبق لوظيفة كل خريطة.***

٢٨-٩ أنواع الخرائط

تتعدد أنواع الخرائط بصورة كبيرة جدا نظرا لأهميتها و تعدد استخداماتها في المجالات العلمية و التطبيقات العملية بصورة كبيرة. ومن الممكن القول أنه تقريبا لا يوجد الآن تخصص علمي لا يستخدم نوعا من أنواع الخرائط بصورة أو بأخرى. ومع ذلك فيمكن - بصورة عامة - وضع تقسيمات للخرائط بناءا علي أربعة عناصر: مقياس الرسم، الهدف من الخريطة، طرق تمثيل الظواهر، المادة المتوفر عليها الخريطة.



شكل (٢٨-١٨) أنواع الخرائط

٢٨-٩-١ أنواع الخرائط بناءا علي مقياس الرسم

يعرف مقياس الرسم - بصورة مبسطة - بأنه نسبة تصغير الواقع الحقيقي علي الخريطة، فلا يمكن رسم المنطقة الجغرافية بنفس أبعادها الحقيقية علي الخريطة. وكمثال إذا كان لدينا طريق علي الأرض طوله الحقيقي خمسة كيلومترات ورسمناه علي الخريطة كخط طوله خمسة سنتمترات فأن مقياس الرسم هنا يصبح أن كل سنتيمتر علي الخريطة يمثل أو يساوي واحد كيلومتر علي الطبيعة. والعلاقة بين قيمة مقياس الرسم و مساحة المنطقة الجغرافية الممثلة علي الخريطة هي علاقة عكسية، بمعني أنه كلما كبرت مساحة المنطقة الجغرافية كلما صغر مقياس رسم الخريطة وكلما صغرت مساحة المنطقة الجغرافية كلما كان مقياس الرسم أكبر. ولأهمية مقياس الرسم في الخرائط و تعدد تطبيقاته فسيتم إفراد فصل مستقل له.
طبقا لمقياس رسم الخريطة فيمكن تصنيف أو تقسيم أنواع الخرائط الي عدة أقسام تشمل:

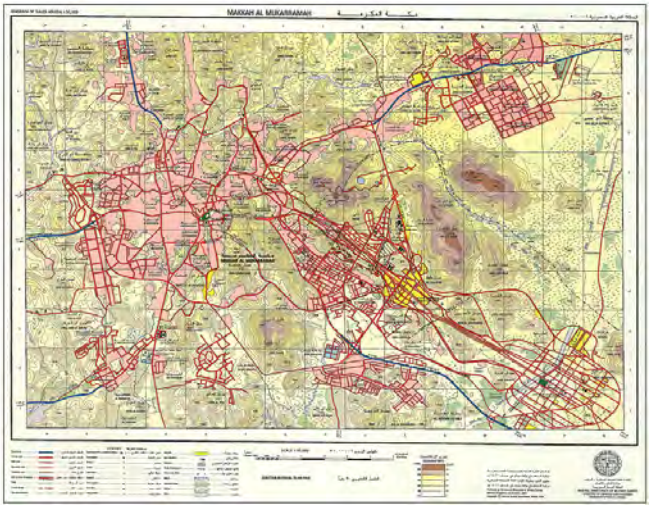
الخرائط العامة: ويطلق عليها أيضا اسم الخرائط الجغرافية والخرائط الأطلسية، وهي خرائط صغيرة المقياس (أي أنها تمثل مساحات كبيرة من سطح الأرض) تستخدم لتمثيل الدول و القارات. وإذا استخدمت الخريطة العامة لتمثيل العالم كله فتسمي الخرائط العالمية، ومن أشهر أنواع الخرائط العامة ما يطلق عليه الخرائط المليونية والتي يكون مقياس رسمها أن كل وحدة علي الخريطة تمثل مليون وحدة علي الطبيعة. وحيث أن الخريطة العامة تمثل جزء كبير من سطح الأرض فأنها لا تتسم بإظهار أية تفاصيل المعالم الجغرافية فهي تبرز فقط المعالم المكانية الرئيسية الموجودة في هذه المنطقة الجغرافية. وغالبا تستخدم هذه الخرائط كوسائل تعليمية أو كوسائل إيضاح أو في الأطالس و الكتب الدراسية.

الخرائط الطبوغرافية: وهي خرائط متوسطة مقياس الرسم حيث أنها تمثل مساحات أو مناطق جغرافية متوسطة المساحة (مدينة مثلا) كما أنها تشتمل علي تفاصيل أكثر من تلك الموجودة في الخرائط العامة. وغالبا تظهر في الخرائط الطبوغرافية معالم تفصيلية للظاهرات الطبيعية و البشرية مثل البحيرات و الأنهار و الغابات و الكثبان الرملية و المدن و طرق المواصلات والأودية ...الخ. وهذا النوع من الخرائط هو الأكثر استخداما من قبل الجغرافيين و المخططين.

الخرائط التفصيلية: وهي خرائط تبرز تفاصيل المنطقة الجغرافية الممثلة علي الخريطة (ومن هنا جاء أسمها) ولذلك يكون مقياس رسمها كبير لحد ما. ويمكن ملاحظة التفاصيل في هذا النوع من الخرائط حيث تظهر التقسيمات العقارية والأحياء و الخدمات وشبكات النقل و المواصلات في خرائط المدن، وأيضا التقسيمات والملكيات الزراعية لخرائط الأرياف. كما يطلق علي هذا النوع من الخرائط اسم الخرائط الكادسترالية حيث أن كلمة "كادسترال Cadastre" في اللغة الانجليزية تعني تفاصيل الملكيات. وأكثر من يستخدم هذا النوع من الخرائط هم مسئولو البلديات والمحافظات و أمانات المدن في التطبيقات التخطيطية المتعلقة بالمدن و القري.

المخططات: وهي نوع من أنواع الخرائط التي تتسم بظهار كافة التفاصيل في منطقة صغيرة جدا، أي أنها خرائط كبيرة المقياس جدا. وغالبا فأن المهندسين هم أكثر من يستخدم هذه المخططات.

شكل (٢٨-١٩) خريطة عامة للمملكة العربية السعودية



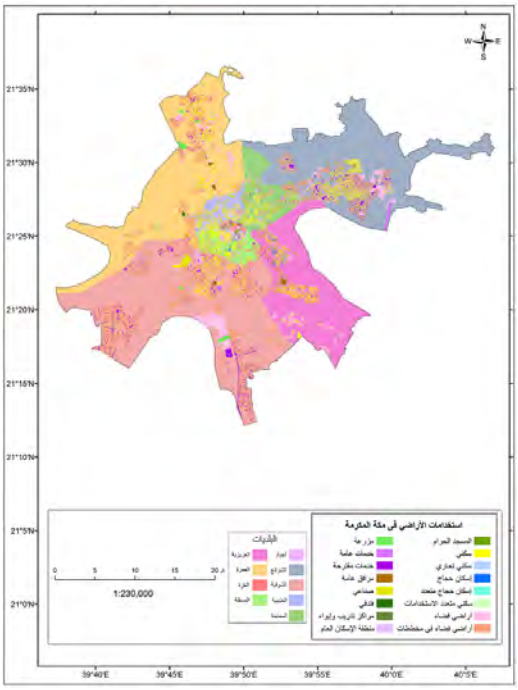
شكل (٢٨-٢٠) خريطة طبوغرافية لمدينة مكة المكرمة

٢٨-٩-٢ أنواع الخرائط بناءا على الهدف من الخريطة

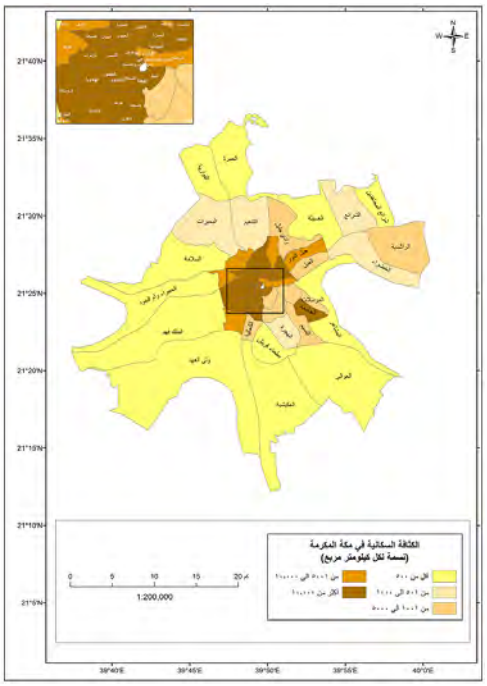
تصنف الخرائط طبقا للهدف أو الغرض الذي أنِشأت من أجله الي مجموعتين رئيستين وهما الخرائط الطبيعية و الخرائط البشرية. ويختلف مقياس رسم كل خريطة طبقا لمساحة المنطقة الجغرافية الممثلة عليها، أي أن هذا التقسيم أو التصنيف للخرائط لا يعتمد علي مقياس رسم الخريطة.

الخرائط الطبيعية: تتناول تمثيل المظاهر الجغرافية الطبيعية الموجودة علي سطح الأرض، وغالبا فأن كل خريطة تهتم بإبراز تفاصيل نوع واحد من المظاهر الطبيعية. ومن أمثلة الخرائط الطبيعية: الخرائط الجيولوجية، الخرائط المناخية، الخرائط النباتية، خرائط التربة، الخرائط الكنتورية (التضاريسية).

الخرائط البشرية: وهي التي تتناول تمثيل المظاهر الجغرافية البشرية الموجودة علي سطح الأرض. ومن أمثلة الخرائط البشرية: الخرائط السياسية التي تحدد الحدود السياسية بين الدول، والخرائط الإدارية التي تحدد الحدود بين المناطق الإدارية مثل المحافظات و المراكز، وخرائط شبكات النقل و المواصلات، و الخرائط السكانية التي تبرز التوزيع المكاني للسكان والنمو السكاني والهجرة السكانية، والخرائط الاقتصادية، والخرائط الصناعية، والخرائط التعدينية، والخرائط الزراعية التي تمثل التركيب المحصولي ومناطق التوسع الزراعي، وخرائط التربة.



استخدامات الأرض في مدينة مكة المكرمة



الكثافة السكانية في مدينة مكة المكرمة

شكل (٢٨-٢١) نماذج للخرائط الطبيعية و البشرية

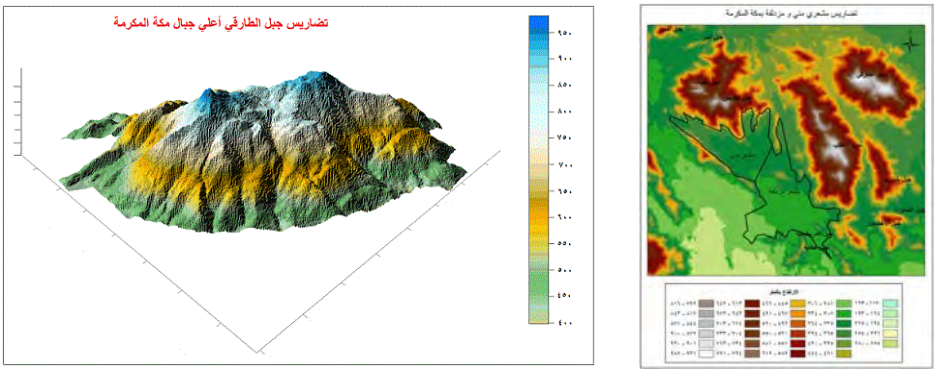
٢٨-٩-٣ أنواع الخرائط بناءا على طرق تمثيل الظاهرات

يمكن أيضا تصنيف الخرائط طبقا للطرق المستخدمة في تمثيل المظاهر الممثلة علي الخريطة، وفي هذا التقسيم للخرائط نجد الخرائط الجوية و خرائط البعد الثالث و الخرائط الموضوعية.

الخرائط الجوية أو خرائط الصور الجوية: بالرغم من وجود بعض الاختلافات العلمية بين الخريطة و الصورة الجوية (الملتقطة بكاميرا مثبتة في طائرة) إلا أن الصورة الجوية في حد ذاتها تمثل نوعا من الخرائط التي تبرز - بمقياس رسم محدد - جميع الظواهر و المعالم الجغرافية في منطقة من سطح الأرض. ومن ثم فأن الصور الجوية المتجاورة لمنطقة مكانية معينة يمكن اعتبارها خريطة تفصيلية لهذه البقعة الجغرافية. فإذا تم تجميع عدة صور متجاورة لمنطقة فأن الصورة المجمعة يطلق عليها اسم الموزايك أو الفسيفساء، وهي تمثل أحد أنواع الخرائط. ومع انتشار تطبيقات التصوير من الفضاء بالأقمار الصناعية (تقنية الاستشعار عن بعد) فأنه يمكن أيضا استخدام المرئيات الفضائية في تطوير هذا النوع من الخرائط. ويختلف مقياس رسم هذا النوع من الخرائط باختلاف مقياس رسم الصور الجوية أو المرئيات الفضائية المستخدمة، فقد نجد خريطة جوية كبيرة المقياس لمدينة وأيضا نجد خريطة جوية صغيرة المقياس لمحافظة أو منطقة كبيرة من سطح الأرض.

خرائط البعد الثالث: وهي خرائط تهتم بإبراز و تمثيل البعد الثالث وهو الارتفاعات، حيث أن معظم الخرائط العادية لا تبرز إلا بعدين فقط (الطول و العرض أو س و ص) للمعالم الجغرافية الممثلة عليها. وتوجد عدة أنواع من خرائط البعد الثالث مثل الخرائط الكنتورية و الخرائط المجسمة.

الخرائط الموضوعية: تمثل الخريطة العامة كافة المعالم الجغرافية سواء الطبيعية أو البشرية الموجودة في منطقة مكانية محددة من سطح الأرض. إلا أننا نحتاج في بعض التطبيقات الي خريطة تهتم بإبراز تفاصيل نوع واحد معين من هذه المظاهر أو المعالم، وهذا النوع من الخرائط يسمي الخرائط الموضوعية حيث أن كل خريطة تهتم بموضوع واحد فقط، كما أنها أيضا تسمي بالخرائط الخاصة حيث أن كل خريطة تختص بظاهرة محددة، وأيضا تسمي بخرائط التوزيعات حيث أن هذه الخرائط تبرز توزيع ظاهرة معينة طبيعية كانت أم بشرية.



شكل (٢٨-٢٢) نماذج لخرائط البعد الثالث

شكل (٢٨-٢٣) نموذج للخرائط الجوية

٢٨-٩-٤ أنواع الخرائط بناءا علي مادة إنتاجها

ظلت الخريطة الورقية لمئات السنين هي النوع الوحيد لإنتاج و تمثيل الخرائط و رسمها علي قطعة من الورق. وفي منتصف القرن العشرين الميلادي و مع ابتكار الكمبيوتر أو الحاسوب ظهرت الخريطة الرقمية أو الخريطة الالكترونية. وكان هذا ثورة علمية هائلة في علم الكارتوجرافيا وصناعة الخرائط حيث أصبح رسم و تعديل و تصميم و تخزين و تحليل الخرائط يتم في صورة رقمية باستخدام برامج كمبيوتر متخصصة، وأصبحت الخريطة الرقمية عبارة عن ملفات الكترونية متاحة في صور متعددة مثل الأقراص المدمجة CD و وسائل التخزين المحمولة (الفلاش ميموري).

خلقت الخرائط الرقمية تحديا علميا للكارتوجرافيين في الوقت الحالي، فالكارتوجرافي يجب أن يتعامل مع أجهزة و برامج و تقنيات الخرائط الرقمية لما توفره من مميزات هائلة في السرعة و الدقة و الجودة لهذا النوع من الخرائط. بل أننا يمكننا القول أن معظم إن لم يكن كل الخرائط المنتجة الآن هي خرائط رقمية.

وتعدي الأمر ذلك بعد أن توافرت الخرائط (بكافة أنواعها) علي شبكة الانترنت مما يجعل الحصول علي أي خريطة لأي بقعة في العالم شيئا ميسورا. ومن أشهر تطبيقات الكمبيوتر في الخرائط الرقمية برنامج جوجل ايرث Google Earth وموقع ويكي مابيا علي شبكة الانترنت في الرابط:

http://wikimapia.org

وأيضا موقع خرائط نوكيا والتي أصبحت خرائط رقمية يمكن تحميلها علي أجهزة الهاتف المحمول (الجوال) في الرابط:

http://www.nokia.com/maps

كما قامت عدة جهات عربية بتطوير مواقع خرائطية تعرض الخرائط التفصيلية لمدينة معينة علي شبكة الانترنت، ومن أمثلة هذه المواقع:

مستكشف مدينة مكة المكرمة في الرابط:
http://maps.holymakkah.gov.sa/

مستكشف مدينة الرياض في الرابط:
http://gis.alriyadh.gov.sa/riyadhexplorer/

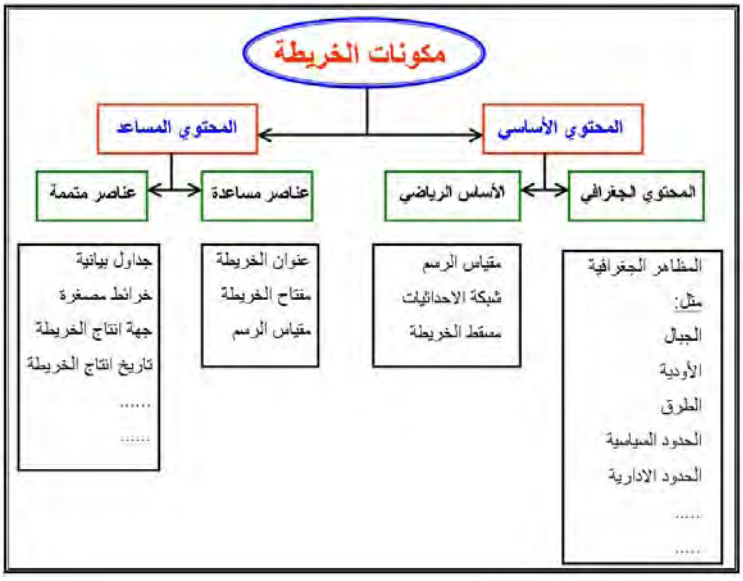
مستكشف مدينة القاهرة في الرابط:
http://www.cairo.gov.eg/1.aspx

الفصل التاسع و العشرين

مكونات الخريطة

٢٩-١ مكونات الخريطة

تتكون الخريطة من عدد من العناصر تساعد فيما بينها لإظهار تمثيل دقيقي و متناسق للمنطقة الجغرافية التي تمثل الخريطة صورة مصغرة لها. وبصفة عامة يمكن تقسيم عناصر أو مكونات الخريطة الي قسمين رئيسين: المحتوي الأساسي و المحتوي المساعد.

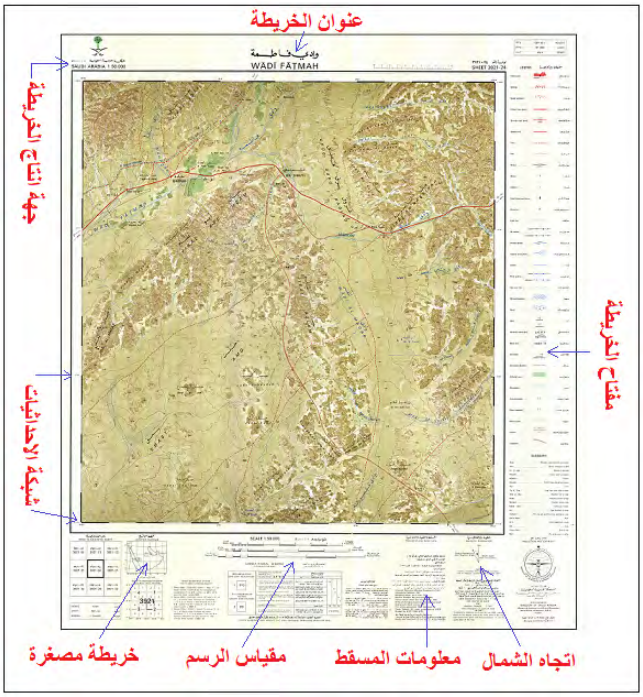


شكل (٢٩-١) مكونات الخريطة

يتكون المحتوي الأساسي للخريطة من كلا من المحتوي الجغرافي و الأساس الرياضي، فالمحتوي الجغرافي يشمل المعالم و الظاهرات الجغرافية الطبيعية و البشرية الموجودة علي سطح الأرض وهذا هو أهم مكونات الخريطة. أما الأساس الرياضي فهو ما يميز الخريطة عن أي رسم آخر أو صورة أو اسكتش، فطبقا لتعريف الخريطة فهي تمثيل مصغر لسطح الأرض مبني علي أساس رياضي. ويتكون الأساس الرياضي للخريطة من ثلاثة عناصر وهي: مقياس الرسم و شبكة الإحداثيات و نوع الإسقاط، وسيتم الحديث عن كل عنصر منهم في فصل مستقل.

يتكون المحتوي المساعد للخريطة من جزأين أحدهما العناصر المساعدة أي التي تساعد القارئ علي فهم الخريطة و التعامل معها بسرعة، والثاني هو العناصر المتممة التي تمد القارئ بمعلومات إضافية عن الخريطة. ومن أمثلة العناصر المساعدة عنوان الخريطة الذي بمجرد النظر إليه يعطينا معلومة عن المنطقة الجغرافية التي تمثلها هذه الخريطة، و مفتاح الخريطة وهو شرح الرموز المستخدمة في الخريطة وما يمثله كل رمز من هذه الرموز، ومقياس الرسم. وقد يتساءل البعض عن كيفية اعتبار مقياس الرسم من الأساسيات الرياضية للخريطة مرة و اعتباره من العناصر المساعدة مرة أخري. فاستخدام مقياس الرسم أثناء رسم الخريطة هو من أساسيات الخرائط كما يدل تعريف الخريطة، بينما إظهار قيمة أو شكل مقياس الرسم المستخدم علي الخريطة ذاتها فهذا من العناصر التي تساعد القارئ علي معرفة قيمة هذا المقياس بسرعة.

وتجدر الإشارة الي أن عدم وجود شكل أو قيمة مقياس الرسم علي الخريطة لا يمنعنا من استخدام الخريطة حيث أننا يمكننا استنباط (حساب) قيمة مقياس الرسم من شبكة الإحداثيات الموجودة علي الخريطة علي سبيل المثال. أما العناصر المتممة في المحتوي المساعد للخريطة فتشمل أية إضافات تعطي معلومات أكثر عن هذه الخريطة مثل الجهة التي أنتجت هذه الخريطة و كذلك تاريخ أو سنة إنتاج الخريطة وأيضا بعض الجداول الإحصائية والأشكال البيانية عن الظاهرات الممثلة علي الخريطة وأحيانا يكون من الأسهل وضع خريطة مصغرة تدل علي الموقع الجغرافي العام للمنطقة الممثلة علي الخريطة.

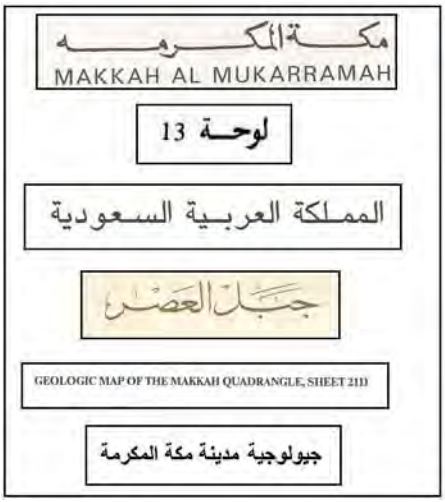


شكل (٢٩-٢) نموذج لمكونات الخريطة

٢٩-٢ أساسيات الخريطة

توجد عدة عناصر يجب إظهارها علي الخريطة لتسهل للقارئ استخدام الخريطة و استنباط ما بها من معلومات مكانية بسرعة و سهولة. ومن أهم أساسيات الخريطة خمسة عناصر تشمل: اسم الخريطة، مقياس الرسم، اتجاه الشمال، شبكة الإحداثيات، مفتاح الخريطة. وسنتناول بعض هذه العناصر هنا بصورة إجمالية علي أن يتم التعامل مع كلا منها بالتفصيل في الفصول القادمة.

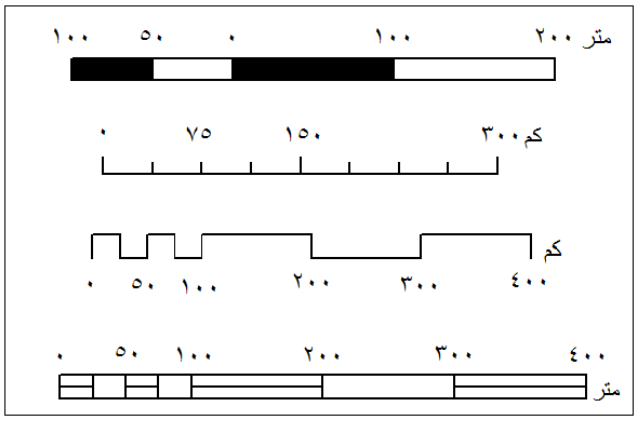
عنوان أو اسم الخريطة: في الخرائط العامة (الخرائط الجغرافية) يتم اختيار اسم الخريطة باسم أهم معلم جغرافي طبيعي موجود بها، مثل المدن و القري. أما للخرائط الموضوعية أو الخرائط الخاصة فأن اسم الخريطة يعبر عن موضوعها أو الظاهرة الأساسية الممثلة بها. ولا يوجد مكان محدد علي الخريطة لوضع عنوانها، لكن جري العرف أن يكون عنوان الخريطة بمنتصف الهامش العلوي لها.



شكل (٢٩-٣) أمثلة لعنوان الخريطة

شبكة الإحداثيات: هي شبكة من الخطوط المرسومة علي الخريطة والتي تحدد الموقع الجغرافي للمنطقة المكانية الممثلة علي الخريطة.

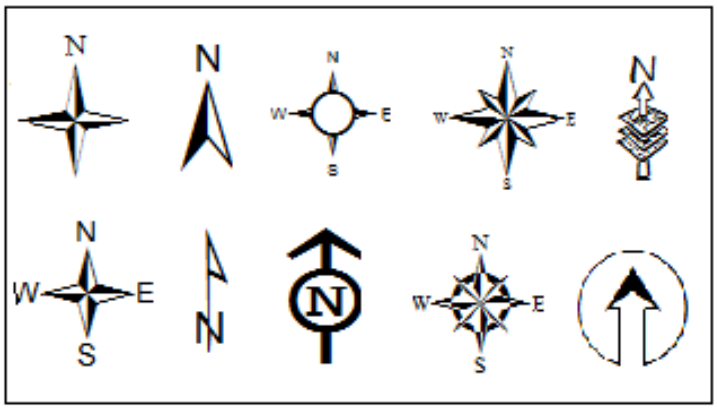
مقياس الرسم: هو القيمة العددية التي تحدد العلاقة بين الأطوال و المسافات و المساحات علي الخريطة و ما تمثله من قيم مناظرة علي سطح الأرض. وتوجد عدة طرق و نماذج لرسم مقياس الرسم علي الخريطة.



شكل (٢٩-٤) نماذج لمقياس الرسم

مفتاح الخريطة: هو ترجمة لمعاني الرموز المستخدمة في رسم الخريطة و ما يمثله كل رمز.

اتجاه الشمال: ويهدف لتحديد اتجاه الشمال و من ثم باقي الاتجاهات الجغرافية مما يساعد علي توجيه الخريطة توجيها سليما. وتوجد عدة نماذج لرسم اتجاه الشمال الذي غالبا يوضع في أعلي هامش الخريطة سواء من جهة اليمين أو من جهة اليسار.



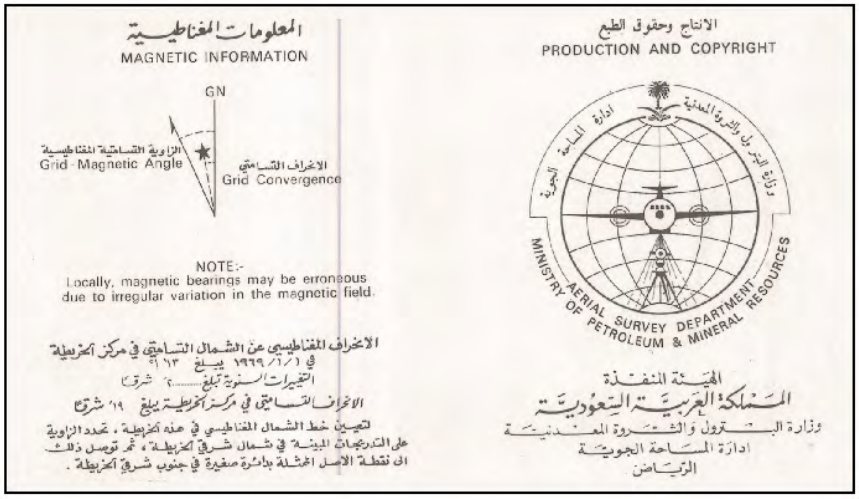
شكل (٢٩-٥) نماذج لاتجاه الشمال

أنواع اتجاه الشمال: أتفق العلماء منذ مئات السنين علي اعتبار اتجاه الشمال هو الاتجاه المرجعي عند قياس الاتجاهات في الطبيعة (علي سطح الأرض) وأيضا في الخريطة. لكن يوجد نوعين من أنواع اتجاه الشمال:

الشمال المغناطيسي: هو الاتجاه الذي تحدده أبره مغناطيسية حركة الحركة كاملة الاتزان وليست تحت أي تأثير مغناطيسي محلي. فإذا تركت هذه الإبرة حركة الحركة فأنها ستتجه ناحية اتجاه الشمال الذي يطلق عليه أسم الشمال المغناطيسي. وهذه هي الفكرة التي بنيت عليها أجهزة البوصلة المغناطيسية التي يمكن استخدامها في الطبيعة لتحديد اتجاه الشمال. لكن أهم مشاكل الشمال المغناطيسي أنه غير ثابت (غير متوازي عند مجموعة من النقاط) بل أنه يتغير عند نفس النقطة من عام لآخر.

الشمال الجغرافي: هو الاتجاه أو الخط الواصل بين أي نقطة وكلا القطبين الشمالي و الجنوبي للأرض. الشمال الحقيقي هو اتجاه ثابت غير متغير ويتم تحديده من خلال الأرصاد و القياسات الفلكية ، وحيث أنه ثابت وغير متغير فهو المستخدم في إنشاء الخرائط.

زاوية الاختلاف: يطلق أسم زاوية الاختلاف علي الزاوية المحصورة بين اتجاهي الشمال المغناطيسي و الجغرافي عند نقطة معينة في زمن معين. فإذا كان الشمال المغناطيسي شرق الشمال الجغرافي فتكون إشارة زاوية الاختلاف موجبه ، وإذا كان الشمال المغناطيسي غرب الشمال الجغرافي فتكون إشارة زاوية الاختلاف سالبة. وغالبا توضع زاوية الاختلاف علي الخريطة لتحدد قيمتها و اتجاهها عند إنشاء الخريطة:



شكل (٢٩-٦) مثال لمعلومات زاوية الاختلاف علي خريطة

تتغير زاوية الاختلاف بطريقة منتظمة في عدة دورات علي مدار : (أ) تغير كل ٣٠٠ سنة تقريبا ، (ب) تغير سنوي ، (ج) تغير يومي. ويمكن معرفة قيمة زاوية الاختلاف من خلال مواقع بعض الجهات المتخصصة علي شبكة الانترنت مثل موقع الوكالة الأمريكية للمحيطات والمناخ المعروفة باسم NOAA في الرابط التالي:

http://www.ngdc.noaa.gov/geomagmodels/Declination.jsp

القيم التالية تمثل زوايا الاختلاف لبعض المواقع في يوم ١/١/ ٢٠١٢ م:

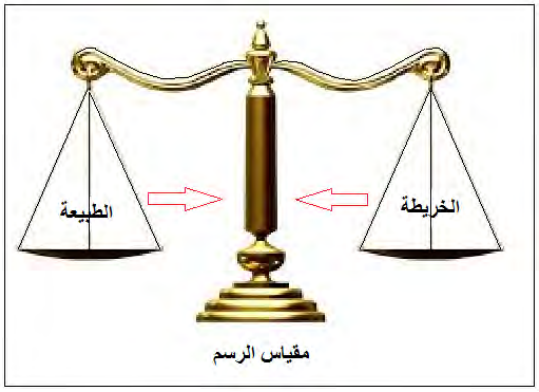
المدينة	الموقع الجغرافي التقريبي		زاوية الاختلاف
	خط الطول	دائرة العرض	
مكة المكرمة	٣٩.٨٢٥° شرقا	٢١.٤٢٦° شمالا	١٥ '٠٢° غربا
المدينة المنورة	٣٩.٦١١° شرقا	٢٤.٤٥٦° شمالا	١٤ '٢٩° غربا
القاهرة	٣١.٢٢٩° شرقا	٣٠.٠٥٨° شمالا	١١ '١٥° غربا

٢٩-٣ مقياس الرسم

لا يمكن بأي حال من الأحوال رسم الأرض أو جزء منها بنفس الأبعاد الحقيقية علي الخريطة التي مهما كبرت لا تزيد عن المتر المربع الواحد، لذلك نحن في حاجة الي نسبة تصغير محددة لرسم الخريطة وهذه النسبة هي ما يطلق عليها اسم مقياس الرسم. وهذه النسبة يجب أن تكون ثابتة في كافة أجزاء الخريطة، فلا يمكن استخدام قيمة معينة في جزء من الخريطة و استخدام قيمة أخري في جزء آخر من نفس الخريطة.

يعرف مقياس الرسم علي أنه: "***النسبة العددية الثابتة بين طول أي بعد علي الخريطة والطول الحقيقي المناظر له علي الطبيعة***". وكما سبق الذكر فأن مقياس الرسم من الأسس الرياضية التي تبني عليها الخرائط، وبدون مقياس الرسم ستتحول الخريطة الي رسم أو صورة أو اسكتش. ومعرفة قيمة مقياس رسم أي خريطة هو الذي يمكننا من معرفة (حساب أو قياس) قيم

المسافات و الأطوال و المساحات الحقيقية للمعالم الجغرافية الظاهرة علي الخريطة. كما أن مقياس الرسم هو ما يجعلنا نحسب الطول المناسب علي الخريطة اللازم لتوقيع أو رسم طول مقاس فعلا في الطبيعة.



شكل (٢٩-٧) مفهوم مقياس الرسم

٢٩-٣-١ أنواع مقياس الرسم

يكتب مقياس الرسم علي الخريطة أو يرسم عليها، ولذلك فأن مقاييس الرسم تصنف الي نوعين رئيسين وهما المقاييس الكتابية و المقاييس الخطية.

مقياس الرسم العددي

يكتب مقياس الرسم العددي علي الخريطة في احدي ثلاثة صور: المقياس المباشر و المقياس النسبي و المقياس الكسري.

مقياس الرسم المباشر:

يكتب هذا المقياس مباشرة في جملة بسيطة ليدل علي مقياس رسم الخريطة مثل:

السنتيمتر يمثل كيلومتر
١ سنتيمتر = ٥٠٠ متر
ا سنتيمتر يساوي ١٠٠٠ متر

ومع أن المقياس المباشر أسهل مقاييس الرسم الكتابية إلا أنه لم يعد مستخدما في الخرائط الآن.

مقياس الرسم النسبي:

يعد هذا المقياس هو الأكثر شيوعا بين مقاييس الرسم الكتابية المستخدمة في كافة أنواع الخرائط، ويكتب في صورة نسبة الجزء الأول منها يساوي الوحدة المستخدمة في القياس علي الخرائط بينما الجزء الثاني من النسبة يعبر عن الوحدة المناظرة علي الطبيعة. فمثلا عندما نكتب مقياس رسم الخريطة في الصورة النسبية التالية:

١ : ١٠٠٠

فهذا يدل علي أن:

كل وحدة علي الخريطة = ١٠٠٠ وحدة (من نفس النوع) علي الطبيعة، أي أن:
كل ١ سنتيمتر علي الخريطة = ١٠٠٠ سنتيمتر في الطبيعة.
كل ١ ملليمتر علي الخريطة = ١٠٠٠ ملليمتر في الطبيعة.

مقياس الرسم الكسري:

يختلق هذا المقياس عن المقياس النسبي في أنه يكتب في صورة كسر حيث البسط يعبر عن الوحدة علي الخريطة و المقام يعبر عن الوحدة المناظرة علي الطبيعة. فالمقياس:

$$\frac{١}{١٠٠٠}$$

يساوي المقياس النسبي ١ : ١٠٠٠

أي أن:

كل وحدة علي الخريطة = ١٠٠٠ وحدة (من نفس النوع) علي الطبيعة، بمعني أن:

كل ١ سنتيمتر علي الخريطة = ١٠٠٠ سنتيمتر في الطبيعة.

التحويل بين مقاييس الرسم الكتابية:

يمكن بسهولة تحويل أي مقياس كتابي من نوع محدد الي النوعين الآخرين، وذلك اعتمادا علي معرفة قيم الوحدات المستخدمة في قياس المسافات سواء علي الخريطة أو في الطبيعة:

١ كيلومتر = ١٠٠٠ متر
١ متر = ١٠٠ سنتيمتر
١ سنتيمتر = ١٠ ملليمتر

أي أن:

١ كيلومتر = ١٠٠٠ × ١٠٠ = ١٠٠،٠٠٠ سنتيمتر
١ متر = ١٠٠ × ١٠ = ١٠٠٠ ملليمتر
١ كيلومتر = ١٠٠٠ × ١٠٠ × ١٠ = ١،٠٠٠،٠٠٠ ملليمتر

والجدول التالي يمثل عدة أنواع من مقاييس الرسم المستخدمة في الخرائط:

المقياس المباشر	المقياس النسبي	نوع الخريطة
سنتيمتر = ١٠ كيلومتر	١ : ١،٠٠٠،٠٠٠	خريطة مليونية (صغيرة المقياس)
سنتيمتر = كيلومتر	١ : ١٠٠،٠٠٠	خريطة متوسطة المقياس
سنتيمتر = ٥٠٠ متر	١ : ٥٠،٠٠٠	
سنتيمتر = ٢٥٠ متر	١ : ٢٥،٠٠٠	
سنتيمتر = ١٠٠ متر	١ : ١٠،٠٠٠	خريطة كبيرة المقياس
سنتيمتر = ٥٠ متر	١ : ٥٠٠٠	
سنتيمتر = ٢٥ متر	١ : ٢٥٠٠	
سنتيمتر = ١٠ متر	١ : ١٠٠٠	مخططات (كبيرة المقياس جدا)
سنتيمتر = متر	١ : ١٠٠	

مقياس الرسم الخطي

في هذا النوع من مقاييس الرسم يتم "رسم" المقياس علي الخريطة في صورة خط مجزأ الي عدد من الأقسام، بحيث تكون وحدات المقياس مرسومة بوحدات الخريطة (مثل السنتيمتر) ويكتب علي كل جزء منها ما يمثله من أطوال حقيقية علي الطبيعة. وتتميز مقاييس الرسم تلك من أنها ستصغر أو تكبر بنفس النسبة عندما يتم تصغير أو تكبير الخريطة ذاتها. وتتعدد مقاييس الرسم الخطية لتشمل المقياس البسيط و الدقيق و الشبكي و المقارن و الزمني.

المقياس الخطي البسيط:

هو عبارة عن خط (أو مستطيل عرضه بسيط جدا) ويقسم الي عدة أقسام متساوية ويكتب أعلي كل قسم ما يمثله غلي الطبيعة.

مثال:

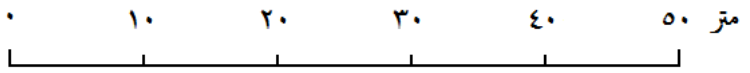
ارسم مقياس رسم خطي بسيط للمقياس النسبي ١ : ١٠٠٠ :

أولا نحدد ما يمثله السنتيمتر الواحد علي الخريطة كمسافة حقيقية علي الطبيعة:

المقياس النسبي ١ : ١٠٠٠ يدل علي أن:
كل وحدة علي الخريطة = ١٠٠٠ وحدة مناظرة علي الطبيعة، أي أن:
كل ١ سنتيمتر علي الخريطة = ١٠٠٠ سنتيمتر علي الطبيعة
وحيث أن المتر = ١٠٠ سنتيمتر، فيمكننا إعادة كتابة المقياس ليصبح:
كل ١ سنتيمتر علي الخريطة = ١٠٠٠ ÷ ١٠٠ = ١٠ متر علي الطبيعة

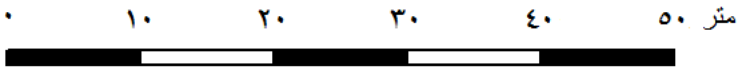
الآن نقوم برسم خط مستقيم طوله (مثلا) خمسة سنتيمترات ونقسمه الي خمسة أجزاء بحيث يكون طول الجزء الواحد منهم سنتمترا واحدا. وبالتالي فأن السنتيمتر الواحد سيمثل علي الطبيعة ١٠ أمتار، ونبدأ بكتابة الرقم صفر في بداية (أقصي يسار) المقياس، ثم نكتب في نهاية الجزء الأول الرقم ١٠ وفي نهاية الجزء الثاني الرقم ٢٠ (حيث أن الخط الذي طوله ٢ سنتيمتر

سيمثل ٢٠ مترا علي الطبيعة) وفي نهاية الجزء الثالث نكتب ٣٠ وهكذا. وفي نهاية (أقصي يمين) المقياس نكتب كلمة "متر" لتدل علي الوحدة المستخدمة للقياس علي الطبيعة:



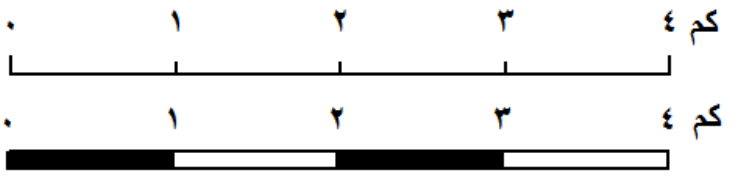
شكل (٢٩-٨) نموذج لمقياس الرسم الخطي البسيط

ومن الممكن رسم مقياس الرسم في صورة مستطيل عرضه قليل جدا (ملليمتر مثلا) بدلا من الخط المستقيم ليكون أكثر وضوحا علي الخريطة، مع تلوين أجزاؤه باللونين الأبيض و الأسود بالتتابع ليكون أكثر جمالا:



شكل (٢٩-٩) نموذج آخر لمقياس رسم خطي بسيط

ويمكن أيضا في مقاييس الرسم الخطية استخدام وحدات الكيلومتر للتعبير عن المسافات الحقيقية علي الطبيعة. فمثلا لمقياس الرسم ١ : ١٠٠،٠٠٠ نجد أن السنتيمتر علي الخريطة يمثل ١٠٠،٠٠٠ سنتيمتر أي ما يعادل ١٠٠٠ متر علي الطبيعة، وبدلا من كتابة ١٠٠٠ متر علي مقياس الرسم نستعيض عنه بكتابة ١ كيلومتر:



<u>المقياس الخطي الدقيق:</u>

يطلق مصطلح "دقة المقياس" علي أصغر وحدة مرسومة من وحدات مقياس الرسم، فعلي سبيل المثال فأن دقة المقياس الخطي البسيط في الشكل بأعلى تساوي ١ كيلومتر حيث أن أصغر جزء يمكن قياسه علي هذا المقياس هو الكيلومتر الصحيح. وتجدر الإشارة الي أن دقة المقياس لا تعتمد علي قيمة الوحدات المكتوبة صراحة عليه، ففي الشكل التالي فما تزال دقة المقياس تساوي ١ كيلومتر مع أن الوحدات مكتوبة كل ٢ كيلومتر:

إذا أردنا قياس مسافة علي الخريطة فكانت أطول بقليل من السنتيمتر الواحد فكيف نعرف قيمة المسافة المناظرة لها علي الطبيعة؟ ستكون بالتأكيد أكبر من الكيلومتر الواحد، لكن بأي قيمة حقيقية؟ فهذا المقياس لا يسمح لنا إلا بقياس الكيلومترات الصحيحة فقط. في هذه الحالة نلجأ للنوع الثاني من أنواع مقاييس الرسم الخطية ألا و هو المقياس الخطي الدقيق.

المقياس الخطي الدقيق هو مقياس خطي بسيط مضافا إليه وحدة واحدة علي يسار الصفر مقسمة الي عدد من الأقسام الفرعية الصغيرة. ويكون عدد هذه الأقسام الفرعية مناسبا للحصول علي الدقة الجديدة المطلوبة للمقياس. أي أن المقياس الخطي الدقيق يتكون مع مقياس خطي بسيط بالإضافة لجزء أدق علي يسار صفر المقياس.

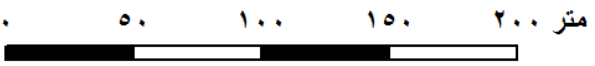
مثال:

ارسم مقياس خطي دقيق لمقياس الرسم النسبي ١ : ٥٠٠٠ بحيث تكون دقة المقياس ١٠ أمتار.

أولا نحدد ما يمثله السنتيمتر الواحد علي الخريطة كمسافة حقيقية علي الطبيعة:

المقياس النسبي ١ : ٥٠٠٠ يدل علي أن:
كل ١ سنتيمتر علي الخريطة = ٥٠٠٠ سنتيمتر علي الطبيعة
وحيث أن المتر = ١٠٠ سنتيمتر، فيمكننا إعادة كتابة المقياس ليصبح:
كل ١ سنتيمتر علي الخريطة = ٥٠٠٠ ÷ ١٠٠ = ٥٠ متر علي الطبيعة

نبدأ أولا برسم المقياس الخطي البسيط بأن نقوم برسم خط مستقيم طوله خمسة سنتيمترات ونقسمه الي خمسة أجزاء بحيث يكون طول الجزء الواحد منهم سنتمترا واحدا. وبالتالي فأن السنتيمتر الواحد سيمثل علي الطبيعة ٥٠ مترا، ونرسم هذا المقياس البسيط كما سبق في الأمثلة السابقة ليكون:

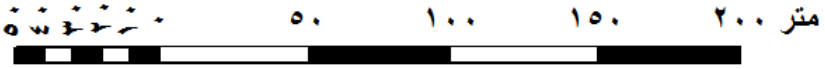


أي أن دقة هذا المقياس الخطي البسيط تساوي ٥٠ مترا (قيمة أصغر وحدة من وحداته).
ولحساب عدد الأقسام الفرعية التي سيتكون منها المقياس الخطي الدقيق نستخدم المعادلة:

عدد الأقسام الفرعية للمقياس الدقيق = قيمة وحدة المقياس البسيط ÷ دقة المقياس المطلوبة

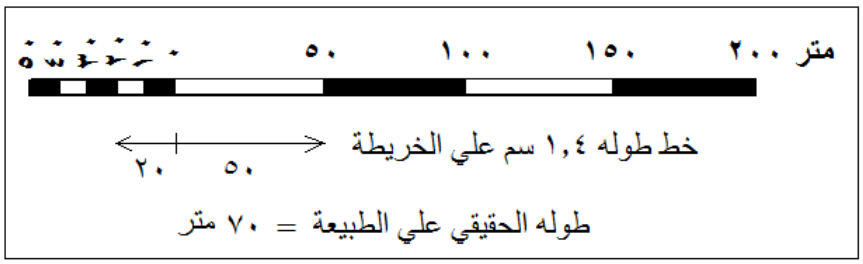
أي أن:
عدد الأقسام الفرعية للمقياس الدقيق = ٥٠ متر ÷ ١٠ متر = ٥ أقسام

ثم نقوم برسم وحدة من وحدات المقياس البسيط (أي سنتيمتر واحد) علي يسار صفر المقياس ثم نقسم هذه الوحدة الي ٥ أقسام. وبما أن السنتيمتر الواحد يحتوي ١٠ ملليمترات، فأن طول كل قسم من هذه الأقسام يساوي (١٠÷٥=) ٢ ملليمتر. وسيمثل الجزء الأول من الوحدات الصغيرة قيمة ١٠ أمتار علي الطبيعة، فنكتب أعلاه الرقم ١٠، بينما الجزء الثاني سيمثل (١٠+١٠=) ٢٠ مترا فنكتب أعلاه الرقم ٢٠، وبالمثل نكتب الرقم ٣٠ في نهاية الجزء الثالث والرقم ٤٠ في نهاية الجزء الرابع والرقم ٥٠ في نهاية الجزء الخامس و الأخير من أجزاء المقياس الدقيق:

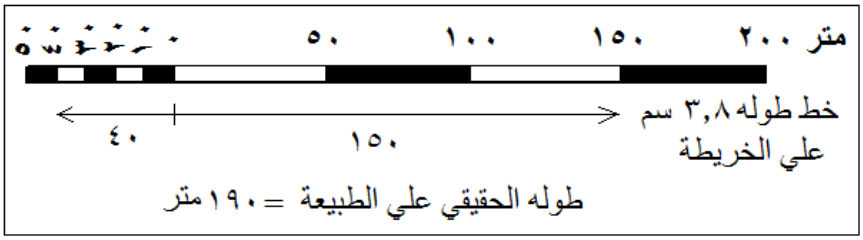


شكل (٢٩-١٠) نموذج لمقياس رسم خطي دقيق

الآن إذا قمنا باستخدام المسطرة بقياس طول خط علي الخريطة ووجدناه يساوي (مثلا) ١,٤ سنتيمتر، فيمكننا باستخدام هذا المقياس الخطي الدقيق أن نعرف أن المسافة الحقيقية لهذا الخط علي الطبيعة تساوي ٧٠ مترا، حيث أن ١ سم علي المقياس البسيط تمثل ٥٠ مترا بالإضافة الي ٠.٤ سم تمثل ٢٠ مترا علي المقياس الدقيق:



وبالمثل إذا قسنا مسافة علي الخريطة فكانت ٣.٨ سنتيمتر ووضعناها علي مقياس الرسم فسنجد أن طول هذه المسافة علي الطبيعة = الجزء الأول البالغ طوله ٣ سنتيمتر علي المقياس البسيط يمثل ١٥٠ متر علي الطبيعة + الجزء الثاني البالغ طوله ٠.٨ سنتيمتر علي المقياس الدقيق يمثل ٤٠ متر علي الطبيعة = ١٥٠ + ٤٠ = ١٩٠ مترا:



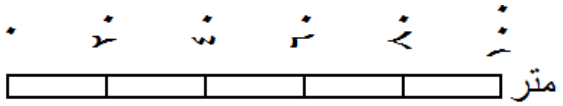
المقياس الخطي الشبكي:

يعد هذا النوع من مقاييس الرسم الخطية أكثر الأنواع دقة، ويأخذ شكل شبكة من الخطوط ومن هنا جاء أسمه. ويستعمل المقياس الخطي الشبكي عندما نحتاج دقة عالية لمقياس الرسم ولا يمكننا رسمها علي المقياس الدقيق حيث أنها ستحتاج لعدد كبير من الأجزاء الفرعية مما لا يجعل شكل المقياس متناسقا. والمقياس الشبكي مبني علي نظرية الخط الذي يقطع مستقيمات متوازية علي أبعاد متساوية كما في المثال التالي:

مثال:
صمم مقياس خطي شبكي لخريطة مقياس رسمها النسبي ١ : ٢٠٠٠ بحيث تكون دقته ١ متر.

كل ١ سنتيمتر علي الخريطة = ٢٠٠٠ سنتيمتر علي الطبيعة
= ٢٠٠٠ ÷ ١٠٠ = ٢٠ متر علي الطبيعة

فيكون المقياس الخطي البسيط كالتالي:

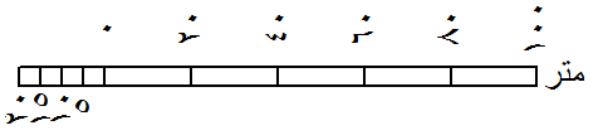


ولرسم المقياس الخطي الدقيق نستخدم المعادلة كما سبق:

عدد الأقسام الفرعية للمقياس الدقيق = قيمة وحدة المقياس البسيط ÷ دقة المقياس المطلوبة

أي أن:
عدد الأقسام الفرعية للمقياس الدقيق = ٢٠ متر ÷ ١ متر = ٢٠ قسما.

وبالطبع لا يمكننا تقسيم وحدة المقياس البسيط (وطولها ١ سنتيمتر) الي ٢٠ قسما، فنختار أن يكون عدد أجزاء المقياس الدقيق ٤ أجزاء فقط، وبالتالي فأن دقة هذا المقياس الخطي الدقيق ستساوي دقة المقياس البسيط ÷ عدد الأقسام = ٢٠ ÷ ٤ = ٥ أمتار :

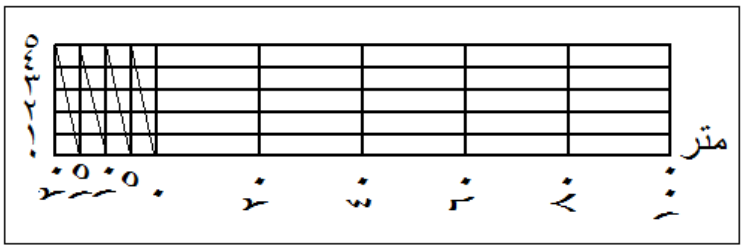


لكننا مازلنا في حاجة الي أن نزيد دقة المقياس لتصبح ١ متر وليس ٥ متر في الشكل السابق، ويتم ذلك من خلال بناء شبكة مكونة من عدد من المستويات الرأسية حيث:

عدد المستويات الرأسية = دقة المقياس الخطي الدقيق ÷ دقة المقياس الشبكي المطلوبة

أي أن:
عدد المستويات الرأسية = ٥ متر ÷ ١ متر = ٥ مستويات رأسية.

ثم نقوم برسم ٥ مقاييس (بسيطة و دقيقة أيضا) بصورة علوية أحدهما فوق الآخر، وبالتالي فيكون عدد الأقسام الصغيرة لمقياس الرسم ٢٠ جزءا لكنهم موزعين علي ٥ مستويات رأسية وليس في مستوي واحد، ثم نرسم خطا مائلا من اليمين السفلي الي اليسار العلوي داخل كل مستوي من المستويات الرأسية:

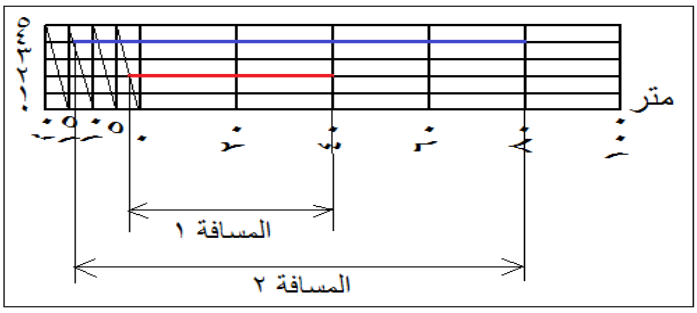


شكل (٢٩-١١) نموذج لمقياس رسم خطي شبكي

والشكل التالي يقدم تطبيقا علي استخدام مقياس الرسم الشبكي:

المسافة الأولي سيبلغ طولها في الحقيقية = ٤٠ مترا من مقياس الرسم البسيط + صفر متر من المستوي السفلي لمقياس الرسم الدقيق (حيث أنها لم تصل للجزء الأول من أجزاء هذا المقياس) + ٢ متر من المستوي الثاني لمقياس الرسم الشبكي = ٤٠ + ٠ + ٢ = ٤٢ مترا

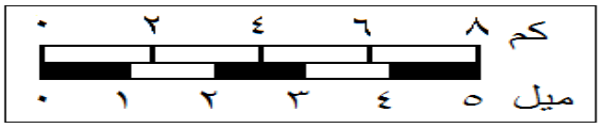
المسافة الثانية سيبلغ طولها علي الطبيعة = ٨٠ متر من مقياس الرسم البسيط + ١٠ متر من المستوي السفلي لمقياس الرسم الدقيق (حيث أنها تجاوزت قيمة ١٠ متر لكنها لم تصل الي ١٥ متر علي هذا المقياس) + ٤ أمتار من المستوي الرابع لمقياس الرسم الشبكي = ٨٠ + ١٠ + ٤ = ٩٤ مترا.



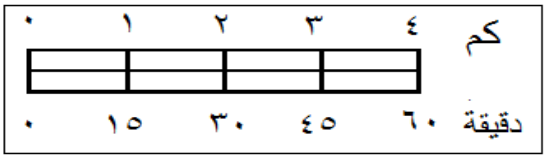
مقاييس خطية أخري:

توجد أنواع أخري من مقاييس الرسم الخطية وان كانت لم تعد مستخدمة بكثرة الآن، ومنها علي سبيل المثال مقياس الرسم المقارن و مقياس الرسم الزمني.

يتكون مقياس الرسم المقارن من مقياسين متلاصقين من مقاييس الرسم وان كانا يختلف في وحدات القياس علي الطبيعة، فيمكن عمل مقياس رسم خطي يقرأ المسافات علي الطبيعة بالكيلومترات بينما المقياس الخطي الثاني يقرأ المسافات علي الطبيعة بالأميال. ومع سهولة عمليات تحويل المسافات باستخدام الآلات الحاسبة وبرامج الكمبيوتر فلم يعد المقياس المقارن شائعا بكثرة في الخرائط الحديثة، وان كانت بعض الخرائط تحمل مقياسين رسم مختلفين في وحدات القياس علي الطبيعة إلا أنهما غالبا لا يرسما متلاصقين.



شكل (٢٩-١٢) نموذج لمقياس رسم خطي مقارن

تقوم فكرة مقياس الرسم الزمني علي مقارنة وحدات قياس المسافات علي الطبيعة مع الوحدات الزمنية، وكان هذا النوع من مقاييس الرسم مستخدما في الماضي في الخرائط العسكرية و خرائط الكشافة و الرحلات. يتكون المقياس الزمني من مقياسي رسم أحدهما لقراءة المسافات علي الطبيعة (أي مقياس خطي بسيط عادي) والآخر مخصص للزمن الذي يتطلبه قطع هذه المسافة ويكون مدرجا بالدقائق أو الساعات. فإذا قام مستخدم الخريطة بقياس مسافة معينة عليها فيمكنه معرفة المسافة الحقيقية المناظرة علي الطبيعة من المقياس الأعلى، وبافتراض سرعة ثابتة للسير يمكنه أيضا معرفة الزمن المستغرق لقطع هذه المسافة من المقياس السفلي.

شكل (٢٩-١٣) نموذج لمقياس رسم خطي زمني

مقارنة بين مقاييس الرسم

يتميز كل نوع من نوعي مقاييس الرسم بمميزات عن النوع الآخر، فالمقاييس الكتابية أسهل في الفهم والتعامل. فبمجرد النظر الي مقياس الرسم الكتابي يعرف مستخدم الخريطة مقياس رسمها بسهولة، بينما المقاييس الخطية المرسومة علي الخريطة تحتاج بعض القياسات و الحسابات لتحديد قيمة مقياس رسم الخريطة. وعلي الجانب الآخر فأن مقاييس الرسم الخطية تتميز بسهولة تحويل الأبعاد المقاسة علي الخريطة الي ما يناظرها علي الطبيعة بمجرد القياس باستخدام المسطرة، بينما تتطلب مقاييس الرسم الكتابية إجراء بعض الحسابات لإتمام هذه الخطوة. أما أهم عيوب مقاييس الرسم الكتابية فهي أنها لا تتغير إذا تم تكبير أو تصغير الخريطة، فعلي سبيل المثال فأن مقياس الرسم الخطي المكتوب في صورة "١/٥٠٠٠" لن تتغير حروفه عندما نكبر أو نصغر هذه الخريطة وستظهر نفس الجملة "١/٥٠٠٠" علي الخريطة المصغرة مع أنها ستكون جملة خاطئة. وفي المقابل فأن أهم مميزات مقاييس الرسم الخطية أنها كصورة مرسومة علي الخريطة ستكبر أو تصغر بنفس نسبة تكبير أو تصغير الخريطة، وبالتالي سيظل مقياس الرسم الخطي صحيحا.

يتم استخدام كلا نوعي مقياس الرسم علي الخرائط بحيث يتم كتابة قيمة مقياس الرسم وأيضا استخدام مقياس رسم خطي علي الخريطة. ويعد هذا أفضل الحلول الكارتوجرافية بحيث يجمع مميزات كلا نوعي مقياس الرسم. أما في حالة أننا مضطرون لاستخدام نوع واحد فقط من مقاييس الرسم فأن المقياس الخطي هو الأفضل.

المملكة العربية السعودية

الإدارة العامة للمساحة العسكرية
وزارة الدفاع و الطيران و المفتشية العامة
المملكة العربية السعودية
الطبعة الخامسة ١٤٣٢ هـ ٢٠١١ م

مقياس الرسم ١ : ٤,٠٠٠,٠٠٠

مسقط لامبرت المخروطي لدائرتي العرض الأساسيتين ١٧° و ٣٣°
المجسم النظام الجيوديسي العالمي ٨٤

حقوق الطبع محفوظة للإدارة العامة للمساحة العسكرية
مكتبة الملك فهد الوطنية
رقم الإيداع بمكتبة الملك فهد الوطنية ١٤٢٨/٨٩١ هـ ، ردمك ٩٧٨-٩٩٦٠-٠٤-٠٠٠٠-٤

شكل (٢٩-١٤) نموذج لعدة صور لمقياس الرسم علي خريطة

٢٩-٣-٢ تطبيقات مقياس الرسم

يتم استخدام مقياس رسم الخريطة لتحويل المسافة المقاسة علي الخريطة الي المسافة الحقيقية علي سطح الأرض والعكس أيضا. وهناك بعض الطرق لتحديد مقياس رسم خريطة غير معلوم.

حساب المسافات على الطبيعة

مثال:
قيست مسافة علي خريطة مقياس رسمها ١ : ٥٠٠٠ فكانت ٤.٦ سنتيمتر، أحسب المسافة الحقيقية المناظرة علي الطبيعة بالأمتار؟

المقياس النسبي ١ : ٥٠٠٠ يدل علي:
كل ١ سنتيمتر علي الخريطة = ٥٠٠٠ سنتيمتر علي الطبيعة
المسافة الحقيقية علي الطبيعة = ٤.٦ × ٥٠٠٠ = ٢٣٠٠٠ سنتيمتر
وحيث أن المتر = ١٠٠ سنتيمتر، فأن
المسافة الحقيقية علي الطبيعة = ٢٣٠٠٠ ÷ ١٠٠ = ٢٣٠ متر

حساب المسافات على الخريطة:

مثال:
يبلغ طول الطريق من مكة المكرمة الي المدينة المنورة ٣٩٠ كيلومتر، أحسب طول هذا الطريق بالسنتيمتر علي خريطة مقياس رسمها ١ : ٢،٠٠٠،٠٠٠ ؟

المقياس النسبي ١ : ٢،٠٠٠،٠٠٠ يدل علي:
كل ١ سنتيمتر علي الخريطة = ٢،٠٠٠،٠٠٠ سنتيمتر علي الطبيعة
وحيث أن المتر = ١٠٠ سنتيمتر، فأن:
كل ١ سنتيمتر علي الخريطة = ٢،٠٠٠،٠٠٠ ÷ ١٠٠ = ٢٠،٠٠٠ متر علي الطبيعة
وحيث أن الكيلومتر = ١٠٠٠ متر، فأن:
كل ١ سنتيمتر علي الخريطة = ٢٠،٠٠٠ ÷ ١٠٠٠ = ٢٠ كيلومتر علي الطبيعة
إذن:
المسافة علي الخريطة = ٣٩٠ ÷ ٢٠ = ١٩.٥ سنتيمتر

تحديد مقياس رسم خريطة

أحيانا نجد خريطة لمنطقة معينة ويكون مقياس رسمها مجهولا، وهنا يمكن حسابه بعدة طرق مختلفة مثل أن نقارن بين طول خط معلوم في هذه الخريطة مع طوله علي خريطة أخري معلومة مقياس الرسم، أو أن نقارن بين طول خط معلوم علي الخريطة و طوله الحقيقي علي الأرض.

مثال:
وجدت خريطة مجهولة مقياس الرسم لمنطقة و بالبحث تم العثور علي خريطة أخري لهذه المنطقة وكان مقياس رسمها ١ : ٢٥،٠٠٠ ، وتم قياس خط علي الخريطة المجهولة فكان طوله

١٥ سنتيمتر بينما كان طوله علي الخريطة الثانية المعلومة ١٨ سنتيمتر. أحسب مقياس رسم الخريطة المجهولة؟

مقياس رسم الخريطة المجهولة = الطول علي الخريطة المجهولة × مقياس رسم الخريطة المعلومة / الطول علي الخريطة المعلومة

مقياس رسم الخريطة المجهولة = ١٥ سنتيمتر × (١ / ٢٥٠٠٠) / ١٨ سنتيمتر
= ٠.٠٠٠٠٦ / ١٨
= ٠.٠٠٠٠٣٣٣
وحيث أنه جري العرف علي كتابة قيمة مقياس رسم أي خريطة في صورة نسبية (أو كسرية) تبدأ بالواحد الصحيح فأن:
مقياس رسم الخريطة المجهولة = ١ ÷ ٠.٠٠٠٠٣٣٣
= ١ : ٣٠،٠٠٠

اختيار مقياس رسم مناسب لخريطة

مثال:
توجد قطعة أرض علي الطبيعة تبلغ أبعادها ٤٠٠ × ٦٠٠ متر ومطلوب رسمها علي قطعة من الورق أبعادها ٢٠ × ٣٤ سنتيمترا، فكم يبلغ مقياس الرسم المناسب لإنشاء هذه الخريطة؟

أولا سنقوم بترك مسافة مناسبة (٢ سنتيمتر علي سبيل المثال) من جميع جوانب الورقة كهوامش للخريطة، وبالتالي فأن أبعاد الورقة المتاحة لرسم الخريطة ستصبح (٢٠ - ٤=) ١٦ سنتيمتر و (٣٤ - ٤=) ٣٠ سنتيمتر.

أصبح لدينا الآن عرض قطعة الأرض علي الطبيعة وهو ٤٠٠ متر ومطلوب رسمه علي الورقة التي يبلغ عرضها ١٦ سنتيمتر:

مقياس عرض اللوحة = عرض الورقة / عرض قطعة الأرض
= ١٦ سنتيمتر / ٤٠٠ متر
= ١٦ سنتيمتر / (٤٠٠×١٠٠) سنتيمتر
= ١٦ / ٤٠،٠٠٠
= ١ / ٢٥٠٠

أما طول قطعة الأرض البالغ ٦٠٠ متر علي الطبيعة فمطلوب رسمه علي الورقة التي يبلغ طولها ٣٠ سنتيمتر:

مقياس طول اللوحة = طول الورقة / طول قطعة الأرض
= ٣٠ سنتيمتر / ٦٠٠ متر
= ٣٠ سنتيمتر / (٦٠٠×١٠٠) سنتيمتر
= ٣٠ / ٦٠،٠٠٠
= ١ / ٢٠٠٠

وكما هو معروف فأن مقياس الرسم يجب أن يكون ثابتا لكافة أرجاء الخريطة، ولذلك نختار أصغر المقياسين ليكون هو مقياس الرسم المناسب لهذه الخريطة. وحيث أن مقياس الرسم ١ : ٢٥٠٠ أصغر من مقياس الرسم ١ : ٢٠٠٠ (كلما كبر المقام صغرت قيمة مقياس الرسم و العكس صحيح أيضا) فيكون مقياس الرسم المناسب لهذه الخريطة هو ١ : ٢٥٠٠.

٢٩-٣-٣ طرق القياس على الخرائط

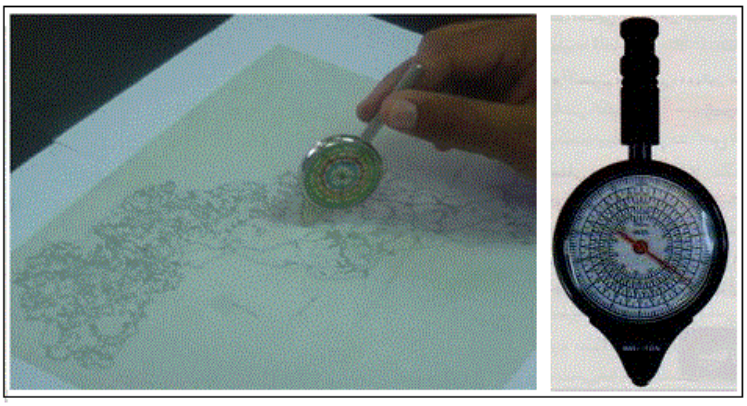
يعد إجراء القياسات علي الخريطة من أهم استخداماتها بهدف معرفة الأبعاد و المساحات الحقيقية للمعالم المكانية الموجودة علي سطح الأرض. فعلي سبيل المثال يحتاج مستخدم الخريطة لقياس المسافة بين مدينتين بهدف معرفة الطول الحقيقي للطريق بينهما علي الطبيعة، وأيضا قد يحتاج لقياس مساحة مبني علي الخريطة بهدف حساب مساحته الحقيقية علي الأرض. وحيث أن الخريطة هي تمثيل أو نموذج مصغر لسطح الأرض فأننا نحتاج لتطبيق مقياس الرسم لكي يتم تحويل القياسات التي تتم علي الخريطة لمعرفة قيمها المناظرة الحقيقية علي سطح الأرض.

قياس المسافات على الخريطة

توجد عدة طرق و أدوات و أجهزة لقياس المسافات علي الخريطة، وتشمل المسطرة والخيط و الفرجار و عجلة القياس. تعد المسطرة أسهل أدوات قياس المسافات علي الخريطة، وفيها يتم وضع بداية القياس علي المسطرة (الصفر) مع بداية المسافة المطلوب قياسها ثم نقرأ طول المسطرة المحدد لهذه المسافة علي الخريطة. وفي الخطوة التالية نضع المسطرة علي مقياس الرسم الخطي للخريطة ونقرأ منه القيمة الحقيقية المناظرة لهذه المسافة علي الطبيعة. وبالطبع فأن المسطرة لا تصلح إلا لقياس المسافات المستقيمة علي الخريطة. وفي حالة كون المسافة المطلوب قياسها علي الخريطة متعرجة (ليست مستقيمة) نستخدم الخيط، وذلك بأن نثبت طرف الخيط عند بداية هذه المسافة ثم نتتبع بعناية كل ثنية علي الخط الي أن ينتهي الخط المطلوب قياسه، وبعد ذلك نقوم بشد الخيط علي مسطره لنحدد طول المسافة علي الخريطة بالسنتيمتر ثم نضع المسطرة علي مقياس رسم الخطي للخريطة لنعرف الطول الحقيقي لهذه المسافة علي الطبيعة. كما يمكن استخدام الفرجار لقياس الخطوط المتعرجة علي الخريطة، وذلك بأن نفتح الفرجار بمسافة معينة (عدة ملليمترات) ثم نبدأ في قياس الخط المتعرج من بدايته عن طريق عمل عدة نقلات للفرجار بشرط عد رفع الفرجار من علي الخريطة وحتى نصل لنهاية الخط المطلوب قياسه. ثم نجمع عدد النقلات التي تمت ونضرب هذا العدد في طول فتحة الفرجار لنحصل علي طول هذا الخط المتعرج بالملليمتر، وباستخدام مقياس الرسم الخطي للخريطة يمكننا تحديد الطول الحقيقي علي الطبيعة لهذه المسافة المقاسة.

تعد عجلة القياس أدق أجهزة قياس المسافات علي الخريطة وتتكون من قرص مستدير له يد لإمساكه ويوجد عليه دائرتان مقسمتان الي عدة أقسام لأخذ القراءة. تكون الدائرة الداخلية مقسمة الي ٩٩ قسما بينما الدائرة الخارجية مقسمة الي ٣٩ قسما، وفي مركز الدائرتين (مركز القرص) يوجد مؤشر متحرك يشبه عقرب الساعة والذي تتحكم في حركته ترس صغير في أسفل قرص العجلة. عند بداية قياس طول أي خط نقوم بضبط المؤشر علي صفر التدريج بالنسبة للدائرتين، ثم نضع ترس العجلة علي بداية الخط ونحركها - في اتجاه دوران عقرب الساعة - علي الخط بمنتهي الدقة و العناية الي أن نصل لنهاية الخط المطلوب قياسه فنرفع العجلة ونقرأ الرقم الذي وصل إليه المؤشر. تكون قراءة المؤشر علي الدائرة الداخلية هي قيمة المسافة الحقيقية بالكيلومتر في حالة كون مقياس رسم الخريطة هو ١ : ١٠٠،٠٠٠ حيث أن قراءة المؤشر علي هذه الدائرة تكون

بالسنتيمتر وفي هذه الخريطة يكون السنتيمتر علي الخريطة يمثل كيلومتر مباشرة علي الطبيعة. أما إذا أخذنا قيمة قراءة المؤشر علي الدائرة الخارجية للعجلة فتكون هي قيمة المسافة الحقيقية بالأميال بشرط أن تكون الخريطة المستخدمة لها مقياس رسم ١: ١٠٠،٠٠٠ أيضا، حيث أن قراءة مؤشر العجلة علي هذه الدائرة تكون بالبوصة وفي هذه الخريطة تكون البوصة علي الخريطة مساوية لميل علي الطبيعة. أما في حالة كون مقياس رسم الخريطة المستخدمة لا يساوي ١ : ١٠٠،٠٠٠ فنأخذ قراءة المؤشر بالسنتيمتر ثم نضربه في مقياس الرسم لنحصل علي القيمة الحقيقية لهذه المسافة علي الطبيعة.



شكل (٢٩-١٥) عجلة القياس علي الخريطة

قياس المساحات على الخريطة

توجد عدة طرق و أدوات و أجهزة لقياس المساحات علي الخريطة وتحديد المساحات الحقيقية المناظرة لها علي الطبيعة. وتعد الطرق الحسابية هي أدق طرق حساب المساحات حيث أن أي شكل هندسي معروف (مثلث، دائرة، مربع، مستطيل، شبه منحرف ....الخ) له معادلة رياضية لحساب مساحته. وفي حالة كون الشكل المطلوب حساب مساحته علي الخريطة هو أحد الأشكال الهندسية المعروفة فيمكن قياس بعض أبعاده علي الخريطة (باستخدام المسطرة علي سبيل المثال) وتحويل هذه الأبعاد الي القيم المناظرة لها علي الطبيعة ومن ثم تطبيق معادلة حساب مساحة هذا الشكل لنحصل علي المساحة الحقيقية له. ومن أمثلة معادلات حساب مساحات الأشكال الهندسية:

مساحة المثلث = نصف القاعدة × الارتفاع
= نصف حاصل ضرب ضلعين × جيب الزاوية المحصورة بينهما

مساحة المربع = طول الضلع × نفسه

مساحة المستطيل = الطول × العرض

مساحة الدائرة = (٧/٢٢) × مربع نصف القطر

مساحة المعين = نصف حاصل ضرب القطرين

مساحة متوازي الأضلاع = القاعدة × الارتفاع

مساحة شبه المنحرف = نصف مجموع القاعدتين × الارتفاع

مساحة أي شكل رباعي = نصف حاصل ضرب القطرين × جيب الزاوية بينهما

وفي حالة الأشكال غير المنتظمة علي الخريطة يمكننا تقسيم الشكل الي عدة أشكال هندسية (مثلثات مثلا) ونقوم بحساب مساحة كلا منهم منفردا ثم نجمع هذه المساحات لنحصل علي مساحة الشكل المطلوب. كما توجد أيضا عدة طرق حسابية أخري لحساب مساحة أي شكل غير منتظم مثل طريقة الحساب باستخدام الإحداثيات و طريقة الحساب باستخدام مركبات الخطوط وطريقة سمبسون للأشكال المنحنية الأطراف. ومع انتشار تطبيقات الحاسب الآلي فأن برامج الخرائط المتخصصة لديها إمكانيات حساب مساحة أي شكل علي الخريطة سواء كان شكلا منتظما أو غير منتظم وتحديد مساحة الشكل علي الطبيعة مباشرة.

يعد جهاز البلانيميتر أشهر أنواع أجهزة قياس المساحات علي الخريطة (مع انتهاء الاعتماد علي جهاز مسطرة التفدين القديمة)، وتوجد منه عدة أنواع بعضها قديم عادي أو ميكانيكي مثل البلانيميتر القطبي، وبعضها حديث مثل البلانيميتر الرقمي. يتكون البلانيميتر القطبي من ذراعين من المعدن متصلات بمفصل كروي ويسمي الأول بذراع الثقل أو الذراع الثابت والثاني بذراع التخطيط أو ذراع الراسم. وعند تحريك سن الراسم علي الخريطة فتدور عجلة القياس رأسيا وبالتالي يتحرك القرص الأفقي. يبدأ الراسم من نقطة محددة علي الشكل المطلوب قياس مساحته ثم يتحرك بكل دقة و عناية علي حدود محيط هذا الشكل الي أن يعود مرة أخري لنفس النقطة التي بدأ منها، وتكون القراءة علي الجهاز مساوية لقيمة مساحة هذا الشكل علي الخريطة، وتتكون قراءة المساحة من ثلاثة أجزاء فالقرص الأفقي يقرأ رقم الآلاف بينما العجلة الرأسية تقرأ المئات و العشرات والورنية تقرأ الآحاد و كسورها. وطبقا لمواصفات كل جهاز توجد خطوات معينة لتحويل المساحة المقاسة علي الخريطة الي القيمة الحقيقية المناظرة لها اعتمادا علي قيمة مقياس رسم الخريطة المستخدمة. أما البلانيميتر الرقمي الحديث فيتميز بأن قيمة المساحة تظهر مباشرة علي شاشة الجهاز بمجرد الانتهاء من عملية القياس علي الخريطة بعد تحديد مقياس الرسم المستخدم.

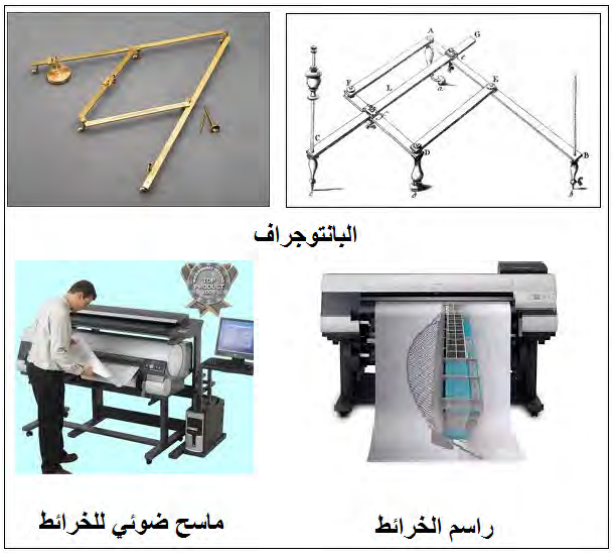
شكل (٢٩-١٦) أجهزة البلانيميتر

٢٩-٣-٤ تصغير و تكبير الخرائط

توجد عدة طرق لتصغير و تكبير الخرائط، فقديما كانت تتم هذه العملية بعدة وسائل مثل طريقة المربعات حيث يتم وضع ورقة شفافة مرسوما عليها شبكة من المربعات علي الخريطة الأصلية ثم وضع شبكة أخري من المربعات علي الورقة المطلوب رسم الخريطة الجديدة عليها بحيث تكون النسبة بين طول المربع علي الخريطة الأصلية و طول المربع علي الخريطة الجديدة مساوية لنسبة التصغير أو التكبير المطلوبة. ثم يتم رسم المعالم الجغرافية داخل كل مربع الي المربع المناظر له في الخريطة الجديدة.

تلا ذلك اختراع أجهزة خاصة لتكبير أو تصغير الخرائط تسمي أجهزة البانتوجراف، ويتكون في أبسط صوره من أضلاع أربعة متساوية الطول مصنوعة إما من الخشب أو الألمونيوم ومربوطة مع بعضها البعض ربطا مفصليا ويثبت في أحد أركان متوازي الأضلاع هذا ثقل ثابت بينما يوضع في الركن المعاكس قلم رصاص (مرسمه).

حديثا يتم الأجهزة الالكترونية الرقمية لتكبير و تصغير الخرائط مثل أجهزة الماسحات الضوئية، وأيضا أجهزة الراسمات المتصلة بالحاسبات الآلية حيث يمكن التحكم في قيمة مقياس الرسم المطلوب لطباعة أي خريطة.

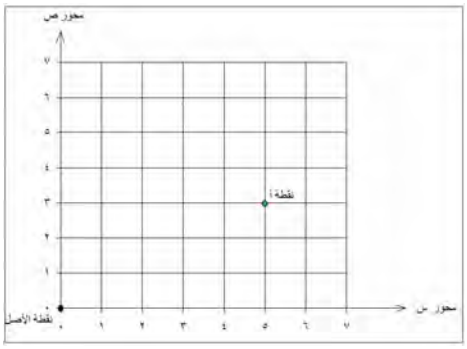


شكل (٢٩-١٧) أجهزة تكبير و تصغير الخرائط

٢٩-٤ شبكة الاحداثيات

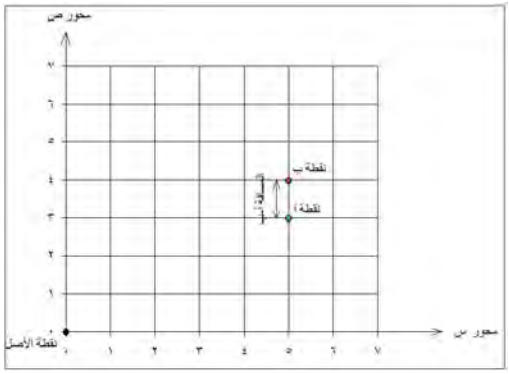
الإحداثيات هي القيم العددية التي بواسطتها يتم تحديد موقع أي نقطة أو معلم في إطار معين. أبسط أنواع الإحداثيات هي قيم (س،ص) التي نستخدمها في الرسم البياني البسيط، فعندما نقول أن النقطة أ تقع في (٥ ، ٣) فيدل ذلك علي موقع هذه النقطة يبعد ٥ وحدات (سنتيمترات) علي المحور الأفقي س كما يبعد ٣ وحدات (سنتيمترات) علي المحور الرأسي ص. وبالطبع فلن توجد أية نقطة أخري تقع في نفس هذه الإحداثيات (٥ ، ٣) وإلا انطبقت علي النقطة أ ذاتها، أي أن هذه الإحداثيات قد حددت بدقة موقع النقطة أ في إطار ورقة الرسم البياني. وإذا فحصنا هذا النوع من الإحداثيات نجده يتكون من ٣ عناصر محددة له: (١) وجود نقطة أصل

أو نقطة صفر يبدأ منها القياس، (٢) وجود محور أول (س) مقسم الي وحدات يتم القياس بها، (٣) وجود محور ثاني (ص) عمودي علي المحور الأول وهو أيضا مقسم الي وحدات يتم القياس بها. وهذا النظام من نظم الإحداثيات البسيطة يسمي نظام إحداثيات مستوية حيث أنه محدد أو مرسوم علي سطح مستوي (الورقة)، كما أنه يسمي نظام إحداثيات ثنائية الأبعاد حيث أنه يتطلب قيمتين أو رقمين أو بعدين فقط (وهما س،ص) لتحديد موقع أي نقطة علي الورقة.



شكل (٢٩-١٨) الإحداثيات المستوية البسيطة

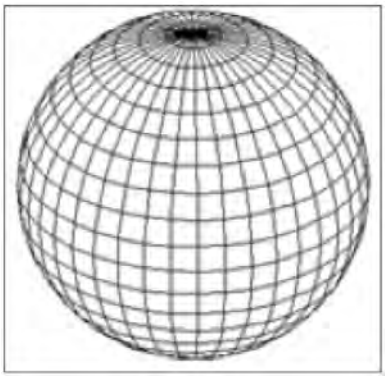
وتنبع أهمية أي نظام إحداثيات من أنه بالإضافة للتحديد الدقيق لموقع أي نقطة في إطاره فأنه يسمح بمعرفة المواقع النسبية بين النقاط بمجرد معرفة قيم الإحداثيات وبدون توقيع أو رسم النقاط علي الورقة. فعلي سبيل المثال عندما نعرف أن إحداثيات نقطة أ هي (٥ ، ٣) وإحداثيات نقطة ب هي (٥ ، ٤) فندرك أن نقطة أ تقع أفقيا علي نفس الخط مع نقطة ب (حيث أن لهما نفس قيمة الإحداثي س) بينما نقطة ب تقع أعلي من نقطة أ (حيث أن قيمة الإحداثي ص للنقطة ب أكبر من قيمة الإحداثي ص للنقطة أ). كما أن معرفة إحداثيات نقطتين يسمح لنا أيضا بحساب قيمة المسافة بينهما، فعلي سبيل المثال فأن المسافة بين نقطة أ (٥ ، ٣) و نقطة ب (٥ ، ٤) ستكون ١ سنتيمتر حيث أن كلا النقطتين يقعان علي نفس الإحداثي س بينما يفصلهما سنتيمتر واحد فقط علي الإحداثي ص.



شكل (٢٩-١٩) تطبيقات الإحداثيات المستوية البسيطة

الأرض عبارة عن كرة (أو بالتحديد شكل شبه كروي) أي أنها مجسم وليس سطح مستوي مثل ورقة الرسم البياني، لذلك لا يمكن استخدام نظام الإحداثيات المستوية البسيطة في تحديد مواقع المعالم الجغرافية علي سطح الأرض. ومن هنا بدأ علماء الجغرافيا و الخرائط منذ مئات السنين في تطوير نظم إحداثيات أخري تصلح لتحديد المواقع علي سطح الأرض الكروي، ومن أشهر

هذه النظم نظام الإحداثيات الجغرافية والذي يسمي أيضا نظام الإحداثيات الكروية (بسبب أنه يمثل المواقع علي الكرة) كما يسمي بنظام الإحداثيات المنحنية (حيث أنه لا يمكن رسم شبكة من الخطوط المستقيمة علي سطح الأرض المجسم، ولكنها ستكون خطوط منحنية) وأيضا يسمي بنظام الإحداثيات الزاوية (حيث أن قيم الإحداثيات ذاتها ستكون زوايا وليست مسافات). وتجدر الإشارة الي نظام الإحداثيات الجغرافية هو نظام ثلاثي الأبعاد حيث أن موقع أي نقطة علي سطح الأرض سيتحدد من خلال ثلاثة قيم أو أبعاد، اثنين منهم يعبران عن الموقع الأفقي للنقطة علي سطح الأرض (الكرة) بينما سيكون البعد الثالث هو قيمة ارتفاع هذه النقطة عن سطح الأرض.



٢٩-٥ شكل الأرض وإحداثيات الخرائط

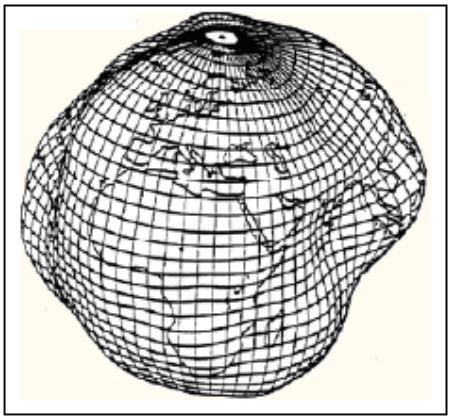
منذ القرن الثاني قبل الميلاد أكتشف العلماء أن الأرض كرة وليست قرص يطفو فوق سطح الماء كما كان معتقدا قبل ذلك. وفي عام ١٦٨٦م (١٠٩٨ هـ) صاغ العالم الشهير اسحق نيوتن نظريته عن أن خصائص كوكب الأرض تدل علي أنه جسم "شبه كروي" وأنه غير تام الاستدارة، وتلا ذلك قيام أكاديمية العلوم الفرنسية في عام ١٧٣٥ (١١٤٧ هـ) بعمل بعض القياسات الميدانية والتي أثبتت بشكل عملي أن الأرض مفلطحة عند القطبين وليست كروية الشكل تماما. ومع بداية القرن التاسع عشر الميلادي و من خلال إجراء القياسات الدقيقة تم تقدير أن نصف قطر الأرض عند دائرة الاستواء يبلغ ٦٣٧٨ كيلومتر بينما يبلغ نصف القطر في اتجاه القطبين ٦٣٥٧ كيلومتر، أي أن الفرق بينهما يبلغ ٢١ كيلومتر تقريبا، مما يدل علي أن الأرض ليست كروية تماما (وإلا كان نصفي القطر متساويين).

في حقيقة الأمر فأن كوكب الأرض يتميز بأنه غير منتظم الشكل، الا أن علماء المساحة و الخرائط قد وجدوا أن "أقرب" الأشكال الهندسية للشكل الحقيقي للأرض هو الشكل البيضاوي أو ما يطلق عليه الاليبسويد Ellipsoid، حيث أنه شكل منبعج عند القطبين ويتميز أن له محورين غير متساويين. وهذه الحقيقة هامة جدا في علم الخرائط حيث أن الخريطة هي تمثيل مصغر لسطح الأرض مما يتطلب معرفة شكل الأرض الحقيقي كي يمكن تمثيلها علي الخريطة، كما أن حسابات الخرائط تعتمد علي معرفة خصائص شكل الأرض.

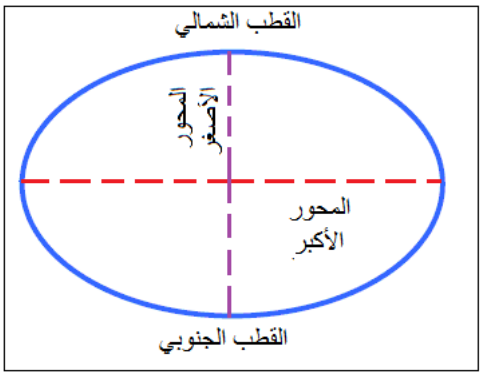
يمكن اعتبار الأرض عبارة عن كرة في الخرائط صغيرة المقياس (التي تغطي مساحات شاسعة من سطح الأرض) حيث أن الفرق بين شكل الأرض الحقيقي و شكل الكرة لن يكون ذا تأثير ملموس علي هذا النوع من الخرائط التي لا تتطلب دقة عالية. بينما لا يمكن قبول الشكل الكروي للأرض عند تطوير خرائط كبيرة المقياس (لمساحات صغيرة من سطح الأرض) لأنها خرائط تحتاج دقة عالية ويتم الاعتماد عليها في قياس المسافات و المساحات. في مثل هذه

الخرائط يتم الاعتماد (في حسابات الخرائط) علي أن الأرض شكل بيضاوي وليست كرة، ومن ثم تكتب خصائص هذا الشكل البيضاوي المستخدم علي الخريطة كأحد عناصر الأساس الرياضي لها.

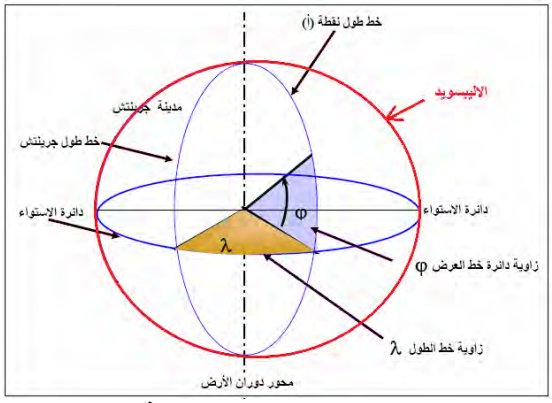
تم ابتكار نظام آخر من الإحداثيات يشابه تماما نظام الإحداثيات الجغرافية (خطوط الطول و دوائر العرض) إلا أنه يستخدم الشكل البيضاوي كأساس لتمثيل الأرض، وسميت هذه الإحداثيات بالإحداثيات الجيوديسية وتتكون من دوائر العرض الجيوديسية و خطوط الطول الجيوديسية. وهذا النوع من الإحداثيات هو المستخدم في الخرائط ذات مقاييس الرسم الكبيرة، فهو أكثر دقة لتمثيل المعالم الجغرافية في المناطق صغيرة المساحة.



شكل (٢٩-٢٠) الأرض غير منتظمة الشكل



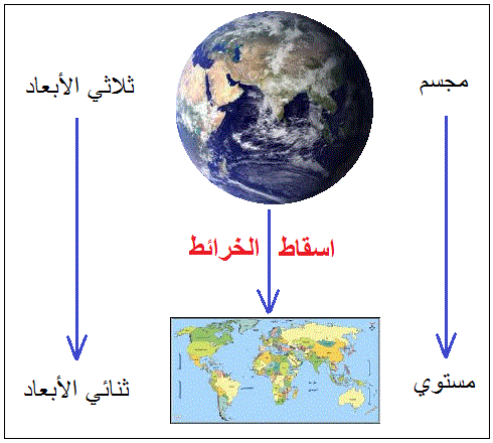
شكل (٢٩-٢١) الاليبسويد



شكل (٢٩-٢٢) الإحداثيات الجيوديسية علي الاليبسويد

٢٩-٦ إسقاط الخرائط

الأرض عبارة عن جسم شبه كروي يحتاج لثلاثة أبعاد أو قيم أو إحداثيات للتحديد الدقيق لموقع أي نقطة علي هذا المجسم، بينما نجد علي الجانب الآخر أن الخريطة عبارة عن سطح مستوي ولا يحتاج إلا لبعدين أو إحداثيين فقط لتحديد موقع أي نقطة عليها. والسؤال الذي يتبادر للأذهان هو: كيف يمكن تمثيل هذه الكرة أو هذا الشكل البيضاوي (الأرض) علي سطح مستوي (الخريطة) لتكون الخريطة تمثيلا دقيقا مصغرا لسطح الأرض و معالمها؟ وكيف يمكن تحويل الإحداثيات الثلاثية لأي نقطة علي الأرض الي إحداثيات ثنائية علي الخريطة؟ تكمن إجابة هذا السؤال في "إسقاط الخرائط".



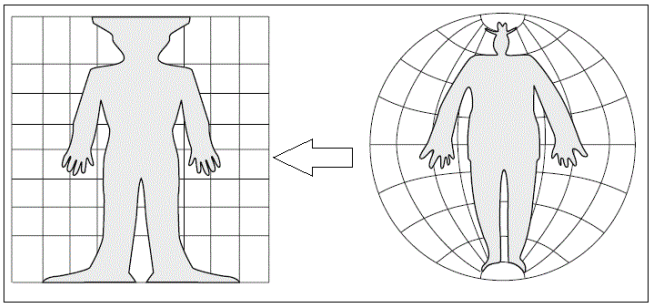
شكل (٢٩-٢٣) إسقاط الخرائط

ولا يعد علم إسقاط الخرائط علما حديثا، فقد وجدت مؤلفات للعالم الإغريقي الشهير بطليموس (في القرن الثاني قبل الميلاد) تشرح طريقة أو فكرة لكيفية رسم الكرة السماوية علي سطح مستوي. أما العالم الهولندي الشهير جيرار ميريكاتور فيعد أول من تحرر من طريقة بطليموس و سلك طريقا جديدا في رسم الخرائط (في عام ١٥٥٤م/ ٩٦٠ هـ) باستخدام المخروط وقام بإنشاء طريقة جديدة لإسقاط الخرائط أسماها باسمه ومازالت مستخدمة حتى الآن. وفي القرن الثامن عشر الميلادي ظهرت عدة طرق جديدة من طرق الإسقاط مثل طريقة العالم الأماني لامبرت.

إسقاط الخرائط عبارة عن طرق و معادلات رياضية تهدف الي تحويل إحداثيات المواقع الحقيقية الموجودة علي سطح الأرض الي إحداثيات مناظرة لها علي الخريطة بهدف إعداد الخريطة لتمثل الواقع الحقيقي بكل دقة وان كان بصورة مصغرة. وأولي الصعوبات التي تواجه طرق إسقاط الخرائط أنه لا يمكن تمثيل (رسم) الشكل المجسم الحقيقي للأرض علي سطح مستوي بصورة تامة التماثل. فلكي يكون التماثل تاما (١٠٠%) يجب أن تتحقق ثلاثة شروط هندسية وهي:

(١) تمثل المسافات علي الخريطة ما يقابلها علي الطبيعة تماما.
(٢) تمثل المساحات علي الخريطة ما يقابلها علي الطبيعة تماما.
(٣) تمثل الاتجاهات علي الخريطة ما يقابلها علي الطبيعة تماما.

ولا توجد أيه طريقة رياضية تحقق هذه الشروط الثلاثة معا، ومن ثم فأن هناك عشرات من مساقط الخرائط (طرق إسقاط الخرائط) و لكلا منها مميزات و استخدامات محددة، والشكل الناتج علي الخريطة من تطبيق طريقة الإسقاط يسمي "مسقط". وبصفة عامة فلا توجد طريقة إسقاط إلا و بها "تشوه"، أي جزء بسيط من عدم التطابق أو عدم التماثل بين ما هو علي الخريطة و ما هو علي الطبيعة.



شكل (٢٩-٢٤) مفهوم التشوه في إسقاط الخرائط

وتجدر الإشارة الي أن الخرائط كبيرة المقياس جدا (المخططات التي تمثل أجزاء صغيرة جدا من سطح الأرض مثل مشروع هندسي أو جزء من حي داخل مدينة) لا تحتاج لإسقاط الخرائط حيث أننا نفترض أن هذا الجزء الصغير جدا من الأرض هو سطح مستوي ولن يكون لكروية الأرض أي تأثير به، ومن ثم يمكننا رسم القياسات الميدانية مباشرة علي هذه المخططات.

لوجود أنواع عدة من مساقط الخريطة فأن اختيار المسقط المناسب لخريطة معينة يجب أن يتم بدقة و عناية حتى تفي الخريطة الناتجة بالأهداف و الخصائص المطلوبة. ومن ثم يجب علي الكارتوجرافي أن يلم بمواصفات المساقط و كيفية المفاضلة و الاختبار بينهم.

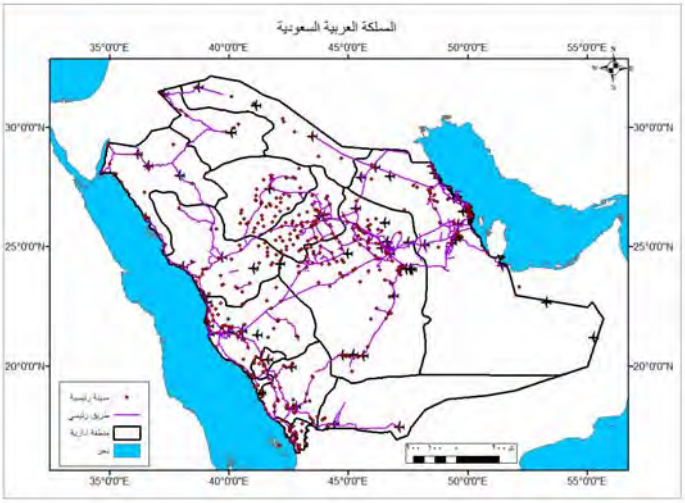
للمفاضلة بين أنواع المساقط طبقا لنوع لوحة (أو سطح) الإسقاط فأن المساقط الاسطوانية تكون أكثر ملائمة للمناطق الاستوائية بينما تكون المساقط المخروطية أكثر مناسبة للمناطق الواقعة بين الاستواء و القطب، أما للمناطق القطبية فأن المساقط الاتجاهية تكون هي الأمثل.

كما يعتمد اختيار المسقط الملائم علي الغرض الذي من أجله سيتم إنشاء الخريطة، فخرائط التوزيعات ذات مقاييس الرسم الصغيرة (أي تغطي مساحات كبيرة من سطح الأرض) يجب أن تمثل علي مساقط متساوية المساحات. أما إن كان الهدف من الخريطة هو قياس الاتجاهات و الزوايا (مثل الخرائط الملاحية) فيجب أن يكون مسقطها من النوع الذي ينتج عنه تطابق و تماثل تام في الاتجاهات، وأيضا تستخدم المساقط الاتجاهية متساوية المسافات للخرائط التي سيتم الاعتماد عليها في قياس المسافات علي سطح الأرض. أما الخرائط الأطلسية التي تعني بإبراز الشكل المجسم للأرض وتختص بدراسة الأرض ككل فأن المسقط المستوي أو الاتجاهي يكون هو الأفضل لها.

أيضا يلعب شكل المنطقة الجغرافية المطلوب إسقاطها دورا مهما في تحديد طريقة الإسقاط المناسبة، فكمثال نختار طريقة إسقاط مستوية إذا كانت شكل المنطقة شبه دائري و طريقة إسقاط اسطوانية للمناطق شبه المستطيلة و طريقة إسقاط مخروطية للمناطق شبه المثلثيه.

٢٩-٧ الرموز

يتم رسم الظاهرات الجغرافية (التفاصيل المكانية والمعلومات غير المكانية) علي الخريطة من خلال ٣ صور: النقطة، الخط، المضلع. فكمثال في الشكل التالي تم تمثيل المناطق الإدارية للمملكة العربية السعودية وأيضا تمثيل البحار باستخدام المضلعات، وتم تمثيل المدن الرئيسية بالمملكة وكذلك المطارات باستخدام النقاط، وتمثيل الطرق الرئيسية بالمملكة باستخدام الخطوط.



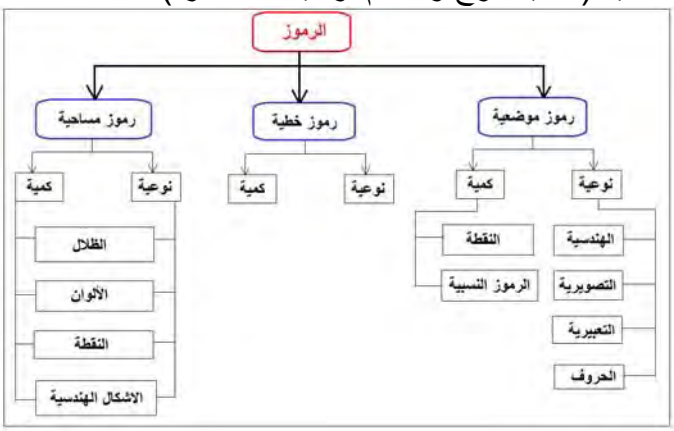
شكل (٢٩-٢٥) أنواع المظاهر الجغرافية علي الخريطة

أنواع الرموز

بناءا علي ذلك التمثيل للظاهرات فأن الرموز المستخدمة في الخرائط تنقسم أيضا إلي ٣ أنواع من الرموز:

- الرموز النقطية أو المكانية
- الرموز الخطية
- الرموز المساحية

وفي كل نوع من هذه الأنواع الرئيسية يوجد قسمين فرعين للرموز النوعية (لتمثيل نوع الظاهرة) والرموز الكمية (لتمثيل نوع و حجم أو قيمة الظاهرة).



شكل (٢٩-٢٦) أنواع الرموز علي الخرائط

الرموز النقطية أو الموضعية:

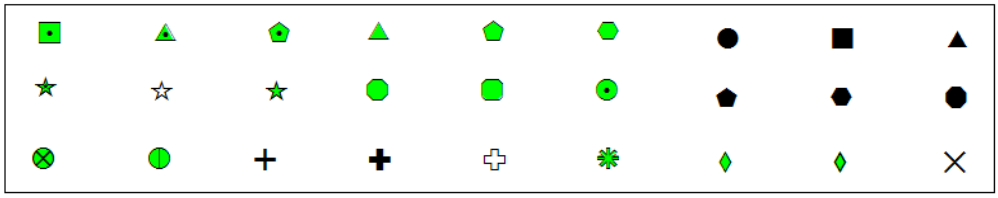
تتكون من مجموعتين فهي إما رموز نوعية أو رموز كمية.

الرموز النقطية أو الموضعية النوعية:

تنقسم إلي عدة أنواع فرعية:

(أ) الرموز الهندسية:

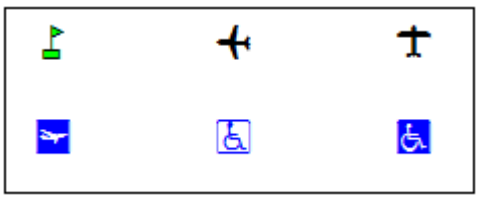
هي أشكال هندسية صغيرة مثل النقطة و الدائرة و المربع و المستطيل و المثلث و المعين و متوازي الأضلاع ... الخ تحدد موقع الظاهرة علي الخريطة. كما يمكن تغيير ألوان كل رمز للحصول علي رموز موضعية أخري. وفي حالة الخرائط الموضوعية الكمية فأن حجم الرمز يكون دالا علي قيمة الظاهرة، فمثلا كلما كبر حجم الدائرة في خرائط توزيع السكان كان ذلك دالا علي زيادة عدد سكان هذه المنطقة الجغرافية.



شكل (٢٩-٢٧) رموز موضعية هندسية

(ب) الرموز التصويرية:

عبارة عن صور صغيرة لنوع الظاهرات التي ترمز لها، إلا أن هذا النوع من الرموز مستخدم فقط في الخرائط السياحية والتعليمية.



شكل (٢٩-٢٨) رموز تصويرية

(ج) رموز الحروف الأبجدية:

عبارة عن حروف (عربية أو انجليزية) تمثل علي الخرائط لتبين مواضع و نوع الظاهرات التي تمثلها، مثل استخدام حرف H للدلالة علي موقع مستشفي. أيضا فأن هذا النوع من الرموز غير مستحب في الخرائط الجغرافية و الهندسية بصفة عامة.

(د) الرموز التعبيرية:

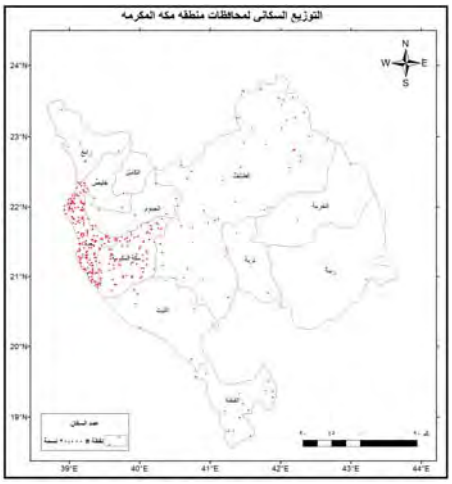
عبارة عن رسوم (صغيرة) تعبر عن التي ترمز لها بصورة فنية، مثل رسم صورة جمل للتعبير عن مناطق المراعي. أيضا من غير المستحب استخدام هذا النوع من الرموز في الخرائط الجغرافية و الهندسية.

الرموز النقطية أو الموضعية الكمية:

تتكون من نوعين رئيسين هما رموز النقطة و الرموز النسبية:

(أ) رموز النقطة:

يتم استخدام رمز النقطة للتعبير عن قيمة محددة للظاهرة المطلوب تمثيلها علي الخريطة، وبناءا علي قيمة الظاهرة في منطقة معينة يتم حساب عدد النقاط التي ستوضع داخل هذه المساحة علي الخريطة. فمثلا عند استخدام رموز النقاط في تمثيل عدد السكان في أحياء مدينة مكة المكرمة فأننا نحدد القيمة التي ستعبر عنها النقطة الواحدة (وليكن مثلا ٢٠ ألف نسمة)، ثم نقسم عدد سكان كل حي من أحياء المدينة علي قيمة النقطة الواحدة فنحسب عدد النقاط التي تعبر عن سكان كل حي وهذا النوع من الخرائط يسمي خرائط النقاط أو خرائط الكثافة.

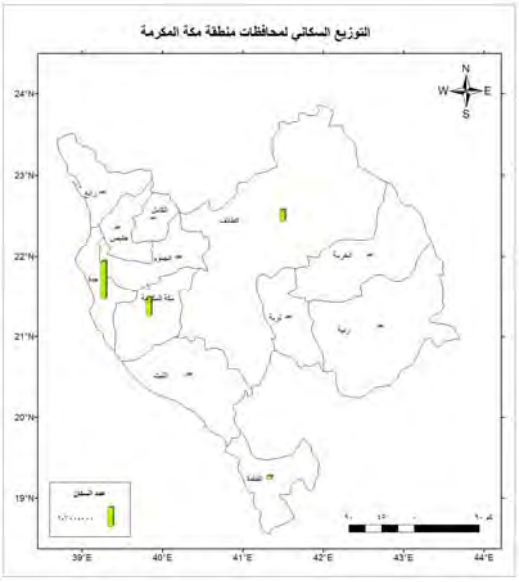


شكل (٢٩-٢٩) نموذج لخرائط النقاط أو خرائط الكثافة

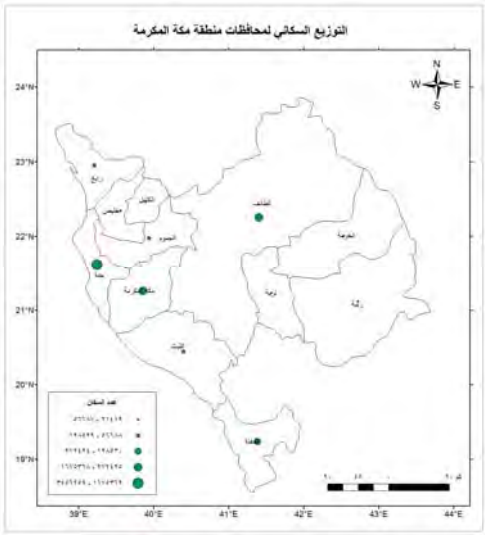
(ب) الرموز النسبية:

في هذا النوع من الخرائط يتم التعبير عن قيمة الظاهرة باستخدام الرموز الموضعية الهندسية (الدائرة و المربع و المثلث و المستطيل ... الخ) بصورة نسبية للدلالة عن التغيرات الكمية بين مفردات الظاهرة. فمثلا يمكن التعبير عن عدد سكان محافظات منطقة مكة المكرمة الإدارية باستخدام الأعمدة بحيث يكون طول العمود معبرا عن القيمة النسبية لعدد السكان في كل محافظة. أيضا يمكن استخدام رمز الدائرة لتمثيل عدد السكان بحيث يكبر حجم الدائرة كلما كبر عدد السكان في كل محافظة. تعطي طريقة الرموز النسبية صورة سريعة للقارئ عن التغيرات

النسبية لقيمة الظاهرة الممثلة علي الخريطة و التباين أو الاختلاف المكاني (الجغرافي) لتوزيع هذه الظاهرة.



شكل (٢٩-٣٠) نموذج لخرائط الأعمدة النسبية

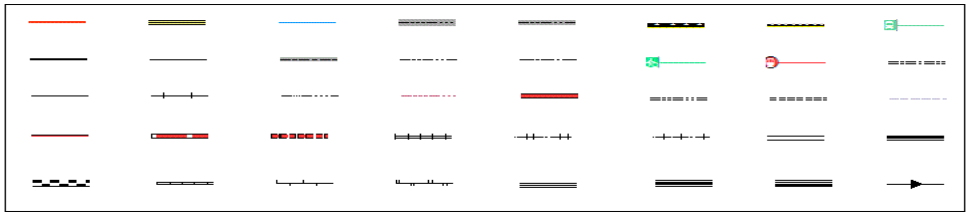


شكل (٢٩-٣١) نموذج لخرائط الدوائر النسبية

الرموز الخطية:

تستخدم الرموز الخطية للتعبير عن الظاهرات التي لها امتداد طولي في الطبيعة مثل الأنهار و الطرق و الشوارع و شبكات المياه و الصرف الصحي وخطوط نقل البترول والأنفاق و الحدود السياسية والحدود الإدارية ...الخ. في حالة استخدام الرموز الخطية للتعبير عن الظاهرات الكمية فأن سمك (عرض) الخط يدل علي قيمة الظاهرة، فكمثال يمكن تغيير سمك الخطوط المعبرة عن الطرق بحيث يمثل سمك الخط عرض الطريق وبذلك يمكن التفرقة بين الطرق

السريعة و الطرق العادية و الشوارع الداخلية. أيضا يمكن استخدام الألوان المتعددة للحصول علي رموز خطية جديدة لنفس الخط المرسوم علي الخريطة.



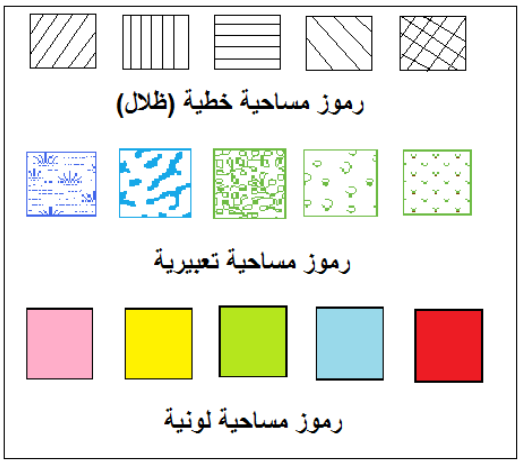
شكل (٢٩-٣٢) رموز خطية

الرموز المساحية:

تستخدم الرموز المساحية للتعبير عن نوع وكمية الظاهرات التي لها مساحة علي الخريطة (وأيضا في الطبيعة) مثل الأحياء داخل المدينة و المزارع والسبخات ومناطق الرعي و المناطق الصناعية والسكنية... الخ. تعتمد الرموز المساحية علي ملئ المضلع المرسوم علي الخريطة برمز معين يعبر عن هذا النوع من الظاهرات.

عند تمثيل الظاهرات المكانية تمثيلا نوعيا علي الخرائط فهناك عدة طرق للرموز المساحية منها:

- رموز مساحية نوعية خطية (طريقة التظليل أو الظلال).
- رموز مساحية نوعية تعتمد علي الألوان.
- رموز مساحية نوعية نقطية.
- رموز مساحية نوعية تستخدم الأشكال الهندسية.
- رموز مساحية نوعية تعبيرية.



شكل (٢٩-٣٣) رموز مساحية نوعية

شكل (٢٩-٣٤) نموذج لطريقة التمثيل النوعي باستخدام الألوان

أيضا عند تمثيل الظاهرات المكانية تمثيلا كميا علي الخرائط فهناك عدة طرق للرموز المساحية منها:

- رموز مساحية نوعية خطية (طريقة التظليل أو الظلال).
- رموز مساحية نوعية تعتمد علي الألوان.
- رموز مساحية نوعية نقطية.
- رموز مساحية نوعية تستخدم الأشكال الهندسية.

شكل (٢٩-٣٥) نموذج لطريقة التمثيل الكمي باستخدام الألوان

شكل (٢٩-٣٦) نموذج لطريقة التمثيل الكمي باستخدام الظلال

٨-٢٩ مفتاح الخريطة

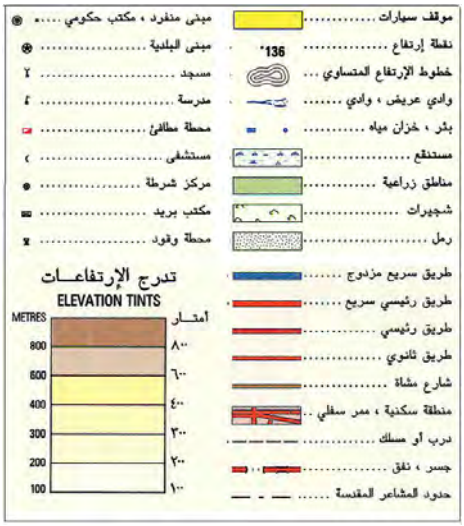
تعرف الخريطة علي أنها تمثيل مصغر لسطح الأرض مرسوم باستخدام رموز خاصة، ولذلك فأن مفتاح الخريطة هو ترجمة لهذه الرموز الظاهرة علي الخريطة لكي يسهل فهم و تفسير الخريطة و ما تمثله من ظاهرات مكانية. يعتمد نجاح الخريطة علي نجاح مصممها في اختيار الرموز السهلة و المعبرة، فالرموز علي الخريطة تدل علي:

- مواقع الظاهرات الجغرافية
- أشكال الظاهرات الجغرافية
- نمط انتشار الظاهرات الجغرافية
- ديناميكية الظاهرات الجغرافية

حديثا زاد اعتماد الخرائط علي استخدام الألوان بكثرة وخاصة مع رخص أسعار الطابعات الملونة، إلا أن استخدام الألوان في الخرائط يجب ألا يكون مجرد إضفاء الشكل الجمالي عليها إنما يتم استخدام الألوان بصورة تجعل تصميم الخريطة متوازنا بين موضوعها و كيفية تفسير الظاهرات الممثلة علي الخريطة.

تقوم الجهات المسئولة عن إنتاج الخرائط في كل دولة بوضع و تصميم مفاتيح قياسية للخرائط طبقا لنوع الخريطة و مقياس رسمها. قد تختلف الرموز المستخدمة في مفتاح الخريطة من دولة لأخرى، إلا أن الاستفادة من هذه النماذج القياسية تزيد من خبرة مصمم الخريطة. الأشكال التالية تعطي نماذج لمفاتيح الخرائط في كلا من جمهورية مصر العربية و المملكة العربية السعودية والولايات المتحدة الأمريكية.

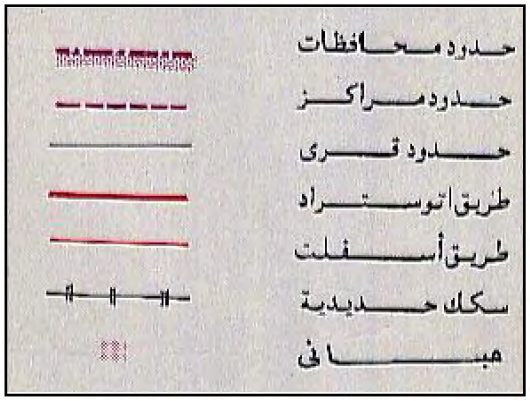
شكل (٢٩-٣٧) نموذج لمفتاح الخريطة المليونية في السعودية



شكل (٢٩-٣٨) نموذج لمفتاح الخريطة الطبوغرافية مقياس رسم ١ : ٥٠،٠٠٠ في السعودية

شكل (٢٩-٣٩) نموذج لمفتاح الخريطة العامة مقياس رسم ١ : ٤،٠٠٠،٠٠٠ في السعودية

شكل (٢٩-٤٠) نموذج لمفتاح الخريطة العامة مقياس رسم ١ : ٢٥٠،٠٠٠ في السعودية



شكل (٢٩-٤١) نموذج لمفتاح الخريطة العامة مقياس رسم ١ : ٢٠٠،٠٠٠ في مصر

شكل (٢٩-٤٢) نموذج لمفتاح الخريطة الجيولوجية مقياس رسم ١ : ٥٠٠،٠٠٠ في السعودية

شكل (٢٩-٤٣) نموذج لمفتاح الخريطة التفصيلية مقياس رسم ١ : ٥٠٠٠ في مصر

شكل (٢٩-٤٤) نموذج لمفتاح الخريطة الطبوغرافية مقياس رسم ١ : ٢٥،٠٠٠ في أمريكا

تقدم جامعة ميتشجان الأمريكية مقترحا لاستخدام الألوان في خرائط استعمالات الأراضي كما في الجدول و الشكل التاليين:

استخدام الأراضي	اللون
الاستخدامات السكنية	الأصفر
الاستخدامات التجارية و الخدمات (التجارية و الحكومية)	البرتقالي
الاستخدامات الصناعية	الأحمر
خدمات المواصلات والنقل	الأسود
الآبار ومناطق الاستخراج	البني
المناطق المفتوحة و الترفيهية	الأرجواني
المناطق الزراعية	الأخضر الفاتح
المراعي	الأبيض
الغابات	الأخضر
الصنوبريات	الأخضر الداكن
المناطق المائية (بحيرات و خزانات و سدود)	الأزرق
المناطق المبللة بالمياه	الأزرق الفاتح
الأراضي القاحلة والكثبان الرملية	البيج

شكل (٢٩-٤٥) نموذج لمفتاح خريطة استعمالات الأراضي في أمريكا (نموذج جامعة ميتشجان)

الفصل الثلاثين

ترتيب و تصميم الخرائط

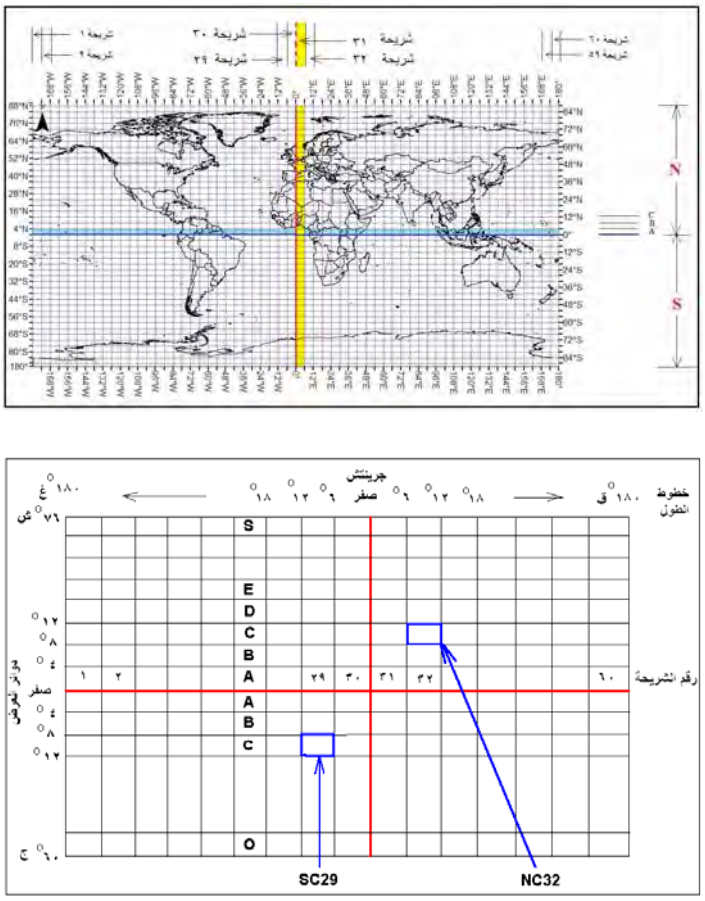
٣٠-١ ترتيب الخرائط

توجد عدة نظم لترتيب أو ترقيم الخرائط مع اختلاف مقاييس رسمها سواء علي المستوي العالمي أو المستوي المحلي. فهناك نظام ترتيب عالمي للخرائط المليونية (ذات مقياس الرسم ١ : ١،٠٠٠،٠٠٠) كما توجد نظم محلية لترتيب و ترقيم الخرائط في كل دولة. ويستعرض هذا الفصل النظام العالمي لترقيم الخرائط المليونية بالإضافة الي نظامين محليين لترتيب الخرائط في كلا من المملكة العربية السعودية و جمهورية مصر العربية.

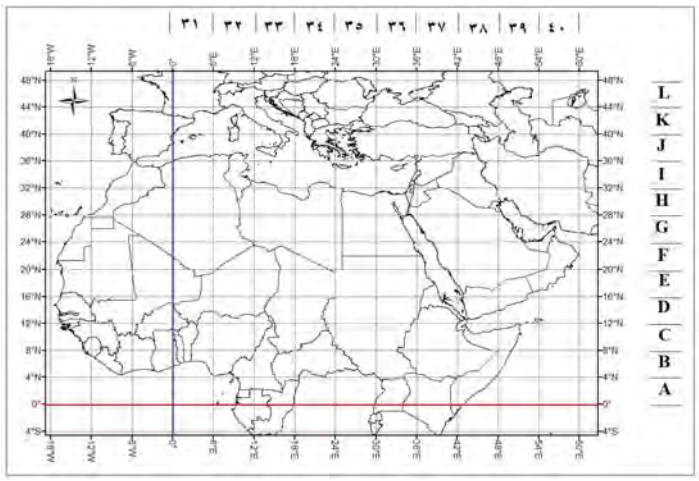
٣٠-٢ النظام العالمي لترقيم الخرائط المليونية

تعد الخرائط المليونية من أهم أنواع الخرائط التي تم الاتفاق علي مواصفاتها علي المستوي العالمي. و يعتمد نظام ترقيم هذه الخرائط علي نظام الإحداثيات الجغرافية (خطوط الطول و دوائر العرض) لإعداد نظام ترقيم خرائطي يغطي الأرض كلها:

- يتم تقسيم الأرض بدءا من خط طول ١٨٠ غربا إلي ٦٠ شريحة طولية يبلغ عرض كل شريحة ٦ درجات من خطوط الطول.
- يبدأ ترقيم الشرائح من رقم ١ ويزداد الرقم كلما اتجهنا ناحية الشرق.
- بذلك فأن الشريحة التي تنتهي عند خط طول جرينتش (خط طول صفر) يكون رقمها هو ٣٠ بينما أول شريحة شرق خط جرينتش يكون رقمها هو ٣١.
- أما في اتجاه القطبين فأن الشرائح العرضية يبلغ طول الشريحة الواحدة ٤ درجات من دوائر العرض.
- ترقم الشرائح العرضية بالحروف الانجليزية بدءا من الحرف A عند دائرة الاستواء ثم B ثم C وهكذا كلما اتجهنا ناحية القطب الشمالي.
- تأخذ الشرائح العرضية جنوب دائرة الاستواء نفس الحروف و بنفس الترتيب.
- تأخذ الشرائح شمال دائرة الاستواء الرمز N بينما تأخذ الشرائح الواقعة جنوب خط الاستواء الحرف S.
- كل مستطيل يحمل أسما محددا مكون من حرفين و رقم. مثلا: المستطيل (أو الشريحة) NH36 يقع شمال دائرة الاستواء (لأن أسمه يبدأ بالرمز N) في الشريحة الطولية رقم ٣٦ (أي شرق خط جرينتش) والشريحة العرضية H.
- كل شريحة (طولها ٦ درجات طول و عرضها ٤ درجات عرض) يتم رسمها في خريطة مليونية (بمقياس رسم ١ : ١،٠٠٠،٠٠٠).



شكل (٣٠-١) نظام ترقيم الخرائط المليونية لكل العالم



شكل (٣٠-٢) ترقيم الخرائط المليونية في المنطقة العربية

٣٠-٣ نظم ترتيب الخرائط في جمهورية مصر العربية

في جمهورية مصر العربية تعد الهيئة المصرية العامة للمساحة هي الجهة الحكومية الأساسية لإنتاج الخرائط الجغرافية و الطبوغرافية و التفصيلية بكافة مقاييس الرسم ولكافة أنحاء الجمهورية. كما توجد بعض الجهات الأخرى (حكومية و خاصة) تنتج بعض أنواع الخرائط لمناطق محددة في الجمهورية، منها علي سبيل المثال الهيئة العامة للمساحة الجيولوجية و المشروعات التعدينية التي تنتج الخرائط الجيولوجية لمصر.

(أ) الخرائط ذات مقاييس الرسم الصغيرة والمتوسطة:

١. رسمت الخريطة الأساسية لمصر بمقياس رسم ١ : ٢،٠٠٠،٠٠٠ وطبعت علي لوحة واحدة تمثل مصر و الدول المجاورة لها وتظهر بها المعالم الجغرافية الرئيسية من أنهار و جبال وأيضا التقسيم الإداري لمصر.
٢. تغطي مصر ستة خرائط من الخرائط المليونية (مقياس رسم ١ : ١،٠٠٠،٠٠٠) والتي تغطي الخريطة الواحدة ٦ درجات من خطوط الطول و ٤ درجات من دوائر العرض. سميت هذه الخرائط بأسماء أهم المعالم الجغرافية بها فجاءت أسماء الخرائط:

أ-	الإسكندرية	NH35
ب-	الداخلة	NG35
ت-	العوينات	NF35
ث-	القاهرة	NH36
ج-	أسوان	NG36
ح-	وادي حلفا	NF36

أما الجزء الجنوبي الشرقي من مصر فيظهر في الخريطة المليونية المعروفة باسم مكة المكرمة.

تطبع كل خريطة مليونية علي ورقة تبلغ أبعادها ٥٩ سنتيمتر شرقا و ٤٥ سنتيمتر شمالا.

طبقا للمواصفات العالمية فأن الألوان المستخدمة في هذه الخرائط تتكون من:

- اللون الأسود: المدن و السكك الحديدية
- اللون الأحمر: الطرق
- اللون الأزرق: الترع و الوديان وحدود البحار وتدرج الأعماق.
- اللون البني: تضاريس الأرض ذات الارتفاعات من ٥٠٠ إلي ١٠٠٠ متر.
- اللون الأخضر: تضاريس الأرض ذات الارتفاعات من صفر إلي ٢٠٠ متر.
- اللون الأصفر: تضاريس الأرض ذات الارتفاعات من ٢٠٠ إلي ٥٠٠ متر.

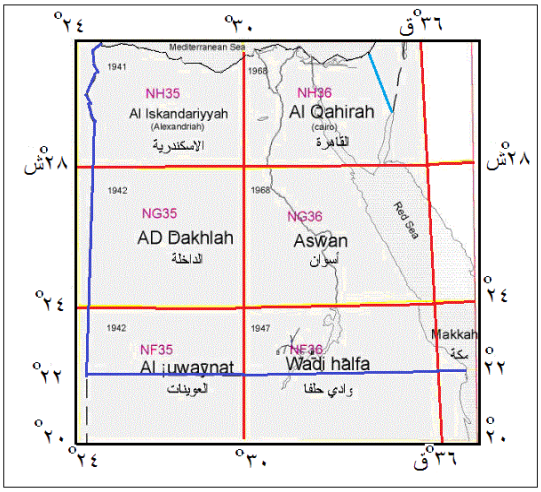
٣. تغطي مصر ٢١ خريطة من الخرائط ذات مقياس رسم ١ : ٥٠٠،٠٠٠ والتي تغطي الخريطة الواحدة ٣ درجات من خطوط الطول و ٢ درجة من دوائر العرض.

- تقسم الخريطة المليونية إلي ٤ أركان، ويكتب رقم الخريطة المليونية ويتبعه من جهة اليمين أسم الربع الواقع به الخريطة. فمثلا خريطة القاهرة المليونية أسمها

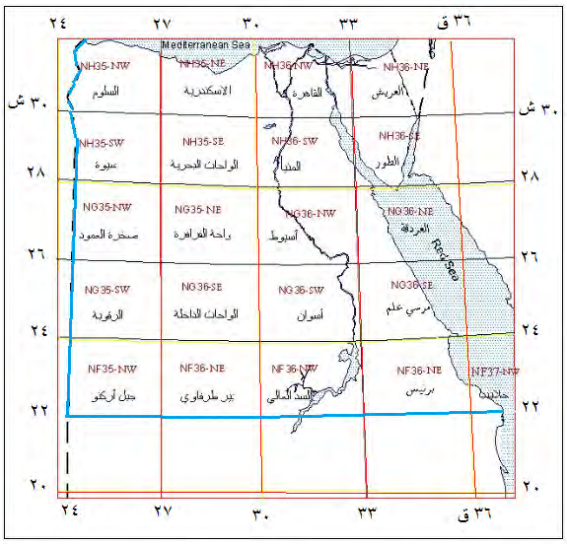
NH36 فيتم تقسيمها إلي ٤ أركان: الشمال الشرقي NH و الشمال الغربي NW و الجنوب الشرقي SE والجنوب الغربي SW، وتأخذ خرائط ١ : ٥٠٠،٠٠٠ في هذه المنطقة أرقام NH36-NE (العريش) و NH36-NW (القاهرة) و NH36-SE (الطور) و NH36-SW (المنيا).

- سميت هذه الخرائط بأسماء أهم المعالم الجغرافية بها فجاءت أسماء الخرائط: العريش، القاهرة، الإسكندرية، السلوم، الطور، المنيا، الواحات البحرية، سيوة، الغردقة، أسيوط، الفرافرة، صخرة العمود، مرسي علم، أسوان، الداخلة، الرقوبة، حلايب، برنيس، السد العالي، بئر طرفاوي، جبل أركنو.

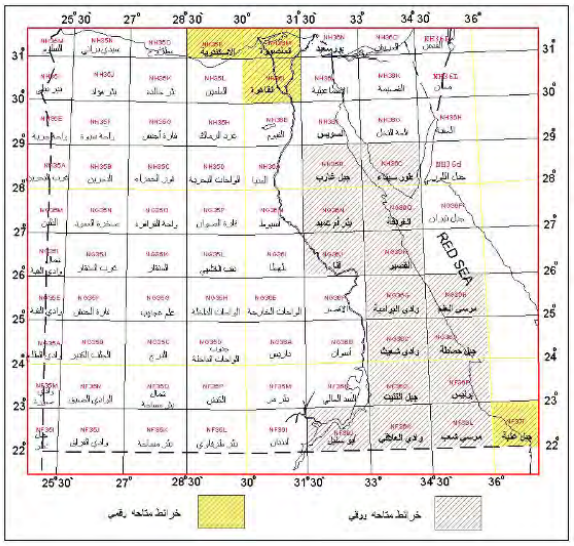
٤. تغطي مصر ٨٠ خريطة من الخرائط ذات مقياس رسم ١ : ٢٥٠،٠٠٠ والتي تغطي الخريطة الواحدة ١.٥ درجة من خطوط الطول و ١ درجة من دوائر العرض. لم تكتمل كل هذه الخرائط للجمهورية، والبعض منها متاح ورقيا بينما بعضها متاح أيضا في صورة رقمية.



شكل (٣٠-٣) دليل الخرائط المليونية في مصر



شكل (٣٠-٤) دليل خرائط ١ : ٥٠٠،٠٠٠ في مصر



شكل (٣٠-٥) دليل خرائط ١ : ٢٥٠،٠٠٠ في مصر

٥. توجد بعض الخرائط مصر ذات مقياس رسم ١ : ١٠٠،٠٠٠ والتي تغطي الخريطة الواحدة ٣٠ دقيقة من خطوط الطول و ٤٠ دقيقة من دوائر العرض. والمتاح من هذه الخرائط هو ما يغطي الأراضي الزراعية في الدلتا و محافظات جنوب مصر حتى أسيوط.

٦. تغطي مصر ١٥٣١ خريطة من الخرائط ذات مقياس رسم ١ : ٥٠،٠٠٠ والتي تغطي الخريطة الواحدة ١٥ دقيقة من خطوط الطول و ١٥ دقيقة من دوائر العرض (جوالي ٢٥ كيلومتر شرقا و ٢٧ كيلومتر شمالا).

- لم تكتمل كل هذه الخرائط للجمهورية، والمتاح منها حتى الآن حوالي ٤٤٥ خريطة تشمل الوجه البحري و الوجه القبلي و الصحراء الشرقية.
- تبلغ أبعاد الخريطة الواحدة ٥١ × ٥٥ سنتيمتر.
- تطبع خرائط ١ : ٥٠،٠٠٠ بعدة ألوان تتكون من:
  - الأسود: للمعالم الحضرية
  - الأحمر: للطرق والمدن و القرى
  - الأزرق: الترع و البرك و المصارف والبحيرات
  - البني: لخطوط الكنتور
  - الأخضر: للأراضي الزراعية
- تحتوي هذه الخرائط علي المعالم الجغرافية التالية:
  - التضاريس: خطوط الكنتور و نقاط الارتفاع و نقاط الثوابت الأرضية
  - النقل: الطرق و السكك الحديدية و الكباري و الاتفاق
  - المعالم الصناعية (المناجم و المحاجر) و التجمعات السكنية و الحدود السياسية وحدود المحافظات و حدود المراكز
  - الأراضي المزروعة و الأراضي المستصلحة و الأشجار ومحطات الصرف و معالجة المياه

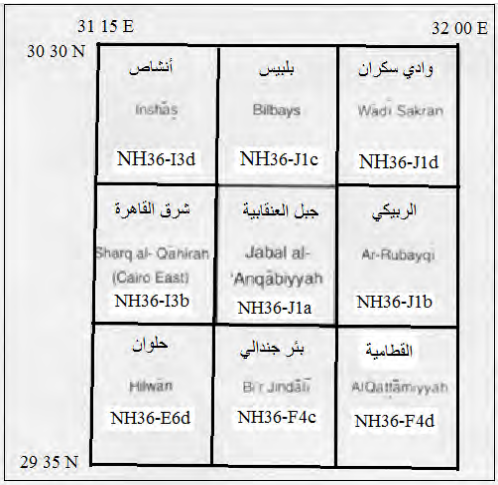
- الأماكن التاريخية
- المياه: الأنهار و البحيرات والسدود و الآبار و العيون المائية
- المرافق: خطوط ومحولات الكهرباء (الضغط العالي) وخطوط التليفونات و الغاز

– يتكون نظام ترقيم هذه الخرائط كالآتي:
- تقسم الخريطة المليونية إلي ١٦ خريطة مقياس رسمها ١ : ٢٥٠،٠٠٠ وترقم بالحروف الانجليزية الكبيرة من A إلي P ، مثلا: NH36-M
- تقسم كل خريطة ١ : ٢٥٠،٠٠٠ إلي ٦ خرائط ١ : ١٠٠،٠٠٠ ترقم بالأرقام من ١ إلي ٦ ، مثلا NH36-M2
- تقسم كل خريطة ١ : ١٠٠،٠٠٠ إلي ٤ خرائط ١ : ٥٠،٠٠٠ ترقم بالحروف الانجليزية الصغيرة من a إلي d ، مثلا NH36-M2a

– يكون الفاصل الكنتوري في هذه الخرائط ١٠ متر للأراضي الصحراوية و ١ متر في الأراضي الزراعية.

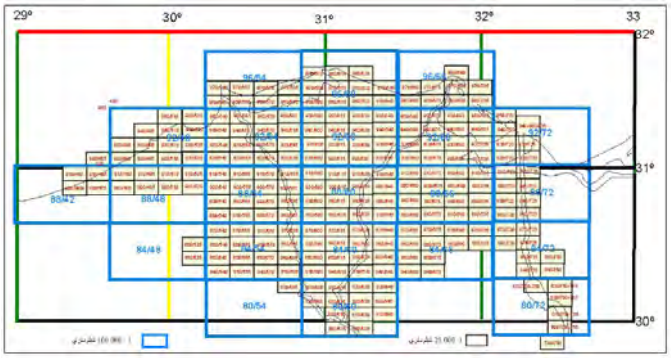
٧. متاح في مصر ٤٩١ خريطة فقط من الخرائط ذات مقياس رسم ١ : ٢٥،٠٠٠ والتي تغطي الخريطة الواحدة ١٥ كيلومتر شرقا و ١٠ كيلومتر شمالا، تغطي الأراضي الزراعية لوادي النيل من شمال الدلتا حتى أسوان جنوبا (أوقف العمل بهذا المقياس منذ عام ١٩٦٧م).
– تبلغ أبعاد الخريطة الواحدة ٦٠ × ٤٠ سنتيمتر.
– تطبع خرائط ١ : ٢٥،٠٠٠ بعدة ألوان تتكون من:
- الأسود: للمعالم الحضرية
- الأحمر: للطرق والمدن و القرى
- الأزرق: الترع و البرك و المصارف والبحيرات
- البني: لخطوط الكنتور ونقاط الارتفاعات
- الأخضر: للأراضي الزراعية
- الرمادي: للمساحات والمناطق السكنية
- البني الفاتح: لمناطق الرمال

– يتكون نظام ترقيم هذه الخرائط من بسط و مقام يعبران عن الإحداثيات الكيلومترية للركن الجنوبي الغربي للخريطة: يكون البسط هو قيمة الإحداثي الشمالي بعشرات الكيلومترات بينما يكون المقام هو قيمة الإحداثي الشرقي بالكيلومترات. مثال: الخريطة ذات الإحداثيات (الركن الجنوبي الغربي) ٥٥٥، ٩٤٠ كيلومتر يكون رقمها ٥٥٥/٩٤.

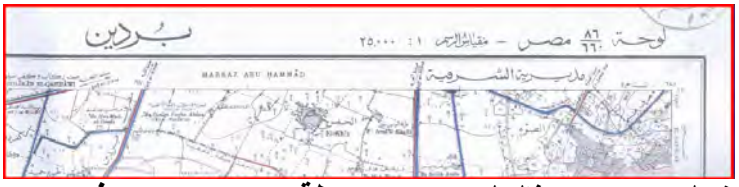


شكل (٣٠-٦) مثال لترقيم الخرائط ١ : ٥٠،٠٠٠ في مصر

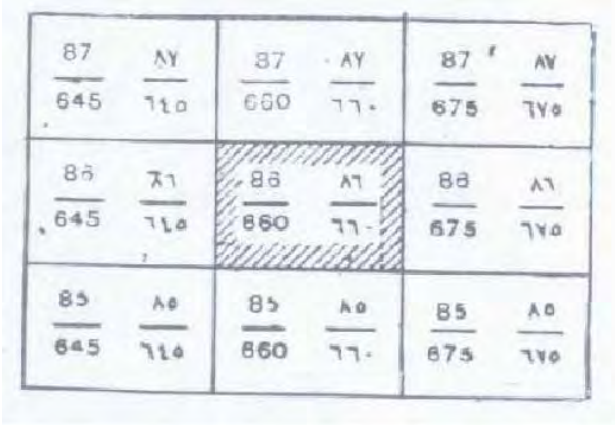
شكل (٣٠-٧) جزء من دليل خرائط ١ : ٥٠،٠٠٠ في مصر



شكل (٣٠-٨) جزء من دليل خرائط ١ : ٢٥،٠٠٠ لشمال الدلتا في مصر



شكل (٣٠-٩) مثال لجزء من خريطة ١ : ٢٥،٠٠٠ في مصر

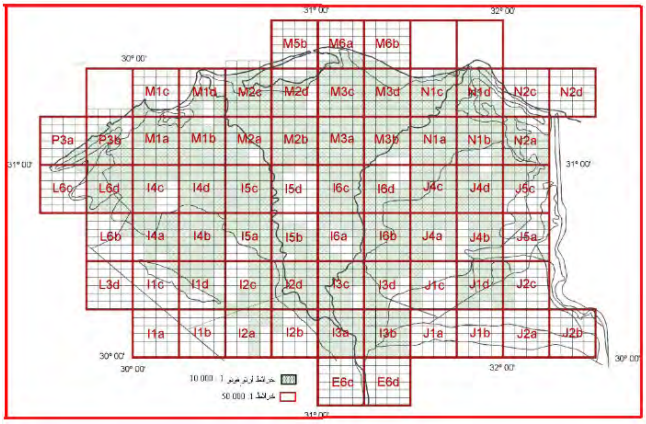


شكل (٣٠-١٠) مثال لترقيم خرائط ١ : ٢٥،٠٠٠ في مصر

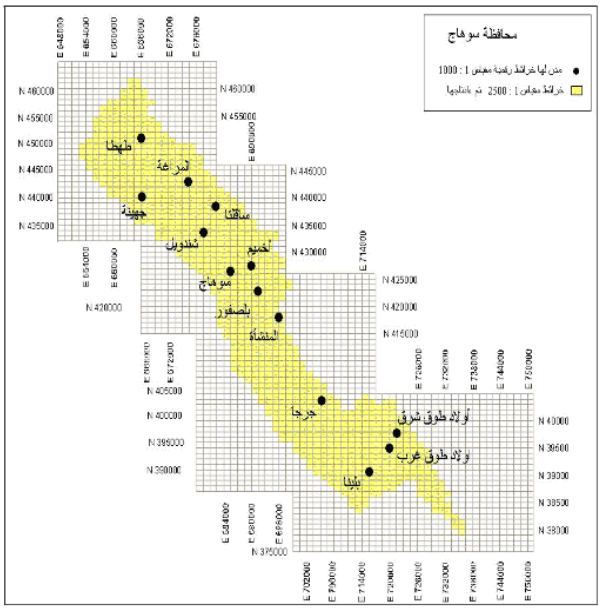
(ب) الخرائط ذات مقاييس الرسم الكبيرة:

تغطي المناطق المعمورة من مصر عدة أنواع من الخرائط التفصيلية كما في الجدول التالي:

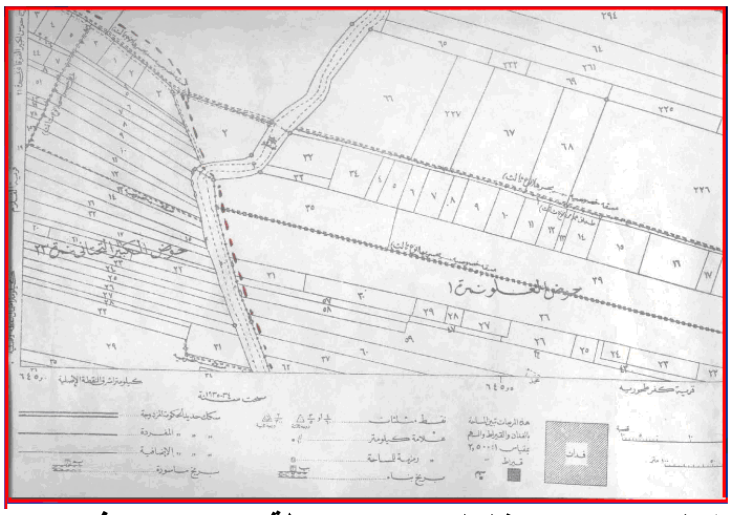
مقياس الرسم	نوع الخريطة	طول المنطقة بالكيلومتر	عرض المنطقة بالكيلومتر
١ : ١٠،٠٠٠	تفصيلية	٦	٤
١ : ٥،٠٠٠	تفصيلية	٣	٢
١ : ٢٥٠٠	فك الزمام (المناطق الزراعية)	١.٥	١
١ : ١٠٠٠	تفريد مدن (داخل المدن)	٠.٦	٠.٤
١ : ٥٠٠		٠.٣	٠.٢



شكل (٣٠-١١) جزء من دليل خرائط ١ : ١٠،٠٠٠ لشمال الدلتا في مصر



شكل (٣٠-١٢) جزء من دليل خرائط ١ : ٢٥٠٠ لمحافظة سوهاج في مصر



شكل (٣٠-١٣) مثال لجزء من خريطة ١ : ٢٥٠٠ في مصر

٣٠-٤ تصميم الخريطة

إن الكارتوجرافيا هي علم و فن إعداد الخرائط كما سبق تعريفها، فهي كعلم تعتمد علي قواعد و أسس رياضية لضمان أن الخريطة تمثل وبدقة الواقع الحقيقي علي سطح الأرض. وعلي الجانب الآخر فان إعداد خريطة "جيدة" يتطلب رؤية فنية لها بهدف أن تتمتع الخريطة بمظهر جمالي مناسب وأن تستطيع نقل المعلومات الممثلة عليها بطريقة سهلة و سريعة لعين قارئ أو مستخدم الخريطة. لذلك فعلي الكارتوجرافي أن يضع في ذهنه حقيقة هامة ألا و هي كيف يصمم خريطة "جيدة و مريحة و سهلة الاستنباط" تؤدي الغرض الأساسي المطلوب منه، وهذا ما يسمي بالاتصال الخرائطي أي الاتصال الذهني بين منشأ الخريطة و مستخدمها. ومع أنه لا توجد قواعد علمية ثابتة لكيفية تصميم الخريطة برؤية فنية و جمالية، إلا أن هذا الفصل يحاول أن يقدم بعض الخطوط العريضة لعملية تصميم الخرائط من حيث اختيار العناصر الظاهرة علي الخريطة وكيفية عرض محتويات الخريطة من حيث الموضع أو الحجم وأيضا اختيار الألوان المستخدمة في الخرائط.

عناصر محتوي الخريطة

قبل البدء في إعداد تصميم للخريطة يقوم الكارتوجرافي بتحديد العناصر التي سيتم إظهارها علي هذه الخريطة (بخلاف المحتوي الجغرافي لها). فالخرائط تحتوي علي عدد كبير من العناصر سواء الأساسية أو المساعدة أو المتممة والتي قد تختلف من خريطة لأخرى طبقا للهدف المنشود من الخريطة وأيضا مساحة ورقة الخريطة المطبوعة و مقياس رسمها. وتشمل عناصر محتوي الخريطة ما يلي:

(أ) عناصر رئيسية:
- العنوان الرئيسي للخريطة
- عنوان فرعي
- مفتاح الخريطة
- اتجاه الشمال
- شبكة الإحداثيات
- مسقط الخريطة

(ب) عناصر ثانوية:
- مصادر بيانات الخريطة
- أشكال بيانية
- جداول بيانية
- خرائط مصغرة
- تاريخ إنتاج الخريطة
- جهة إنتاج الخريطة
- شعار الجهة المنشأة للخريطة
- صور فوتوغرافية
- رقم الخريطة
- حقوق الملكية
- نصوص أخري

ويبدأ الكارتوجرافي عمله بسؤال: ما هي العناصر الهامة للخريطة قيد الإعداد؟ وتختلف إجابة هذا السؤال من خريطة لأخرى بطبيعة الحال. وربما يضع الكارتوجرافي نفسه مكان قارئ الخريطة ليسأل: هل كان ضروريا وجود هذا العنصر علي الخريطة؟. وحديثا ومع توافر تقنيات و برامج حاسوبية لإعداد الخرائط فيمكن للكارتوجرافي إعداد عدة "تصاميم" مختلفة للخريطة قبل إنشاؤها فعليا ليقرر ما هو التصميم الأمثل وما هي العناصر المناسبة لهذه الخريطة.

٣٠-٥ عرض محتويات الخريطة

يختلف موضع و حجم كل عنصر من عناصر محتوي الخريطة من حيث الأهمية ومن حيث توفير قدر أكبر من الاتصال الخرائطي. وبالتالي فأن "رؤية" الكارتوجرافي و خبرته الفنية تؤثر بدرجة كبيرة علي المظهر الجمالي النهائي للخريطة. وسنستعرض هنا خطوطا عريضة لكيفية تنفيذ كل عنصر من عناصر الخريطة بصورة كارتوجرافية مناسبة.

عنوان الخريطة:

يعد عنوان الخريطة أهم أساسياتها حيث أنه يدل علي محتوي و هدف تطوير الخريطة والمنطقة الجغرافية التي تمثلها (للخريطة العامة) أو الظاهرة الرئيسية التي تبرزها (للخريطة الموضوعية). يجب أن يكون العنوان مناسبا و دالا علي المعلومة الرئيسية التي يقدمها لمستخدم الخريطة، فلا يجب أن يكون طويلا جدا أو قصيرا جدا. أما موضع العنوان علي الخريطة فهناك عدة مواضع يمكن الاختيار فيما بينهم كما في الشكل التالي:

شكل (٣٠-١٤) مواضع شائعة لعنوان الخريطة

مفتاح الخريطة:

مفتاح الخريطة أيضا من أهم عناصرها الأساسية فهو الذي يقدم تعريفا لكافة الرموز المستخدمة علي الخريطة و ما يمثله كل رمز. يتكون مفتاح الخريطة من مجموعة من الرموز و بجوار كل رمز (غالبا علي يساره) نص يدل علي معناه. في حالة وجود عدة رموز يتم ترتيبهم أما أفقيا أو رأسيا سواء في عمود واحد أو في عدة أعمدة طبقا لمساحة المفتاح علي الخريطة ذاتها. وقد يوضع نص "مفتاح الخريطة" أو نص "مصطلحات الخريطة" في الجزء العلوي من مساحة المفتاح. وقد يوضع مفتاح الخريطة في أسفلها أو علي أحد طرفيها.

اتجاه الشمال:

يوضع اتجاه (أو سهم) الشمال في الجزء العلوي من الخريطة بصفة عامة سواء علي يمينها أو يسارها. وقد يوضع داخل المحتوي الجغرافي للخريطة أو خارجه، علي أن يكون ذا حجم مناسب يوضح لمستخدم الخريطة كيفية توجيه الخريطة بسهولة و سرعة. ويري بعض الكارتوجرافيين عدم أهمية وضع اتجاه الشمال علي الخرائط طالما وجدت شبكة الإحداثيات حيث أن هذه الشبكة تدل علي كيفية توجيه الخريطة، إلا أن وجود سهم الشمال يساعد مستخدم الخريطة - وبمجرد النظر- علي سرعة توجيها دون أية خطوات تفصيلية.

مقياس الرسم:

سواء كان كتابيا أو خطيا فأن مقياس رسم الخريطة من مكوناتها الأساسية فهو الذي يسمح بمعرفة العلاقة بين أية قياسات علي الخريطة و ما تمثله في الطبيعة علي سطح الأرض. ومن

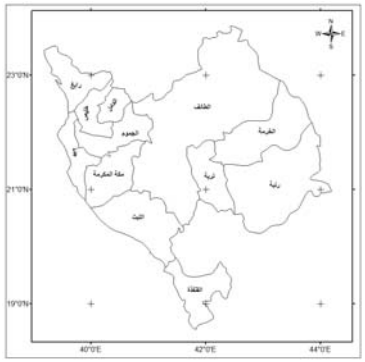
الأفضل وضع مقياس رسم كتابي وآخر خطي علي نفس الخريطة، بل أحيانا يكون من المناسب وضع مقياسي رسم خطيين يختلفان في وحدات القياس (أحدهما بالكيلومترات و الآخر بالأميال) علي نفس الخريطة. وغالبا يوضع مقياس الرسم في الجهة السفلي من الخريطة.

شبكة الإحداثيات:

تمثل خطوط الطول و دوائر العرض (في نظام الإحداثيات الجغرافية) أو قيم الإحداثيات الشرقية و الإحداثيات الشمالية (في نظم الإحداثيات المسقطة أو المترية) التي تغطي كامل سطح المحتوي الجغرافي للخريطة. وتوجد عدة نماذج لشبكات الإحداثيات مثل أن تكون الشبكة مرسومة علي الإطار الخارجي فقط، أو تكون مرسومة علي كل سطح المحتوي الجغرافي، أو مرسومة علي الإطار الخارجي مع وضع علامات عند نقاط تقاطع الإحداثيات علي المحتوي الجغرافي للخريطة:

(أ) شبكة الإحداثيات علي كل سطح المحتوي الجغرافي

(ب) شبكة الإحداثيات علي الإطار الخارجي فقط



(ج) شبكة الإحداثيات علي الإطار الخارجي مع وضع علامات عند نقاط تقاطع الإحداثيات

شكل (٣٠-١٥) نماذج شبكات الإحداثيات علي الخريطة

العناوين الفرعية:

يشمل العنوان الفرعي معلومة أخري عن الخريطة تكون أقل أهمية من العنوان الرئيسي للخريطة لكنها مازالت تمثل أهمية ضرورية لفهم الخريطة فهما كاملا. فعلي سبيل المثال فأن اسم الجهة المنتجة للخريطة يمثل عنوانا فرعيا لها حيث أنه يقدم لمستخدم الخريطة معلومة هامة عن مصداقية هذه الخريطة فقارئ الخريطة سيتحقق من مصداقيتها عندما يعرف أنها من جهة حكومية مسئولة عن إنتاج الخرائط الرسمية في هذه الدولة. غالبا يوضع العنوان الفرعي (إن وجد) أسفل العنوان الرئيسي للخريطة مع استخدام بنط أقل في كتابة نصه.

جهة و تاريخ إنتاج الخريطة:

من المعلومات الهامة علي الخريطة أن يعرف مستخدم الخريطة اسم الجهة التي قامت بإنتاجها و تاريخ الإنتاج. فالخريطة تمثيل للواقع الموجود في لحظة زمنية معينة، فقد نجد خريطتين مختلفتين لنفس المنطقة أو نفس الظاهرة بسبب أن كلا منهما قد تم تطويرها في تاريخ محدد يختلف عن الخريطة الأخرى. عادة يوضع نص جهة و إنتاج الخريطة في أسفلها سواء من جهة اليمين أو من جهة اليسار.

حقوق ملكية الخريطة:

عادة في الخرائط الحكومية يوضع نص علي الخريطة يحدد الحقوق الفكرية لملكية الخريطة بحيث تعود هذه الحقوق للجهة التي أنتجت الخريطة. وغالبا تكون حقوق الملكية - إن وجدت - في أسفل الخريطة.

إطار محتويات الخريطة:

غالبا فأن عناصر محتويات الخريطة يتم جمعهم في إطار (مستطيل أو مربع) واحد وعادة يوضع في أسفل الخريطة. وقد يكون الإطار مقسما الي أجزاء باستخدام الخطوط الرأسية أو يحتوي علي إطارات أخري داخلية لكل عنصر من عناصر المحتوي.

شكل (٣٠-١٦) مواضع إطار عناصر الخريطة

مصادر بيانات الخريطة:

قد توضع علي الخريطة معلومات عن مصادر البيانات التي تم استخدامها في إنتاج هذه الخريطة، وغالبا يكون موضع هذه النصوص في أسفل الخريطة أو علي أحد طرفيها.

شكل (٣٠-١٧) نموذج لمصادر البيانات علي الخريطة

<u>شعار الجهة المنشأة للخريطة:</u>

غالبا تقوم الجهة المنتجة للخريطة بوضع شعارها (رسم أو لوجو) إضافة لاسمها علي الخريطة، ومن الأفضل أن يكون الشعار بحجم مناسب و موضوعا بجانب اسم الجهة في أسفل الخريطة.

شكل (٣٠-١٨) مثال لشعار جهات إنتاج الخريطة

<u>أشكال و جداول بيانية:</u>

في الخرائط الموضوعية وخاصة خرائط التوزيعات الكمية قد يكون مناسبا وضع بعض الأشكال و الجداول البيانية التي تعطي معلومات إحصائية عن الظاهرة (أو الظاهرات) الممثلة علي الخريطة. وعادة توضع هذه الأشكال البيانية وبحجم مناسب علي أحد جانبي الخريطة.

<u>صور فوتوغرافية:</u>

تفيد الصور الفوتوغرافية في جعل مستخدم الخريطة يري الواقع والصورة الحقيقية لبعض معالم الخريطة، وعادة تستخدم الصور الفوتوغرافية لإضفاء قدر أكبر من المظهر الجمالي علي الخريطة خاصة الخرائط السياحية و التعليمية.

<u>رقم الخريطة:</u>

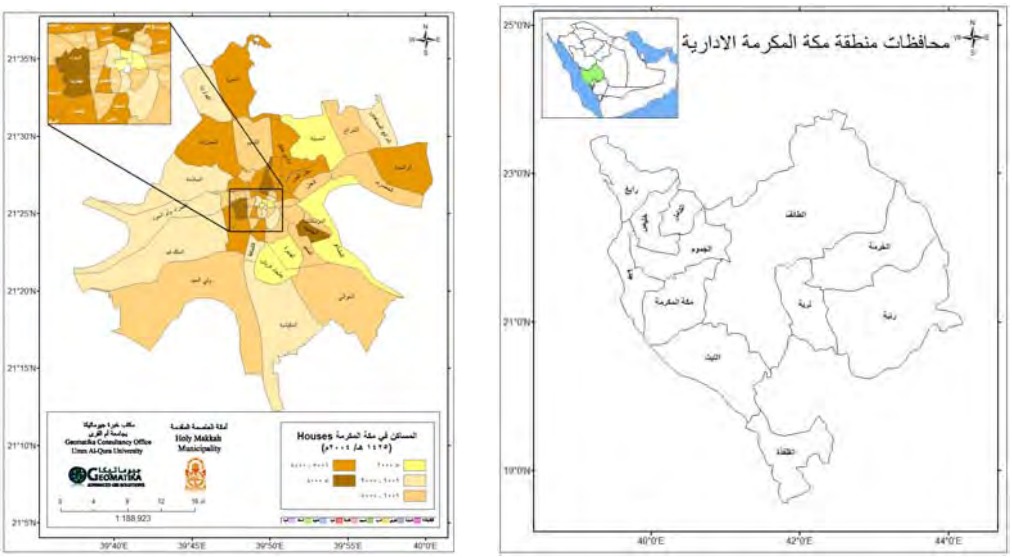
يكون لكل خريطة رقم محدد في حالة تطوير سلسلة أو مجموعة من الخرائط، ومن ثم يوضع رقم الخريطة - إن وجد - مع العناصر الأخرى للخريطة.

مسقط الخريطة:

مسقط الخريطة أحد أهم عناصر الأساس الرياضي الذي بنيت عليه الخريطة، ومن ثم فيجب وضع نص يدل علي نوع مسقط الخريطة. عادة يوضع مسقط الخريطة بجوار (أو أسفل) مقياس رسمها.

خرائط مصغرة:

في أحيان كثيرة يحتاج الكارتوجرافي لوضع خريطة مصغرة علي الخريطة بهدف (١) بيان الموقع الجغرافي العام للمحتوي الجغرافي للخريطة الأصلية، (٢) تكبير جزء من الخريطة الأصلية لبيان تفاصيل أكثر عنه. عادة توضع الخرائط المصغرة في أعلي الخريطة الأصلية في أحد جانبيها.

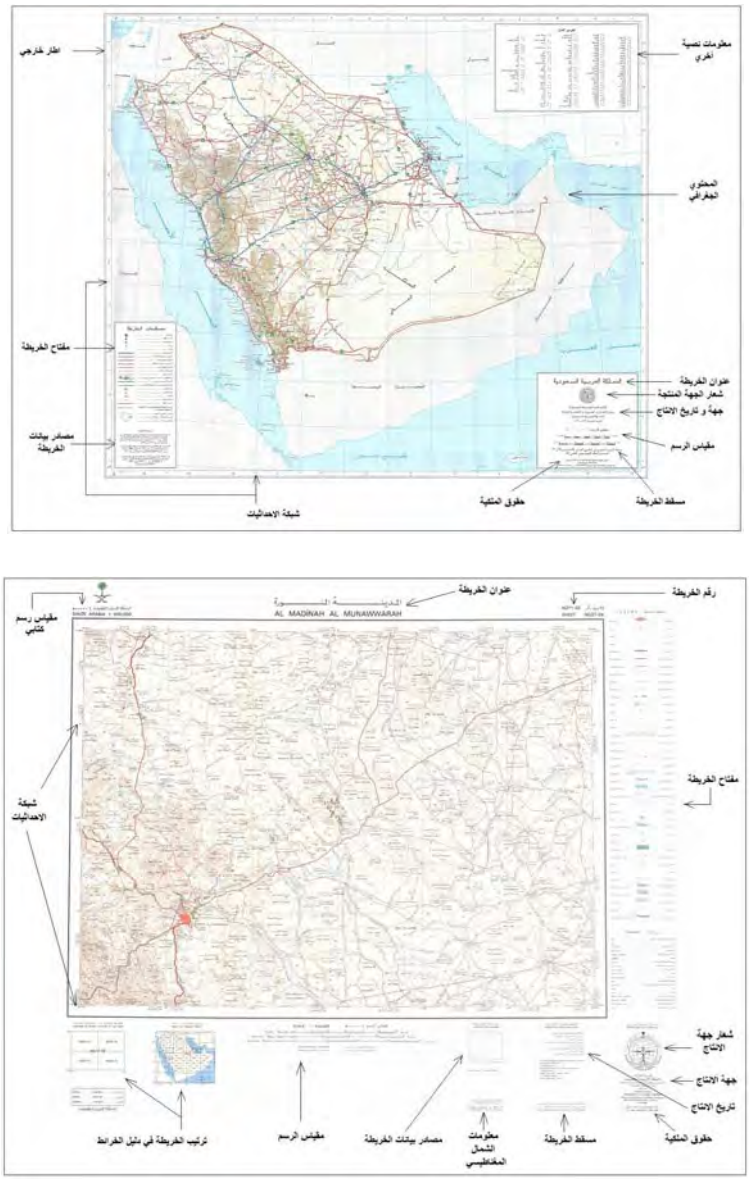


شكل (٣٠-١٩) نماذج للخرائط المصغرة

إطار الخريطة:

عادة يوضع إطار شامل يضم كافة محتويات الخريطة سواء المحتوي الجغرافي لها و كافة عناصر الخريطة.

لا يوجد نظام محدد لترتيب مواضع العناصر التي تتكون منها الخريطة، إنما تخضع عملية التصميم لخبرة الكارتوجرافي و رؤيته الفنية و الجمالية. وكلما كانت الخريطة بسيطة و تتمتع بتناسق كبير بين أحجام عناصرها و الألوان المستخدمة فيها كلما كانت أكثر جودة وكلما حققا قدرا أكبر من الاتصال الخرائطي بين الكارتوجرافي و مستخدم الخريطة. والأشكال التالية تقدم نماذج لبعض الخرائط و أساليب تصميمها.



شكل (٣٠-٢٠) نماذج لتصميم و إخراج الخرائط

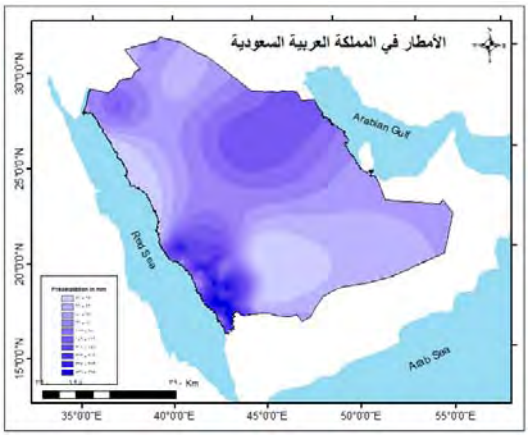
استخدام الألوان في الخرائط

مع انتشار أجهزة الطباعة الملونة و رخص ثمنها في الوقت الراهن فيمكن القول أن معظم - إن لم يكن كل - الخرائط أصبحت تطبع بالألوان. لكن يقع الكثير من الكارتوجرافيين خاصة المبتدئين في خطأ تصور أنه كلما اشتملت الخريطة علي ألوان عديدة زاهية فيكفل هذا لها القيمة الجمالية العالية، فعلي العكس من ذلك فأنه كلما زادت بساطة الخريطة و تناسق ألوانها كلما كانت أسهل في القراءة و استنباط و إدراك ما بها كمن معلومات.

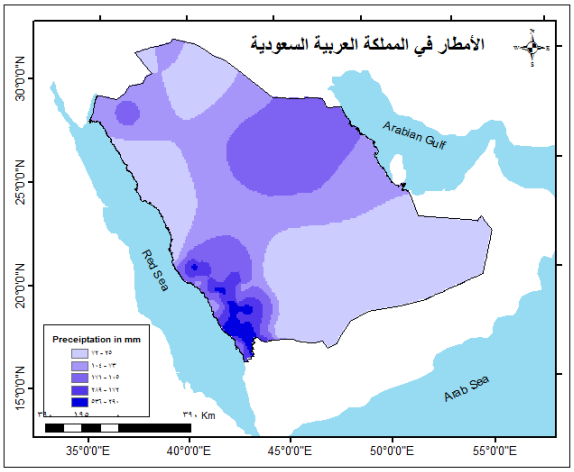
الشروط العامة لاستخدام الألوان في التمثيل الكارتوجرافي:

- يجب على كل الألوان أن تكون متناسقة ومنسجمة مع بعضها البعض.

- أن يكون اللون متناسب ومعبر عن العنصر الممثل له، وهذه من أهم شروط استخدام اللون ولا يجب الإسراع في اعتماد اللون لأي عنصر، كما يجب محاولة تغييره إذا حدث عدم انسجام أو تنافر مع باقي ألوان الدخلة في تصميم المجال الكارتوجرافي.
- الابتعاد عن الألوان الفاقعة والداكنة أي عالية الصراحة.
- أن يخصص للمساحات الكارتوجرافية الصغيرة علي الخريطة ألوان أكثر دكانه أو من النوع الفاقع للتعويض عن صغر مساحاتها.
- أن تساعد الألوان في إظهار وتمييز التشابه أو الاختلاف بين مناطق توزيع العناصر الكارتوجرافية بهدف توفير قراءة أسهل للعمل الكارتوجرافي.
- تستخدم الألوان المتباينة في الخريطة لكي توضح الظواهر المتقابلة مثل مناطق الجفاف و المناطق المطيرة أو مناطق الكثافة السكانية العالية و مناطق الكثافة السكانية المنخفضة.
- في حالة استخدام تدرج اللون الواحد يجب ألا تكون فئات اللون كثيرة بحيث يصعب علي قارئ أو مستخدم الخريطة التمييز بينهم (الشكل التالي).



(أ) تدرج لوني غير جيد (عدد كبير من الفئات)



(ب) تدرج لوني جيد (عدد قليل من الفئات)

شكل (٣٠-٢١) استخدام التدرج اللوني في الخرائط

الفصل الحادي و الثلاثين

الخريطة الموضوعية والخريطة الكنتورية

٣١-١ مقدمة

تعد الخريطة الموضوعية من أهم أنواع الخرائط شائعة الاستخدام في العديد من المجالات و التطبيقات، حيث أنها تختص بعرض أو تمثيل موضوع واحد علي الخريطة لبيان انتشاره و توزيعه و خصائصه ومن هنا جاء اسم هذا النوع من الخرائط. أيضا تسمي هذه الخريطة بالخريطة الخاصة مقارنة بالخريطة الجغرافية العامة التي تمثل كل الظاهرات الموجودة في المنطقة الجغرافية الممثلة علي الخريطة. ويطلق اسم خريطة التوزيعات أيضا علي الخريطة الموضوعية لأنها تبرز التوزيع و الانتشار المكاني لتلك الظاهرة قيد الدراسة. ويطلق علي أحد أنواع الخريطة الموضوعية اسم الخريطة الإحصائية لأنها تمثل قيم عددية إحصائية عن خصائص الظاهرة الممثلة علي الخريطة.

ولا تعد الخريطة الموضوعية تطبيقا حديثا من تطبيقات الكارتوجرافيا حيث ترجع أول خريطة موضوعية معروفة الي عام ١٦٠٧م (١٠١٥هـ) والتي أعدها هونديوس Jodocus Hondius وتظهر توزيع الديانات المختلفة. وتحقق الخريطة الموضوعية عدة أهداف تشمل:

- تقديم معلومات محددة عن موقع أو منطقة جغرافية معينة.
- تقديم معلومات عامة عن التوزيع و النمط المكاني لظاهرة.
- تستخدم للمقارنة بين أنماط التوزيع بين خريطتين أو أكثر.

٣١-٢ الخرائط الموضوعية النوعية

تنقسم الخرائط الموضوعية بصفة عامة الي قسمين: نوعية و كمية. فالخريطة الموضوعية النوعية هي الخريطة التي تهتم بإبراز الأنواع المختلفة للظاهرة الممثلة علي الخريطة، فمثلا إذا أردنا إعداد خريطة موضوعية عن أنواع الخدمات الصحية المتوافرة في مدينة مكة المكرمة فستكون هذه الخريطة الموضوعية خريطة نوعية. وتعد خرائط استخدامات الأراضي أشهر تطبيقات الخرائط الموضوعية النوعية. أما الخريطة الموضوعية الكمية (الخريطة الإحصائية) فهي التي تهتم بتمثيل القيم العددية للظاهرة، مثل تلك الخريطة التي تمثل توزيع سكان مدينة مكة المكرمة علي الأحياء المختلفة بها.

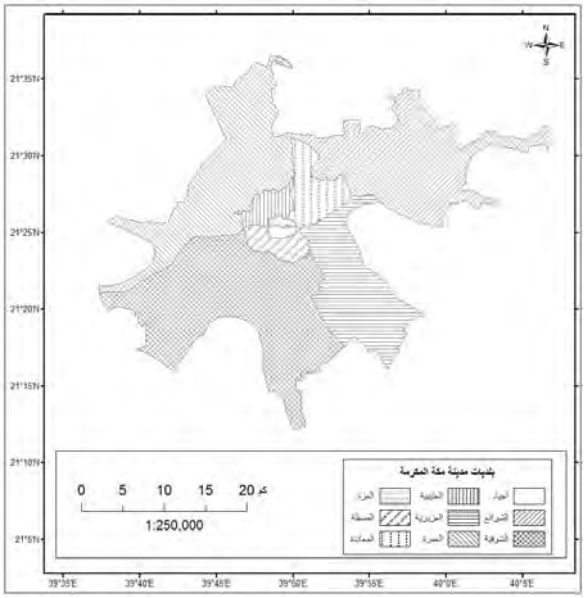
تستخدم الخرائط الموضوعية لتمثيل أية ظاهرة مهما كان شكلها علي الخريطة، فهناك خرائط موضوعية للظاهرات الموضعية (النقطية) وخرائط موضوعية للظاهرات الخطية و خرائط موضوعية للظاهرات المساحية (المضلعة). ومن ثم فأن الرموز المستخدمة في إنشاء الخرائط الموضوعية تشمل كافة أنواع الرموز سواء النقطية أو الخطية أو المساحية طبقا لنوع الظاهرة الممثلة علي الخريطة.

٣١-٣ الخرائط الموضوعية الكمية

طبقا لنوع الظاهرة الممثلة علي الخريطة الموضوعية الكمية فهناك ثلاثة أنواع من هذه الخرائط: خرائط رموز الموضع الكمية و خرائط رموز الخط الكمية و خرائط رموز المساحة الكمية.

(أ) نقطية

(ب) خطية



(ج) مساحية

شكل (٣١-١) أمثلة للخرائط الموضوعية النوعية

٣١-٣-١ خرائط رموز الموضع الكمية

في هذا النوع من الخرائط الإحصائية يتم استخدام نوعين رئيسين من الرموز لتمثيل قيمة الظاهرة علي الخريطة الموضوعية، و هما رموز النقطة و الرموز النسبية:

(أ) رموز النقطة:

يتم استخدام رمز النقطة للتعبير عن قيمة محددة للظاهرة المطلوب تمثيلها علي الخريطة، وبناءا علي قيمة الظاهرة في منطقة معينة يتم حساب عدد النقاط التي ستوضع داخل هذه المساحة علي الخريطة. فمثلا عند استخدام رموز النقاط في تمثيل عدد السكان في أحياء مدينة مكة المكرمة فأننا نحدد القيمة التي ستعبر عنها النقطة الواحدة (وليكن مثلا ٢٠ ألف نسمة)، ثم نقسم عدد سكان كل حي من أحياء المدينة علي قيمة النقطة الواحدة فنحسب عدد النقاط التي تعبر عن سكان كل حي، ومن ثم يتم توقيع هذا العدد من النقاط داخل حدود كل حي علي الخريطة. وهذا النوع من الخرائط يسمي خرائط النقاط أو خرائط الكثافة (لأنه كلما زادت قيمة الظاهرة زاد عدد النقاط الممثلة لها وبالتالي زادت كثافة النقاط في هذا الجزء من الخريطة).

(ب) الرموز النسبية:

في هذا النوع من الخرائط يتم التعبير عن قيمة الظاهرة باستخدام الرموز الموضعية الهندسية (الدائرة و المربع و المثلث و المستطيل ... الخ) بصورة نسبية للدلالة عن التغيرات الكمية بين مفردات الظاهرة. فمثلا يمكن التعبير عن عدد سكان محافظات منطقة مكة المكرمة الإدارية باستخدام الأعمدة بحيث يكون طول العمود معبرا عن القيمة النسبية لعدد السكان في كل محافظة. أيضا يمكن استخدام رمز الدائرة لتمثيل عدد السكان بحيث يكبر حجم الدائرة كلما كبر عدد السكان في كل محافظة. تعطي طريقة الرموز النسبية صورة سريعة للقارئ عن التغيرات النسبية لقيمة الظاهرة الممثلة علي الخريطة و التباين أو الاختلاف المكاني (الجغرافي) لتوزيع هذه الظاهرة. أيضا يمكن استخدام رموز موضع حجميه أو ثلاثية الأبعاد (مثل المكعب و المخروط) بدلا من الرموز الموضعية البسيطة ثنائية الأبعاد في تمثيل خرائط رموز الموضع الكمية.

٣١-٣-٢ خرائط رموز الخط الكمية

عند استخدام الرموز الخطية للتعبير عن الظاهرات الكمية فأن سمك (عرض) الخط يدل علي قيمة الظاهرة، فكمثال يمكن تغيير سمك الخطوط المعبرة عن الطرق بحيث يمثل سمك الخط عرض الطريق وبذلك يمكن التفرقة بين الطرق السريعة و الطرق العادية و الشوارع الداخلية. أيضا يمكن استخدام الألوان المتعددة للحصول علي رموز خطية جديدة لنفس الخط المرسوم علي الخريطة.

٣١-٣-٣ خرائط رموز المساحة الكمية

عند تمثيل الظاهرات المكانية تمثيلا كميا علي الخرائط فهناك عدة طرق للتمثيل أو عدة أنواع من هذه الخرائط وتشمل:

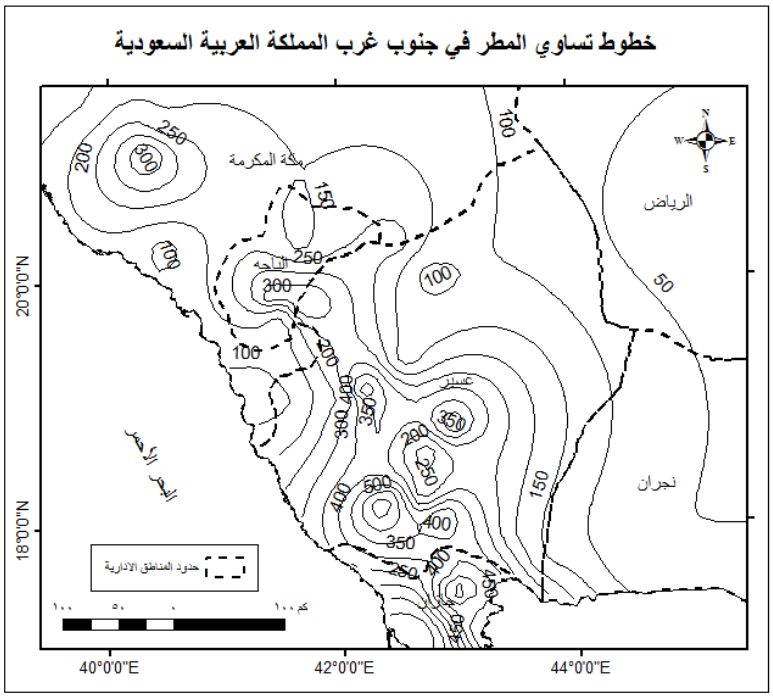
- خرائط التظليل النسبي (الكوروبليث)
- خرائط خطوط التساوي (الايزوبليث)

(أ) خرائط التظليل النسبي (الكوروبليث)

تعد هذه الخرائط أبسط أنواع خرائط التوزيعات الكمية وأكثرها انتشارا، وهي تطبق مجموعة من الظلال المتدرجة لتعبر عن التدرج في كثافة الظاهرة الممثلة.

(ب) خرائط خطوط التساوي (الايزوبليث)

خطوط التساوي هي الخطوط التي تمر بالنقاط ذات القيمة المتساوية من قيم الظاهرة. وتتطلب هذه الخرائط كم أكبر من بيانات الظاهرة بحيث يكون هناك مجموعة من النقاط معلومة الإحداثيات الأفقية (خطوط الطول و دوائر العرض) ومعلومة قيمة الظاهرة عند كل نقطة من هذه النقاط. فعلي سبيل المثال إذا توافر لدينا بيانات لعدد من محطات الأرصاد بحيث يكون معلوما موقع كل محطة (خط طولها و دائرة عرضها) وقيمة درجة الحرارة - مثلا - عند كل محطة من هذه المحطات فيمكننا رسم خريطة خطوط تساوي درجات الحرارة، والتي فيها سيكون هناك مجموعة من الخطوط كل خط منهم يمر بجميع المواقع التي لها نفس قيمة درجة الحرارة. وإذا توافرت أيضا قيم كمية المطر عند كل محطة من هذه المحطات فيمكننا رسم خريطة خطوط تساوي المطر، والتي فيها سيكون هناك مجموعة من الخطوط كل خط منهم يمر بجميع المواقع التي لها نفس كمية المطر. ولمعرفة تفاصيل رسم هذا النوع من الخرائط يمكن الرجوع للفصل القادم حيث أن خطوط الكنتور تعد أحد أنواع خطوط التساوي.



شكل (٣١-٢) نموذج لخرائط خطوط التساوي

٣١-٤ الخريطة الكنتورية

الخريطة الكنتورية هي أحد أنواع الخرائط المخصصة بصفة عامة لدراسة تضاريس سطح الأرض من جبال و هضاب و منخفضات، ولذلك فهي من أهم الخرائط للجغرافيين و

المهندسين. فهلي سبيل المثال فأن بيان تفاصيل تضاريس سطح الأرض في منطقة معينة لهو من أهم متطلبات الدراسات اللازمة لإنشاء المشروعات الهندسية مثل الطرق و الجسور، وأيضا لدراسة الأودية و مساراتها بهدف الوقاية من آثار الفيضانات و السيول، كما أنه يفيد في استصلاح الأراضي و التنمية الزراعية و العمرانية.

منذ عدة قرون استخدم الجغرافيين وسائل متعددة لتمثيل التغيرات في تضاريس سطح الأرض (مثل طرق الهاشور و الظلال والرسم المنظوري)، إلا أن طريقة خطوط الكنتور تعد هي الأكثر دقة و الأكثر انتشارا في الوقت الحالي.

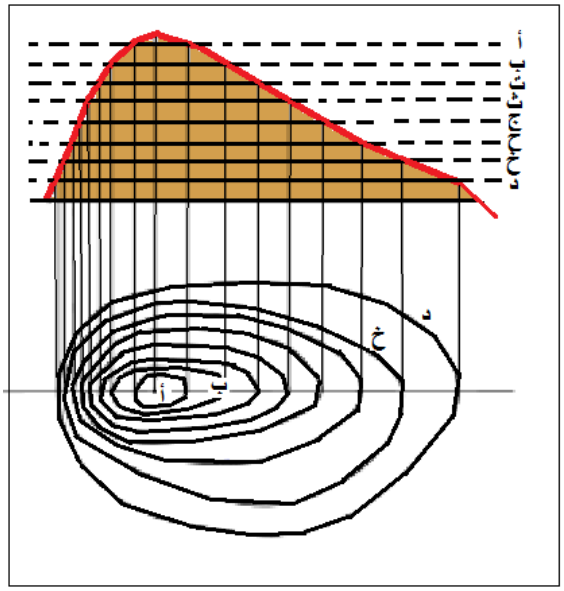
يتم إنشاء الخريطة الكنتورية بناءا علي قياسات مساحية ميدانية تحدد قيم الارتفاعات لسطح الأرض عن طريق استخدام الأجهزة المساحية الأرضية (مثل الميزان) أو الأجهزة المساحية المعتمدة علي تقنيات الأقمار الصناعية (مثل تقنية النظام العالمي لتحديد المواقع المعروف باسم الجي بي أس)، كما يمكن أيضا استخدام الصور الجوية و المرئيات الفضائية (صور الأقمار الصناعية) لإنشاء الخرائط الكنتورية.

٣١-٥ خطوط الكنتور

٣١-٥-١ مفهوم خطوط الكنتور

الكنتور هو خط وهمي (تخيلي) يصل بين جميع النقاط التي لها نفس الارتفاع. وحيث أن الارتفاعات علي سطح الأرض يتم قياسها بدءا من متوسط سطح البحر ويطلق عليها اسم المناسيب، فيمكن تعريف الكنتور بأنه الخط الوهمي الواصل بين النقاط التي لها نفس المنسوب.

يمكن أن نتخيل خطوط الكنتور علي أنها المقاطع الناتجة عن قطع سطح الأرض ببعض المستويات الأفقية مختلفة الارتفاع. فإذا نظرنا للشكل التالي الذي يمثل جبل كأحد تضاريس سطح الأرض، ثم قمنا بتمرير مستوي أفقي "أ" في الشكل العلوي ليقطع هذا الجبل عند قمته، فأن شكل المقطع (تقاطع هذا المستوي مع الجبل) سيكون خط أو منحني صغير المساحة كما يظهر في الشكل السفلي. ونلاحظ أيضا أن قيمة ارتفاع (أو منسوب) أي نقطة علي هذا الخط ستكون هي نفس القيمة لباقي النقاط حيث أن هذا الخط هو مقطع للمستوي الأفقي. الآن نتخيل أن لدينا مستوي أفقي آخر "ب" سيقطع نفس الجبل لكن علي ارتفاع أقل من ارتفاع المستوي السابق، فسيكون المقطع أيضا خط منحني لكنه أكبر مساحة من مساحة المقطع السابق. وهكذا لباقي المستويات الأفقية التي ستقطع هذا الجبل ليتكون لدينا عدة مقاطع أو قطاعات (في الشكل السفلي) هي ما نطلق عليها خطوط الكنتور. فإذا عرفنا قيمة الارتفاع (أو المنسوب) لكل مستوي من هذه المستويات الأفقية وهو نفس قيمة الارتفاع لخطوط الكنتور (القطاعات) الناتجة، فسيكون لدينا - من خطوط الكنتور - صورة واضحة أن تضاريس الأرض في هذه المنطقة عبارة عن جبل.



شكل (٣١-٣) مفهوم خطوط الكنتور

٣١-٥-٢ خصائص خطوط الكنتور

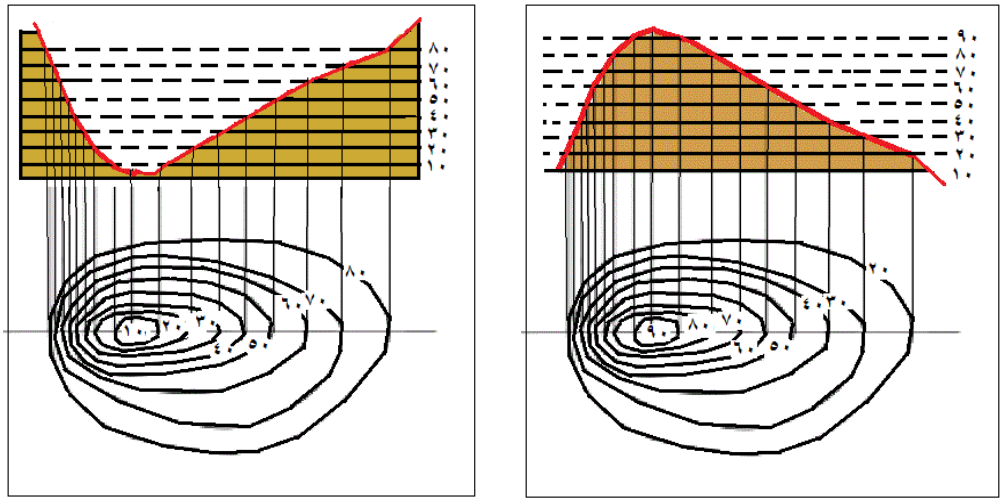
تكتب قيمة المنسوب (الارتفاع) الذي يمثله كل خط كنتور علي الخط نفسه علي الخريطة الكنتورية. وتكون الفترة الكنتورية (أو الفاصل الكنتوري) هي قيمة الفرق بين منسوب أي خط كنتور و الخط التالي له، فمثلا عندما نقول أن الفترة الكنتورية تساوي ١٠ أمتار، فأن هذا يدل علي وجود خطوط كنتور كل ١٠ أمتار مثل خطوط ٢٠، ٣٠، ٤٠، ٥٠ ...الي ٩٠ متر في الشكل التالي أ. والفترة الكنتورية تكون فترة ثابتة لنفس الخريطة.

وتختلف قيمة الفترة الكنتورية علي الخرائط طبقا لاختلاف مقياس رسمها و أيضا طبيعة التضاريس في المنطقة الجغرافية. ففي خرائط المملكة العربية السعودية ذات مقياس الرسم ١ : ٥٠٠،٠٠٠ يتم رسم خطوط الكنتور الأساسية كل ١٠٠ متر مع رسم خطوط إضافية كل ٥٠ متر، بينما في الخرائط من مقياس الرسم ١ : ٥٠،٠٠٠ فتكون الفترة الكنتورية ١٠ متر للمناطق المنبسطة و ٢٠ متر للمناطق شديدة التضرس. و الجدول التالي يقدم مثالا لمواصفات الفترة الكنتورية وارتباطها بمقياس رسم الخريطة.

مقياس الرسم	طبيعة التضاريس	الفترة الكنتورية (متر)
مقاييس كبيرة	منبسطة	٠.١ - ٠.٥
	متوسطة التضرس	٠.٣ - ١.٠
	شديدة التضرس	٠.٥ - ٢.٠
مقاييس متوسطة	منبسطة	١ - ٣
	متوسطة التضرس	١.٥ - ٣
	شديدة التضرس	٣ - ٦
مقاييس صغيرة	منبسطة	١ - ٥
	متوسطة التضرس	٣ - ١٠
	شديدة التضرس	١٠- ٢٠
	جبلية	٢٠- ١٠٠

تتميز خطوط الكنتور بعدة خصائص تشمل:

- لا تتقابل أو لا تتقاطع خطوط الكنتور مختلفة المنسوب (إلا في حالة الكهوف).
- لا يتفرع خط الكنتور الي خطين.
- خطوط الكنتور خطوط مغلقة و ليست مفتوحة، فان وجد خط كنتور مفتوح في خريطة فهذا يدل علي أنه ممتد لمنطقة أخري مجاورة.
- كلما زادت قيمة خطوط الكنتور للداخل في حلقات كنتورية دل ذلك وجود قمم جبلية (أنظر الشكل أ).
- كلما زادت قيمة خطوط الكنتور للخارج في حلقات كنتورية دل ذلك وجود منخفضات (أنظر الشكل ب).
- كلما زادت المسافة الأفقية بين خطوط الكنتور كلما كانت الأرض منبسطة أو أفقية.
- كلما قلت المسافة الأفقية بين خطوط الكنتور كلما كانت الأرض متغيرة التضاريس بشدة.
- تتلامس (أو تتطابق) خطوط الكنتور فوق بعضها البعض في حالة وجود منحدر رأسي تماما.
- الخط الدال علي الانحدار يكون عموديا علي خط الكنتور.



(ب) منخفض (أ) مرتفع

شكل (٣١-٤) الفترة الكنتورية

٣١-٥-٣ خطوط الكنتور والانحدارات

من أهم تطبيقات الخريطة الكنتورية دراسة أنواع و معدلان انحدار سطح الأرض في منطقة جغرافية محددة. فمن خصائص خطوط الكنتور يمكن التمييز بين الأنواع التالية من الانحدارات:

(أ) انحدار شديد:

يظهر عندما تتقارب خطوط الكنتور من بعضها البعض بشدة بحيث تكون المسافة الأفقية الفاصلة بينهم صغيرة جدا، فإذا تلامست خطوط الكنتور دل ذلك علي وجود انحدار رأسي

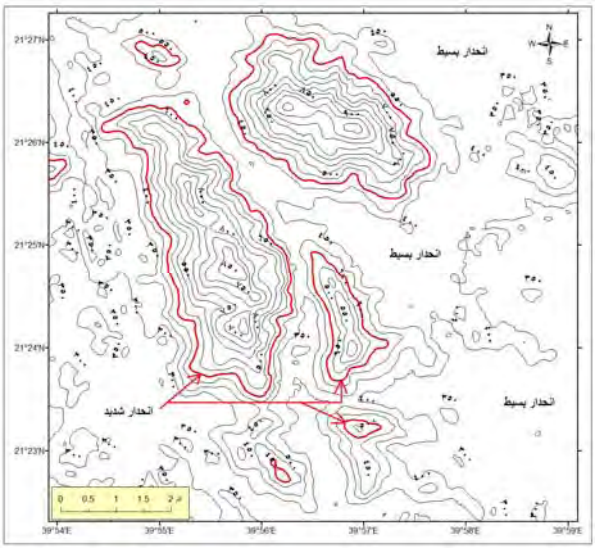
(جرف). ويكون الانحدار شديدا إذا كان في حدود من ٥٠ الي ٦٠ متر رأسيا لكل ١٠٠ متر أفقيا ويدل علي المناطق الجبلية.

(ب) انحدار بسيط:

يظهر عندما تتباعد خطوط الكنتور عن بعضها البعض وتكون المسافة الأفقية الفاصلة بينهم كبيرة. ويكون الانحدار بسيطا إذا كان في حدود من ١ الي ٤ أمتار رأسيا لكل ١٠٠ متر أفقيا ويدل علي المناطق المنبسطة.

(ج) انحدار متوسط:

يظهر عندما تكون المسافة الأفقية الفاصلة بين خطوط الكنتور مسافة متوسطة.



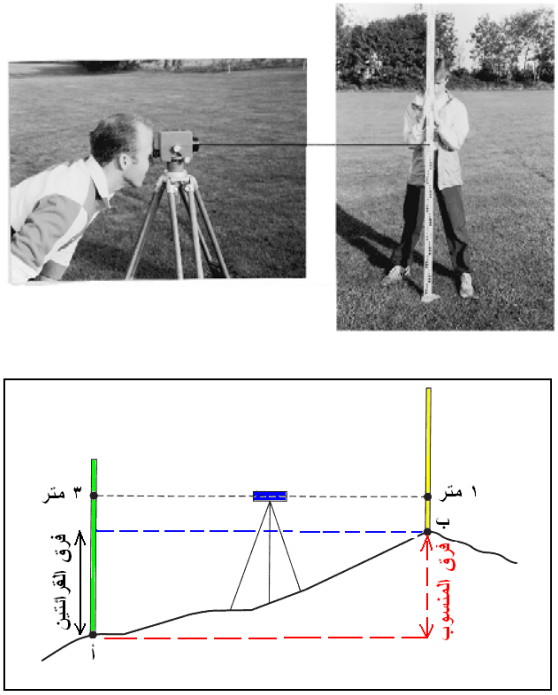
شكل (٣١-٥) خطوط الكنتور و الانحدارات في مشعر مني بمكة المكرمة

٣١-٦ عمل الخريطة الكنتورية

يتم رسم خطوط الكنتور علي الخريطة الكنتورية من خلال قياس مناسيب (أي ارتفاعات) بعض النقاط علي سطح الأرض مع معرفة الإحداثيات الأفقية لهم، وذلك من خلال تقنيات و أجهزة المساحة سواء المساحة الأرضية أو المساحة الجوية أو مساحة الأقمار الصناعية. وتوجد عدة أساليب ميدانية لقياس المناسيب في منطقة معينة تعتمد علي مساحة المنطقة و شكلها و طبيعة تضاريسها، ومن هذه الطرق الميدانية طريقة المربعات و طريقة المحاور و طريقة النقاط المنتظمة المسافة و طريقة النقاط المبعثرة.

تعد طريقة الميزانية الشبكية أسهل و أبسط طرق قياس مناسيب النقاط علي سطح الأرض و خاصة للمناطق الصغيرة والتي تتميز بتضاريس منبسطة أو معتدلة بصورة عامة. وفي هذه الطريقة يتم استخدام جهاز مساحي يسمي جهاز الميزان لقياس فرق المنسوب (فرق الارتفاع) بين نقطتين من خلال وضع مسطرة رأسية مدرجة (تسمي القامة) علي كل نقطة وأخذ قراءة

الميزان علي كلاهما لحساب فرق المنسوب بينهما. وبمعرفة منسوب أول نقطة (أي ارتفاعها فوق متوسط سطح البحر) يمكن حساب منسوب النقطة الثانية.

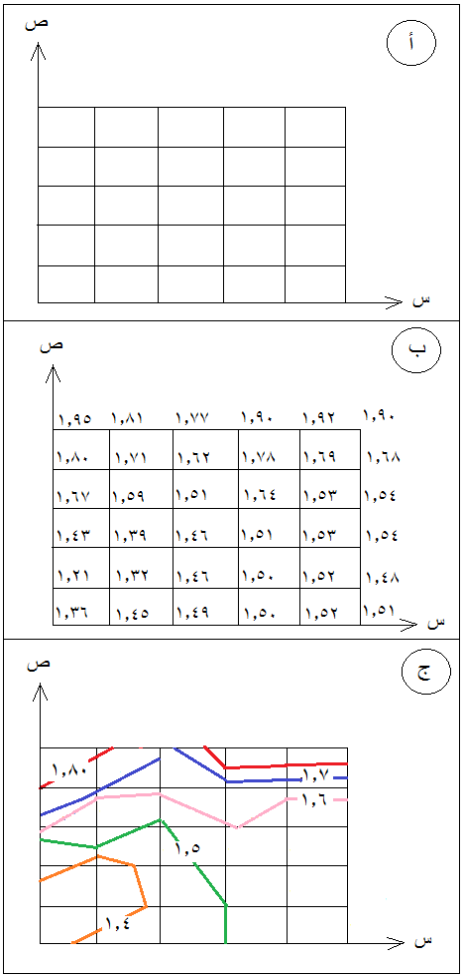


شكل (٣١-٦) جهاز الميزان لقياس فرق المنسوب

تبدأ طريقة الميزانية الشبكية برسم شبكة من المربعات (أو المستطيلات) المتساوية علي الأرض في منطقة الدراسة (الشكل أ)، ومن ثم فأن الإحداثيات الأفقية س ، ص لكل رؤوس هذه المربعات تكون معلومة من خلال معرفة طول ضلع المربع الواحد. ويعتمد اختيار طول ضلع مربعات الشبكة علي مساحة المنطقة و علي الدقة المطلوبة و قيمة الفترة الكنتورية المطلوبة أيضا. وفي الخطوة الثانية يتم استخدام جهاز الميزان لتحديد قيمة المنسوب عند كل رأس من رؤوس مربعات الشبكة (الشكل ب).

يبدأ العمل المكتبي برسم الشبكة طبقا لمقياس رسم الخريطة المطلوبة، ثم تكتب قيم مناسيب رؤوس المربعات علي الورقة. وبعد ذلك يتم استنباط موقع كل خط كنتور مطلوب (طبقا للفترة الكنتورية المنشودة) علي مربعات الشبكة من خلال النسبة و التناسب. وفي الخطوة الأخيرة (الشكل ج) يتم توصيل النقاط التي لها نفس المنسوب لرسم خطوط الكنتور.

وتجدر الإشارة لوجود برامج حاسوبية متخصصة في إنشاء الخرائط الكنتورية مثل برنامج السيرفر Surfer وبرنامج الجلوبال مابر Global Mapper، كما أن كل برامج تقنية نظم المعلومات الجغرافية تضم مكونات أو برامج فرعية لإنشاء خطوط الكنتور.



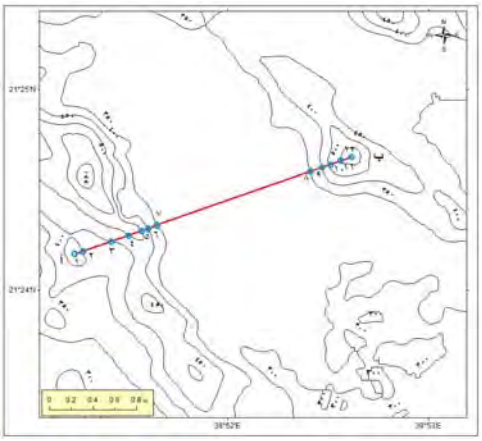
شكل (٣١-٧) طريقة المربعات لإنشاء خطوط الكنتور

٣١-٧ عمل القطاعات من الخريطة الكنتورية

يعد تطوير القطاعات التضاريسية من أهم تطبيقات الخرائط الكنتورية سواء في المجالات الجغرافية أو الهندسية. فالقطاع التضاريسي هو خط بياني يمثل تغيرات تضاريس سطح الأرض، ومن ثم فالقطاع يعطي صورة سريعة و مبسطة و دقيقة أيضا عن التضاريس (من منظور جانبي) في اتجاه محدد يسمي خط القطاع. وقد يكون القطاع التضاريس مستقيما (يربط بين نقطتين) أو منحنيا أو متعرجا (يربط بين عدة نقاط).

يتم إنشاء القطاع التضاريسي (المستقيم مثلا) من خلال تحديد الإحداثيات الأفقية للنقطتين المطلوب رسم القطاع بينهما. ثم يتم توقيع هاتين النقطتين علي الخريطة الكنتورية، ثم يرسم خط يصل بينهما. يتم تحديد تقاطع هذا الخط مع كل خط كنتور علي الخريطة (الشكل أ)، ويتم قياس المسافة من بداية الخط (القطاع) لكل نقطة تقاطع من هذه النقاط. ثم يتم تحويل هذه المسافات من الخريطة الي القيم المناظرة لها علي الطبيعة باستخدام مقياس رسم الخريطة الكنتورية، وتسجيل هذه البيانات في جدول (الشكل ب).

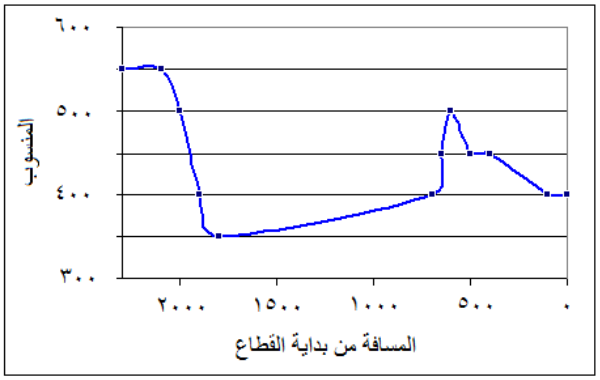
في المرحلة الثانية يتم استخدام ورقة مربعات محددا عليها محورين أحدهما أفقي و الآخر رأسي، ويتم اعتبار المسافات الأفقية هي المحور الأفقي و المناسيب هي المحور الرأسي. ثم يتم توقيع كل نقطة من نقاط القطاع التضاريسي بمعرفة قيمة مسافاتها من بداية القطاع (توقع علي المحور الأفقي) و قيمة خط الكنتور الذي حدث عنده التقاطع (توقع علي المحور الرأسي). وأخيرا يتم توصيل نقاط التقاطعات للحصول علي شكل القطاع التضاريسي في صورته النهائية (الشكل ج).



(أ) تحديد نقاط القطاع التضاريسي علي الخريطة

رقم النقطة	المسافة من بداية القطاع (متر)	المنسوب (متر)
١	٠	٤٠٠
٢	١٠٠	٤٠٠
٣	٤٠٠	٤٥٠
٤	٥٠٠	٤٥٠
٥	٦٠٠	٥٠٠
٦	٦٥٠	٤٥٠
٧	٧٠٠	٤٠٠
٨	١٨٠٠	٣٥٠
٩	١٩٠٠	٤٠٠
١٠	٢٠٠٠	٥٠٠
١١	٢١٠٠	٥٥٠
١٢	٢٣٠٠	٥٥٠

(ب) القياسات من الخريطة الكنتورية



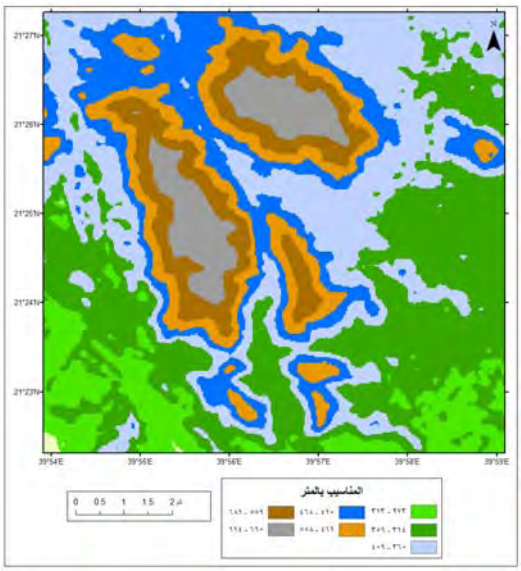
(ج) رسم القطاع

شكل (٣١-٨) القطاعات التضاريسية من الخريطة الكنتورية

٣١-٨ طرق أخري لتمثيل تضاريس سطح الأرض

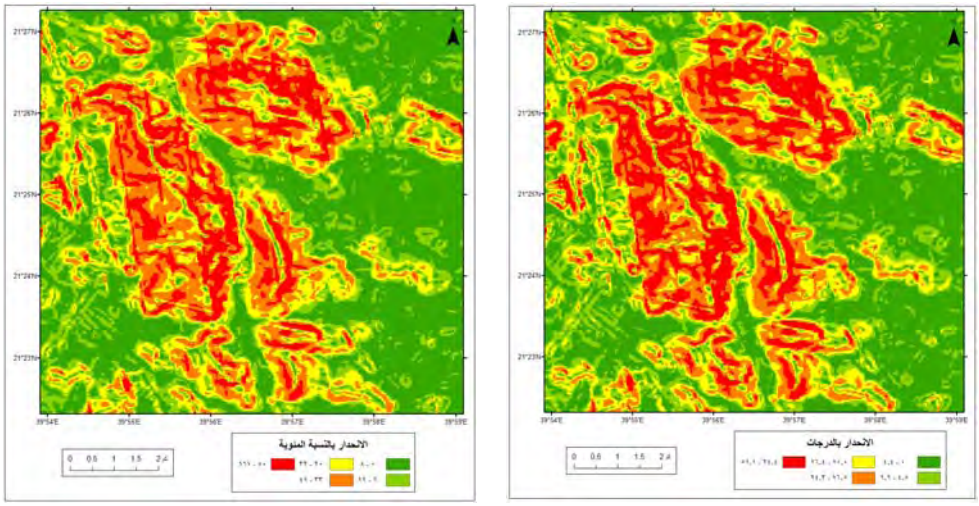
تعد الخريطة الكنتورية أدق طرق تمثيل تضاريس سطح الأرض، إلا أنه توجد طرق وأساليب أخري لبيان طبوغرافية منطقة جغرافية معينة. وتشمل هذه الأساليب علي سبيل المثال خرائط التضاريس و خرائط الانحدارات و خرائط الظلال و خرائط اتجاهات الميول و المجسمات.

مع انتشار ورخص تكلفة طباعة الخرائط الملونة عادت خريطة التضاريس Relief Map للتطبيق الخرائطي، حيث يتم تمثيل طبوغرافية الأرض من خلال تقسيم المناسيب الي فئات أو مجموعات بحيث يتم طباعة كلا منهم بلون مختلف أو حتى بدرجات مختلفة من نفس اللون. وهذه الطريقة كانت مستخدمة منذ أوائل القرن العشرين الميلادي مع استخدام الظلال بدلا من الألوان. وحديثا يتم استخدام هذه الطريقة لتمثيل تضاريس الأرض علي الخرائط صغيرة المقياس والتي لا تسمح برسم عدد كبير من خطوط الكنتور بوضوح تام، بينما فئات التضاريس الملونة ستكون أكثر ايجابية في إعطاء صورة عامة واضحة عن طبوغرافية المنطقة. فعلي سبيل المثال فأن الخريطة الكنتورية الممثلة لتضاريس مشعر مني بمكة المكرمة والموجودة في الشكل (٣١-١٠) يمكن تحويلها الي خريطة تضاريس (وتسمي أيضا خريطة السطح Surface Map) كما في الشكل التالي.



شكل (٣١-٩) خريطة السطح لتضاريس مشعر مني بمكة المكرمة

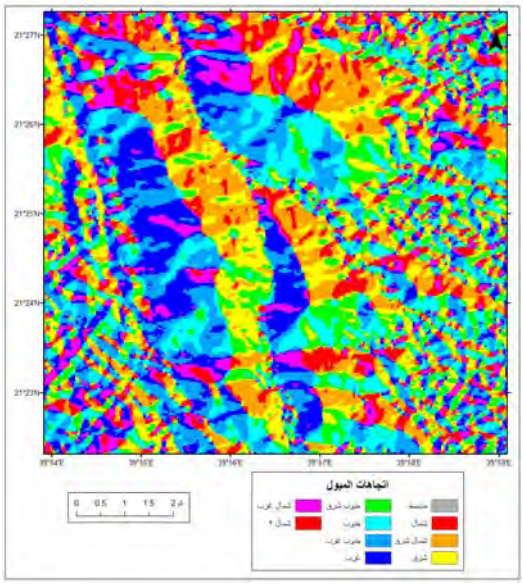
تعد خرائط الانحدار Slope Map أحد طرق تمثيل طبوغرافية سطح الأرض، فبدلا من تمثيل قيم المناسيب ذاتها يتم تمثيل قيم معدلات الانحدار. ويمكن تمثيل الانحدار إما بوحدات الدرجات أو بوحدات النسب المئوية.



(أ) بالدرجات **(ب) بالنسب المئوية**

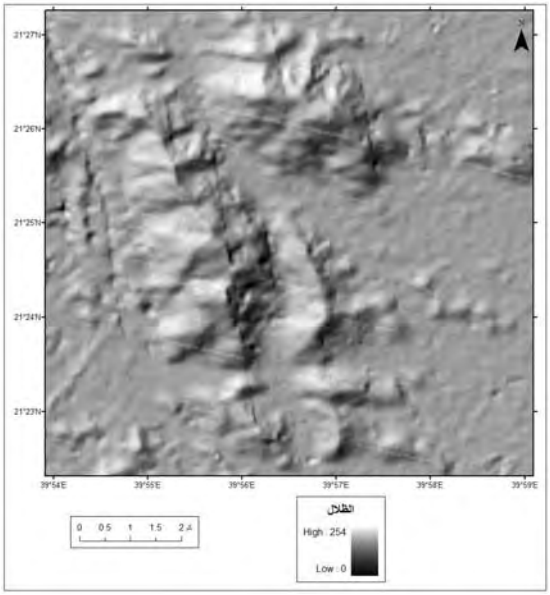
شكل (٣١-١٠) خرائط انحدار الأرض لمشعر مني بمكة المكرمة

أيضا في بعض التطبيقات يتم استخدام خريطة اتجاهات الميول Aspect Map كأحد طرق التمثيل التضاريسي، حيث تظهر هذه الخريطة فئات اتجاهات ميول سطح الأرض بدلا من قيم الميول ذاتها.



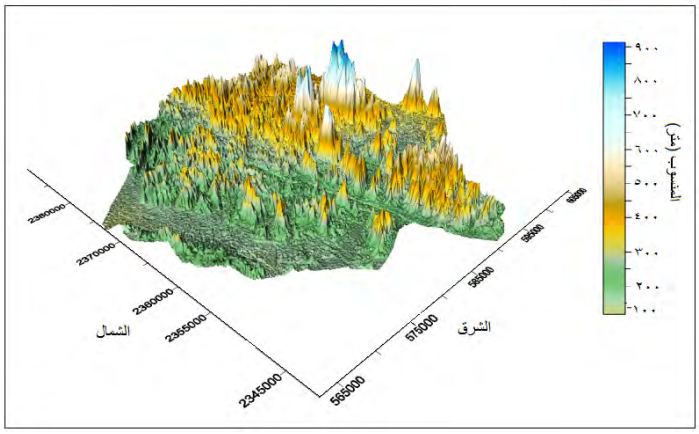
شكل (٣١-١١) خريطة اتجاهات الميول لمشعر مني بمكة المكرمة

كما تستخدم خريطة الظلال Hill shade Map كأحد الخرائط التضاريسية حيث تتميز بأنها تجسم طبوغرافية المنطقة الجغرافية بصورة بصرية أقرب للواقع خاصة لمستخدمي الخرائط غير المتخصصين.



شكل (٣١-١٢) خريطة الظلال لمشعر مني بمكة المكرمة

كذلك فأن المجسمات ثلاثية الأبعاد يمكنها تمثيل تضاريس سطح الأرض بصورة أفضل و أكثر جمالية لبيان الوضع العام لتضاريس منطقة جغرافية بأبعادها الثلاثة.



شكل (٣١-١٣) مجسم ثلاثي الأبعاد لتضاريس مدينة مكة المكرمة

الباب السادس

نظم المعلومات الجغرافية

Geographic Information Systems

GIS

الفصل الثاني و الثلاثين

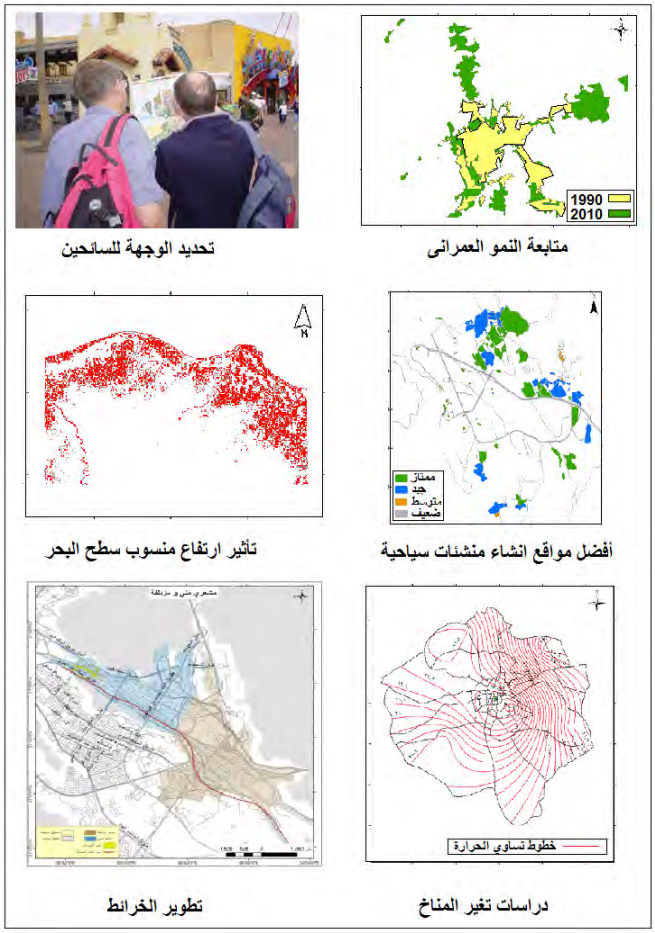
مقدمة عن نظم المعلومات الجغرافية

يقدم هذا الفصل نبذة تعريفية عن نظم المعلومات الجغرافية و أهميتها و تاريخ تطورها وأهميتها في العلوم المكانية.

٣٢-١ لماذا الاهتمام بنظم المعلومات الجغرافية؟

من المعروف أن أي حدث يحدث في مكان محدد، ويهتم الانسان بمعرفة "موقع" أو مكان أي حدث علي سطح الأرض. فنحن نحيا علي سطح الأرض و نسافر في أجوائها و بحارها ونحفر الأنفاق داخلها، ومن هنا فأن معرفة "مواقع" النشاطات البشرية يعد أمرا بالغ الأهمية. فمعرفة أين يقع حدث ما يمكننا من أن ننتقل الي هذا المكان أو نرسل أحدا اليه بهدف جمع معلومات أكثر عن هذا الحدث و مكانه وآثاره و تبعاته. ومن هنا يمكن القول أن أي قرار يتطلب تبعات "مكانية أو جغرافية" ومن ثم فأن الموقع المكاني أو الموقع الجغرافي هو أحد أهم عناصر اتخاذ القرارات و تطوير السياسات وبناء الخطط في أي مجتمع. ان نظم المعلومات الجغرافية Geographic Information Systems - أو اختصارا GIS - هي نوع خاص ومميز من نظم المعلومات التي ليس فقط تراقب و تتابع الاحداث و المتغيرات و الأنشطة وإنما أيضا تحدد "مواقع أو أماكن" هذه الأحداث و الأنشطة البشرية.

لأهمية تحديد المواقع فأن هذا الأمر أصبح عنصرا هاما في حل مشاكل المجتمعات الانسانية. وربما نحن لا ندري أن أمورا حياتية يومية تتطلب منا الاعتماد علي المعلومات المكانية، فعلي سبيل المثال فنحن يوميا نتخذ قرارا ذا طبيعة مكانية عندما نحدد في كل صباح أي الطرق التي سنسلكها للوصول للعمل و العودة منه. وتسمي المشاكل التي تتطلب الاعتماد علي معلومات مكانية باسم "المشكلات الجغرافية" ومن أمثلتها: (أ) يعتمد مسئولو الرعاية الصحية علي المعلومات المكانية في تحديد مواقع انشاء المراكز الصحية و المستشفيات الجديدة، (ب) يعتمد مهندسو شبكات المواصلات علي المعلومات المكانية في اختيار أفضل مواقع انشاء الطرق الجديدة، (ج) يعتمد السياح علي المعلومات المكانية في اختيار أماكن الترفيه و مواقع الفنادق ومواقع الاثار أثناء تجوالهم، (د) يعتمد المزارعون علي المعلومات المكانية في تحديد أماكن وضع الشتلات الجديدة وأيضا مواقع التسميد في مزارعهم، (ذ) يعتمد مهندسو الانشاءات المدنية علي المعلومات المكانية في متابعة مواقع أجزاء المنشئات طوال فترة تنفيذ المشروع، (ر) يعتمد مسئولو الحماية المدنية علي المعلومات المكانية في تحديد مواقع التضرر من الكوارث الطبيعية - مثل السيول والانهيارات الأرضية - ووضع الخطط اللازمة للتقليل من اثارها السلبية ..... الخ. وبذلك فأن استخدام أو تطبيق نظم المعلومات الجغرافية GIS لم يعد في وقتنا الحالي أمرا أكاديميا يتم داخل الجامعات و مراكز البحوث انما صار روتينا يطبق باستمرار داخل الجهات الحكومية و الشركات الأهلية الخاصة للوصول لحلول عملية دقيقة لمشكلات مجتمعية.



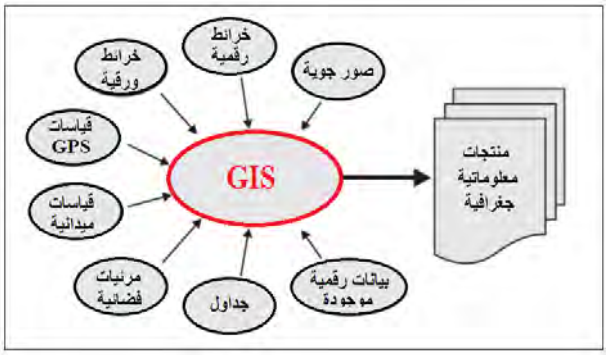
شكل (٣٢-١) أمثلة للمشكلات الجغرافية

٣٢-٢ نظم المعلومات الجغرافية أم المكانية؟

تشير الصفة "الجغرافية Geographic" الي أن هذه النوعية من نظم المعلومات تهتم بالمعلومات عن سطح الأرض. إلا أن هناك مصطلحا اخر يتم تداوله أيضا وهو نظم المعلومات "المكانية Spatial Information Systems" مما يجعل مجال عمل نظم المعلومات المكانية يتخطى سطح الأرض ليكون في أي "مكان". فعلي سبيل المثال يستخدم هذا العلم في دراسة الكواكب الأخرى وليس كوكب الأرض فقط، كما تم تطبيقه في المجال الطبي لدراسة و تحليل المعلومات عن الجسم البشري، مما يجعل مصطلح نظم المعلومات "الجغرافية" ليس هو الأمثل في هذه التطبيقات الحديثة. ومع استخدام مصطلح نظم المعلومات المكانية SIS فقد ظهر في السنوات الأخيرة مصطلحا جديدا وهو " المعلومات المكانية الأرضية أو Geospatial Information " ليدل علي نوع خاص من المعلومات المكانية التي تتعلق فقط بالأرض. فعلي سبيل المثال فقد تغير اسم وكالة الاستخبارات و الخرائط الأمريكية National Intelligence Mapping Agency في عام ٢٠٠٣م (١٤٢٤ هـ) الي اسم وكالة الاستخبارات المكانية الأرضية National

Geospatial-Intelligence Agency. ومع نهاية القرن العشرين الميلادي ظهر أيضا مصطلح "الجيوماتكس Geomatics" أو المعلوماتية الأرضية ليدل علي مظلة علمية أو علم أو تخصص يضم بالإضافة لنظم المعلومات الجغرافية عدة علوم و تقنيات أخري مثل الهندسة المساحية و الاحصاء و علوم الحاسب الالي و تقنيات النظام العالمي لتحديد المواقع و الاستشعار عن بعد. ومنذ ذلك الحين فقد غيرت بعض الجامعات اسم قسم الهندسة المساحية بها ليصبح تحت مسمي قسم الجيوماتكس.

تساعدنا نظم المعلومات - بصفة عامة - علي ادارة ما نعرف من معلومات من خلال تسهيل عمليات ترتيب و تخزين و استرجاع و صيانة و تحليل هذه المعلومات بهدف الوصول لحلول للمشاكل التي تواجهنا. وفي هذا الاطار يجب أن نفرق بين مصطلحي البيانات Data و المعلومات Information، فالبيانات هي مجموعة من الأرقام و النصوص في صورتها الخام raw والتي يمكن جمعها في ما يعرف باسم قاعدة البيانات Database. أما المعلومات فهي ناتج عمليات تمت علي البيانات مثل عمليات الاختيار و الترتيب و التحليل بناءا علي هدف محدد، وبالتالي فيمكن القول أن المعلومات هي ما يمكن استخلاصه من دراسة و تحليل البيانات الخام. وهنا تبرز واحدة من أهم مميزات نظم المعلومات الجغرافية - أو المكانية - حيث تسهل لنا تخزين و دمج عدة أنواع من قواعد البيانات و تحليلها و استنباط معلومات جديدة منها تخدم الهدف المراد الوصول اليه. وتزيد نظم المعلومات الجغرافية من مرونة استخدام البيانات الخام، فبدمج عدة أنواع من البيانات متعددة المصادر في إطار تكاملي واحد (أي نظام معلومات جغرافي) فتزداد قدراتنا في تمثيل و تحليل البيانات والاستفادة منها بتحويلها إلي منتجات معلوماتية.



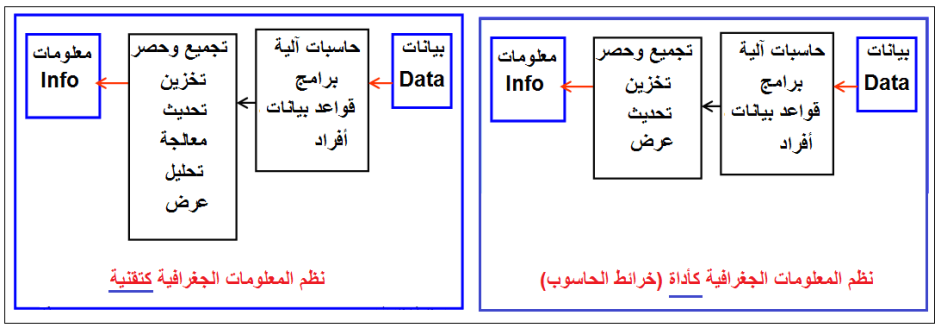
شكل (٣٢-٢) البيانات و المعلومات الجغرافية

٣٢-٣ ماهية نظم المعلومات الجغرافية؟ أداة أم تقنية أم علم؟

تختلف النظرة لنظم المعلومات الجغرافية اختلافا شاسعا، بل أن تعريف مصطلح نظم المعلومات الجغرافية ذاته يتعدد بدرجة كبيرة مما يجعل الكثيرون يتساءلون عن ماهية هذه النظم وهل هي مجرد أداة حاسوبية أم تقنية أم أنها علم في حد ذاته. فمن أمثلة أبسط تعريفات نظم المعلومات الجغرافية أنها وعاء لحفظ بيانات الخرائط في صورة رقمية، وهنا يمكننا أن نعتبر نظم المعلومات الجغرافية مجرد "أداه tool" لتحويل الخرائط الورقية الي خرائط رقمية. أيضا نجد تعريفا اخر يقول أن نظم المعلومات الجغرافية هي "أداه حاسوبية لحل المشكلات الجغرافية ". كما نجد أيضا

من يعرف نظم المعلومات الجغرافية علي أنها "أداة لعمل قياسات أو عمليات علي البيانات الجغرافية كانت ستكون أكثر صعوبة بتنفيذها يدويا علي الخرائط الورقية. وربما ظهرت مثل هذه التعريفات مع بداية ظهور مصطلح نظم المعلومات الجغرافية ذاته منذ عدة عقود حيث كانت النظرة العامة لهذه الاداة لتطوير الخرائط الرقمية ومقارنتها مع الطرق التقليدية لاستخدامات الخرائط الورقية.

بعد عقدين من ابتكار نظم المعلومات الجغرافية و استخدامها كأداة، تطور تعريف هذا المصطلح بعد أن بدأت في الظهور تطبيقات جديدة تعتمد ليس فقط علي حفظ البيانات الجغرافية في صورة رقمية بل تخطتها الي تحليل هذه البيانات بهدف الوصول لحلول علمية و عملية لمشكلات مجتمعية قائمة في عدد كبير من التخصصات و الاهتمامات. ومن ثم تخطت نظم المعلومات الجغرافية مرحلة "الاداة" لتصل الي مرحلة "التقنية technology" حيث صارت تعتمد في داخلها علي التكامل بين عدة علوم مثل علوم الجغرافيا و الكارتوجرافيا و الجيوديسيا و الاحصاء و الكمبيوتر بجانب تقنيات الاستشعار عن بعد و نظم تحديد المواقع. وفي هذا الاطار يأتي تعريف معهد البحوث و النظم البيئية (المعروف باسم شركة ازري ESRI) لنظم المعلومات الجغرافية علي أنها " مجمع متناسق يضم مكونات الحاسب الآلي و البرامج و قواعد البيانات والأفراد المدربين ويقوم هذا المجمع بحصر دقيق للمعلومات المكانية و غير المكانية و تخزينها و تحديثها و معالجتها و تحليلها و عرضها". وفي الشكل التالي يمكن ملاحظة الفرق بين كون نظم المعلومات الجغرافية كأداة أو كتقنية في وجود كلمتي "معالجة" و "تحليل" البيانات.



شكل (٣٢-٣) نظم المعلومات الجغرافية

ولتوضيح هذا الفرق الرئيسي بين خرائط الحاسوب (النظم كأداة) و نظم المعلومات الجغرافية (كتقنية) فلنأخذ مثالا بسيطا: لإنشاء خريطة لتوزيع مواقع المدارس في مدينة مكة المكرمة فسيقوم المتخصص في الخرائط الرقمية بإنشاء خريطة أساس للمدينة (من خرائط ورقية مثلا) ثم سيقوم بتحديد مواقع المدارس في الطبيعة (بأجهزة النظام العالمي لتحديد المواقع GPS علي سبيل المثال) ثم سيقوم بتجميع البيانات غير المكانية للمدارس (نوع المدرسة و المرحلة التعليمية و عدد الطلاب ...الخ) ثم سيقوم بإنشاء قاعدة بيانات رقمية لهذه البيانات المكانية و غير المكانية للمدارس في مدينة مكة المكرمة. ومن ثم يمكن لهذا المستخدم إنشاء عدد من الخرائط الرقمية (وطباعتها بعد ذلك) لتوزيع المدارس في مكة المكرمة سواء جميع المدارس أو خريطة لتوزيع المدارس في كل مرحلة تعليمية معينة وكذلك خرائط موضوعية كمية لتوزيع عدد الطلاب و عدد المعلمين في كل مدرسة ... وهكذا. فان قام المستخدم بكل هذه الخطوات فيكون قد أدي عمله تماما كراسم خرائط

رقمية. أما المتخصص في نظم المعلومات الجغرافية (الذي سيستخدمها كتقنية) فسيكون لديه عدة أهداف أو خطوات أخري قبل أن يكمل هذا المشروع التطبيقي. فعلي سبيل المثال فعلي هذا المتخصص أن يدرس نمط توزيع المدارس في هذه المنطقة الجغرافية وهل هو نمط منتظم يغطي كافة أنحاء المدينة أم نمط متجمع في بقعة محددة، وبالتالي يحدد إن كانت هناك حاجة لإنشاء مدارس جديدة في هذه المدينة لكي يصبح توزيع المدارس منتظما ويلبي حاجة كافة سكان المدينة أم لا. كما أن هذا المتخصص في نظم المعلومات الجغرافية – ربما – سيقوم أيضا بدراسة موقع كل مدرسة وهل هو يلبي الاشتراطات والمواصفات المتعارف عليها لمواقع المدارس أم لا. ومن خلال التحليلات المكانية يقوم بتحديد معامل ملائمة لكل مدرسة ليقيس من خلاله درجة ملائمة موقع المدرسة للمواصفات المكانية المحددة، وبالتالي يقوم بإعداد تقرير عن المدارس المقامة في مواقع غير آمنه من الناحية الهندسية و البيئية. وربما قام متخصص نظم المعلومات الجغرافية أيضا بالمضي قدما - في دراسته لهذه الظاهرة – ليحدد أنسب المواقع الجغرافية المناسبة لإنشاء مدارس جديدة في هذه المنطقة سواء من حيث حاجة سكان أحياء المدينة أو من حيث اختيار مواقع ملائمة توافي متطلبات مواصفات إنشاء المدارس. أيضا سيقوم هذا المتخصص بمحاولة التنبؤ الإحصائي المستقبلي لعدد المدارس المطلوبة بعد عدة سنوات وإعداد توقعات بمواقع و أنواع المدارس. وخلاصة القول – من هذا المثال البسيط – أن إعداد خرائط رقمية أيا كان نوعها و عددها وألوانها المبهرة الجميلة هو تطبيق لتقنية خرائط الحاسوب أو استخدام نظم المعلومات الجغرافية كمجرد أداة وليس استخداما كاملا أو علميا لوظيفة نظم المعلومات الجغرافية كتقنية.

يتعلق المستوي الثالث من مستويات تعريف نظم المعلومات الجغرافية باعتبارها علم GIS Science وليس مجرد تقنية. وكان أول ظهور لمصطلح "علم نظم المعلومات الجغرافية GIS Science" في عام ١٩٩٢ م (١٤١٢ هـ) في بحث منشور للدكتور Michael Goodchild. ثم ظهرت بعد ذلك عدة مصطلحات تحمل نفس المعني مثل الجيوماتكس Geomatics وعلم المعلوماتية الأرضية Geoinformatics وعلم المعلومات المكانية Spatial Information Science والهندسة الجيو-معلوماتية Geoinformation Engineering. فعلم نظم المعلومات الجغرافية يهتم بتطوير أسلوب علمي لكل القضايا المتعلقة باستخدام نظم المعلومات الجغرافية و التقنيات الأخرى المصاحبه لها. وبمعني اخر فأنه العلم الذي يستخدم مجال برمجيات نظم المعلومات الجغرافية لتحديد و تحليل و حل المشاكل القائمة. وتجدر الاشارة لوجود مؤتمر دولي يعقد في الولايات المتحدة الامريكية منذ عام ٢٠٠٠م تحت اسم مؤتمر علم نظم المعلومات الجغرافية (www.giscience.org). فإذا نظرنا لموضوعات هذا المؤتمر في دورته الحالية (٢٠١٤م/١٤٣٥هـ) سنجد أنها تشمل الأقسام التالية: الجغرافيا، علم الكمبيوتر، علم الادراك، الهندسة، علم المعلومات، الفلسفة، الرياضيات، العلوم الاجتماعية، الاحصاء. ومن هنا يمكن استخلاص ماهية علم نظم المعلومات الجغرافية في حد ذاته.

ان هذه النظرة الحديثة تتخطي النظرة الضيقة لتطبيق نظم المعلومات الجغرافية كما هي وبإمكانياتها المتاحة (في برنامج كمبيوتر متخصص software) الي ابتكار و تطوير أدوات علمية جديدة وبرمجة وظائف جديدة لتطبيقات محددة. فعلي سبيل المثال فأن معظم برامج نظم المعلومات الجغرافية تستطيع تمثيل قياسات GPS لتحديد مواقع الظاهرات المكانية و توقيعها في قاعدة البيانات، إلا أن مهندس الجيوماتكس يستطيع تطوير برامج جديدة programming لعمل وظائف جديدة - داخل البرنامج الرئيسي - لتنفيذ الحسابات الهندسية و تحليل أرصاد أو قياسات GPS

للتأكد من جودتها و دقتها قبل ضمها لقاعدة البيانات المكانية. هنا لم يقم هذا المستخدم بتطبيق الامكانيات الحالية للبرنامج بل أنه أضاف وظائف جديدة له بناءا علي خبرته العلمية في علم الجيوديسيا. وبذلك فأننا نجد أن كل برنامج GIS يختلف في وظائفه من اصدار الي اخر، حيث هناك من قام بإضافة أيقونات جديدة تمثل أدوات تحليلية جديدة في الاصدار الأحدث. وبمعني اخر فأن اخصائيو نظم المعلومات الجغرافية من جميع التخصصات (الجغرافيا و الهندسة و الرياضيات و الاحصاء و الموارد المائية و علوم البيئة .... الخ) ولديهم خبرة في مجال برمجة الكمبيوتر هم من ينظرون لنظم المعلومات الجغرافية علي أنها ليست مجرد تقنية، حيث أنهم يقدمون حلولا علمية جديدة - كلا في تخصصه - ثم يقومون ببرمجة هذه الخطوات الحسابية أو الطرق العلمية الجديدة ليضعوها في صورة أدوات ووظائف جديدة في البرنامج الأصلي. ولا يجب أن يتخيل أحد أن مبرمجو الكمبيوتر هم فقط من يمثلون هذه الفئة، بل أن الجغرافي أو المهندس المدني - علي سبيل المثال لا الحصر - يستطيعون ابتكار حلول علمية جديدة في تخصصاتهم وبتعلم احدي لغات البرمجة فيكونون هم الأجدر علي تطوير برامج جديدة وإضافتها لبرامج نظم المعلومات الجغرافية، وبذلك يكونوا قد أسهوا في تطوير هذه البرامج، ومن ثم فهم قد تعاملوا مع نظم المعلومات الجغرافية كعلم وقاموا بابتكار اضافات جديدة علي تقنية نظم المعلومات الجغرافية.

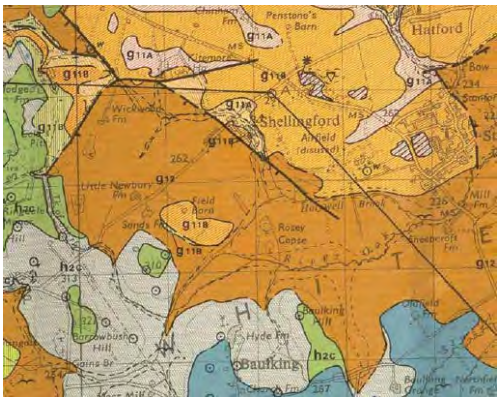
ويعتمد علم نظم المعلومات الجغرافية في جوهره علي عدد من التخصصات العلمية أو العلوم الأساسية وأيضا التقنيات والتي تشمل:

- علم الكمبيوتر Computer Science: ويستخدم في تمثيل و تشغيل (حساب) المعلومات المجمعة من خلال تطوير أجهزة تقنية (عتاد أو hardware) و طرق و نماذج و نظم تقنية (برامج أو software).
- علم الجيوديسيا Geodesy: ويستخدم لتحديد شكل و حجم الأرض والنماذج الرياضية المستخدمة في هذا التمثيل مثل السطوح المرجعية أو الاليبسويد Ellipsoids و نماذج الجيويد Geoid Models وأيضا لتمثيل مجال الجاذبية الأرضية.
- علم المساحة Surveying: وهو الذي يجمع الطرق و الأجهزة و التقنيات المستخدمة في قياس و تمثيل تفاصيل معالم وتضاريس سطح الأرض.
- علم الخرائط Cartography: يقدم علم الكارتوجرافيا قواعد و أسس و طرق تمثيل المعالم الطبيعية و البشرية لسطح الأرض سواء تمثيلا ورقيا (خرائط تقليدية) أو رقميا (خرائط رقمية).
- علم المساحة التصويرية Photogrammetry: يحدد مواقع و أشكال الأهداف الأرضية من خلال القياسات علي الصور الجوية.
- الاستشعار عن بعد Remote Sensing: للحصول علي معلومات مكانية و بيئية دون الاحتكام المباشر مع الأهداف الأرضية (أي من بعد).
- النظام العالمي لتحديد المواقع Global Positioning System or GPS : للحصول علي الإحداثيات الثلاثية الأبعاد للأهداف الثابتة أو المتحركة لأي مكان علي سطح الأرض وتحت أية ظروف مناخية.
- نظم المسح الليزري Laser Scanning System: لتحديد الأهداف وقياس مسافاتها من خلال استخدام الأشعة في النطاق البصري (من ٠.٣ الى ١٥ مايكرومتر).

- نظم اتخاذ القرار Decision Support System or DSS: لتطبيق نظم معلومات جغرافية معقدة أو مركبة بهدف إيجاد سيناريوهات محتملة لنمذجة الواقع الحقيقي علي الأرض و توفير مجموعة من الحلول لمتخذي القرار.
- النظم الذكية Expert System or ES: تأخذ في الاعتبار أجهزة تستطيع أن تقلد عملية الإدراك لدي الخبراء وقدراتهم علي إدارة الحقائق المركبة وذلك بطريقة حسابية رقمية.
- نظم المعلومات الجغرافية العنكبوتية WebGIS: لتوفير و إتاحة و توزيع البيانات المكانية من خلال حاسبات (كمبيوترات) عن بعد بطريقة الشبكات الحاسوبية.

٣٢-٤ نظرة تاريخية لتطور نظم المعلومات الجغرافية

توجد بعض الاختلافات في التحديد التاريخي الدقيق لتطور نظم المعلومات الجغرافية؛ حيث كانت تجري جهود متماثلة في كلا من أمريكا الشمالية و أوروبا في نفس الفترة الزمنية تقريبا. وربما يعد نظام المعلومات الجغرافي الكندي أول ظهور لنظم المعلومات الجغرافية حيث قامت الحكومة الكندية في عام ١٩٦٣ م (١٣٨٣ هـ) بتحويل خرائط الموارد الأرضية من صورتها الورقية الي صورة رقمية للاستفادة منها في تصنيف الاراضي و استخداماتها المتعددة وإجراء بعض القياسات عليها مثل حساب المساحات. وتقريبا وفي نفس الوقت بدأ مكتب الاحصاء الأمريكي في التفكير بتطوير سجلات رقمية لجميع الشوارع و الطرق بهدف الارجاع الجغرافي الالي لبيانات الاحصاء السكاني الذي كان مقررا في عام ١٩٧٠م. وكانت هذه الفكرة دافعا لقيام جامعة هارفارد في عام ١٩٦٤م بإنشاء معمل الرسم و التحليل بالكمبيوتر بهدف تطوير نظام معلومات جغرافي عام يخدم عددا من التطبيقات وليس هدفا محددا. أما في انجلترا فقد بدأت وحدة الكارتوجرافيا التجريبية في عام ١٩٦٧م في أول تجربة لإنشاء نظام حاسوبي لتطوير الخرائط بهدف تقليل تكلفة ووقت انشاء الخرائط بصورتها التقليدية، وفي عام ١٩٧٣م تم انتاج أول خريطة جيولوجية رقمية بواسطة هيئة المساحة الجيولوجية البريطانية. ومنذ ذلك التاريخ بدأت جهات انتاج الخرائط في أمريكا و أوروبا (مثل هيئة المساحة الامريكية و هيئة المساحة العسكرية الامريكية و هيئة المساحة البريطانية والمعهد الوطني الفرنسي للخرائط) الاستفادة من هذه التقنية الجديدة في انتاج الخرائط الرقمية. إلا بريطانيا أصبحت أول دولة تنجح في تطوير قاعدة بيانات كاملة لخرائطها الرقمية، وكان ذلك في عام ١٩٩٥م (١٤١٦هـ).



شكل (٣٢-٤) أول خريطة جيولوجية رقمية

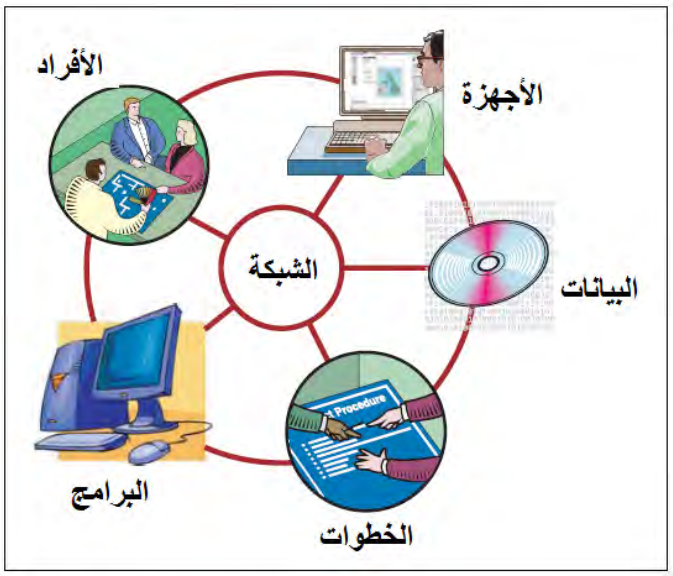
لعبت تقنية الاستشعار Remote Sensing عن بعد دورا هاما في تطوير نظم المعلومات الجغرافية كونها تقنية لجمع البيانات المكانية. تم اطلاق أول قمر صناعي عسكري في الخمسينات من القرن العشرين الميلادي بغرض جمع معلومات مخابراتية، ومع أنه كان يستخدم الكاميرا و الأفلام التقليدية في أعمال التصوير إلا أن تخزين و تحليل هذا الكم الهائل من المعلومات المكانية كان له دور كبير - بصورة سرية - في تطوير نظم المعلومات الجغرافية. ثم تطورت تقنية الاستشعار عن بعد طوال عقد الستينات لتنتقل من التصوير التقليدي الي التصوير الرقمي أو الاستشعار عن بعد الرقمي Digital Remote Sensing، وظهر أول قمر صناعي مدني للاستشعار عن بعد وهو القمر الامريكي لاندسات Landsat في عام ١٩٧٢م (١٣٩٢ هـ). أيضا ساعدت التطبيقات العسكرية والمخابراتية في تطوير نظم الملاحة وتحديد المواقع العالمية بالرصد علي الأقمار الصناعية في فترة السبعينات من القرن العشرين الميلادي، فظهرت تقنية النظام العالمي لتحديد المواقع Global Positioning System أو اختصارا جي بي أس GPS، والتي ساعدت علي الوصول لتحديد مواقع الظاهرات المكانية بدقة و سرعة و تكلفة أقل وعلي مستوي عالمي، وهو ما أدي لتطور في الحصول علي البيانات المكانية ومن ثم تطور نظم المعلومات الجغرافية. ومع بداية عقد الثمانينات من القرن العشرين الميلادي حدث تطور هام وهو انخفاض أسعار أجهزة الكمبيوتر Hardware مما أطلق صناعة تطوير البرامج Software وخاصة برامج نظم المعلومات الجغرافية. فلك أن تتخيل أنه قبل هذا الوقت كان ثمن جهاز كمبيوتر (بإمكانيات الكمبيوتر الشخصي الحالي) في حدود ٢٥٠،٠٠٠ دولار أمريكي بينما كانت البرامج المصاحبة له في حدود ١٠٠،٠٠٠ دولار أمريكي! ويقدم الجدول التالي عرضا مبسطا لأهم المحطات التاريخية في تطور نظم المعلومات الجغرافية.

التاريخ	نوع الحدث	الحدث
مرحلة الابتكار		
١٩٦٣	تقني	تطوير نظام المعلومات الجغرافية الكندي
١٩٦٣	عام	انشاء المنظمة الامريكية لنظم المعلومات الحضرية و الاقليمية URISA
١٩٦٤	أكاديمي	انشاء معمل الرسم و التحليل بالكمبيوتر بجامعة هارفارد الأمريكية
١٩٦٧	تقني	مشروع DIME بمكتب الاحصاء الأمريكي لتطوير سجلات رقمية لجميع الشوارع و الطرق بهدف الارجاع الجغرافي الالي لبيانات الاحصاء السكاني
١٩٦٧	أكاديمي	انشاء وحدة الكارتوجرافيا التجريبية ECU في بريطانيا
١٩٦٩	تجاري	انشاء شركتي ايزري ESRI و انترجراف Intergraph لتطوير برامج حاسوبية لنظم المعلومات الجغرافية
١٩٦٩	أكاديمي	نشر أول كتاب يتناول بعض أسس نظم المعلومات الجغرافية Design with Nature للمؤلف Ian McHarg
١٩٧٢	تقني	اطلاق القمر الصناعي الاول للاستشعار عن بعد Landsat
١٩٧٤	أكاديمي	عقد أول مؤتمر علمي AutoCarto 1 في فيرجينيا بأمريكا يتناول نظم المعلومات الجغرافية
مرحلة الإنتاج التجاري		
١٩٨١	تجاري	اطلاق أول نسخة من برنامج Arc Info المتخصص في نظم المعلومات

		الجغرافية
١٩٨٥	تقني	اكتمال منظومة النظام العالمي لتحديد المواقع GPS
١٩٨٦	تجاري	انشاء شركة MapInfo لبرامج نظم المعلومات الجغرافية
١٩٨٧	أكاديمي	ظهور المجلة الدولية لنظم المعلومات الجغرافية IJGIS
١٩٨٨	أكاديمي	انشاء المركز الوطني الامريكي للمعلومات الجغرافية و التحليل US NCGIA وأيضا معمل البحوث البريطاني الاقليمي UK RRL
١٩٩٢	تقني	اطلاق أول نسخة من الخرائط الرقمية العالمية DCW من تطوير المساحة العسكرية الامريكية (بحجم ١.٧ جيجا بايت)
١٩٩٤	عام	صدور قرار الرئيس الامريكي (كلينتون) بإنشاء البنية التحتية للمعلوماتية المكانية US NSDI واللجنة الاتحادية للمعلومات الجغرافية FGFC
١٩٩٥	عام	اكتمال أول مجموعة خرائط رقمية لدولة كاملة في بريطانيا من تطوير هيئة المساحة البريطانية و تتكون من ٢٣٠ ألف خريطة
١٩٩٦	تقني	ظهور عدد من نظم المعلومات الجغرافية علي الانترنت Internet GIS
مرحلة الانتشار		
١٩٩٤	أكاديمي	تأسيس اتحاد برامج نظم المعلومات الجغرافية مفتوحة المصدر Open GIS لتطوير برامج غير تجارية
١٩٩٧	أكاديمي	اطلاق Map Server 1 اول برنامج نظم معلومات جغرافية مفتوح المصدر open-source علي الانترنت بواسطة جامعة مينيسوتا الأمريكية
١٩٩٩	تجاري	اطلاق أول قمر صناعي تجاري للاستشعار عن بعد IKONOS
٢٠٠٠	تجاري	تجاوز حجم صناعة نظم المعلومات الجغرافية (أجهزة و برامج و خدمات) لقيمة ٧ مليار دولار أمريكي
٢٠٠٣	تقني	إطلاق خرائط جوجل و جوجل ايرث Google Earth, Google Maps

٣٢-٥ مكونات نظم المعلومات الجغرافية

يتكون نظام المعلومات الجغرافي من ستة أقسام رئيسية تشمل الأجهزة Hardware والبرامج Software و البيانات Data و الأفراد People والخطوات Procedures والشبكة Network. وسنحاول هنا تقديم شرحا مختصرا عن كل جزء من هذه الاجزاء ولاحقا - في الفصول القادمة - سيتم التعرض للتفاصيل التقنية لكلا منها.



شكل (٣٢-٥) مكونات نظم المعلومات الجغرافية

الأجهزة: تشمل كل جهاز يستخدمه مشغل نظم المعلومات الجغرافية سواء لإدخال البيانات أو معالجة البيانات أو عرض النتائج. تقليديا كانت أجهزة الكمبيوتر المكتبي desktop هي الاساس، إلا أن المستخدم أصبح لديه الان خيارات متعددة مثل الكمبيوتر المحمول laptop أو اللوح الكفي PDA بل وحتى الاجهزة المركبة داخل السيارات in-vehicle devices.

البرامج: تتعدد برامج نظم المعلومات الجغرافية من برامج مصممة للعمل علي الكمبيوتر الشخصي للمستخدم (وسعرها في حدود مئات الدولارات) وبرامج أكثر تعقيدا تناسب المؤسسات الكبيرة وتكون محملة علي خادم الشبكة الحاسوبية server للمؤسسة (وسعرها في حدود عشرات الالاف من الدولارات). ومعظم برامج نظم المعلومات الجغرافية تكون برامج تجارية commercial software يتم شراؤها من الشركات المنتجة لها (مثل برامج ArcGIS, MapInfo, AutoCAD Map)، إلا أنه توجد بعض البرامج الاكاديمية التي طورتها جامعات (مثل برنامج IDRISI من جامعة كلارك). ولكل برنامج امكانيات تقنية تختلف من برنامج الي اخر، كما توجد داخل نفس البرنامج عدة نسخ لكلا منها امكانيات مختلفة.

البيانات: تتكون البيانات من التمثيل الرقمي لأنواع محددة من البيانات في منطقة محددة من سطح الأرض بهدف ايجاد حلول علمية لمشاكل محدده في هذه البقعة المكانية. ويتم بناء قاعدة البيانات database لمشروع نظم المعلومات الجغرافية في أول مرة كما يتم تحديثها update باستمرار لتعبر عن الواقع بصفة مستمرة. وقد تكون قاعدة البيانات صغيرة الحجم (عدة ميجا بايت) يمكن تخزينها بسهولة علي قرص صلب، وقد تكون كبيرة الحجم (تصل الي تيرا بايت) يتم تخزينها علي خادم شبكي server ذو إمكانيات تقنية كبيرة، و الجدول التالي يقدم بعض الأمثلة لقواعد البيانات في عدة تطبيقات.

حجم قاعدة البيانات		مثال للتطبيق
ميجا بايت	١ ٠٠٠ ٠٠٠ بايت	مشروع نظم معلومات جغرافية صغير
جيجا بايت	١ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ بايت	قاعدة بيانات لشبكة الطرق في مدينة كبيرة أو دولة صغيرة
تيرا بايت	١ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ بايت	ارتفاعات سطح الأرض بقدرة توضيح مكاني ٣٠ متر
بيتا بايت	١ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ بايت	مرئيات فضائية للأرض بقدرة توضيح مكاني ١ متر
اكسا بايت	١ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ ٠٠٠ بايت	تمثيل (مستقبلي) ثلاثي الأبعاد لسطح الأرض بقدرة توضيح مكاني ١٠ متر

الأفراد: هم أهم مكونات نظم المعلومات الجغرافية الذين يقومون بتشغيل الاجهزة و البرامج و استخدام البيانات. وتختلف أعمال و مهارات أفراد نظم المعلومات الجغرافية اختلافا كبيرا بناءا علي وظيفة كل فرد، إلا أنهم جميعا لديهم الحد الأدنى من المعلومات عن العمليات الاساسية للتعامل مع البيانات الجغرافية مثل أنواع و مصادر البيانات و دقتها. وفي هذا الاطار فهناك مدخل بيانات، مشغل بيانات، محلل بيانات، مدير قاعدة البيانات، مدير نظام، مبرمج، مدير شبكات .... الخ.

الخطوات: يتطلب نظام المعلومات الجغرافية ادارة أو خطوات تشغيلية قياسية لتنظيم العمل والتأكد من جودة البيانات المستخدمة و مطابقة أسلوب العمل للميزانية المالية المحددة وأيضا المحافظة علي ضبط تنفيذ مراحل تشغيل النظام للوصول للنتائج المنشودة له.

الشبكة: في معظم تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية حاليا يتم الاعتماد علي شبكة حاسوبية بهدف نقل و مشاركة البيانات بين مستخدمي النظام. وقد تكون الشبكة من نوع Intranet أي شبكة خاصة لمؤسسة أو جهة معينة، وقد يتم استخدام شبكة الانترنت Internet ذاتها.

٦-٣٢ مميزات نظم المعلومات الجغرافية

صارت نظم المعلومات الجغرافية مطبقة في وقتنا الحالي في عدد كبير من التطبيقات التي تؤثر علي حياتنا اليومية. فعلي سبيل المثال فالطاقة الكهربائية التي تصل منازلنا تعتمد في جزء من مسارها علي استخدام نظم المعلومات الجغرافية في شركة الكهرباء لمتابعة مراحل توليد و توزيع الطاقة، وبنفس الطريقة فأن شركة توزيع المياه أيضا تعتمد علي نظم المعلومات الجغرافية حتى تستطيع ايصال الماء العذب لمنازلنا.

شكل (٣٢-٦) أمثلة لتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية

ويرجع هذا الانتشار الكبير في الاعتماد علي نظم المعلومات الجغرافية الذي حدث في العقدين الأخيرين لما لهذا العلم (أو هذه التقنية من وجهة نظر التطبيقين) من مميزات هائلة، منها علي سبيل المثال:

- تستخدم لسرعة اتخاذ القرار علي المدي القريب والبعيد أيضا.
- تتميز بالأهمية التطبيقية العالية.
- يمكن تطبيقها لحل العديد من المشاكل المجتمعية و الاقتصادية و البيئية.
- تدعم القياسات وتطوير الخرائط ومراقبة التغيرات و النمذجة.
- تدعم الجانب التطبيقي لتمثيل البيانات و ادارتها و تحليلها بصورة مبسطة.
- لها مميزات اقتصادية ملموسة.
- يسهل دمجها مع التقنيات الأخرى.

أيضا هناك عدة أسباب ساعدت علي انتشار الاعتماد علي نظم المعلومات الجغرافية مثل:

- توافر عدة أنواع من البيانات المكانية علي الانترنت.
- انخفاض أسعار أجهزة و برمجيات نظم المعلومات الجغرافية مع توسع هذا السوق.
- تزايد الاهتمام لدي صناع القرار بأهمية البعد المكاني في التخطيط و الادارة.
- سهولة التعامل مع نظم المعلومات الجغرافية باستخدام كمبيوتر شخصي بسيط.
- سهولة و سرعة الحصول علي البيانات المكانية اعتمادا علي تقنيات الرصد علي الأقمار الصناعية مثل تقنية GPS.

٣٢-٧ تطبيقات علم نظم المعلومات الجغرافية

تهدف جميع العلوم الانسانية الي وضع حلول للمشاكل التي تواجهنا، وان اختلفت الأسس العلمية والتقنيات المستخدمة باختلاف نوعية و طبيعة المشاكل ذاتها. فإذا أخذنا المعيار المكاني (أو الجغرافي) في الاعتبار فأن أهداف حل أي مشكلة تتمثل في:

١. التوزيع الفعال و المنطقي للموارد بناءا علي معايير محددة، مثل توزيع منشئات البنية التحتية في تطبيقات الخدمات.
٢. مراقبة و فهم التوزيع المكاني للعناصر، مثل التغير في نوعية التربة في بقعة مكانية.
٣. فهم طبيعة التغيرات التي يحدثها المكان ذاته، مثل أنماط اراء الناخبين.
٤. فهم العلاقة بين المتغيرات الطبيعية و البشرية، مثل العلاقة بين عمليات تآكل (أو نحر) الشواطئ وعمليات الهجرة البشرية من المدن الساحلية.
٥. دراسة التأثير البشري و البيئي للقرارات و الاستراتيجيات.

ولتحقيق هذه الأهداف والوصول الي حلول علمية باستخدام علم نظم المعلومات الجغرافية GIS Science فأن هذا يتطلب خمسة عمليات متكاملة وتشمل:

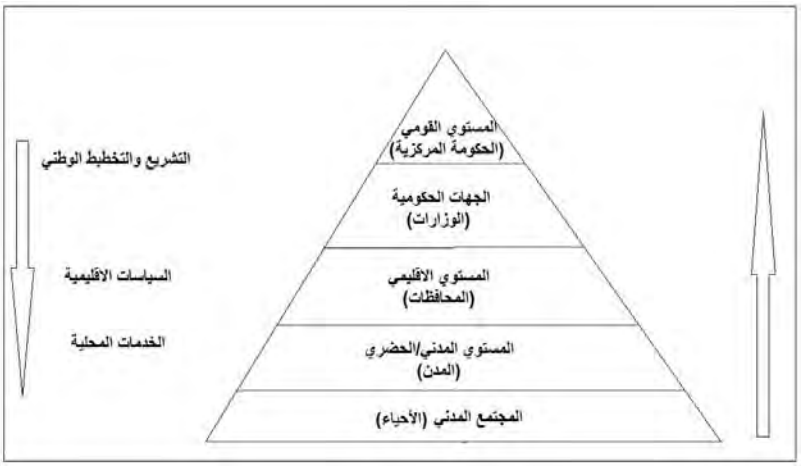
- تجميع البيانات و القياسات measuring
- التمثيل (الخرائطي) للبيانات mapping
- تحديث البيانات (متابعة مراقبة الظاهرة) monitoring
- تحليل و نمذجة المتغيرات modeling
- الادارة المتكاملة ووضع الحلول managing

بصفة عامة يمكن تقسيم تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية الي ثلاثة أقسام: تطبيقات تقليدية، تطبيقات نامية، و تطبيقات حديثة. مع ظهور نظم المعلومات الجغرافية فقد شملت تطبيقاتها التقليدية تلك التطبيقات الحكومية و العسكرية و التعليمية وتطبيقات الخدمات بكافة أنواعها. وفي منتصف التسعينات من القرن العشرين الميلادي بدأت تطبيقات نامية في الظهور، فبدأ استخدام نظم المعلومات الجغرافية في البنوك والخدمات التجارية والخدمات العقارية و شبكات المواصلات و الثقل وأيضا تحليل الأسواق. أما في بدايات القرن الحادي و العشرين الميلادي فأن تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية قد توسعت ودخلت مجالات جديدة مثل التطبيقات الأمنية والمخابراتية و مكافحة الإرهاب. واليوم أصبح تطبيق نظم المعلومات الجغرافية و تكاملها مع نظم المعلومات الأخرى أحد أهم أسباب النجاح و التطور في المؤسسات الكبرى. وفي الأجزاء التالية سنتعرض لبعض تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في المجالات الحكومية والتجارية و النقل و البيئة كمجرد أمثلة لتطبيقات هذا العلم.

٣٢-٧-١ تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في الخدمات الحكومية

كانت المؤسسات الحكومية ومجال الخدمات العامة من أولي التطبيقات التي استخدمت واستفادت من نظم المعلومات الجغرافية، فعلي سبيل المثال وكما سبق الذكر في الفصل الأول فأن أول ظهور لنظم المعلومات الجغرافية في كندا، في الستينات من القرن العشرين الميلادي، كان في مؤسسة حكومية. ومنذ تلك البداية وحتى الآن فمازال المستخدمون الحكوميون يمثلون الكتلة الأكبر بين مستخدمي نظم المعلومات الجغرافية. ومع أن أول تطبيق كان علي مستوي وطني أو قومي، فأن التطبيقات الحكومية لنظم المعلومات الجغرافية يتم استخدامها الآن علي كافة المستويات سواء علي مستوي دولة أو مستوي محافظة أو مستوي مدينة أو حتى مستوي حي داخل مدينة. ومع ربط هذه

المستويات معا فأن نظم المعلومات الجغرافية تصبح أداه فعالة في عمليات اتخاذ القرار ووضع الخطط التنموية مع الأخذ في الاعتبار كافة المتطلبات المحلية و الوطنية.



شكل (٣٢-٧) استخدام نظم المعلومات الجغرافية في عدة مستويات لعملية اتخاذ القرار

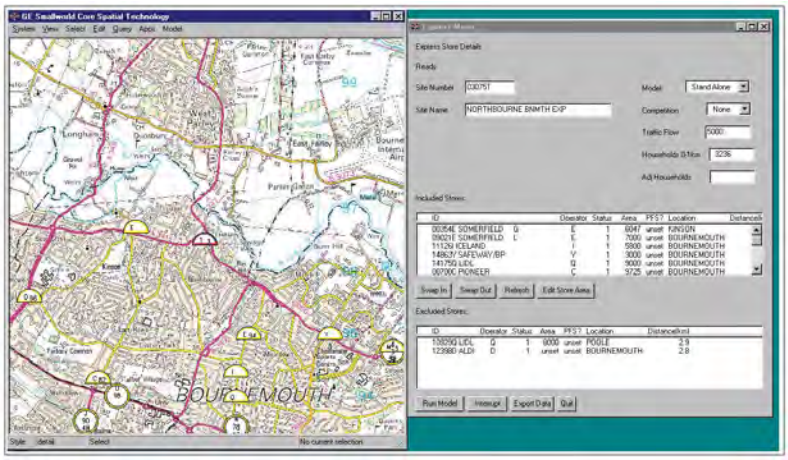
أصبحت الجهات والمؤسسات الحكومية أكثر وعيا في قضية الاستخدام الأمثل للموارد المتاحة، ومن ثم زاد الاعتماد علي نظم المعلومات الجغرافية - علي المستوي الوطني - التي تسمح ببناء قواعد بيانات مكانية للموارد و البنية التحتية وتخطيط شبكات النقل وزيادة جودة الخدمات الحكومية المقدمة وتنمية الأراضي مما ينعكس علي زيادة الدخل من خلال زيادة النشاطات الاقتصادية. بالمثل فأن الجهات الحكومية علي المستوي المحلي صارت تعتمد علي نظم المعلومات الجغرافية في إدارة و تحديد أنسب مواقع إنشاء الخدمات العامة بحيث تفي الغرض المثالي منها من حيث تغطية كافة احتياجات المواطنين بتوزيع عادل. ومن أمثلة التطبيقات المحلية لنظم المعلومات الجغرافية مراقبة مخاطر الصحة العامة، إدارة خدمات الإسكان العام، مراقبة الجريمة، إدارة شبكات النقل العام، إدارة الخدمات الأمنية وخدمات الطوارئ.

يعد تقدير الضرائب العقارية من الأمثلة التقليدية للتطبيقات الحكومية لنظم المعلومات الجغرافية في العديد من الدول. فهذا المجال يعتمد علي معلومات مكانية في المقام الأول وخاصة في تقدير قيمة الأرض والمباني المقامة عليها بالاعتماد علي أحد ثلاثة طرق وهي قيمة العقار أو الدخل الذي يوفره العقار إذا تم تأجيره أو حالة سوق العقارات في المدينة من حيث العرض و الطلب، وتعد الطريقة الأخيرة هي الأوسع انتشارا لتقدير الضريبة العقارية لمبني معين بناءا علي سعر السوق لمبني مماثل له من حيث الموقع والحجم و الجودة. وهنا يتم الاعتماد علي نظم المعلومات الجغرافية في جمع و تخزين و معالجة و تحليل هذه البيانات العقارية للمدينة بهدف تقدير قيمة الضرائب العقارية. أيضا توفر نظم المعلومات الجغرافية إمكانية نمذجة (تطوير نماذج) لهذه العملية التقديرية بناءا علي العوامل المحددة السابق تعريفها.

شكل (٣٢-٨) مثال لاستخدام نظم المعلومات الجغرافية في مجال تقدير الضرائب العقارية

٣٢-٧-٢ تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في الخدمات التجارية

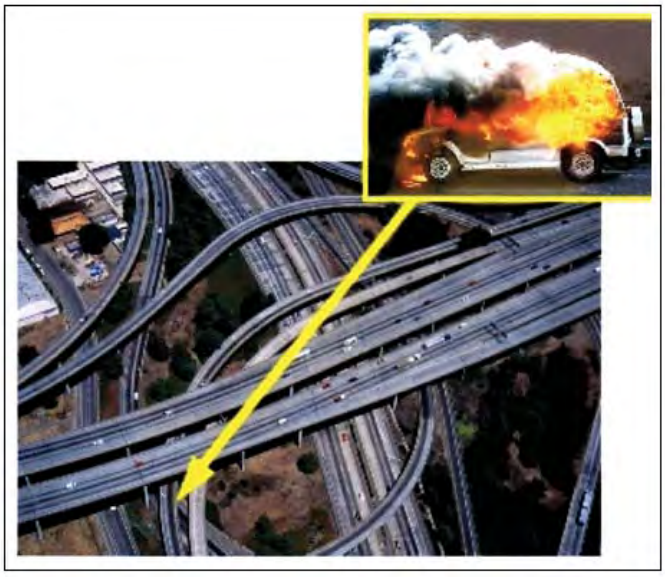
يعد التحليل الجغرافي للسوق أو تحليل منطقة السوق من أهم أعمال تخطيط و إدارة الخدمات التجارية. فهذا التحليل المكاني أو الجغرافي يهدف للإجابة علي سؤال "أين؟"، بمعني ما هي حدود النفوذ المكاني (الانتشار الجغرافي) لخدمة تجارية محددة؟ أو أين يمكن إقامة خدمة تجارية جديدة في منطقة معينة؟ أو أين يمكن تنفيذ خطوط توزيع جديدة للمنتج؟ أو دراسة السلوك الاجتماعي و الاقتصادي للعملاء في بقعة جغرافية محددة. وفي كل هذه العمليات التخطيطية التجارية فأن نظم المعلومات الجغرافية تقدم حلا علميا لا يمكن الاستغناء عته لإجابة مثل هذه الأسئلة المكانية. إن علم نظم المعلومات الجغرافية لا يهدف فقط لتوقيع البيانات علي الخرائط في صورة رقمية، إنما يتعدي ذلك الهدف بكثير فالأهم هو "التحليل المكاني" للبيانات. وبالطبع فأن برامج نظم المعلومات الجغرافية (software) تقدم بعض أدوات التحليل الجغرافي التجاري، إلا أن هناك برامج متخصصة لهذا النوع من التطبيقات والتي يمكن دمجها داخل أي برنامج نظم معلومات جغرافية تجاري.



شكل (٣٢-٩) مثال لاستخدام نظم المعلومات الجغرافية لتحديد موقع إنشاء خدمة تجارية جديدة

٣٢-٧-٣ تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في النقل و المواصلات

تتطلب خدمات النقل و المواصلات الاعتماد علي المعلومات المكانية فهي في الأساس تهدف لنقل الناس و البضائع من مكان إلى مكان. ومن أهم مهام المؤسسات الحكومية للنقل و المواصلات تحديد مواقع الخدمات الجديدة (من طرق و سكك حديدية) وأيضا المحافظة علي كفاءة شبكة المواصلات. كما أن الجهات الأهلية أو الخاصة العاملة في مجال النقل تعتمد أيضا في عملها علي تحديد أفضل مسارات النقل لها سواء كان النقل بريا أو بحريا. وكل هذه التطبيقات تحتاج لنظم المعلومات الجغرافية من خلال جزأين: الجزء الثابت static الذي يتعامل مع البنية التحتية ذاتها، والجزء المتحرك dynamic الذي يتعامل مع حركة الركاب و البضائع. قديما كانت تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية تستخدم فقط في الجزء الثابت من حيث دراسة و تحليل و إدارة الشبكة التحتية للنقل و المواصلات (طرق و سكك حديدية ..الخ). أما حديثا ومع التكامل بيت نظم المعلومات الجغرافية و تقنية النظام العالمي لتحديد المواقع GPS أصبح مراقبة حركة وسائل النقل و المواصلات ممكنا لحظة بلحظة مما نتج عنه استخدام نظم المعلومات الجغرافية كأداة ديناميكية لإدارة الثقل و المواصلات. ومن التطبيقات الحديثة لنظم المعلومات الجغرافية إمكانية تحديد موقع الحدث لحظيا بمجرد الاتصال بمركز الطوارئ (مع توافر إمكانية تحديد موقع الشخص المتصل من خلال هاتفه المحمول أو الجوال المزود بتقنية GPS) وفي نفس اللحظة يمكن لمركز الطوارئ توقيع مكان المتصل علي الخرائط الرقمية وتحديد موقعه بدقة وإبلاغ الموقع للجهة المنوط بها التعامل مع هذا الحدث (الدفاع المدني أو الشرطة أو المرور أو الإسعاف) للتعامل السريع مع الحدث. أيضا فأن الكثير من التطبيقات في مجال النقل و المواصلات تتطلب عملية "الأمثلية optimization" أي تحديد أمثل حل يفي بأهداف محددة. فعلي سبيل المثال يمكن لنظم المعلومات الجغرافية أن تحدد "أمثل" طريق لحافلة معينة مطلوب منها توزيع بعض البضائع لعدة مواقع مختلفة داخل مدينة، مما سينتج عنه توفير الوقت و تقليل تكلفة التوزيع.



شكل (٣٢-١٠) تكامل نظم المعلومات الجغرافية مع GPS لتحديد موقع حدث لحظيا

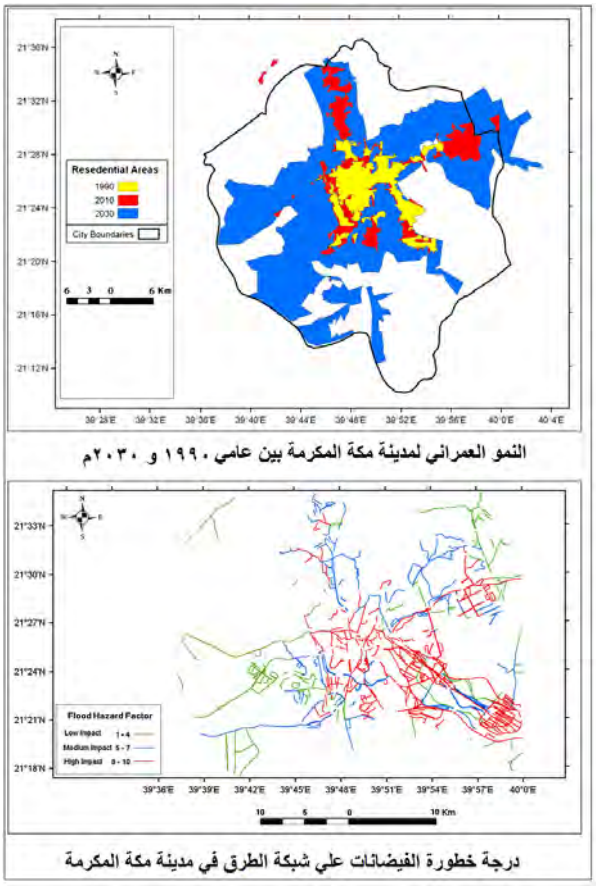
يمكن استخدام نظم المعلومات الجغرافية في مجال النقل و المواصلات علي عدة مستويات مثل:
مستوي التشغيل:
- مراقبة حركة المركبات بهدف رفع كفاءة التشغيل.
- تحديد المسارات المثلي لتقليل التكلفة.

المستوي التكتيكي:
- تصميم و تقويم مسارات الحركة للخدمات مثل مركبات المدارس و مركبا جمع القمامة و مركبات توزيع البريد.
- مراقبة و تقويم حالة شبكة النقل (مثل حالة رصف الشوارع وحالة خطوط السكك الحديدية) بهدف إدارة أعمال صيانتها.
- التحليل المكاني لمواقع الحوادث.

المستوي الاستراتيجي:
- تصميم مواقع إنشاء الطرق الجديدة ومواقع الخدمات المصاحبة لها.

٣٢-٧-٤ تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في مجال البيئة

تعد التطبيقات البيئية من أولي وأهم أنواع مجالات استخدامات نظم المعلومات الجغرافية منذ ابتكارها، ففي معظم دول العالم فأن الأراضي والموارد الطبيعية محدودة مما يتطلب إدارتها بكفاءة عالية. وهنا تقدم نظم المعلومات الجغرافية أداة تقنية لمراقبة ومتابعة التغيرات في استخدامات الأراضي و متابعة وتحليل و نمذجة النمو العمراني. فعلي سبيل المثال فأن نظم المعلومات الجغرافية تقدم لنا قياسات دقيقة ومتابعة عبر الزمن للتناقص في الغابات الاستوائية في حوض الأمازون بأمريكا الجنوبية من خلال الاعتماد علي صور الأقمار الصناعية. أيضا فأن متابعة النمو العمراني للمدن وآثاره البيئية يعد نموذج آخر لتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في المجالات البيئية. كما تستخدم نظم المعلومات الجغرافية بيئيا لمراقبة و نمذجة عمليات تآكل التربة و التصحر وحركة المياه الجوفية ومراقبة أثار الكوارث الطبيعية مثل السيول و الانزلاقات الأرضية. وفي المجال البيئي أصبح منهج "التحليل المتعدد المعايير Multi-Criteria Analysis" داخل نظم المعلومات الجغرافية من أكثر التطبيقات انتشارا في عدد كبير من التطبيقات علي المستوي العالمي بهدف تطوير نماذج ملائمة suitability model لتحديد أفضل مواقع إنشاء خدمة معينة بحيث يلبي هذا الموقع عددا من المعايير أو الشروط الواجب توافرها. فعلي سبيل المثال فأن نظم المعلومات الجغرافية تمكننا من تحديد أفضل مواقع إنشاء سدود الحصاد المائي في منطقة معينة بناءا علي عدد من المعايير الهندسية و الجيولوجية و الهيدرولوجية و المناخية و البيئية. أيضا فأن نظم المعلومات الجغرافية تقدم لنا منهجا علميا دقيقا للتوقع المستقبلي لظاهرة معينة بحيث يمكن وضع الخطط المناسبة لمواجهة هذه التحديات المستقبلية. فمثلا يمكن التنبؤ بمخاطر السيول التي من المتوقع حدوثها (من حيث الحجم و الانتشار المكاني) مع التوسع العمراني المستقبلي لمدينة معينة.



شكل (٣٢-١١) أمثلة للتطبيقات البيئية لنظم المعلومات الجغرافية

الفصل الثالث و الثلاثين

التمثيل الجغرافي و طبيعة البيانات المكانية

يستعرض هذا الفصل الأسس الرئيسية لتمثيل المكان أو العالم الحقيقي و أيضا يلقي الضوء على طبيعة البيانات المكانية ذاتها وخصائصها بالإضافة لدقة تمثيل العالم الحقيقي.

٣٣-١ مقدمة

يحيا الإنسان علي الأرض في جزء بسيط نسبيا من سطحها، فاليابسة لا تمثل إلا ثلث سطح الكوكب والمساحة التي تحتلها المدن و التجمعات البشرية لا تمثل إلا مقدارا بسيطا جدا من هذه اليابسة. ومع ذلك فأن الحصول علي معلومات عن سطح الأرض يعد بالغ الأهمية في عدد كبير من النشاطات البشرية. عرف الإنسان تمثيل المكان من خلال عدة وسائل مثل: التمثيل داخل المخ البشري من خلال حفظ المعلومات عما يحيط بنا من أماكن يمكننا رؤيتها، والتمثيل بالصور الفوتوغرافية، والتمثيل بالكلام وبالكتابة النصية، والتمثيل بعمل القياسات والأرصاد، و التمثيل الخرائطي.

حديثا أصبح تمثيل المكان من خلال تطوير نموذج رقمي لسطح الأرض، وهذا من أهم أوجه البحث العلمي و التخطيط، فمن خلاله يتعرف الإنسان علي الأماكن ومعالمها وتفاصيلها. لكن العالم الحقيقي بالغ التعقيد وليس من السهل تمثيله، ولذلك فلا بد من اتخاذ قرارات أو اختيارات لما سنقوم بتمثيله أو بمعني آخر المستوي المطلوب لتفاصيل سطح الأرض ولأي فترة زمنية وهذا من أهم مهام أخصائيو نظم المعلومات الجغرافية.

٣٣-٢ التمثيل الرقمي

صارت التقنيات الرقمية من أساسيات الحياة البشرية الآن، فنحن نتعامل حاليا مع كل وسائل الاتصال بصورة رقمية مثل أجهزة التلفزيون و الراديو و التليفونات و الفاكس والكتب والمطبوعات الالكترونية والانترنت ...الخ. وأصبح اقتناء جهاز كمبيوتر شخصي مطلبا أساسيا من متطلبات الحياة الحديثة. وكلمة "رقمي digital" مشتقة من كلمة "الأرقام digits" وان كان هذا التعبير غير دقيق! فالأرقام العددية أو الحسابية تتكون من عشرة وحدات من الصفر إلي تسعة، بينما في مجال الكمبيوتر فأن التمثيل لا يتم إلا باستخدام وحدتين فقط وهما الصفر و الواحد. فكافة المعلومات يتم تمثيلها "رقميا" من خلال اشتقاقات متعددة من تجميع الصفر و الواحد فقط. ولكل حرف أبجدي أو رقم يوجد كود محدد لاشتقاقات الصفر و الواحد و طريقة جمعهم في "بايت byte" وهي المعلومة المكونة من ٨ وحدات أساسية. فعلي سبيل المثال فأن الرقم ٢ يتم تمثيله رقميا (باستخدام ٨ خانات من الصفر و الواحد) بصورة: ٠٠١١٠٠٠٠ أما الرقم ٥ فيتم تمثيله بصورة: ٠٠١١٠١٠١ وهكذا. وبالطبع فقد تم استنباط عدد من الطرق أو الصيغ القياسية standard formats لتمثيل المعلومات بصورة رقمية، فمثلا هناك صيغة ASCII لتمثيل النصوص وصيغ مثل GIF, TIFF, JPEG لتمثيل الصور و صيغ مثل MPEG لتمثيل الأفلام وصيغ مثل MP3, MIDI لتمثيل الأصوات. وبالطبع فنحن لا يمكن أن نتعامل مع الصورة الحقيقية للتمثيل الرقمي (مشتقات الصفر

و الواحد) ولكن البرامج المتخصصة تعيد "ترجمة" هذا التمثيل الرقمي إلي شكله الحقيقي سواء نص أو صورة أو فيلم.

للتمثيل المكاني (أو الجغرافي) الرقمي مميزات هائلة عند مقارنته بالطرق التقليدية لتمثيل المكان سواء الخرائط الورقية أو التقارير المكتوبة. فالمعلومات الرقمية من السهل نسخها و نقلها بسرعة الضوء وأيضا حفظها في أماكن لا تشكل حيزا كبيرا، كما أنها لا تتعرض للتلف مثل الخرائط الورقية. لكن أهم مميزات التمثيل المكاني الرقمي تكمن في سهولة المعالجة و التحليل، وفي هذا الإطار تقدم لنا نظم المعلومات الجغرافية إمكانات هائلة كان من الصعوبة تحقيقها بالطرق التقليدية، وذلك من خلال إجراء القياسات بدقة وسرعة، و تركيب و دمج عدة نماذج رقمية، وتغيير مقياس الرسم ، و التكبير و التصغير بسهولة و يسر، وكل هذا بتكلفة قليلة.

٣٣-٣ التمثيل الجغرافي

التمثيل الجغرافي هو تمثيل جزء سطح الأرض بمقاييس متعددة تتراوح ما بين التمثيل المعماري لغرفة و تمثيل كامل الأرض. ويقول الأثريون أن الإنسان عرف رسم المكان علي جدران الكهوف كوسيلة لنقل المعلومات الجغرافية حتى قبل أن تتطور اللغة لتصبح وسيلة ناطقة لنقل المعلومات بين أفراد الجماعة البشرية، ومن هنا ظهرت "الخرائط" بشكل بدائي. ثم صارت الخريطة المرسومة يدويا طريقة فعالة لنقل المعلومات الجغرافية بين مجموعات صغيرة من البشر. إلا أن الخرائط و النصوص المكتوبة قد تتلف أو تدمر إن تعرضت للماء أو النار، وكم فقدت البشرية من معلومات قيمة للغاية بسبب هذين العنصرين مثل ما حدث لحريق مكتبة الإسكندرية القديمة في القرن السابع الميلادي. ومع اختراع الطباعة في القرن الخامس عشر الميلادي أصبحت المطبوعات و الخرائط أوسع انتشارا وأصبح الإنسان أكثر اعتمادا عليها. ومع أن تكلفة طباع الخرائط لم تكن بسيطة في البداية، إلا أن ظهور المكتبات العامة في القرن التاسع عشر الميلادي ساعد علي وصول الخرائط وما تحتويه من معلومات مكانية لقطاع واسع من المهتمين. والآن أصبحت شبكة الانترنت أكثر الطرق فعالية لنقل و نشر المعلومات الجغرافية والمكانية بين الناس في كافة أنحاء العالم.

تعد معظم تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية - في حقيقة الأمر - هي نفسها تطبيقات التمثيل الجغرافي. لكن من المهم جدا في أي تطبيق لنظم المعلومات الجغرافية أن نحدد (١) ما نريد تمثيله what، وأيضا (٢) كيف نريد تمثيله how ، (٣) الدقة المطلوبة لهذا التمثيل accuracy. فالعالم الحقيقي بالغ التعقيد بدرجة تجعل تمثيله رقميا من الممكن أن يتم بعدة طرق، وهناك العديد من الاختيارات أو القرارات لتحديد ما يجب أن يتم تمثيله و ما يمكن ألا يتم تمثيله من الظاهرات.

٣٣-٤ خصائص التمثيل الجغرافي

إن طبيعة البيانات الجغرافية هي حقائق تدل علي العالم الحقيقي، وغالبا تتكون من ثلاثة عناصر: الموقع و الزمن و الوصف. فالموقع المكاني أو الجغرافي place هو المرجع الذي يدل علي المكان علي سطح الأرض، بينما في بعض الأحيان نحتاج أيضا لتحديد الزمن time الدال علي حدوث الظاهرة قيد التمثيل حيث أن بعض الظاهرات تتغير مع الزمن. أما الوصف attribute فيشمل كافة المعلومات غير المكانية التي تصاحب الظاهرة وتدل علي خصائصها. فعلي سبيل

المثال فأن الجملة "تبلغ درجة الحرارة في ظهر يوم ٢ ديسمبر عند دائرة عرض ٣٤ درجة و خط طول ٤٥ درجة تبلغ ١٨ درجة مئوية" تربط بين المكان (دائرة عرض ٣٤ درجة و خط طول ٤٥ درجة) و الزمن (ظهر يوم ٢ ديسمبر) والوصف (درجة الحرارة ١٨ درجة مئوية).

تعد معظم عناصر سطح الأرض ثابتة أو مستقرة لحد ما static، أي أن تغيرها يكون بطئ جدا وفي غالب التطبيقات يمكن إهمال تأثيره. فعلي سبيل المثال فأن تغير منسوب سطح البحر (الناتج عن حركة الأرض وظاهرة المد و الجزر) يكون بطئ جدا وفي فترة زمنية قد تمتد لعشرات السنين، مما يجعل بإمكاننا إهمال هذا التغير البسيط جدا في معظم التطبيقات. بينما علي الجانب الآخر فأن تغير درجات الحرارة يكون بصفة يومية أو ساعية مما يجعل التغيرات الزمنية ضرورية للغاية في تمثيل العناصر المناخية كعناصر ديناميكية متحركة أو متغيرة dynamic ، إلا أن المتوسطات السنوية لدرجات الحرارة من الممكن تمثيلها كعنصر ثابت.

يتكون نطاق العناصر غير المكانية attributes في المعلومات الجغرافية من أنواع و طبيعة متعددة للغاية، فبعض العناصر تكون طبيعية أو بيئية والبعض الآخر يكون عناصر اجتماعية أو اقتصادية. من الممكن أن تكون العناصر غير المكانية دالة علي موقع محدد يميزه عن المواقع الأخرى، مثل اسم الشارع أو الرمز البريدي أو رقم القطعة. بينما هناك عناصر غير مكانية قد تقيس عنصر محدد في هذا المكان مثل الارتفاع أو درجة الحرارة، كما توجد عناصر غير مكانية أخري قد تحدد عنصر داخل مجموعات معينة مثل نوع استخدامات الأراضي في هذا الموقع.

تشمل أنواع البيانات غير المكانية عدة أنواع منها: (١) بيانات اسمية nominal وهي التي تحدد العنصر المكاني و تفرق بينه وبين أماكن أخري، مثل رقم المنزل و اسم الشارع أو رقم القطعة ...الخ، (٢) بيانات رتبيه ordinal مثل نوع التربة في مجموعات التربة المحددة، (٣) بيانات فترة interval مثل فترات درجات الحرارة التي تحدد إن كان الطقس حارا أو معتدلا أو باردا، (٤) بيانات نسبية ratio مثل أوزان الأشخاص التي يمكن منها معرفة نسبة وزن شخص مقارنة بوزن شخص آخر. وبالطبع فأننا في نظم المعلومات الجغرافية قد نتعامل مع نوعيات خاصة من البيانات التي يكون لها طبيعة حسابية مختلفة، فعلي سبيل المثال فأن انحرافات الخطوط (مثل تلك المقاسة بالبوصلة المغناطيسية) تتراوح بين الصفر و ٣٥٩ درجة مما يعني أن الرقم التالي لرقم الانحراف ٣٥٩ يكون هو الصفر أو اتجاه الشمال.

يعاني التمثيل الجغرافي للبيانات من مشكلة أساسية تتمثل في أن العالم الحقيقي معقد للغاية مما لا يمكن تمثيل جميع تفاصيله بالكامل. ففي أي مشهد جغرافي كلما نظرنا لمنطقة صغيرة كلما وجدنا كم أكبر من التفاصيل، فعلي سبيل المثال فأن خط الشاطئ علي الخريطة يبدو كخط واحد متعرج، لكنه في الحقيقة يتكون من عدد كبير جدا من التفاصيل و الانحناءات والعناصر المكونة له. وهنا لا بد لنا أن نحدد - قبل بدء عملية التمثيل الجغرافي - المستوي المطلوب من التفاصيل التي نريد التعامل معها، أو إهمال بعض العناصر غير المكانية أو تبسيط simplification الظاهرات المكانية بطريقة معينة. وهذه الاختيارات أو البدائل في عملية التمثيل الجغرافي ليست حديثة، فقد كانت نفس المشاكل تواجه طرق التمثيل الجغرافي التقليدية مثل رسم الخرائط الورقية وما زالت تواجه التمثيل الجغرافي الرقمي في علم نظم المعلومات الجغرافية. وسنلقي الضوء في الأجزاء التالية علي بعض هذه الخيارات.

٣٣-٤-١ الأهداف المنفصلة والمجالات المتصلة

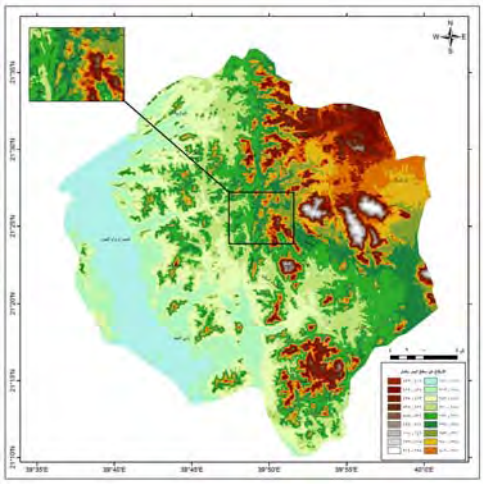
يري الإنسان العالم الجغرافي من خلال وجهتي نظر مختلفتين وهما الأهداف المنفصلة discrete objects و المجالات المتصلة continuous fields. في مفهوم أو نظرية الأهداف المنفصلة فأن العالم فارغ بصفة عامة فيما عدا مجموعات من الظاهرات التي لها حدود معرفة تماما، بمعني أن العالم محدد بوجود المباني و الطرق و السيارات ومثيلاتها من الأهداف أو الظاهرات المحددة بشكل تام و بحدود ثابتة. ومن أهم ما يميز هذه النظرية أن الأهداف المنفصلة يمكن تمييزها وعدها بسهولة، فمن السهل القول أن هناك ٢٨٤ جبل في اسكتلندا وأن هناك ١٠ آلاف بحيرة في ولاية مينيسوتا الأمريكية. وهذه النظرية تناسب الأهداف المصنعة، فمن السهل معرفة عدد السيارات المصنعة في عام محدد. كما أن الكائنات الحية تتعامل بسهولة مع هذه النظرية مثل سهولة معرفة عدد سكان مدينة معينة أو عدد الطائرات التي تملكها شركة معينة. لكن علي الجانب الآخر فهناك معوقات كثيرة لهذا الأسلوب أو هذه النظرية، فمثلا ما هو تعريف الجبل وكيف يختلف عن تل؟ وان كان للجبل قمتين فهل يعد جبلا واحدا أم أثنين؟

تمثل الأهداف المنفصلة بعدة وسائل طبقا لنوع الظاهرة الجغرافية ذاتها، فالظاهرات التي تحتل مساحة area (أي لها طول و عرض) تسمي بالظاهرات ثنائية الأبعاد two-dimensional وعادة يتم تمثيلها رقميا بمضلع polygon. أما الظاهرات التي لها بعد واحد فقط (طول) فيطلق عليها اسم الظاهرات أحادية البعد one-dimensional وتمثل بخط line (مثل الطرق والأنهار و السكك الحديدية). بينما هناك ظاهرات يمكن أن نطلق عليها اسم ظاهرات صفرية البعد zero-dimensional ويتم تمثيلها بنقطة point. أما في العالم الحقيقي فأن كل الظاهرات لها ثلاثة أبعاد three-dimensional ومحاولة تمثيلها بعدد أقل من الأبعاد ما هو إلا "تقريب approximation". فالمبني - مثلا - له ٣ أبعاد (طول و عرض و ارتفاع) بينما نحن نمثله علي أنه ثنائي الأبعاد فقط، وفي بعض الأحيان يمكن حل هذه المشكلة من خلال تحديد ارتفاع المنزل (أو عدد أدواره) كمعلومة غير مكانية في قاعدة البيانات.

أما النظرية الثانية في وجهة نظرنا للعالم الحقيقي فهي نظرية المجالات المتصلة، وفيها فأن الظاهرات تتكون من مجالات متصلة حتى و إن كان لها قيم محددة عند كل نقطة. فعلي سبيل المثال فأن تضاريس سطح الأرض يمكن اعتبارها مجالا واحدا متصلا ولكل نقطة في هذا المجال قيمة (ارتفاع) محدد. وفي هذه النظرية فأن المجالات المتصلة تتميز بقيمة التغير و مدي نعومة smooth أو معدل تغير كل مجال، فمثلا تغير التضاريس يكون ناعما أو بسيطا في الأراضي المنبسطة و يكون حادا و متغيرا بسرعة في المناطق الجبلية. ومن الأمثلة الأخرى للمجالات المتصلة الكثافة السكانية و استخدامات الأراضي وأنواع التربة ... الخ. أيضا فأن المجالات المتصلة لا تكون فقط في المساحات إنما قد تكون للخطوط، فمثلا فأن الكثافة المرورية علي طريق تعد مجالا متصلا.

من أهم النقاط التقنية في نظرية الأهداف المتصلة كيفية تحديد عدد فئات المجال نفسه، فكلما كان عدد الفئات كبيرا كلما أعطي ذلك معلومات تفصيلية أكثر عن طبيعة المجال المتصل. في الشكل التالي نري تضاريس سطح الأرض في مدينة مكة المكرمة، وفيه نري قيم الارتفاعات قد تم تمثيلها من خلال ١٤ فئة مما جعل التمثيل الجغرافي يوضح طبيعة التضاريس بدقة و جودة مما يسمح لنا

بالتفرقة بين المناطق المنبسطة و الجبلية وفئات كلا منهما. أما النقطة الثانية فتتمثل في أن نظرية الأهداف المتصلة تسمح لنا وبسهولة من عد الظاهرات المتشابهة، فكيف يمكن تطبيق ذلك في نظرية المجالات المتصلة؟ لحل هذه المشكلة فأننا نتخيل وضع شبكة grid علي الخريطة ويمكننا تحديد قيمة المجال (الارتفاع في مثال التضاريس) عند كل مربع من مربعات هذه الشبكة. أما حجم أو أبعاد كل مربع من مربعات هذه الشبكة (ما يطلق عليه اسم البكسل pixel) فيعتمد علي الدقة المنشود الوصول إليها، فكلما كان البكسل صغير الحجم كلما كانت نتائج التمثيل - و التحليل أيضا - أكثر دقة و تفصيلا.

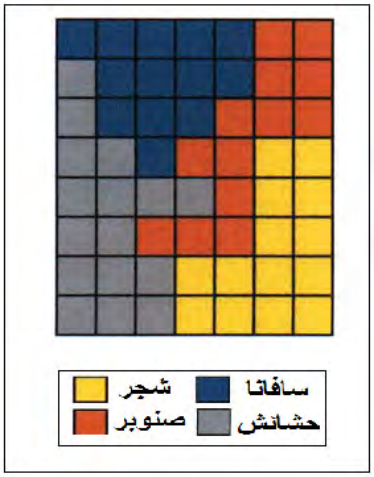


شكل (٣٣-١) تضاريس مدينة مكة المكرمة: مثال للمجالات المتصلة

٣٣-٤-٢ البيانات الخطية و البيانات الشبكية

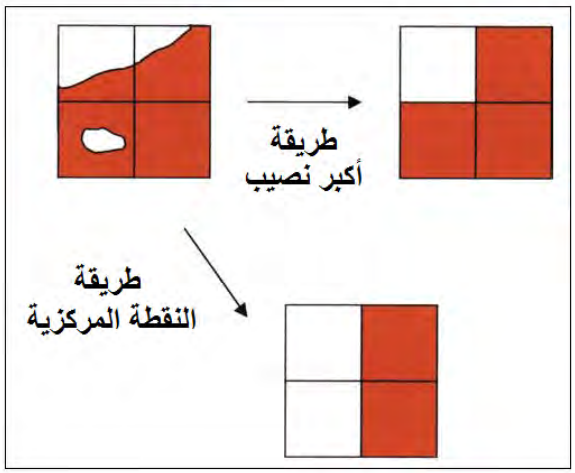
مثلت نظريتي الأهداف المنفصلة و المجالات المتصلة منهجين علميين نظريين لفهم العالم الجغرافي، إلا أنهما لا يقدمان حلولا للتمثيل الجغرافي أو المكاني رقميا. فعلي سبيل المثال فأن مفهوم المجالات المتصلة يحتوي ضمنيا علي كم لا نهائي من البيانات إذا تم تحديد قيمة المجال عند "كل" نقطة. ومن هنا فقد تم ابتكار طريقتين لتمثيل الواقع الجغرافي علي الخريطة الرقمية وهما ما يعرفان باسم طريقة البيانات الخطية vector data وطريقة البيانات الشبكية raster data. وهناك ارتباط قوي للغاية بين نظرية الأهداف المنفصلة و طريقة البيانات الخطية، وكذلك بين نظرية المجالات المتصلة و طريقة البيانات الشبكية.

يعتمد التمثيل الشبكي علي تقسيم المكان - أو العالم - إلي عدد من المربعات أو الخلايا cells بحيث يكون لكل خلية (أو بكسل) قيمة محددة للظاهرة المطلوب تمثيلها أو معلومة غير مكانية attribute. ومن أشهر أنواع البيانات الشبكية تلك البيانات القادمة من تقنية الاستشعار عن بعد remote sensing حيث يقوم القمر الصناعي بتسجيل البيانات بهذا الأسلوب الشبكي. وبالطبع فأن درجة الوضوح المكاني spatial resolution (قيمة طول الخلية أو البكسل المناظر علي سطح الأرض) تختلف من قمر صناعي إلي آخر، فنجد مرئيات فضائية images بوضوح مكاني ٠.٥، ١، ٢.٥، ٥، ١٠، ٣٠ متر.



شكل (٣٣-٢) مثال للتمثيل الشبكي raster

تجدر الإشارة إلي أنه في طريقة التمثيل الشبكي فأن تفاصيل الظاهرة داخل البكسل الواحد ستختفي، حيث أن كل بكسل أو خليه ستأخذ قيمة ثابتة محددة، بمعني أنه لا يمكن التفرقة بين قيمة المعلومة غير المكانية attribute لأجزاء الخلية ذاتها. وهنا لا بد من إيجاد وسيلة أو طريقة لكيفية تحديد قيمة واحدة للبكسل في حالة أنها تحمل أكثر من قيمة. وفي هذا الإطار فهناك طريقة "أكبر نصيب largest share" حيث تكون قيمة الخلية مساوية لقيمة الجزء الأكبر من مكوناتها. أيضا توجد طريقة "النقطة المركزية central point" وفيها تأخذ الخلية نفس قيمة نقطة مركزها. وتعد طريقة "أكبر نصيب" هي الأوسع انتشارا، إلا أن طريقة "النقطة المركزية" تستخدم في بعض الحالات مثل استنباط خلايا التضاريس من مجموعة بيانات مقاسه للارتفاعات في بقعة معينة.

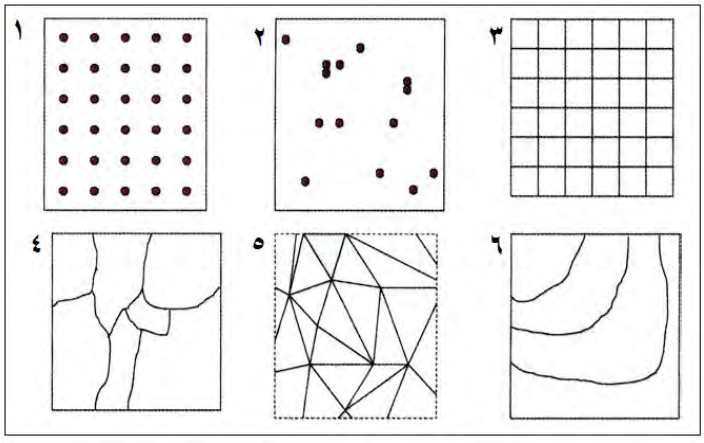


شكل (٣٣-٣) طرق التمثيل الشبكي

تعتمد طريقة البيانات الخطية أو طريقة التمثيل الاتجاهي vector data علي توقيع النقاط points، بينما الخطوط lines ما هي إلا توصيل مجموعة من النقاط معا، والمضلعات polygons هي توصيل مجموعة من الخطوط (كلما زادت كثافة النقاط أكبر صارت الخطوط أقرب للمنحنيات curves منها للخطوط المستقيمة وصارت المضلعات أكثر دقة في التمثيل). وفي هذا النوع من التمثيل لا نحتاج إلا لمعرفة مواقع النقاط التي تتكون من رؤوس المضلع vertices ومن ثم فأن التمثيل سيكون أسهل وأكثر كفاءة من طريقة البيانات الشبكية. وتظهر هذه الخاصية بصفة أكثر وضوحا عند تمثيل الأهداف المتصلة التي - غالبا - يمكن تحديد مواقعها المكانية بدقة. لكن وعلي الجانب الآخر فأن بعض الظاهرات الجغرافية لا يمكن تحديد حدودها بدقة عالية، مما يجعل التمثيل الشبكي أحيانا يكون مناسبا لعدد من الظاهرات المكانية. وفي هذه الحالات (تمثيل مجال متصل) هناك عدة بدائل أو اختيارات في نظم المعلومات الجغرافية:

١. معرفة قيمة العنصر المتغير عند رؤوس شبكة من المربعات محددة علي فترات ثابتة، مثل معرفة المنسوب (الارتفاع) عند أركان شبكة في حالة نماذج الارتفاعات الرقمية Digital Elevation Model (DEM).
٢. معرفة قيمة العنصر المتغير عند نقاط متباعدة، مثل معرفة قيمة درجة الحرارة عند محطات القياس المناخية.
٣. معرفة قيمة العنصر المتغير لخلية محددة الشكل، مثل معرفة قيمة الانعكاس في مرئيات الاستشعار عن بعد.
٤. معرفة قيمة العنصر المتغير لخلية متغيرة الشكل، مثل معرفة نوع المزروعات عند كل حوض في مزرعة.
٥. معرفة التغير الخطي للعنصر المتغير عند مثلثات غير منتظمة الشكل Triangulated Irregular Network (TIN).

وتجدر الإشارة إلي أن البديلين ١ و ٣ ما هما إلا طرق تمثيل شبكي، بينما البدائل الأربعة الأخرى تعد من طرق التمثيل الخطي أو الاتجاهي (وان كان يمكن تحويلها إلي تمثيل شبكي في برامج نظم المعلومات الجغرافية).



شكل (٣٣-٤) طرق تمثيل المجالات المتصلة

والجدول التالي يعرض مقارنة سريعة لكلا طريقتي التمثيل الرقمي الخطي و الشبكي في نظم المعلومات الجغرافية.

مميزات التمثيل الخطي vector و التمثيل الشبكي raster

البند	التمثيل الشبكي	التمثيل الخطي
حجم البيانات	يعتمد علي حجم الخلية أو البكسل	يعتمد علي كثافة النقاط
مصدر البيانات	مرئيات الاستشعار عن بعد	بيانات بيئية و اجتماعية وهندسية
التطبيقات	تطبيقات الموارد و البيئية	تطبيقات اجتماعية و اقتصادية و إدارية وهندسية
البرامج software	برامج التحليل الشبكي raster GIS	برامج التحليل الخطي vector GIS و الخرائط الرقمية
الوضوح	ثابت	متغير

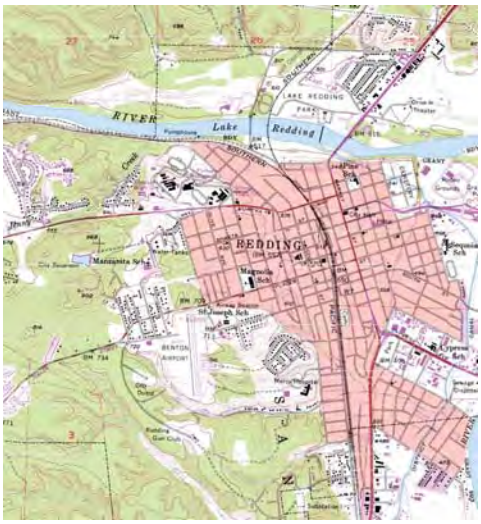
٣٣-٥ الخرائط الورقية

منذ القدم كانت الخريطة الورقية تعد وسيلة جيدة و فعالة لحفظ و لنقل البيانات الجغرافية، وبالطبع فأن الخريطة الورقية هي تمثيلا تناظريا analog وليس رقميا digital للواقع المكاني. وأهم ما يميز الخريطة الورقية هو نسبة التمثيل أو مقياس الرسم الذي من خلاله يمكن من خلاله تمثيل العالم الحقيقي علي قطعة صغيرة من الورق. ومقياس الرسم بصورة مبسطة هو النسبة بين طول أو مسافة علي الخريطة و الطول أو المسافة الحقيقية المناظرة علي سطح الأرض. فالخريطة ذات مقياس الرسم ١ : ٥٠٠٠ تدل علي أن كل المعالم الحقيقية علي الأرض قد تم تصغيرها علي الخريطة إلي جزء من ٥٠٠٠ من حجمها الحقيقي. لكن يجب أن نلاحظ أن هذا التعريف غير دقيق تماما حيث أن مقياس رسم الخريطة يكون ثابتا بينما وحيث أن سطح الأرض مجسما (وليس مسطحا) فأن نسبة التصغير الحقيقية لن تكون ثابتة.

من المهم معرفة ماذا يعني مقياس رسم خريطة رقمية (وليست مطبوعة) فالبعض لا يعي مفهوم أو فكرة أن التمثيل الرقمي ليس له مقياس رسم محدد. فكلمة مقياس رسم الخريطة الرقمية تدل فقط علي مقياس رسم الخريطة الورقية التي تم الاعتماد عليها في إنشاء هذه الخريطة الرقمية. بينما إن كانت الخريطة الرقمية قد تم تطويرها بناءا علي قياسات أو أرصاد (وليس من خريطة ورقية) فأنها هنا لا تعبر عن مقياس رسم محدد، حيث أن برامج نظم المعلومات الجغرافية تستطيع طباعة هذه الخريطة بعدة مقاييس رسم.

توجد علاقة وثيقة وقوية بين محتوي الخريطة الورقية و طريقتي التمثيل الجغرافي الرقمي سواء الخطي أو الشبكي. فعلي سبيل المثال فأن هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية توزع ملفين رقميين من خرائطها الطبوغرافية، ملف منهم خطي vector بينما الآخر شبكي raster وكلاهما يمثلان وسيلتين لجمع محتويات الخريطة الورقية الأصلية. في الملف الشبكي (صيغة DRG) يتم عمل مسح ضوئي scan للخريطة الورقية بكثافة عالية جدا (بكسل صغير جدا) بحيث يكون التمثيل

الشبكي قريب جدا لأصل الخريطة. ولكل درجة لون يلتقطها جهاز الماسح الضوئي scanner يتم بناء قاعدة معلومات رقمية توضح أنواع ومسميات الظاهرات الجغرافية الموجودة علي الخريطة الأصلية. أما الملف الثاني (صيغة DLG) يتم رسم كل ظاهرات الخريطة الأصلية سواء بنقاط أو خطوط أو مضلعات. وفي قاعدة البيانات غير المكانية attribute يتم وضع عمود لبيان ما يمثله كل رمز من الرموز المستخدمة في التمثيل.



شكل (٣٣-٥) نموذج للخرائط الممسوحة ضوئيا

لا يمكن النظر لقاعدة البيانات الرقمية digital database علي أنها مجرد نسخة رقمية من الخريطة المطبوعة و لا علي أنها فقط خريطة رقمية digital map، كما لا يمكن اعتبار نظم المعلومات الجغرافية علي أنها فقط مجمع يحتوي الخرائط الرقمية. فمفهوم التمثيل الجغرافي الرقمي من الممكن ان يحتوي معلومات من الصعب إظهارها علي الخرائط الورقية. فعلي سبيل المثال فالتمثيل الرقمي قد يحتوي علي التغيرات الزمنية للظاهرات المكانية، بينما الخريطة المطبوعة تكون ثابتة static لزمن محدد. أيضا فالتمثيل الجغرافي الرقمي يكون ثلاثي الأبعاد، بينما الخريطة المطبوعة بصفة عامة تكون ثنائية الأبعاد. كما يمكن للتمثيل الرقمي تمثيل سطح الأرض الحقيقي أو المنحني، بينما الخريطة هي مسقط أفقي لسطح الأرض وغالبا ما ينتج عن هذا الإسقاط بعض التشوه distortion.

٣٣-٦ التعميم

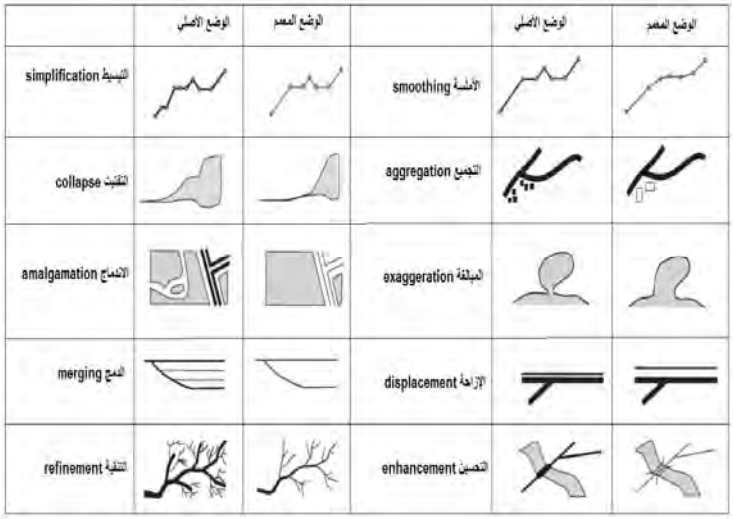
لا يمكننا تمثيل العالم الجغرافي بالغ التعقيد و بكل تفاصيله، ولذلك أبتكر الإنسان عدة وسائل لتبسيط نظرتنا للواقع الجغرافي. فمثلا بدلا من وصف كل نقطة فمن الممكن أن نكتفي بوصف منطقة والعناصر الجغرافية الرئيسية الموجودة بها. كما يمكننا أن نتعرف علي معالم "عينة" من النقاط ونفترض أن هذه العينة تمثل - لحد ما - العالم بأسره. وبناءا علي هذا المنطق فتوجد درجة من درجات التعميم generalization في كل البيانات الجغرافية أو المكانية. لكن الكارتوجرافيون (صانعي الخرائط) يتبنون وجهة نظر أخري، وتتلخص في أن لكل مقياس رسم من مقاييس الخرائط

مواصفات standards محددة تصف كيف يتم إنشاء هذه الخريطة. فالخرائط ذات مقياس الرسم ١ : ٢٥،٠٠٠ لها مواصفات قياسية تختلف عن مواصفات الخرائط ذات مقياس الرسم ١ : ١٠،٠٠٠. أي أن مواصفات الخريطة هي التي تحدد دقة تمثيل المعالم و الظاهرات التي تحتويها هذه الخريطة. فعلي سبيل المثال فأن مواصفات خريطة الغطاء النباتي من مقياس الرسم ١: ١٠،٠٠٠ تنص علي أنه لا يمكن تمثيل نوع من الغطاء النباتي إن كانت مساحته أقل من ١ هكتار. وفي هذه الحالة فسنفقد هذه المعلومات الموجودة علي الأرض والتي لن يمكن تمثيلها علي هذا النوع من الخرائط. ومن ثم فيمكننا القول أن الخريطة ذات مقياس الرسم المحدد تكون دقيقة تماما طبقا لمواصفاتها، حتى و إن كانت لا تمثل تمثيلا دقيقا بصفة عامة لكل تفاصيل سطح الأرض.

يحدد مستوي التفاصيل أحد أهم خصائص قاعدة بيانات نظم المعلومات الجغرافية GIS dataset، حيث أنه يحدد درجة التقريب بين العالم الحقيقي وقاعدة البيانات. فمن الطبيعي أن نحذف بعض التفاصيل بالنظر إلي حجم البيانات وسرعة المعالجة و حجم التخزين المتاح في أجهزة الكمبيوتر. وهناك عدة طرق للتعميم تشمل:

١. التبسيط simplification: مثل إزالة بعض النقاط الخارجية من مضلع بهدف جعل شكله أبسط.
٢. الأملسة smoothing: بتحويل الشكل المعقد إلي شكل أملس.
٣. التجميع aggregation: بتبديل مجموعة كبيرة من الأهداف أو الرموز بمجموعة أصغر عددا.
٤. الاندماج amalgamation: بتبديل مجموعة من الأهداف بهدف واحد فقط.
٥. الدمج merging: بإحلال مجموعة من الخطوط بعدد أقل من الخطوط.
٦. التفتيت collapse: بإحلال مضلع ببعض الخطوط و النقاط بدلا منه.
٧. التنقية refinement: بإحلال نمط معقد من الأهداف بنمط آخر أبسط مازال يحافظ علي الوضع العام للنمط الأصلي.
٨. المبالغة exaggeration: بتضخيم هدف معين للمحافظة علي خصائصه في حالة أن الهدف لن يظهر بوضعه الأصلي.
٩. التحسين enhancement: بتغيير الحجم أو الشكل الأصلي للرموز.
١٠. الإزاحة displacement: بتحريك الأهداف من مواقعها الحقيقية للحفاظ علي تميزها و سهولة التعرف عليها.

وهذه الطرق من طرق التعميم يمكن التعرف علي خصائصها بسهولة مبسطة من الشكل التالي.



شكل (٣٣-٦) طرق التعميم

٣٣-٧ طبيعة البيانات الجغرافية

يعد فهم طبيعة البيانات الجغرافية أو المكانية من أهم مبادئ عمل نظم المعلومات الجغرافية لتمثيل هذه البيانات بحيث تكون معبرة عن العالم الحقيقي. إن هناك ٧ خصائص لطبيعة البيانات الجغرافية (تناولنا منهم ٣ في الجزء السابق) وتشمل:

١. تبني نظم المعلومات الجغرافية تمثيلا لأماكن أو مواقع فريدة unique غير متماثلة،
٢. طبيعة التمثيل ذاته تكون اختيارية أو انتقائية selective وليست كاملة تماما،
٣. في بناء التمثيل نري العالم إما أهدافا منفصلة أو مجالات متصلة.

أما الخصائص الثلاثة الأخرى (سنتناولهم بالتفصيل في هذا الجزء) فتشمل:

٤. فهم تأثير التقارب proximity يعد مفتاحا رئيسيا لفهم التغيرات المكانية وبالتالي تمثيلها رقميا،
٥. يعتمد التمثيل الجغرافي الرقمي علي المقياس و مستوي التفاصيل المطلوب،
٦. القياسات التي نجريها في الواقع تكون مترابطة أو معتمدة علي بعضها co-vary ومن المهم فهم طبيعة هذا الترابط.

وهناك خاصية سابعة سنتناولها بالشرح في فصل منفصل قادم وهي:

٧. حيث أن كل تمثيل - تقريبا - يكون غير كامل incomplete فأنه بالطبع سيكون غير دقيق un-certain تماما.

٣٣-٨ الارتباط المكاني

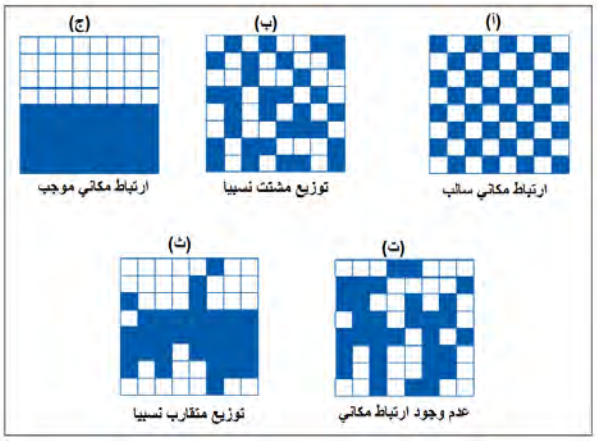
عند تحليل سلسلة زمنية time series من البيانات فان الارتباط autocorrelation بين مفردات هذه المجموعة من البيانات يكون ارتباطا أحادي البعد one-dimensional، فالتغير بين قيم البيانات يكون معتمدا فقط علي الزمن. فمثلا أسعار قطع الأراضي في مدينة ما ستتغير فقط من وقت إلي آخر (صعودا أو حتى هبوطا). ومن ثم فأن تحليل مجموعة البيانات هذه يكون مباشرا أو صريحا straightforward حيث أن التغيرات ذاتها تكون زمنية بطبيعتها. لكن البيانات الجغرافية قد تختلف زمنيا، إنما تختلف في الأساس اختلافا مكانيا، وبالتالي فأن الارتباط بينها يكون ارتباطا مكانيا spatial autocorrelation في الغالب ثنائي الأبعاد two dimensional (وقد يكون أيضا ثلاثي الأبعاد three dimensional). فمن السهولة معرفة الفروق المكانية بين منطقة حوض الأمازون و منطقة دلتا نهر النيل، وذلك بناءا علي معرفة الموقع المكاني (خطوط الطول و دوائر العرض) لكلاهما علي سطح الأرض وبالتالي معرفة تأثيرات البيئية في كل موقع. وبصفة عامة فأن التغيرات المكانية أو الجغرافية قد تكون بسيطة و ملحوظة كما في تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في مجال الخدمات العامة، وقد تكون معقدة وتستغرق فترة زمنية طويلة كما في تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في دراسة التصحر والتغيرات المناخية.

من أهداف التمثيل الجغرافي الرقمي أن يمدنا بقدرة تحليلية علي التنبؤ بالتغيرات المستقبلية أيضا. وبالتالي فنجن نحتاج لمعرفة كيف يمكن لعنصرين أن يترابطا مكانيا أو كيف يكون تأثير كلا منهما علي الآخر. فعلي سبيل المثال فأن المخططين يهتمون بمعرفة كيف سيؤثر إنشاء طريق عام أو خط مترو جديد داخل مدينة علي أسعار الأراضي بها. ومن هنا فأن دراسة أنماط التوزيع المكاني لعنصر أو ظاهرة مكانية سيؤثر علي عنصر مكاني آخر بناءا علي مدي الارتباط والتأثير المكاني لكلاهما.

إن بناء تمثيلا جيدا للواقع الجغرافي أو المكاني في نظم المعلومات الجغرافية يعتمد علي معرفتنا بطبيعة التغيرات المكانية، وطبيعة الارتباط المكاني بين العناصر و الظاهرات الجغرافية. فهذه العناصر هي التي تحدد لنا مستوي التفاصيل المنشود لنظام معلومات جغرافي معين، وتحدد أيضا كيفية اختيار العينات samples، وكيفية عمل التعميم generalization من هذه العينة المقاسة.

يقيس الارتباط المكاني درجة التماثل بين كلا من البيانات المكانية (المواقع) والبيانات غير المكانية attributes بين مجموعة من الأهداف. فان كان هناك تماثل بين المواقع و العناصر غير المكانية فيكون هناك نموذج لارتباط مكاني موجب positive spatial autocorrelation بين هذه الأهداف. أما في حالة وجود التماثل بين المواقع فقط (أهداف قريبة من بعضها مكانيا) ووجود اختلاف بين العناصر غير المكانية للأهداف فهذا نموذج الارتباط المكاني السلبي negative spatial autocorrelation. أما الارتباط المكاني الصفري zero spatial autocorrelation فيحدث عندما تكون العناصر غير المكانية لا تعتمد علي الموقع. ونري في الشكل التالي عدة نماذج أو أنماط للارتباط المكاني لشكل مكون من ٦٤ أو بكسل خليه حيث كل خليه قد تأخذ أحد احتمالين فقط (أبيض أو أزرق في الشكل). ففي الشكل (أ) نري حالة الارتباط المكاني السلبي بين الخلايا المتجاورة، بينما الشكل (ج) يوضح حالة الارتباط المكاني الموجب حيث نري كلا نوعي الخلايا ظاهرين بتماثل و تناغم منتظم. والأشكال الثلاثة الأخرى توضح أنماطا

متوسطة من الارتباط المكاني ما بين الارتباط الموجب و الارتباط السالب، فالشكل (ت) يوضح عدم وجود ارتباط مكاني أو بمعني آخر وجود استقلال مكاني spatial independence بينما الشكل (ب) يمثل حالة التوزيع المشتت dispersed نسبيا والشكل (ث) يوضح حالة التوزيع المتقارب clustered نسبيا.



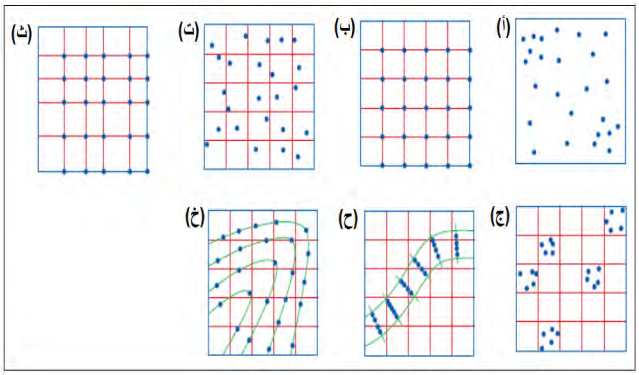
شكل (٣٣-٧) أنماط الارتباط المكاني

٣٣-٩ اختيار العينة المكانية

من الصعب تمثيل العالم الحقيقية بكافة تفاصيله و مفرداته، ولذلك فنحن نقوم باختصار أو تلخيص الواقع من خلال "عينة sample" مختارة يمكنها أن تمثل طبيعة البيانات الجغرافية. ويمكن أن يكون إطار العينة محددا بعنصر واحد تسعي لدراسته أو محددا بحدود منطقة مكانية. فيمكننا أن نري عملية اختيار العينة sampling كأنها عملية اختيار مجموعة من النقاط من مجال متصل، أو عملية اختيار بعض الأهداف وإهمال البعض الآخر. بل أن عملية التمثيل الجغرافي برمتها ما هي إلا عملية اختيار للعينات بأسلوب علمي لكي يمكن تمثيل العالم الحقيقي. وإذا نظرنا بتمعن إلي عملية الاستشعار عن بعد فهي في حقيقتها عملية اختيار عينة، فكل خليه في المرئية الفضائية تحمل قيم الانعكاس "المتوسط" للأهداف الموجودة بالفعل داخل الخلية أو البكسل.

يؤكد علم الإحصاء (وخاصة التقليدي) علي أهمية مبدأ "العشوائية randomness" في تصميم أساليب أخذ العينات، ويمثل الشكل التالي (أ) الاختيار العشوائي للعينات. لكن هذا المبدأ قد لا يكون فعالا وقد يعطي اختيارا مركزا للعينات في منطقة دون منطقة أخري، وخاصة في حالة كون حجم العينة قليل مقارنة بحجم المجتمع التي تؤخذ منه هذه العينة. وهنا فأن أسلوب العينة المنتظمة systematic (الشكل ب) قد يحل هذه المشكلة باختيار نقطة عينة كل فترة مكانية interval محددة. إلا أن هذا الأسلوب أيضا قد يواجه مشكلة في بعض الحالات، فكمثال في حالة أخذ عينة كل ١ كيلومتر في مدينة بغرض دراسة دخل السكان، فمن الممكن أن يكون معظم المنازل المختارة من فئة محدودي الدخل مما يجعل العينة غير معبرة عن الحالة الاقتصادية لكل سكان المدينة. وهذا يجعلنا نلجأ لطرق أخري تجمع بين كلا أسلوبي العشوائية و الانتظام، ففي الشكل ت يمكن اختيار نقطة العينة عشوائيا داخل كل خليه من خلايا، بينما في الشكل ث يمكن تغيير حجم الخلية أو البكسل

ثم إتباع الطريقة المنتظمة. وأحيانا نلجأ لحصر قياساتنا الميدانية بطريقة معينة (شكل ج) خاصة في حالة كون المنطقة المكانية كبيرة مما يجعل التكلفة الاقتصادية لجمع العينات عالية. فمثلا يمكن جمع عينات عن الآراء السياسية و الانتخابية للسكان عند مراكز التسوق بدلا من مسح كامل المدينة. وتصلح هذه الطرق من طرق اختيار العينات في حالة عدم معرفتنا بالتركيب المكاني spatial structure للظاهرة المراد تمثيلها، أو في حالة أن الظاهرة تمتد في جميع الاتجاهات الجغرافية. إلا أن بعض الحالات و بعض الظاهرات المكانية يكون لها تركيب مكاني معلوم مسبقا، وبالتالي فنحن في حاجة لابتكار طرق أخذ العينات طبقا لتطبيقات محددة. فعلي سبيل المثال يمكن أخذ العينات علي مسار محدد profile لتمثيل تغير التربة في هذا الاتجاه المحدد سلفا (شكل ح)، أو أخذ العينات علي خطوط الكنتور (شكل خ).



شكل (٣٣-٨) طرق اختيار العينة

وتجدر الإشارة إلي أن حجم العينة قد يكون كبيرا في حالة أن الظاهرة المكانية قيد الدراسة تكون موزعة بصورة غير متجانسة مكانيا علي منطقة جغرافية كبيرة. وفي مثل هذه الحالات من الأفضل أن يتم تقسيم هذه المنطقة إلي مناطق أصغر، واختيار أسلوب مناسب لأخذ العينة في كل منطقة بناءا علي معلوماتنا المسبقة عن الظاهرة وتغيراتها المكانية. بمعني أن فترة العينة interval قد تتغير من جزء إلي آخر من منطقة الدراسة. ونخلص بذلك إلي أن اختيار العينة من أهم خصائص بناء نظام جغرافي فعال لدراسة ظاهرة (أو ظاهرات) مكانية معينة لكي يكون النظام معبرا بكفاءة عن العالم الحقيقي. أيضا يجب الأخذ في الاعتبار عدة عوامل أخري عند اختيار العينات ومنها علي سبيل المثال توافر المواد اللازمة لأخذ العينة (والقياسات إن وجدت) وأيضا تكلفة أخذ العينة و سهولة الوصول إلي كافة أرجاء منطقة الدراسة.

٣٣-١٠ تأثير الُبعد أو مسافة التأثير

يعتمد التمثيل الاختياري (من خلال العينة) علي معرفة تأثير الظاهرة قيد الدراسة ما بين كل نقطتين من نقاط أخذ العينة ذاتها، وهذا أحد خصائص البيانات الجغرافية. وهنا فنحن بحاجة لعملية استنباط interpolation وأيضا عملية وزن weight للقياسات المتجاورة. تعتمد نظرية المجالات المتصلة علي أن المجال يتغير بصورة بسيطة كلما تحركنا من نقطة لأخرى. فعلي سبيل المثال فأن

تأثير التلوث الكيمائي سيقل أو ينخفض بصورة مطردة كلما بعدنا عن مصدر التلوث ذاته، وأيضا سينخفض التلوث الضوضائي الصادر من الطائرات بصورة خطية كلما ابتعدنا عن مدرج المطار.

إن طبيعة البيانات الجغرافية تختلف من نوع إلي آخر، وبالتالي فهناك عدة طرق لتقدير تأثير الُبعد أو المسافة التي يضمحل عندها التأثير distance decay لكل ظاهرة جغرافية أو في كل تطبيق من تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية. ويقدم الشكل التالي عدة أنواع افتراضية في صور رياضية، حيث الرمز b يمثل العنصر الذي يؤثر علي معدل تغير وزن w (أو أهمية) للظاهرة. فكلما زادت قيمة b دل ذلك علي أن التأثير أو التغير يكون سريعا، والعكس صحيح. وفي معظم التطبيقات فأن اختيار معادلة التأثير يعتمد علي الخبرة المسبقة للظاهرة قيد الدراسة. وتعد معادلة مسافة الخط المستقيم linear distance أبسط الصور الرياضية لتقدير مسافة اضمحلال التأثير كالتالي:

$$w = a - b\,d \qquad (33\text{-}1)$$

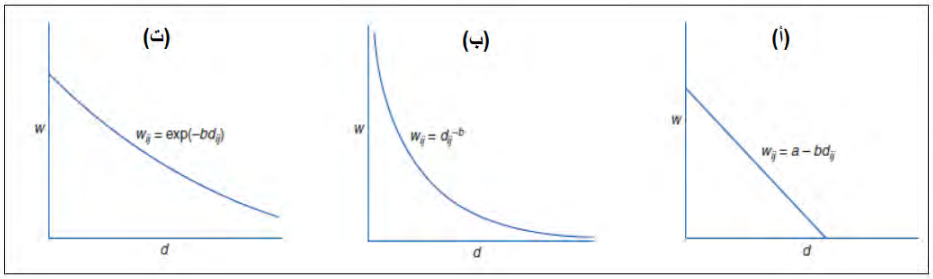
وتستخدم هذه المعادلة مثلا في تقدير مسافة اضمحلال (أو تلاشي) تأثير الضوضاء الصادرة من مدرج طائرات في مطار معين.

أما معادلة مسافة الأس السالب negative power distance (شكل ب) فقد تم استخدامها في تقدير تغير الكثافة السكانية اعتمادا علي المسافة من مناطق الإحصاء ذاتها، وتأخذ الصورة الرياضية:

$$w = d^{-b} \qquad (33\text{-}2)$$

كما استخدمت معادلة مسافة التوافق الأسى السالب negative exponential statistical fit في دراسات الجغرافيا البشرية خاصة في حساب تأثير تفضيل مركز تجاري بناءا علي مسافة العد منه، وتأخذ الصورة الرياضية:

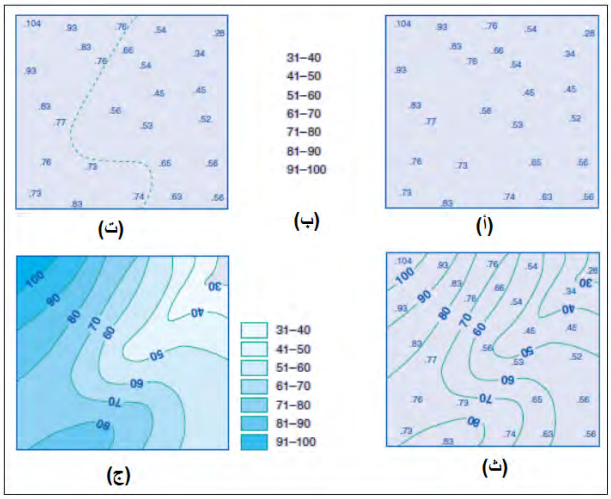
$$w = e^{-b\,d} \qquad (33\text{-}3)$$



شكل (٣٣-٩) بعض طرق حساب مسافة التأثير

هذه الطرق (أو المعادلات) لتقدير مسافة اضمحلال التأثير طرق مثالية تفترض أن تأثير الظاهرة يتغير بانتظام في جميع الاتجاهات، وهذا قد يكون صحيحا في كثير من التطبيقات. فمثلا يعتمد

الكارتوجرافيون علي هذا المبدأ في استنباط خرائط خطوط التساوي سواء الخطية isoline أو المساحية isopleths. فكما يوضح شكل التالي (بصورة مبسطة) فأن خطوات إنشاء خرائط التساوي تبدأ بتوقيع أماكن نقاط العينة مع تحديد العنصر غير المكاني attribute عند كل نقطة (أ) ثم تحديد فترات الاستنباط المطلوبة (ب) ثم استنباط قيم العناصر غير المكانية للفئات المحددة (ت)، ثم توقيع حدود كل فئة علي الخريطة (ث)، وأخيرا استخدام الألوان لبيان النمط العام للتغير الحادث (ج). لكن وعلي الجانب الآخر فهناك عدة تطبيقات لا يكون فيها تغير الظاهرة منتظما، حيث يوجد تغير مفاجئ abrupt في مواقع محددة. فعلي سبيل المثال فأن التضاريس و الجيولوجيا تتغير بصورة مفاجئة (وليست منتظمة) عند الجرف و الصدع علي التوالي. وكمثال آخر فأن مبيعات متجر معين لا تعتمد فقط علي المسافة من موقع المتجر، إنما علي عدد آخر من العوامل مثل شبكة المواصلات والطرق لهذا الموقع، وأيضا العوامل الاقتصادية-الاجتماعية لرواد المتجر، والعروض الشرائية المقدمة من هذا المتجر مقارنة بالمتاجر القريبة الأخرى.

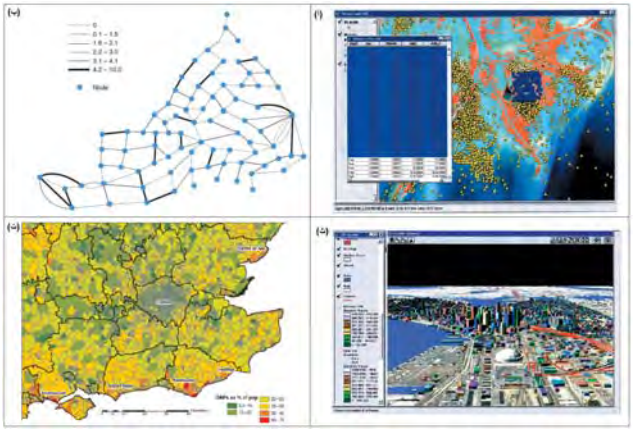


شكل (٣٣-١٠) خطوات إنشاء خرائط خطوط التساوي

٣٣-١١ قياس تأثير المسافة كارتباط مكاني

إن فهم طبيعة البيانات الجغرافية يساعدنا في اختيار طريقة جيدة لاختيار العينات واستنباط القيم بين نقاطها المقاسة بهدف بناء تمثيل جيد للعالم الحقيقي. لكن في الكثير من التطبيقات لا يكون لدينا فهم جيد للتغيرات المكانية و طبيعتها و الارتباط المكاني بينها البعض، ولذلك فأن تحليل الارتباط المكاني يعد هاما للغاية كأحد التحليلات المكانية للبيانات الجغرافية. وكما سبق الذكر فأن طرق قياس الارتباط المكاني تعتمد علي نوعية الظاهرة ذاتها إن كانت أهدافا منفصلة أو مجالات متصلة. ففي حالة كون الظاهرة مجالا متصلا فان الارتباط المكاني يقيس مدي نعومتها بناءا علي قيم نقاط العينة، بينما في حالة الظاهرات ذات الأهداف المنفصلة فأن الارتباط المكاني يقيس تتوزع قيم البيانات غير المكانية attribute في الأهداف بالتمييز بين حالات التركز و التباعد و العشوائية. والشكل ٤-٥ يوضح هذه الحالات الأربعة، ففي الشكل (أ) نري أهداف من نوع النقاط تمثل آبار المياه (بيانات نقطية point data) في منطقة مساحتها ٣٠ كيلومتر مربع، مع معرفة قيم عمق

المياه الجوفية عند كل نقطة، ومن الشكل نستخلص وجود ارتباط مكاني قوي. أما الشكل (ب) فيمثل عدد حوادث المرور علي الطرق (بيانات خطية line data) في جنوب مدينة أونتاريو الكندية. ويدل الارتباط المكاني الضعيف علي وجود عوامل محلية (مثل سوء حالة الطرق عند التقاطعات) هي التي تؤثر علي هذه الإحصاءات. أما الشكل (ت) فيمثل نمط الحالة الاقتصادية-الاجتماعية (بيانات مساحية area data) في جنوب شرق انجلترا ويجيب علي السؤال إن كان هناك عاملا مشتركا -علي المستوي الإقليمي- في التركيب الأسري. بينما يمثل الشكل (ث) فيمثل ارتفاعات المباني (بيانات حجميه volume data) في قلب مدينة سياتل الأمريكية.



شكل (٣٣-١١) أمثلة لتطبيقات دراسة الارتباط المكاني

مع أن طرق قياس أو حساب الارتباط المكاني سيتم تناولها بالتفصيل في فصل قادم، إلا أننا سنحاول أن نلقي الضوء وبصورة مبسطة علي كيفية حساب التماثل بين المناطق المتجاورة. لنأخذ مثالا لعدد من المساحات المتجاورة كما في الشكل التالي (أ). هنا نبدأ بتكوين مصفوفة matrix سنطلق عليها اسم مصفوفة الوزن w حيث سيقيس كل عنصر فيها "تماثل الموقع" بين كل نطاق. وتكون قيمة العنصر في مصفوفة الوزن w_{ij} (حيث i يشير للصف و j يشير للعمود) اما القيمة ١ في حالة التجاور أو القيمة صفر في حالة عدم التجاور. فمثلا النطاق ١ (في الشكل أ) متجاور مع كلا من النطاقات ٢، ٣، ٤ ومن ثم فأن قيمة عناصر مصفوفة الوزن عند الصف الأول (المقابل للنطاق ١) ستكون ١ عند الأعمدة ٢، ٣، ٤ بينما ستكون صفر عند باقي الأعمدة (الشكل ب).

(ب)

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	1	1	0	0	0	0
2	1	0	1	0	0	1	1	0
3	1	1	0	1	1	1	0	0
4	1	0	1	0	1	0	0	0
5	0	0	1	1	0	1	0	1
6	0	1	1	0	1	0	1	1
7	0	1	0	0	0	1	0	1
8	0	0	0	0	1	1	1	0

(أ)

شكل (٣٣-١٢) مثال لموزايك من النطاقات

وبهذه الطريقة المبسطة فأن مصفوفة الوزن ستمثل مدي التماثل في الموقع (التجاور) بين نطاقات منطقة ممثلة كهدف متصل. وفي الخطوة التالية سنقوم - وبنفس الطريقة - بتكوين مصفوفة ثانية تمثل مدي التشابه بين العناصر غير المكانية attribute لهذه النطاقات أو المساحات، ولنسميها c_{ij}. وبضرب كلا المصفوفتين (أي بضرب كل صف من المصفوفة الأولي في العمود المقابل له في المصفوفة الثانية وجمع قيم حاصل الضرب معا) ينتج لنا معيار للارتباط المكاني:

$$\sum_i \sum_j c_{ij} w_{ij} \qquad (33\text{-}4)$$

وهناك عدة طرق رياضية أكثر تفصيلا لحساب و قياس الارتباط المكاني مثل معامل موران Moran Index علي سبيل المثال.

٣٣-١٢ التبعية بين الظاهرات المكانية

يعطينا الارتباط المكاني فكرة جيدة عن العلاقة الداخلية بين مفردات ظاهرة واحدة في الفراغ، لكن هناك عنصر آخر مهم أيضا من خصائص البيانات الجغرافية ألا وهو التبعية dependence أو الاعتماد بين عدة ظاهرات في نفس الموقع المكاني.

في علم الإحصاء فأن تخليل الانحدار regression يقيس مدي اعتماد عنصر (ولنسميه العنصر التابع dependent) علي عنصر آخر (ولنسميه العنصر المستقل independent).وكمثال فأن سعر قطعة أرض في مدينة تعتمد عي عدد من العوامل مثل مساحة الأرض وبعدها عن الخدمات مثل المدارس و مجمعات التسوق و محطات المواصلات ...الخ. وبصورة رياضية فأن:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \ldots\ldots X_k) \qquad (33\text{-}5)$$

حيث: Y هو العنصر التابع، والعناصر $X_1, X_2, X_3, \ldots\ldots X_k$ (من ١ إلي k) هي العناصر المستقلة، بينما f تمثل الدالة الرياضية التي تربط بينهم. لكن هناك نقطتين هامتين يجب أخذهما في الاعتبار هنا وهما : (١) أننا قد لا نستطيع معرفة جميع العناصر المستقلة التي قد تؤثر علي العنصر التابع نفسه، (٢) أن قياساتنا لن تكون دقيقة بالكامل. ولذلك فغالبا ما نضيف عنصر جديد الي المعادلة السابقة لتصبح:

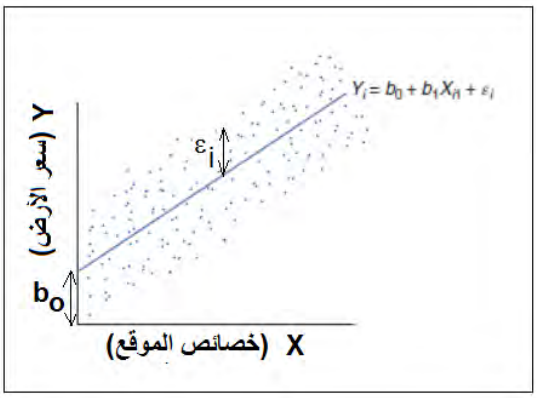
$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \ldots\ldots X_k) + \varepsilon \qquad (33\text{-}6)$$

حيث ε يمثل الخطأ.

فإذا اعتبرنا حالة الخط المستقيم كدالة تمثل العلاقة بين العنصر التابع و العناصر المستقلة:

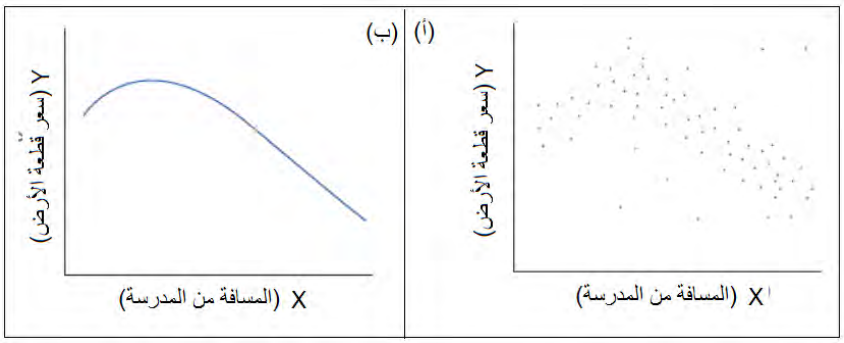
$$Y = b_o + b_1 X_1 + b_2 X_2, + b_3 X_3, \ldots\ldots + b_k X_k + \varepsilon \qquad (33\text{-}7)$$

ويكون هدف تحليل الانحدار هو حساب قيم المتغيرات b_k ..... $b_1, b_2, b_3,$ وهي التي نسميها عناصر الانحدار regression parameters ، حيث b_o يسمي العنصر الثابت أو العنصر القاطع intercept (الشكل ٤-٧). وفي هذا المثال فأن الاتجاه العام الصاعد يدل علي أنه كلما زادت خصائص الموقع كلما أرتفع سعر قطعة الأرض.



شكل (٣٣-١٣) الانحدار الخطي

في بعض الحالات إذا حاولنا دراسة تأثير عنصر واحد فقط من العناصر المستقلة (وليكن مثلا المسافة من المدرسة في المثال الحالي) علي العنصر التابع (سعر قطعة الأرض) فقد نجد العلاقة بينهما ضعيفة وليست علاقة الخط المستقيم التصاعدي كما في الحالة السابقة. فبالنظر للشكل التالي (أ) نجد النقاط التي تمثل القياسات تأخذ شكلا مبعثرا وليس متقاربا، وهنا لا يمكننا تحديد العلاقة المباشرة بين العنصر التابع و العنصر المستقل. وتجدر الإشارة لوجود عدد من الاختبارات (أو المعاملات) الإحصائية التي تقدم لنا حكما علي جودة وكفاءة معادلة الانحدار التي نحصل عليها (مثل المعامل المسمي R^2). أيضا هناك بعض الحالات أو الظاهرات التي ترتبط فيما بينهم بنوع آخر من الدوال الرياضية بخلاف معادلة الخط المستقيم. ففي الشكل (ب) نري أن العلاقة بين سعر قطعة الأرض والبعد عن المدرسة ليست خطا مستقيما صاعدا، إنما هي علاقة غير مستقيمة وهابطة. بمعني أن كلما زادت المسافة من المدرسة كلما أنخفض سعر قطعة الأرض.

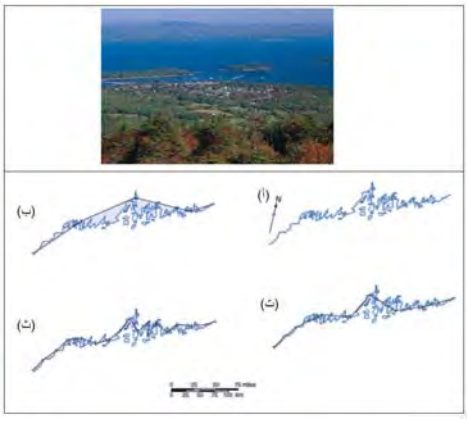


شكل (٣٣-١٤) الانحدار غير الخطي

٣٣-١٢ التغيرات الفجائية في البيانات الجغرافية

توجد الكثير من الظاهرات التي لا تكون مجالا متصلا بصورة ملساء smooth بل يوجد بها التغيرات المفاجئة الحادة. فعلي سبيل المثال فأن تضاريس منطقة جبلية تتغير بصورة حادة مما يجعل من غير المناسب أن نعتمد علي الاستنباط أو الانحدار لتمثيل العلاقة بين قيعان الأودية و قمم الجبال في هذه المناطق. أيضا قد نجد في المدن تغيرات مفاجئة في نمط العمران في جزء من المدينة (ناطحات سحاب و أبراج عالية) مما يجعل تمثيل الكثافة السكانية للمدينة يقفز بشدة في بعض المواقع الجغرافية. وفي مثل هذه الحالات فأن الطرق الرياضية التقليدية لن تكون مناسبة لتعميم هذه الظاهرات.

سنتعرض لمثال بسيط يوضح هذه المشكلة في التمثيل الجغرافي، فالشكل التالي (أ) يمثل تعرجات خط الشاطئ في جزء من مدينة ماين الفرنسية، والسؤال الآن هو كم يبلغ طول هذا الشاطئ؟ لنبدأ في الشكل (ب) بقياس المسافة بفترة تبلغ ١٠٠ كيلومتر، وسنجد أن عدد القياسات (أو الأرصاد) تبلغ ٣.٤ فترة، مما يجعل طول الشاطئ يبلغ ٣٤٠ كيلومتر. الآن سنغير فترة قياس المسافة لتصبح ٥٠ كيلومتر (الشكل ت)، وسنجد أن عدد القياسات سيكون تقريبا ٧.١ مما يجعل طول الشاطئ يساوي ٣٥٥ كيلومتر. أما إذا جعلنا فترة القياس كل ٢٥ كيلومتر (الشكل ث) فأن عدد القياسات سيكون تقريبا ١٦.٦ وبالتالي سيكون طول الشاطئ ٤١٥ كيلومتر. وهكذا كلما قللنا فترة القياس حصلنا علي تفاصيل أكثر و من ثم نتج لدينا طول جديد للشاطئ. ومهما قمنا بتقليل فترة القياس لن تتفق النتائج مع بعضها البعض، حتى وان بلغت فترة القياس السنتيمتر الواحد! فنتيجة القياس هنا ستعتمد علي مستوي التفاصيل المنشود. وهنا نقول أن التعقيد في خط الشاطئ وتعرجاته الشديدة لا يمكن تمثيله بدقة بخط مستقيم (أحادي البعد) وأيضا - وفي نفس الوقت - لا يمكن تمثيله بمساحة (ثنائية الأبعاد). بل يمكننا القول أن هذه الظاهرة لها "بعد كسري fractional dimension" ما بين ١ (الخط) و ٢ (المساحة). وهذه النظرية المسماة "الهندسة الكسرية fractional geometry" تم ابتكارها علي يد الجغرافي لويس ريتشارد سون Lewis Richardson في الأربعينات من القرن العشرين الميلادي، كطريقة جديدة لتلخيص و تمثيل مثل هذه الظاهرات الجغرافية. وسنتعرض لاحقا لتطبيق هذه النظرية في قياسات أطوال الخطوط باستخدام نظم المعلومات الجغرافية.



شكل (٣٣-١٥) مثال لتغير التمثيل بتغير مستوي التفاصيل

وفي نهاية هذا الجزء يجب التأكيد علي أن أحد أهداف نظم المعلومات الجغرافية يتمثل في إنشاء علاقة بين البيانات الجغرافية والنظريات العلمية سواء الجغرافية أو الرياضية أو الإحصائية بهدف الوصول إلي تمثيل جيد للواقع الحقيقي. أي أن نظم المعلومات الجغرافية تعتمد علي "الاستقراء induction" أو التفكير في القياسات والأرصاد جنبا إلي جنب مع "الاستنباط deduction" أو التفكير في النظريات و المبادئ العلمية، ولا يمكن فصل أحدهما عن الآخر لتطوير التمثيل الجغرافي الجيد.

٣٣-١٣ دقة و جودة تمثيل العالم الحقيقي

يأتي عدم اليقين uncertainty (أو عدم الدقة التامة) في التمثيل الجغرافي من الحقيقة التي أوردناها سابقا وهي أن أي تمثيل يكون غير كامل incomplete، ومن ثم أي نظام معلومات جغرافي قد يتعرض لأخطاء في القياس أو عدم الحداثة أو التعميم الشديد. ومن ثم فقد ظهر مصطلح "عدم اليقين " ليعبر عن تفاعل عدة عوامل مؤثرة علي البيانات الجغرافية مثل الخطأ errors وعدم الدقة inaccuracy و الالتباس ambiguity و الغموض vagueness. ويمكن تعريف عدم اليقين علي أنه مقياس لعدم فهم المستخدم للفروق بين العالم الحقيقي وقاعدة البيانات الجغرافية، أو بين الظاهرة الحقيقية و البيانات الممثلة لها. وبالتالي فأن مصطلح عدم اليقين يتم استخدامه في علم نظم المعلومات الجغرافية ليعبر عن كل العوامل التي تصف عدم كمال التمثيل الجغرافي الرقمي، أو يتم استخدامه ليعبر عن مؤشر للدقة العامة في نظام المعلومات الجغرافي.
من الممكن تخيل أن عدم اليقين في نظم المعلومات الجغرافية يتكون من ثلاثة مرشحات أو مصافي وهي الإدراك و القياس و التحليل، وكلا منهم يؤثر أو يشوه بطريقة أو بآخري مستوي تعقيد العالم الحقيقي والطريقة التي يمكن أن نراه بعد تمثيله

شكل (٣٣-١٦) مفهوم عدم اليقين في نظم المعلومات الجغرافية

٣٣-١٤ عدم اليقين في إدراك الظاهرات المكانية

تختلف البيانات الجغرافية عن أي نوع آخر من البيانات بطريقة كبيرة كما رأينا حتى الآن في الفصول السابقة. فبعض الظاهرات الجغرافية لها امتداد مكاني extend من الصعب تحديده بدقة، فمقلا ما هو الامتداد المكاني لتأثيرات البطالة؟ أو ما هو الامتداد المكاني لتجمع عدد من حالات

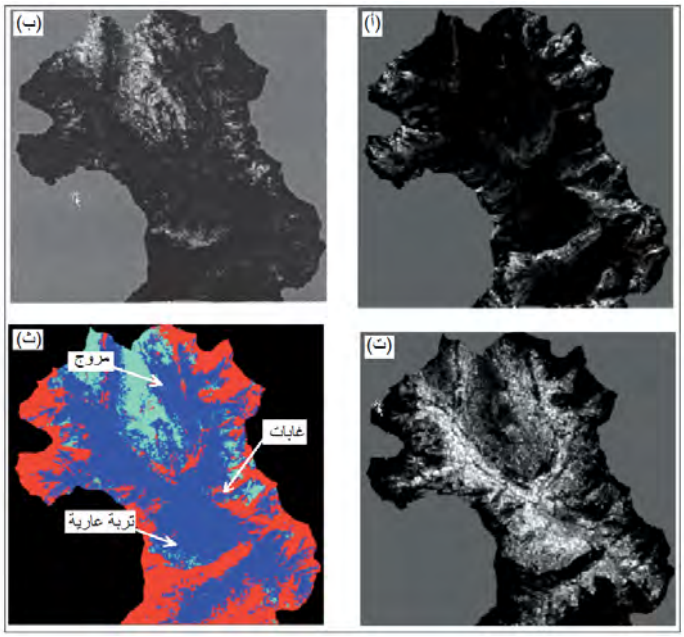
الإصابة بمرض ما؟. أيضا توجد بعض الظاهرات التي من الصعب تحديد آثارها بدقة، فمثلا كيف يمكن تحديد جميع الآثار البيئية لتسرب الزيت من ناقلة نفط؟ أو كيف يمكن دراسة العلاقة بين المؤهلات البشرية للأفراد ومعدل البطالة؟. وبالتالي فهناك عدة حالات لا يمكننا فيها تحديد وحدات طبيعية natural units لاستخدامها في التحليل الجغرافي أو المكاني.

يأتي أول عناصر عدم اليقين في الإدراك (وهو الغموض vagueness) من عدم قدرتنا علي تحديد امتداد عنصر مكاني بدقة.فعلي سبيل المثال ففي الصور الجوية aerial photographs لا يمكننا التفرقة التامة بين العناصر المكانية الممثلة علي الصورة. في مثل هذه الحالة فنحن نقوم بخطوتين قد يحتملان عدم اليقين في كلا منهما: (١) تعيين حدود مكانية للظاهرة، (٢) إعطاء الظاهرة قيمة البيانات غير المكانية attribute. وبالتأكيد فأن عدم اليقين في هاتين الخطوتين سيؤثر علي التحليل الإحصائي للبيانات وأيضا علي طريقة التمثيل الرقمي لهذه الظاهرات.

في بعض الحالات يوجد التباس ambiguity في تعريف بعض البيانات غير المكانية للظاهرات الجغرافية حيث تختلف التعريفات اللغوية الشائعة لنفس المصطلح من منطقة إلي أخري. فعلي سبيل المثال فأن كلمة "سمسار أراضي" في أمريكا هي realtor بينما هي في انجلترا estate-agent. وأيضا فأن أسماء المواقع المكانية أو المدن قد تتغير مع مرور الزمن، مما قد يسبب مشكلة في تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية التاريخية historical GIS. وقد يحدث الالتباس أيضا من المؤشرات التي قد نستخدمها للدلالة علي تأثير ظاهرة جغرافية معينة، فالمؤشرات indicators قد تكون مباشرة أو غير مباشرة. فعلي سبيل المثال فأن قيمة دخل الأسرة هو مؤشر مباشر علي مستوي الإنفاق ومن ثم مستوي الخدمات في بقعة معينة، بينما يمكن استخدام "معدل امتلاك أكثر من سيارة" كمؤشر غير مباشر في حالة عدم الوصول لقيم الدخل في حد ذاتها. وبناءا علي كيفية فهمنا و تقييمنا لهذه المعدلات فقد يحدث الالتباس ومن ثم عدم اليقين. أما في الظاهرات الطبيعية فقد يحدث الالتباس أيضا من اختلاف تعريف أنواع نفس الظاهرات المكانية. فعلي سبيل المثال فهناك ستة جهات حكومية في أمريكا تنتج خرائط استخدامات الأراضي، ولكل جهة منهم تصنيف مختلف لأنواع وأقسام الأراضي الرطبة wetland ومن ثم فقد يحدث التباس عند استخدام خرائط من أكثر من جهة من هذه الجهات في إنشاء نظم معلومات جغرافية.

تتمثل أحد طرق التغلب علي مشاكل عدم اليقين في ما يعرف باسم "التفسير المرجح". فعلي سبيل المثال فأن تحديد نوع المحصول في أحد الحقول الظاهرة علي مرئية فضائية قد يحتمل نوعين من المحاصيل، لكننا سنعتمد علي اختيار التحديد الأكثر احتمالا. فعندما نقول أن هذا الحقل قد يكون حقل قمح بنسبة ٨٠% وقد يكون حقل شعير بنسبة ٢٠%، فالاحتمال الأكثر قبولا هو القمح. وبهذا الأسلوب فنحن نتجه لاستخدام معني جديد وهو ما يسمي المنطق الضبابي fuzzy logic خلافا للأسلوب التقليدي المعروف باسم المنطق الثابت أو المحدد. ففي المنطق الضبابي نتخيل أن لدينا مقياس لعدم اليقين يتراوح بين الصفر و الواحد، فكلما كنا متيقنين تماما كان هذا المقياس يقترب من ١ (مثلا ٠.٩٩) وكلما زاد عد اليقين أو الشك كلما أقترب المقياس من الصفر. وبمعني آخر فأن المنطق الضبابي يدل علي وجود "درجة نسبية" لمدي انتماء عنصر لمجموعة محددة. ومن أهم مميزات أسلوب المنطق الضبابي أنه يتيح لنا التعامل مع مجموعات البيانات التي لا يمكن بدقة تحديدها أو الفصل بين حدودها. وهناك العديد من تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية التي تستفيد من المنطق الضبابي مثل استخدامات الأراضي، أنواع التربة، أنواع غطاءات الأرض، أنواع

النباتات .. الخ. ويقدم الشكل التالي مثالا لتطبيق المنطق الضبابي في تصنيف المجموعات، وقد تم التطبيق علي مرئية فضائية مع الأخذ في الاعتبار آراء خبراء تفسير المرئيات كمدخلات input للعملية. ففي الشكل (أ) تم عمل مجموعات المنطق الضبابي للتربة العارية، حيث نجد القيم الكبيرة للمقياس (الداكنة في الشكل) في المناطق المفصلية حيث تمنع التجمعات الجليدية من ظهور النباتات. وفي الشكل (ب) تم عمل مجموعات الغابات حيث تظهر القيم الكبيرة للمقياس في مناطق الميول البسيطة والمتوسطة حيث تكون التربة ثابتة و جيدة التصريف. أما الشكل (ت) فيوضح مجموعات المروج حيث القيم العالية للمقياس في الميول الناعمة عند المناسيب العالية حيث المياه الزائدة ودرجات الحرارة المنخفضة التي تمنع نمو الأشجار. وفي الشكل (ث) تم استنباط خريطة التوزيع المكاني بناءا علي الأشكال الثلاثة السابقة.

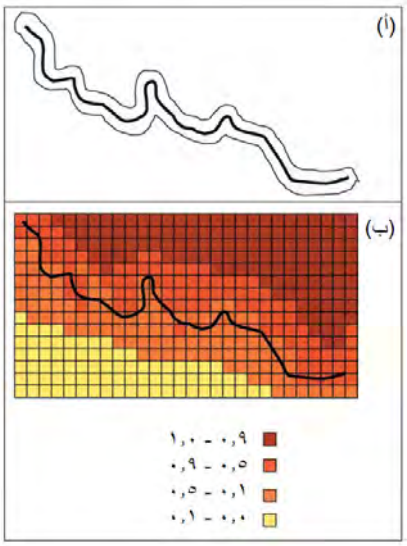


شكل (٣٣-١٧) مثال لتطبيق المنطق الضبابي

٣٣-١٥ عدم اليقين في قياس و تمثيل الظاهرات المكانية

يتمثل المرشح الثاني الذي يؤثر علي الفرق بين العالم الحقيقي والتمثيل الجغرافي في عدم اليقين الذي من الممكن حدوثه في عمليات القياس و التمثيل لظاهرات الواقع الحقيقي. ويظهر هذا التأثير في كلا طريقتي التمثيل سواء طريقة البيانات الخطية vector أو طريقة البيانات الشبكية raster. ففي البيانات الخطية (تمثيل الأهداف المنفصلة) فيوجد عدم يقين في كيفية استخراج الظاهرات الحقيقية. يوضح هذا الشكل التالي حيث نري خط الشاطئ ممثلا علي خريطة بمقياس رسم ١: ٢،٠٠٠،٠٠٠. وبالطبع فأن مقياس رسم هذه الخريطة يمثل تعميما كبيرا للظاهرة الجغرافية، حيث يكون خط الشاطئ ممثلا بمجموعة من الخطوط المستقيمة بحيث لا يمكن استخراج الواقع الحقيقي لخط الشاطئ خاصة في مناطق التعرجات الشديدة. وفي مثل هذه الحالة من الممكن أن نغير طريقة التمثيل من الخط إلي المساحة، بحيث يمكننا رسم مساحة قد تحتوي خط الشاطئ الحقيقي (الشكل أ).

أيضا من الممكن أن نغير طريقة التمثيل ذاتها من التمثيل الخطي إلي التمثيل الشبكي باستخدام طريقة المنطق الضبابي حيث يكون المقياس معبرا عن احتمالية أن تكون الخلية pixel عبارة عن أرض (الشكل ب).



شكل (٣٣-١٨) مثال لعدم اليقين في تمثيل الظاهرات المكانية

بالمثل فهناك درجة من عدم اليقين في البيانات الشبكية raster أيضا، فالحدود بين المجموعات المختلفة ليست حدودا قاطعة. فعلي سبيل المثال في مرئيات الاستشعار عن بعد لا يمكن بدقة عالية تحديد نوع الخلية (البكسل) التي تقع بين مجموعتين مختلفتين من مجموعات استخدام الأراضي. وهذا - أحيانا - يدعونا لاستخدام مصطلح mixel (وليس pixel) أي خلية متعددة، وهي الخلية التي قد يوجد بها نوعين من مكونات المجموعة. وبالطبع فأن عدد هذه الخلايا المشتركة سوف يتناقص كلما زادت قدرة التوضيح المكاني resolution للمرئية الفضائية ذاتها. لكن تجدر الإشارة إلي أنه مهما زادت قدرة التوضيح المكاني فسيوجد عددا -مهما كان صغيرا - من هذه الخلايا المشتركة، مع أن المرئيات ذات قدرة التوضيح المكاني العالية (البكسل الأصغر من ١٠×١٠ متر) تكون أيضا كثيرة النطاقات (من ٧ إلي ٢٥٦ نطاق band).

يمدنا علم الإحصاء بطرق كثيرة لوصف الأخطاء في كلا من القياسات measurements والأرصاد observations، وبالطبع فأن هذه الطرق الإحصائية من الممكن تطبيقها في نظم المعلومات الجغرافية عندما نفكر في البيانات الجغرافية (سواء البيانات المكانية أو البيانات غير المكانية) علي أنها مجموعة من القياسات. فنموذج الارتفاعات الرقمية ما هو إلا مجموعة من قياسات الارتفاعات لنقاط علي سطح الأرض، وخريطة استخدامات الأراضي ما هي إلا (بصورة أو بآخري) مجموعة من الأرصاد لمظاهر سطح الأرض حيث أننا نحدد نوع معين من الاستخدامات لكل موقع. لنأخذ مثال لعدد ٥ من أنواع استخدامات الأراضي في منطقة محددة (لنسميهم A, B, C, D, E علي سبيل المثال). من الممكن أن نرصد في الموقع قطعة أرض يكون لها استخدام من النوع A لكن قد نسجله بالخطأ في قاعدة البيانات الرقمية علي أنه من النوع C

مثلا. ومن ثم فيكون هناك عدم يقين uncertainty في التمثيل الجغرافي الرقمي. الجدول التالي يمثل ما نطلق عليه اسم "مصفوفة التشويش confusion matrix" وهي أسلوب مطبق في تحليل تصنيف المرئيات الفضائية، حيث لكل قطعة تصنيف حقيقي ناتج من الدراسة الميدانية (أكثر دقة لكن أكثر تكلفة أيضا) و تصنيف آخر ناتج من تحليل المرئية أو الصورة الجوية. في هذه المصفوفة فأن السطور تمثل أنواع استخدامات الأراضي الممثلة في قاعدة البيانات الرقمية، بينما الأعمدة تمثل أنواع استخدامات الأراضي كما تم تسجيلها في الطبيعة. أما الأرقام التي تظهر في قطر المصفوفة (المظلل) فتمثل عدد التوافق (في نوع الاستخدام) ما بين الدراسة الميدانية و قاعدة البيانات في هذه المنطقة الجغرافية التي تحتوي ٣٠٤ قطعة أرض.

النوع	A	B	C	D	E	المجموع
A	٨٠	٤	٠	١٥	٧	١٠٦
B	٢	١٧	٠	٩	٢	٣٠
C	١٢	٥	٩	٤	٨	٣٨
D	٧	٨	٠	٦٥	٠	٨٠
E	٣	٢	١	٦	٣٨	٥٠
المجموع	١٠٤	٣٦	١٠	٩٩	٥٥	٣٠٤

فإذا أخذنا مثال للسطر A في المصفوفة فهو يدل علي ١٠٦ قطعة أرض تم تسجيلها في قاعدة البيانات علي أنها من هذا النوع من استخدامات الأراضي، ومن هذه القطه يوجد ٨٠ قطعة فقط متوافقين تماما مع نتائج الدراسة الحقلية (أي أنهم فعلا من النوع A)، بينما يوجد ٤ و ٠ و ١٥ و ٧ قطع تم تسجيلهم - في قاعدة البيانات - علي أنهم من الأنواع B و C و D و E بالترتيب. أي أن هناك ٨٠ قطعة (الرقم علي قطر المصفوفة) يمثلوا عدد القطع الصحيحة في التصنيف (بنسبة = ١٠٦/٨٠= ٧٥.٥%) بينما مجموع باقي الصف (٤+٠+١٥+٧=٢٨) يمثل عدد القطع التي لها تمثيل خطأ (بنسبة = ١٠٦/٢٨=٢٦.٤%).

الآن سننظر للمصفوفة (أو الجدول) ككل وليس عنصر بعنصر، ونجد أن مجموع عناصر القطر (٢٠٩) عند قسمته علي المجموع الكلي لقطع الأراضي (٣٠٤) يمثل ما نطلق عليه مصطلح "نسبة التصنيف الصحيح Percent of Correctly Classified" أو اختصارا PCC ، وهو في هذا المثال = ٢٠٩ / ٣٠٤ = ٦٨.٨%. لكن هذا المؤشر غير دقيق من وجهة النظر الإحصائية، وسنستعيض عنه بمؤشر إحصائي أدق وهو ما يعرف باسم "مؤشر كابا kappa index" ويتم حسابه بالمعادلة التالية:

$$k = \left(\sum_{i=1}^{n} c_{ij} - \sum_{i=1}^{n} c_{i.} c_{.i} / c_{..} \right) \Big/ \left(c_{..} - \sum_{i=1}^{n} c_{i.} c_{.i} / c_{..} \right) \qquad (33\text{-}8)$$

حيث: c_{ii} يمثل العنصر في الصف i والعمود j، ورمز النقطة (أو dot) يمثل المجموع أي أن $c_{i.}$ يمثل مجموع كل الأعمدة في الصف i، بينما الرمز $c_{..}$ يمثل المجموع الكلي، و n تمثل عدد الفئات. وبتطبيق المعادلة (٦-١) علي المثال السابق نجد أن قيمة مؤشر كابا = ٥٨.٣% وهي قيمة أدق من مؤشر نسبة التصنيف الصحيح PCC.

يمكننا الآن التوصل لنتيجة أن مصفوفة التشويش تعد طريقة فعالة للحكم علي أخطاء القياسات والأرصاد، لكن لتكوينها يلزمنا معلومات حقلية دقيقة. وبالطبع فمن وجهة النظر الاقتصادية فلا يمكننا إجراء الدراسة الحقلية علي كل قطع الأراضي في بقعة جغرافية معينة، لكننا نستعيض عن ذلك بإجراء الدراسة الحقلية في عينة عشوائية من قطع الأراضي في هذه البقعة.

تجدر الإشارة لوجود تطبيقات أكثر تعقيدا من مثال استخدامات الأراضي الذي كان يعتمد علي تحديد دقة المضلعات per-polygon accuracy assessment (مضلع بمضلع أو قطعة بقطعة). فمثلا في تصنيف أنواع الغطاء النباتي قد نواجه مشكلة أن كل قطعة بها أكثر من نوع (وليس نوع واحد) من أنواع الغطاءات. ففي هذه الحالة لا يمكن بدقة كبيرة تحديد الحدود المكانية لكل نوع ويكون لدينا مصدر آخر من عدم الدقة وهو خطأ الحدود boundary misallocation بالإضافة لخطأ نوع التصنيف class misallocation ذاته. وغالبا في مثل هذه الحالات نلجأ لطريقة التحليل المعتمدة علي خلية بخلية (بكسل ثم الآخر) per-pixel accuracy assessment بدلا من التحليل مضلع بمضلع.

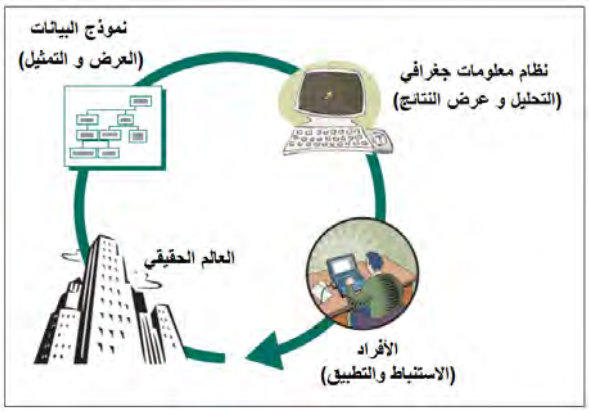
الفصل الرابع و الثلاثين

البيانات وقواعد المعلومات الجغرافية

يقدم هذا الفصل المفاهيم الاساسية لنمذجة و تجميع البيانات المكانية (أو الجغرافية) وأيضا طرق انشاء و صيانة قواعد البيانات الجغرافية بالإضافة لطرق توزيع المعلومات الجغرافية.

٣٤-١ نمذجة البيانات الجغرافية

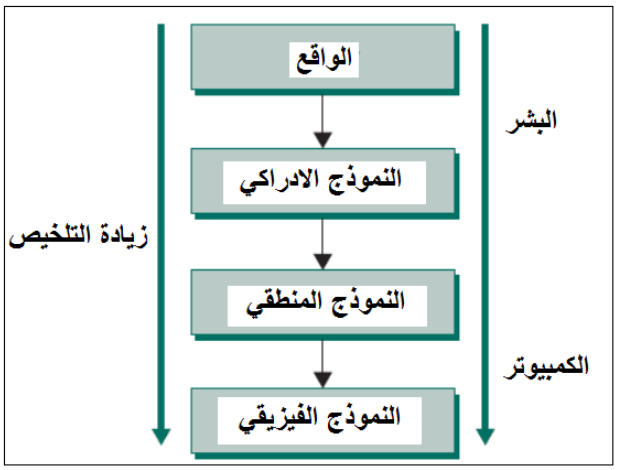
نمذجة البيانات الجغرافية هي عملية تخليص و تمثيل البيانات داخل نظام المعلومات الجغرافي اعتمادا علي نموذج محدد. ويعد نموذج البيانات data model بمثابة القلب في النظام، حيث أنه يمثل مجموعة من العمليات لتمثيل الأهداف و العمليات التي تحدث في العالم الحقيقي تمثيلا رقميا في الكمبيوتر. إن الأفراد (المستخدمين) يتعاملون مع نظام المعلومات الجغرافي لتأدية مهام مثل عمل الخرائط وتحليل أنسب موقع والاستفسار عن البيانات. وكل هذه المهام تعتمد علي الكيفية التي بها تمثيل العالم الحقيقي تمثيلا رقميا، ومن ثم اختيار نموذج البيانات المناسب يعد أمرا هاما للغاية في بناء نظام المعلومات الجغرافي. لكن وكما سبق الذكر فأن العالم الحقيقي معقد بدرجة كبيرة بينما الكمبيوتر يتطلب أرقاما محددة، ومن ثم فهناك اختيارات صعبة يجب عملها في تحديد ما سيتم تمثيله رقميا وكيفية تمثيله أيضا. وعلي مستوي أخر فأن استخدامات نظم المعلومات الجغرافية متعددة وكذلك الظواهر الجغرافية في حد ذاتها. وبناءا عليه فلا يوجد "نموذج بيانات" واحد يصلح لجميع التطبيقات.



شكل (٣٤-١) دور نموذج البيانات داخل نظام المعلومات الجغرافي

عندما نقوم بتمثيل العالم الحقيقي فهناك أربعة مستويات من تلخيص أو تبسيط البيانات (أو التعميم generalization) كما في الشكل التالي. أولا: الواقع reality وهو المكون من ظاهرات العالم الحقيقي (مثل المباني و الشوارع والأفراد ...الخ) سواء الظاهرات التي تناسب الهدف المنشود أم لا. أما النموذج الإدراكي conceptual model فهو نموذج بشري لتحديد و اختيار الأهداف التي نراها مناسبة للهدف من التمثيل. ثم يأتي النموذج المنطقي logical model فهو تطبيق ما تم اختياره من أهداف و ظاهرات من خلال رسوم و قوائم مجدولة. وفي النهائية يأتي النموذج

الفيزيقي أو الطبيعي physical model الذي يتكون من قواعد البيانات الرقمية في نظام معلومات جغرافي (لاحظ هنا أن كلمة "الفيزيقي" مجرد اصطلاح حيث أن هذا النموذج ما هو إلا نموذج رقمي داخل الكمبيوتر وليس شيئا ملموسا). وعلي مستوي عدم اليقين فأن كلا من النموذجين الإدراكي و المنطقي يقعان خلف المصفاة الأولي بينما يكون النموذج الفيزيقي خلف المصفاة أو المرشح الثاني.



شكل (٣٤-٢) درجات تلخيص الواقع في نماذج البيانات

في عملية نمذجة البيانات يتم التعامل مع هذه المستويات الأربعة، فنحن نبدأ بتحديد الأهداف الرئيسية المطلوب تمثيلها داخل نظام المعلومات الجغرافية. تلي تلك المرحلة عملية إعداد قائمة بوصف هذه الأهداف أو الظاهرات المختارة والعلاقات بينهم، ثم يأتي تطبيق هذه المعلومات في إطار التمثيل الرقمي علي الكمبيوتر. وكما رأينا سابقا فأن الأهداف المنفصلة أو المجالات المتصلة يكونان النموذجين الإدراكيين لتمثيل الواقع الحقيقي، بينما البيانات الخطية vector و البيانات الشبكية raster هما النموذجين المنطقيين المستخدمين في نظم لمعلومات الجغرافية.

٣٤-٢ نماذج بيانات نظم المعلومات الجغرافية

تم ابتكار و تطبيق عدد من نماذج البيانات في نظم المعلومات الجغرافية خلال النصف الثاني من القرن العشرين الميلادي (الجدول التالي). وفي قلب كل برنامج نظم معلومات جغرافية يوجد واحد أو أكثر من هذه النماذج لتمثيل ظاهرات العالم الحقيقي. وتعتمد البرامج علي تجميع الظاهرات المتشابهة من الناحية الهندسية في مجموعات classes أو طبقات layers مما يسمح بتخزين أكثر كفاءة للبيانات وأيضا بسرعة في عمليات التعديل و التحليل.

نموذج البيانات	أمثلة للاستخدام
التصميم بالكمبيوتر	رسومات التصميمات الهندسية
الكارتوجرافيا الرقمية	الخرائط البسيطة
الصور	تحليل المرئيات
النموذج الشبكي	التحليل المكاني و النمذجة البيئية
النموذج الخطي	تطبيقات متعددة خاصة في تحليل الموارد
الشبكات	تحليل الشبكات مثل شبكات النقل و الخدمات
شبكات المثلثات غير المنتظمة	تمثيل وتحليل السطوح و التضاريس
الأهداف	تطبيقات متعددة لكافة نماذج البيانات

٣٤-٢-١ نماذج التصميم بالكمبيوتر و الرسومات و الصور

اعتمدت نظم المعلومات الجغرافية في بادئ ظهورها علي نماذج بيانات بسيطة تأتي من ملفات التصميم بالكمبيوتر Computer-Aided Design (CAD) والتي تستخدم النقطة و الخط و المضلع لتمثيل الظاهرات المكانية. ولم ينتشر هذا النموذج (CAD model) من نماذج البيانات كثيرا في نظم المعلومات الجغرافية حيث أنه (بصورة عامة) يعتمد علي إحداثيات نسبية local coordinates بدلا من الإحداثيات الحقيقية للأرض. كما أن هذا النموذج يركز علي التمثيل المكاني للأهداف ولا يمكنه تخزين تفاصيل العلاقات بين الأهداف (مثل الشبكات و الطبولوجيا) والتي يحتاجها التحليل المكاني.

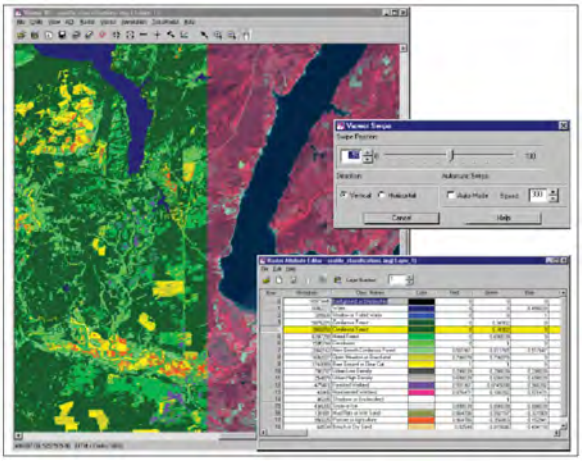
في الستينات من القرن العشرين الميلادي تم الاعتماد علي "ترقيم digitization" الخرائط الورقية لتحويلها إلي خرائط موضوعية thematic maps في صورة رقمية. وأيضا كانت الظواهر المكانية تمثل في صورة النقاط و الخطوط و المضلعات (نموذج الكارتوجرافيا الرقمية computer cartography model)، لكن بدون بيانات غير مكانية attributes أو العمل علي العلاقات بين الأهداف. وفي نفس هذه المرحلة الزمنية تم ابتكار أسلوب المسح الضوئي scanning للصور الجوية (والمرئيات الفضائية لاحقا) ليتم بذلك تمثيل البيانات فيما يعرف باسم نموذج الصور Image model.

٣٤-٢-٢ نموذج البيانات الشبكية

يستخدم نموذج البيانات الشبكية raster model مصفوفة من الخلايا أو البكسل لتمثيل ظاهرات العالم الحقيقي. وتحمل الخلية الواحدة القيمة غير المكانية attribute بناءا علي عدة أساليب للترميز (أو التكويد encoding) فقد تكون هذه القيمة رقما صحيحا integer أو رقما بكسور عشرية float. وفي بعض النظم يمكن للخلية الواحدة أن تحمل أكثر من قيمة للبيانات غير المكانية multiple attribute.

يتم تمثيل البيانات الشبكية في صورة مصفوفة من قيم الخلايا، مع وجود ملف metadata (وصف البيانات) يضم معلومات مثل الإحداثيات الجغرافية للركن العلوي من اليسار للشبكة، حجم

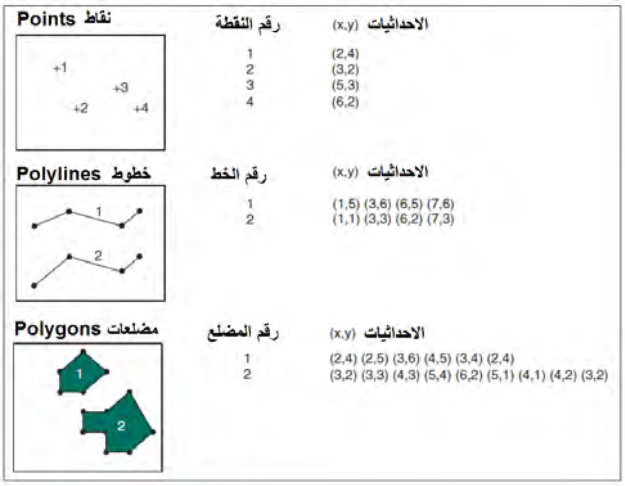
الخلية، عدد الصفوف، عدد الأعمدة، و المسقط projection. أما بيانات النموذج الشبكي في حد ذاتها (وبسبب كبر حجمها) فيتم وضعها في ملفات مضغوطة comprised files لتقليل حجم الذاكرة و حجم التخزين المطلوب علي القرص الصلب للكمبيوتر.



شكل (٣٤-٣) مثال لنموذج البيانات الشبكية

٣٤-٢-٣ نموذج البيانات الخطية

يمثل نموذج البيانات الشبكية أفضل طرق تمثيل ظاهرات المجالات المتصلة، بينما يستخدم نموذج البيانات الخطية vector model لتمثيل الظاهرات من نوع الأهداف المنفصلة. ويتميز نموذج البيانات الخطية بالدقة المكانية العالية لتمثيل الظاهرات و الأهداف، وكفاءة تخزين البيانات، وجودة المنتج الكارتوجرافي، وتوافر أدوات عديدة للتراكب overlay و التحليل. في هذا النموذج يتم - بداية - تصنيف معالم العالم الحقيقي في مستوي ثنائي الأبعاد فقط (2-dimension) إلي: نقطة أو خط أو مضلع. يتم تسجيل النقاط points (مثل الآبار والمباني) بواسطة زوج من الإحداثيات الأفقية x, y. أما الخطوط polylines (مثل الطرق والصدوع) فيتم تسجيلها بمجموعة من الإحداثيات الزوجية. وفي الصورة العامة الأكثر شيوعا فتسجل المضلعات polygons (مثل مناطق التربة و استخدامات الأراضي) بمجموعة من الخطوط المتصلة المغلقة. وتجدر الإشارة إلي أنه في بعض الحالات يمكن تمثيل المضلع مكونا من عدد من المنحنيات curves (وليس الخطوط المستقيمة). أما الإحداثيات التي تحدد طبيعة موقع كل هدف فقد تكون إحداثيات ثنائية (x,y أو خط الطول و دائرة العرض)، أو إحداثيات ثلاثية (x,y,z حيث z يمثل الارتفاع)، أو إحداثيات رباعية (x,y,z,t حيث t يمثل الزمن).



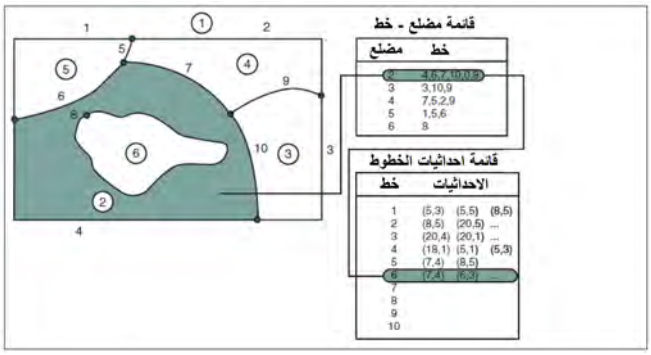
شكل (٣٤-٤) مثال لنموذج البيانات الخطية

يتكون النموذج الخطي من جزأين: التركيب الهندسي، والتركيب البنائي أو التركيب الطبولوجي. الطبولوجيا topology هي علم ورياضيات العلاقات الهندسية بين الأهداف، والعلاقات الطبولوجية ليست علاقات رقمية أو كميات يمكن قياسها وهي لا تتغير مع تغير الحيز المكاني للأهداف. فعلي سبيل المثال عندما تتمدد الخريطة الورقية فأن الزوايا و المسافات ستتغير، لكن العلاقات الطبولوجية (مثل التجاور) ستبقي ثابتة. ويستخدم التركيب الطبولوجي أو التركيب البنائي في عمليات تحقيق validation هندسة البيانات الخطية وأيضا في تحليل الشبكات. فكما هو معروف فأن مصادر البيانات تتعدد بدرجة كبيرة (ترقيم الخرائط الورقية و القياس الميداني والصور الجوية و المرئيات الفضائية و ملفات التصميم بالكمبيوتر ...الخ) وهنا فأن فحص البناء الطبولوجي لقواعد البيانات يعد طريقة لتحقيقها و تقدير درجة جودتها قبل استخدامها في التحليل. ومن أمثلة الاختبارات الطبولوجية:

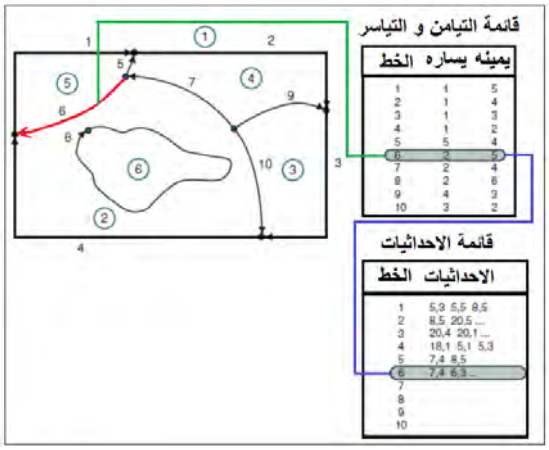
- تقاطع الخطوط intersection: فمثلا الطرق تتقاطع في البيانات ثنائية الأبعاد(x,y) ، بينما لا تتقاطع عند استخدام البيانات ثلاثية الأبعاد (x,y,z).
- التراكب overlay: هل تتقاطع المضلعات المتجاورة؟ فعلي سبيل المثال في تطبيقات الملكيات من غير المناسب أن يكون هناك تراكب (تداخل) بين كل قطعة أرض و القطع المجاورة لها أو أن يكون هناك فواصل بين القطع.
- الخطوط المزدوجة duplicate: هل توجد نسخ مزدوجة من مضلع أو جزء من شبكة؟ فمن المهم اكتشاف و حذف أية نسخ مزدوجة من نفس المظهر أو المعلم الجغرافي.
- ترابط الشبكات connectivity: هل جميع أجزاء شبكة معينة مترابطة معا؟ مثلا في شبكات المياه من المفترض ألا يوجد فواصل بين خطوط الشبكة.

الشكل التالي يوضح لنا بصورة أكثر تفصيلا التركيب البنائي أو الطبولوجي في حالة البيانات الخطية من نوع المضلعات. ففي هذا الشكل نري ٦ مضلعات (بما فيها المضلع الخارجي رقم ١). وكل مضلع مكون من عدد من الخطوط كما توضح قائمة "مضلع-خط"، فمثلا المضلع رقم ٢

يتكون من الخطوط أرقام ٤، ٦، ٧، ١٠، ٨. ونلاحظ وجود الرقم صفر قبل الخط رقم ٨ للدلالة علي أن هذا الخط يمثل "جزيرة" داخل المضلع المنشود. وفي الجدول الثاني توجد قيم إحداثيات كل خط من الخطوط، فمثلا الخط رقم ٥ يبدأ من الاحداثي (٧،٤) ثم الاحداثي (٨،٥) .... الخ. ومن الممكن أن يظهر الخط في أكثر من مضلع (مثلا الخط ٦ موجود في كلا المضلعين ٢ و ٥) إلا أن إحداثيات الخط يتم تخزينها مرة واحدة فقط دون تكرار. ومن ثم فأن مميزات البناء الطبولوجي أنه يقلل من عدد الإحداثيات التي يتم تخزينها في قاعدة البيانات مقارنة بالحالة العادية للمضلعات التي ليس لها بناء طبولوجي. أيضا نري أن التركيب البنائي يوضح علاقات التجاور contiguity or adjacency بين المضلعات، مما يسمح لنا بتحديد المضلعات التي تقع علي يمين أو علي يسار كل مضلع. ففي الشكل التالي نجد أن المضلع رقم ٢ يقع علي يسار الخط رقم ٦ بينما الخط رقم ٥ يقع علي يمينه. وبمعني آخر فأن تحليلا بسيطا - لهذا البناء الطبولوجي - يدلنا علي أن المضلعين ٢ و ٥ متجاورين. وفي معظم البرامج الحديثة لنظم المعلومات الجغرافية يتم تخزين العلاقات الطبولوجية في ملف منفصل، لكنه مرتبط تماما مع ملفي البيانات المكانية و البيانات غير المكانية. ويتم تطبيق البناء الطبولوجي في العديد من استخدامات نظم المعلومات الجغرافية مثل الملكيات والخرائط التفصيلية و تخطيط المباني وإدارة الموارد الطبيعية و البيئية.



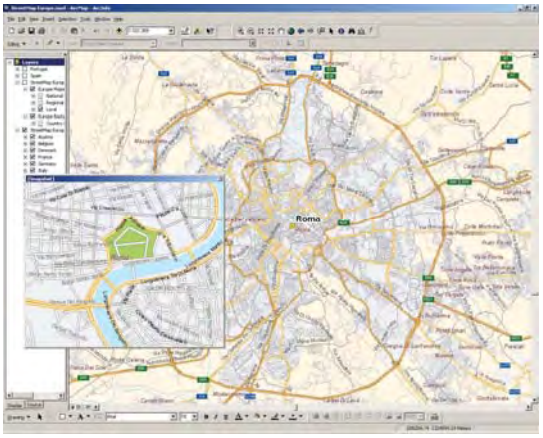
شكل (٣٤-٥) مثال للبناء الطبولوجي في حالة المضلعات - الخطوط



شكل (٣٤-٦) مثال للبناء الطبولوجي لتجاور الخطوط

٣٤-٢-٤ نموذج بيانات الشبكات

يعد نموذج الشبكة network model نوعا خاصا من نموذج البيانات الطبولوجية، وهو مستخدم بكثيرة في تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية مثل شبكات المياه و الكهرباء و الغاز و الطرق والسكك الحديدية. ويوجد نوعين من الشبكات وهما الشبكة الإشعاعية أو شبكة الشجرة radial or tree والشبكة الحلقية looped. في النوع الأول نجد السريان له اتجاهين إما صاعدا upstream أو هابطا downstream، ومن أمثلة هذا النوع شبكات التصريف المائي. أما في النوع الثاني من الشبكات فمن الممكن أن نجد عدد من التقاطعات intersections، ومن أمثلة هذه الشبكات علي سبيل المثال شبكات توزيع المياه. وفي برامج نظم المعلومات الجغرافية يتم تمثيل الشبكة من خلال النقاط و الخطوط، والتركيب البنائي (الطبولوجي) هو الذي يحدد كيفية اتصال الخطوط مع بعضها البعض. ويمثل الشكل التالي مثال لشبكة الشوارع مكونة من عدد من العقد nodes (أي النقاط) التي تمثل تقاطعات الشوارع، وعدد من الخطوط التي تمثل أنواع الشوارع، بالإضافة للعلاقات الطبولوجية فيما بينهم.

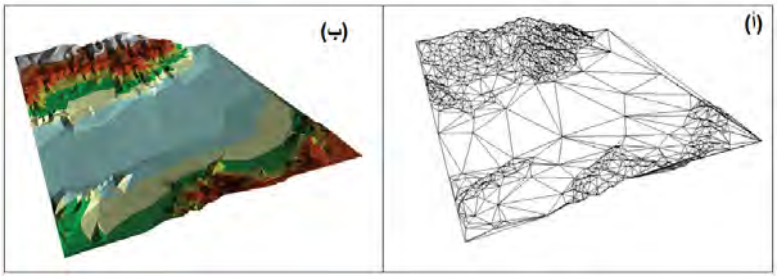


شكل (٣٤-٧) مثال لنموذج بيانات الشبكة

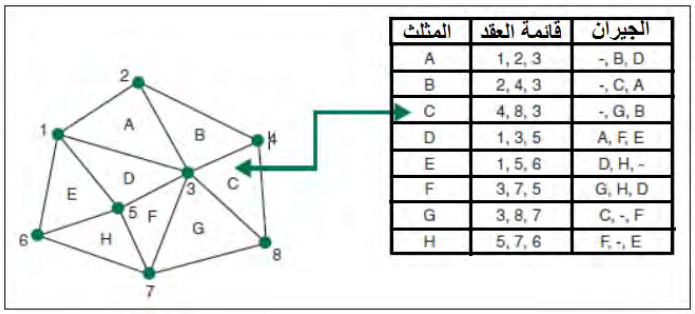
٣٤-٢-٥ نموذج بيانات شبكات المثلثات غير المنتظمة

نموذج شبكات المثلثات غير المنتظمة Triangulated Irregular Network (أو اختصارا TIN) هو أحد النماذج التي تعتمد علي تمثيل البيانات ثلاثية الأبعاد (x,y,z) بخلاف النماذج السابقة التي تمثل البيانات إما أحادية أو ثنائية الأبعاد. يتكون نموذج TIN من عدد من النقاط (لكل نقطة إحداثيات x,y,z) تشكل فيما بينهم عدد من المثلثات غير المتقاطعة والمختلفة في المساحات. ومن أهم مميزات TIN أن عدد هذه المثلثات يعتمد علي عدد النقاط المعلومة وكثافة توزيعها، فكلما زاد عدد النقاط زاد عدد المثلثات مما يسمح بتمثيل السطح بدقة أكبر. ونموذج الشبكات غير المنتظمة هو نموذج طبولوجي بطبيعته بقوم بإدارة البيانات عن العلاقات بين النقاط أو العقد التي تمثل كل مثلث وعلاقته بالمثلثات المجاورة له. ومن خلال بيانات TIN يمكن حساب الميول slopes واتجاهات الأوجه aspects ومدي الرؤية بين النقاط line of sight. ويتم استخدام

نموذج شبكات المثلثات غير المنتظمة في عدد من تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية مثل تصميم الطرق و دراسات الصرف المائي وتنمية الأراضي والدراسات البيئية للمخاطر الطبيعية.



شكل (٣٤-٨) مثال لنموذج بيانات شبكات المثلثات غير المنتظمة



المثلث	قائمة العقد	الجيران
A	1, 2, 3	-, B, D
B	2, 4, 3	-, C, A
C	4, 8, 3	-, G, B
D	1, 3, 5	A, F, E
E	1, 5, 6	D, H, -
F	3, 7, 5	G, H, D
G	3, 8, 7	C, -, F
H	5, 7, 6	F, -, E

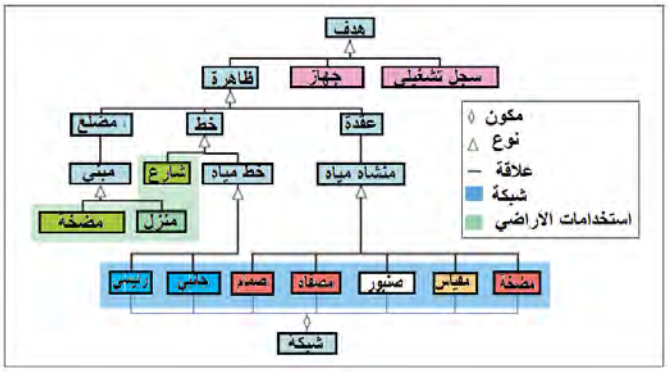
شكل (٣٤-٩) مثال للتركيب الطبولوجي في شبكات المثلثات غير المنتظمة

٣٤-٢-٦ نموذج بيانات الأهداف

تركز كل نماذج البيانات السابقة علي النظرة الهندسية للظواهر الممثلة داخل النموذج، سواء النقاط أو الخطوط أو المضلعات أو البيانات الشبكية أو شبكات المثلثات غير المنتظمة. فهذه النماذج تفصل ما بين الخصائص الهندسية والخصائص الطبولوجية للبيانات (كلا منهم في قواعد بيانات منفصلة) مما يجعل عمليات التحليل التي تقوم بها البرامج عمليات معقدة و تستغرق وقتا طويلا بالإضافة لإمكانية حدوث الأخطاء. ومن هنا جاءت الحاجة لتطوير نموذج بيانات تكاملي في نظم المعلومات الجغرافية. ويعتمد نموذج بيانات الأهداف object model في جوهره علي تجميع الأهداف المكانية والعلاقات بينها، فكل هدف ما هو إلا مجموعة متكاملة من الظاهرات المكانية وخصائصها و الطرق التي تحدد سلوكها. وبمعني آخر فأن كل الأهداف المكانية المتشابهة يتم تجميعها داخل "فئة class" حيث يكون كل هدف داخل هذه الفئة عبارة عن "شاهد instance". وفي معظم البرامج فأن كل فئة يتم تخزينها في قاعدة بيانات أو جدول بيانات غير مكانية attribute table حيث يكون كل سطر عبارة عن هدف وكل عمود عبارة عن خاصية من خصائص هذا الهدف.

لكل هدف جغرافي علاقات مع الأهداف المشابهة في نفس الفئة، وأحيانا يكون له علاقات من أهداف أخري خارج هذه الفئة. ويمكن بصورة عامة تقسيم العلاقات إلي ثلاثة أنواع: علاقات

طبولوجية topological (مثل حالة العقد و تقاطعات الخطوط داخل الشبكة)، علاقات جغرافية geographic (مثل التراكب و التداخل و التجاور)، وعلاقات عامةgeneral (مثل ربط جدول قطع الأراضي مع جدول أسماء الملاك ليمكن تحديد اسم المالك لكل قطعة أرض). والشكل التالي يقدم مثالا لنموذج بيانات الأهداف في شبكة توزيع المياه داخل مدينة.



شكل (٣٤-١٠) مثال لنموذج بيانات الأهداف في شبكة المياه

٣٤-٣ نمذجة البيانات الجغرافية

تعتمد جودة التحليل المكاني علي جودة قواعد البيانات الجغرافية ذاتها التي تعتمد بدورها علي جودة و كفاءة نموذج البيانات المستخدم. تبدأ نمذجة البيانات data modeling بتحديد أهداف المشروع بوضوح من خلال الفهم الكامل لمتطلبات المستخدمين. ثم تأتي مرحلة تحديد الأهداف (الظاهرات) الجغرافية والعلاقات بينهم ثم تطوير النموذج المنطقي ولاحقا بناء النموذج الفيزيقي. وكل هذه الخطوات تعد بمثابة مقدمة لبناء قواعد البيانات ثم استخدامها عمليا فيما بعد.

في نمذجة البيانات الجغرافية لا توجد خطوة أهم من فهم طبيعة النمذجة في حد ذاتها، وذلك من خلال تجميع متطلبات مستخدمي نظام المعلومات الجغرافية. وهنا يجب قضاء وقت أطول لاستطلاع آراء هؤلاء المستخدمين بوضوح كامل، ومن الأفضل تدوين كل هذه الآراء في قائمة محددة واضحة. وفي مرحلة بناء النموذج المنطقي يجب تحديد الظاهرات و العلاقات التي سيتم نمذجتها، سواء البيانات المكانية أو البيانات غير المكانية المطلوبة. وفي الخطوة التالية يتم تحويل هذا النموذج المنطقي إلي نموذج فيزيقي من خلال بناء قواعد البيانات. ويجب الانتباه إلي ضرورة اختيار نموذج البيانات المناسب للمشروع، طبقا لفهم مميزات و عيوب و تطبيقات كل نوع من أنواع نماذج البيانات السابق شرحها. فعلي سبيل المثال فأن نموذج بيانات الأهداف هو الأنسب في تطبيقات الخدمات، بينما يمكن الاكتفاء بنموذج بيانات بسيط في التطبيقات التقليدية مثل الخرائط الرقمية. وكما سبق الشرح فأن نموذج البيانات الخطية vector يعد مناسبا للأهداف المنفصلة، بينما يعد نموذج البيانات الشبكية raster الأنسب للظاهرات من نوع المجالات المتصلة. وبصفة عامة فأن نمذجة البيانات الجغرافية تعد علماً و فناً في نفس الوقت، فهي علم يتطلب فهما منطقيا لخصائص الظاهرات المكانية في العالم الحقيقي، وهي فنا يعتمد علي رؤية واختيارات أخصائي نظم المعلومات الجغرافية.

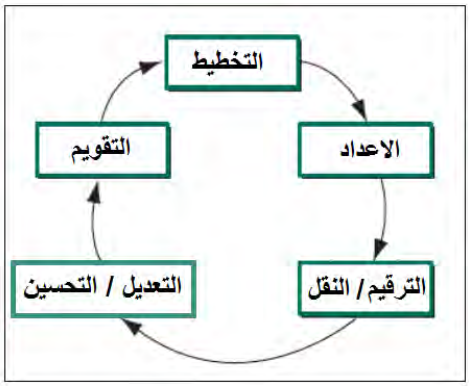
٣٤-٤ تجميع بيانات نظم المعلومات الجغرافية

يحتوي نظام المعلومات الجغرافي علي عدة أنواع من البيانات المكانية التي تأتي من عدة مصادر. ومن الممكن تقسين عملية تجميع البيانات data collection إلي جزأين أو عمليتين: (١) الحصول علي البيانات data capture، (٢) نقل البيانات data transfer. وفي هذا الإطار فمن المهم تقسيم طرق تجميع كلا من البيانات الخطية و الشبكية إلي نوعين: طرق أساسية (بيانات رقمية للاستخدام المباشر في نظم المعلومات الجغرافية) و طرق ثانوية (بيانات رقمية و غير رقمية) كما في الجدول التالي.

	بيانات شبكية	بيانات خطية
طرق أساسية	المرئيات الفضائية للاستشعار عن بعد	قياسات النظام العالمي لتحديد المواقع GPS
	صور جوية رقمية	قياسات المساحة الأرضية
طرق ثانوية	خرائط أو صور جوية ممسوحة ضوئيا	الخرائط الطبوغرافية
	نماذج ارتفاعات رقمية من الخرائط الكنتورية	قواعد بيانات العناوين

تعد مرحلة تجميع البيانات في مشروع نظام معلومات جغرافي هي المرحلة التي تستغرق وقتا طويلا و أيضا تكلفة عالية. عادة فأن تكلفة تجميع البيانات تتراوح من ١٥% إلي ٥٠% بصفة عامة (لكن قد تصل أحيانا إلي ٨٠%) من التكلفة الكلية للمشروع. كما تجدر الإشارة إلي أن عملية تحديث البيانات باستمرار (للمشروعات التي تستغرق فترة زمنية طويلة) تعد عملية هامة وقد تكون مكلفة اقتصاديا أيضا.

تتكون عملية تجميع البيانات من عدة مراحل متصلة تشمل التخطيط planning والإعداد preparation والترقيم/النقل digitizing/transfer والتعديل/التحسين editing/improvement ثم التقويم evaluation. يبدأ التخطيط بإعداد قائمة بمتطلبات المستخدمين الموارد المطلوبة (أجهزة و برامج و أفراد) وتطوير خطة العمل. ويشمل الإعداد عدة مهام مثل الحصول علي البيانات وتجهيزها (مثل المسح الضوئي للخرائط الورقية) وتقويم جودتها. أما مرحلة الترقيم/النقل فهي أكثر المراحل جهدا وغالبا ما تستغرق وقتا طويلا. وفي مرحلة التعديل/التحسين يتم اكتشاف الأخطاء في المراحل السابقة و تصحيحها. ثم تأتي مرحلة التقويم أخيرا وتهدف لتحديد مدي نجاح عملية تجميع البيانات ككل علي كلا المستويين النوعي و الكمي. وغالبا فان مراحل تجميع البيانات تكون تكرارية، وعامة ما يكون هناك مرحلة تجريبية صغيرة في البداية قبل التنفيذ الفعلي لتجميع كافة بيانات المشروع.



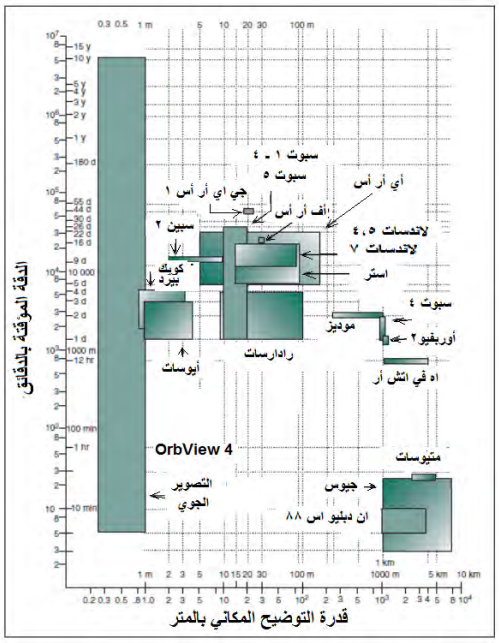
شكل (٣٤-١١) مراحل تجميع البيانات

٣٤-٥ الطرق الأساسية لتجميع البيانات

الطرق الأساسية هي الطرق التي تتيح القياس المباشر للأهداف المكانية. أو بمعني آخر هي الطرق التي ينتج عنها قياسات رقمية يتم إدخالها مباشرة لنظام المعلومات الجغرافي أو علي الأقل تخزينها في ملفات رقمية قبل إدخالها للنظام. وهناك طرق أساسية لكلا نوعي البيانات الخطية vector و الشبكية raster.

٣٤-٥-١ الحصول على البيانات الشبكية

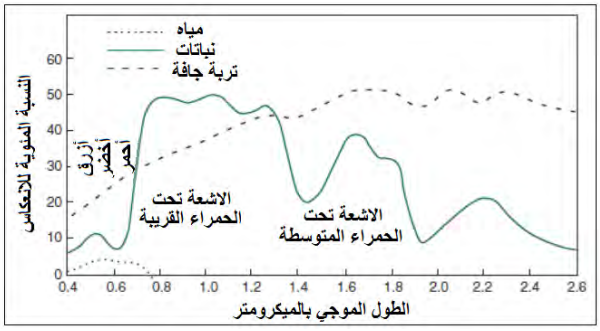
يعد الاستشعار عن بعد remote sensing أشهر طرق الحصول علي البيانات الشبكية و أكثرها انتشارا في الوقت الحالي. وبصورة عامة فأن الاستشعار عن بعد هو عملية الحصول علي معلومات عن الخصائص الطبيعية و الكيمائية و الحيوية للأهداف دون تلامس مباشر معها. ويتم الحصول علي هذه البيانات من خلال قياس كمية الضوء الكهرومغناطيسي المنعكس أو المنبعث من هذه الأهداف. وتوجد العديد من أنواع المجسات أو المستشعرات sensors التي يمكنها عمل القياسات في نطاق واسع من الضوء الكهرومغناطيسي (من مجال الضوء المرئي إلي مجال الأشعة القصيرة أو الميكروويف). وبصفة عامة فأن أجهزة الاستشعار (أو المستشعرات) يمكن تقسيمها إلي نوعين: مستشعرات سالبة passive تعتمد فقط علي استقبال الأشعة المنعكسة أو المنبعثة من الأرض، و مستشعرات موجبة active تقوم بإطلاق أشعة ثم تستقبلها مرة أخري عند انعكاسها من سطح الأرض. أما المنصات platforms التي تحمل أجهزة الاستشعار فهي أساسا الأقمار الصناعية و الطائرات، و أحيانا تستخدم الطائرات المروحية (الهليكوبتر) و البالون أو المنطاد. والشكل التالي يقدم بعض خصائص أقمار الاستشعار عن بعد المستخدمة حاليا.



شكل (٣٤-١٢) خصائص بعض الأقمار الصناعية للاستشعار عن بعد

من وجهة نظر نظم المعلومات الجغرافية فأن قدرة الوضوح resolution من أهم عناصر الاستشعار عن بعد. وتوجد ثلاثة أنواع من قدرة الوضوح: قدرة الوضوح المكانية spatial resolution، قدرة الوضوح الطيفية spectral resolution، وقدرة الوضوح المؤقتة temporal resolution. تعبر قدرة الوضوح المكانية عن حجم الخلية أو البكسل وهي التي تمثل أصغر هدف يمكن تمييزه بوضوح. وتتراوح قدرة الوضوح المكانية للأقمار الصناعية المدنية بين ٠.٥ متر إلي ١ كيلومتر، بينما عادة يتراوح حجم المرئية الواحدة بين ٦×٦ إلي ٢٠٠×٢٠٠ كيلومتر. تشير قدرة الوضوح الطيفية إلي الجزء من الضوء الكهرومغناطيسي الذي يستطيع المستشعر قياسه. فكل جزء من الأشعة يمكن لجهاز الاستشعار استقباله يتم تسجيله في نطاق band محدد، ولذلك فأن عدد النطاقات هام للغاية في عملية الاستشعار عن بعد حيث أن كل هدف أو معلم أرضي يمتص ويعكس كل نطاق بصورة مختلفة عن النطاق الآخر (أي أن لكل هدف أو ظاهرة أرضية بصمة طيفية spectral signature مختلفة في كل نطاق من نطاقات الأشعة الكهرومغناطيسية). والشكل التالي يمثل مثالا لنسبة الانعكاس لثلاثة أنواع من الظاهرات المكانية في عدد من نطاقات الضوء الكهرومغناطيسي. وتستطيع الأقمار الصناعية الحديثة قياس وتسجيل عدد كبير من النطاقات قد تصل إلي العشرات. أما دقة الوضوح المؤقتة (أو الدورة الواحدة) فهي تعبر عن الفترة الزمنية التي يمر بها القمر الصناعي مرتين علي نفس البقعة المكانية علي الأرض، أي الفترة الزمنية بين كل مرئيتين متتاليتين لنفس المنطقة. فعلي سبيل المثال فأن القمر الفرنسي سبوت-٥ يكمل دورة كاملة حول الأرض (أي يزور نفس المنطقة الأرضية مرة أخري) كل ٢٦ يوم. ويحمل هذا القمر الصناعي عدة مستشعرات أحدهما للضوء المرئي (مرئيات غير ملونة panchromatic) ودقة وضوحه المكانية تبلغ ٢.٥×٢.٥ متر، والآخر متعدد النطاقات multi-spectral (النطاقات الأزرق و الأحمر و الأخضر و الأشعة تحت الحمراء المنعكسة) تبلغ دقته المكانية ١٠×١٠ متر، بينما يوجد أيضا مستشعر للأشعة تحت الحمراء القصيرة shortwave

near infrared بدقة مكانية ٢٠×٢٠ متر. وتبلغ مساحة المرئية الواحدة للقمر سبوت-٥ ٦٠×٦٠ كيلومتر. ومن أهم مميزات هذا القمر الصناعي قدرته علي التصوير المزدوج stereo images التي يمكن منه عمل القياسات ثلاثية الأبعاد و تطوير نماذج الارتفاعات الرقمية.



شكل (٣٤-١٣) البصمة الطيفية لبعض الظاهرات المكانية

يعد التصوير الجوي مصدرا هاما للحصول علي البيانات المكانية، وهو يشبه إلي حد كبير عملية الاستشعار عن بعد بالأقمار الصناعية (كلاهما ينتج صورة image في النهاية) إلا أن معظم الصور الجوية تكون باستخدام الأفلام وليس التصوير الرقمي. وعادة فأن الكاميرا توضع في طائرة تطير علي ارتفاع يتراوح بين ٣٠٠٠ و ٩٠٠٠ متر، وتكون الصور إما غير ملونة أو ملونة في النطاق المرئي من الضوء الكهرومغناطيسي (وان كان أحيانا يتم التصوير بالأشعة تحت الحمراء). وللدقة المكانية العالية للتصوير الجوي فأنه يعد مناسبا بقوة لتطبيقات المساحة و الخرائط التفصيلية. وفي حالة التصوير مع وجود منطقة تداخل overlap بين كل صورتين متتاليتين (أي الصور المزدوجة) فيمكن استخدام هذه الصور الجوية في عمل الخرائط الكنتورية و نماذج الارتفاعات الرقمية.

لمرئيات الاستشعار عن بعد (وأيضا الصور الجوية) عدة مميزات في تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية. فللمرئيات الفضائية والصور الجوية نطاق تغطية كبير وغالبا عالمي مما يجعلهما مناسبين لمشروعات المناطق الجغرافية الكبيرة أو الشاسعة. أيضا فأن التصوير المتكرر علي فترات زمنية متغيرة يكون هاما في متابعة التغيرات الزمنية للظاهرات الجغرافية. وبالطبع فأن الاستشعار عن بعد و التصوير الجوي يمدوننا بمعلومات دقيقة عن ظاهرات وأهداف المناطق الجغرافية التي يصعب الوصول إليها بالطرق الأرضية (مثل الصحاري والغابات).

٣٤-٥-٢ الحصول علي البيانات الخطية

تعد المساحة الأرضية والمساحة بالجي بي أس GPS من أهم طرق الحصول علي البيانات الخطية vector في نظم المعلومات الجغرافية. تعتمد المساحة الأرضية علي مبدأ تحديد الموقع ثلاثي الأبعاد (x,y,z) لأي نقطة أو موقع من خلال قياس الزوايا و المسافات لنقاط معلومة الإحداثيات. وعادة يكون العمل المساحي عملا نسبياً relative، بمعني أن إحداثيات النقاط الجديدة تكون منسوبة لإحداثيات النقاط المرجعية المعلومة (يطلق عليها اسم نقاط الثوابت الأرضية). تقليديا يتم

استخدام أجهزة الثيودليت و الميزان في العمل المساحي الأرضي، وحديثا فأن الاعتماد أصبح علي الأجهزة الالكترونية المسماة بأجهزة المحطة الشاملة أو المحطة المتكاملة total station التي قد تصل دقتها إلي ١ ملليمتر. ومن أهم مميزات جهاز المحطة الشاملة أنه يخزن القياسات في الذاكرة الالكترونية الداخلية، ثم يتم نقلها مباشرة للكمبيوتر من خلال كابل. وعادة يكون هناك شخصين في العمل المساحي الأرضي أحدهما يدير الجهاز ذاته بينما الآخر يحمل العاكس reflector prism الذي يعكس الأشعة مرة أحري للجهاز ليمكن حساب المسافات الكترونيا.

تعد المساحة الأرضية مكلفة اقتصاديا لأنها تستغرق وقتا طويلا في العمل الميداني أو الحقلي، إلا أنها تقدم مستويات دقة عالية جدا. ومن ثم فأن المسح الأرضي مازال هو الأنسب للحصول علي البيانات عالية الدقة مثل تطبيقات تحديد الملكيات وتحديد شبكات الخدمات (مثل شبكات المياه و الصرف الصحي و الكهرباء) بالإضافة للمشروعات الهندسية. أيضا فمن أهم تطبيقات المساحة الأرضية تحديد مواقع النقاط المرجعية التي يتم من خلالها الإرجاع الجغرافي للمرئيات الفضائية و الصور الجوية.

شكل (٣٤-١٤) مثال لجهاز المساحة الأرضية من نوع المحطة الشاملة

٣٤-٦ الطرق الثانوية لتجميع البيانات

الطرق الثانوية لتجميع البيانات الجغرافية هي التي يتم استخدامها في إنشاء الملفات الشبكية و الخطية من الخرائط و الصور الجوية وباقي أنواع المستندات غير الرقمية. وفي هذه الطرق يتم استخدام المسح الضوئي scanning للحصول علي البيانات الشبكية بينما يتم استخدام الترقيم digitizing والمسح التصويري المزدوج stereo-photogrammetryللحصول علي البيانات الخطية.

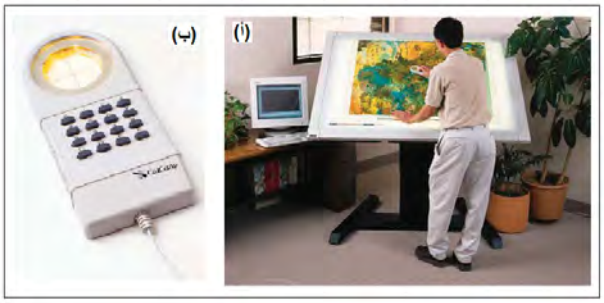
٣٤-٦-١ الحصول على البيانات الشبكية بالمسح الضوئي

الماسح الضوئي scanner هو جهاز يسمح بتحويل المستندات الورقية إلي صورة رقمية image من خلال تسجيل كمية الضوء المنعكس الصادر منه. عادة تكون الصورة الناتجة ملونة، وتتراوح قدرة الوضوح resolution لأجهزة الماسحات الضوئية بين ٢٠٠ نقطة/بوصة (dot per inch or dpi) للأجهزة البسيطة إلي ٢٤٠٠ نقطة/بوصة للأجهزة المتقدمة. وطبقا لقدرة الوضوح فأن جهاز الماسح الضوئي قد يستغرق مدة تتراوح بين ٣٠ ثانية و عدة دقائق لإتمام عملية المسح الضوئي لخريطة.

شكل (٣٤-١٥) مثال لجهاز الماسح الضوئي

٣٤-٦-٢ الطرق الثانوية للحصول على البيانات الخطية

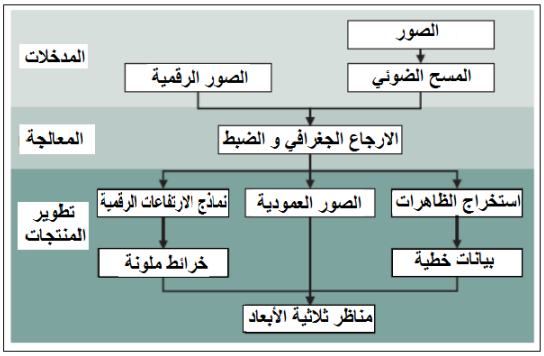
تعد طريقة الترقيم اليدوي manual digitizing أكثر الطرق انتشارا في نظم المعلومات الجغرافية للحصول علي البيانات الخطية. تأتي أجهزة المرقمات digitizers في عدة صور وأحجام تتراوح ما بين ٣٠×٦٠ سنتيمتر إلي ١١٢×١٥٢ سنتيمتر. تعتمد فكرة عمل هذه الأجهزة علي إمكانية تتبع حركة الفارة أو الماوس أثناء حركته علي طاولة الترقيم (المثبت عليها الخريطة الورقية) ونقل هذه الحركة إلي الكمبيوتر. وتتراوح دقة المرقمات بين ٠.٠٠٠٤ بوصة (٠.٠١ ملليمتر) إلي ٠.٠١ بوصة (٠.٢٥ ملليمتر). ومع طاولة الترقيم يوجد ماوس خاص بالمرقم يسمح بالتحديد الدقيق للنقاط علي الخريطة. ويعد الترقيم اليدوي أسهل و أرخص طرق الحصول علي البيانات الخطية من الخرائط الورقية.



شكل (٣٤-١٦) مثال لجهاز المرقم

يستخدم المسح الضوئي كمقدمة لعملية تحويل البيانات الشبكية إلي بيانات خطية (عملية vectorization)، ويعد الترقيم من الشاشة on-screen digitizing أسهل أساليب هذه العملية. في هذا الأسلوب يتم استخدام صورة الخريطة الناتجة من جهاز الماسح الضوئي كخلفية علي شاشة الكمبيوتر (بعد إتمام الإرجاع الجغرافي لها) ثم يستخدم الماوس لرسم كل معلم أو ظاهرة علي هذه الصورة، وتخزين الناتج في ملف بيانات شبكية (نقاط أو خطوط أو مضلعات). كما توجد برامج مخصصة software لعمل الترقيم الآلي أو الأوتوماتيكي بسرعة أكبر كبيرة مقارنة بالترقيم اليدوي. لكن تجدر الإشارة إلي أن هذه البرامج غير دقيقة تماما مما يتطلب قيام المستخدم بنفسه بعمليات تعديل لاكتشاف و تنقية أخطاء الترقيم الآلي.

المساحة الجوية أو المساحة التصويرية photogrammetry هي علم و تقنية عمل القياسات الدقيقة من الصور الجوية. وتقليديا يتم عمل القياسات ثنائية الأبعاد (x,y) من الصور الجوية العادية، لكن من الممكن عمل القياسات ثلاثية الأبعاد (x,y,z) من الصور الجوية المزدوجة التي يكون بها منطقة تداخل بين كل صورتين متتاليتين. وهذا النوع من الصور الجوية يسمح بقياس الارتفاعات و تطوير الخرائط الكنتورية و المجسمات ثلاثية الأبعاد و نماذج الارتفاعات الرقمية. ولإتمام الإرجاع الجغرافي للصور الجوية يتم الاعتماد علي نقاط الثوابت الأرضية معلومة الإحداثيات (سواء باستخدام المساحة الأرضية أو تقنية الجي بي أس). ويتم استخدام أجهزة الراسمات المزدوجة stereo-plotters للقياس من الصور الجوية المزدوجة (المتداخلة) والحصول علي البيانات الخطية. وحاليا يستخدم علم و أجهزة المساحة التصويرية الرقمية digital photogrammetry للحصول علي البيانات الخطية في صورة رقمية من الصور الجوية واستخدامها في تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية.



شكل (٣٤-١٧) خطوات المساحة التصويرية الرقمية

٣٤-٧ الحصول على البيانات من مصادر خارجية

من أهم القرارات عند إنشاء نظام معلومات جغرافي الإجابة علي السؤال: هل البيانات سيتم تجميعها أم سيتم الحصول عليها من مصدر خارجي؟. فالطرق السابقة كلها تركز علي بناء قواعد البيانات بطرق رئيسية أو ثانوية، لكن من الممكن - كطريق آخر - الحصول علي البيانات المطلوبة من مصدر خارجي و نقلها إلي نظام المعلومات الجغرافي فيما يعرف باسم عملية نقل البيانات data transfer.

توجد عدة جهات (علي المستوي العالمي) تقدم أنواع من البيانات الجغرافية في صورة رقمية مباشرة، مثل هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية USGS وهيئة المساحة العسكرية الأمريكية NGA ووكالة الفضاء الأمريكية NASA وهيئة حماية البيئة الأمريكية EPA ونماذج الارتفاعات الرقمية العالمية مثل SRTM, ASTER ، بالإضافة لمنتجات شركة ايزري. وكل هذه الأمثلة و غيرها يمكن الاستدلال عليها من شبكة الانترنت ومعرفة دقة كل منتج وهل هو مجاني أم لا.

في مرحلة تجميع البيانات لأي مشروع نظام معلومات جغرافي يجب دراسة الطرق المتاحة للحصول علي البيانات والمقارنة بينها علي ثلاثة مستويات: الدقة، والسرعة، و الثمن. فمن الممكن الحصول علي البيانات بدقة عالية لكنه سيكون مكلفا من جهة النظر الاقتصادية. أيضا فمن المتوقع أن تتناسب دقة البيانات مع دقة و أهداف وطبيعة المشروع ذاته. وعادة يتم تنفيذ مرحلة جمع البيانات في منطقة تجريبية صغيرة وتقويم كل خطوة من الخطوات قبل بدء العمل الفعلي للمنطقة الجغرافية المطلوبة بالكامل.

٣٤-٨ انشاء و صيانة قواعد البيانات الجغرافية

تعد قاعدة البيانات database مجموعة متكاملة أو متحدة من البيانات عن موضوع محدد. أما قاعدة البيانات الجغرافية geo database فهي مجموعة من البيانات الجغرافية أو المكانية عن بقعة مكانية محددة و موضوع محدد. وتعد قاعدة البيانات الجغرافية من أهم مكونات نظام المعلومات الجغرافي بناءا علي عاملين: (١) تكلفة إنشاء و صيانة قاعدة البيانات الجغرافية، (٢) تأثير طبيعة قاعدة البيانات الجغرافية علي ما يمكن تطبيقه من تحليلات و نمذجة و اتخاذ القرار. ويتم تخزين قواعد البيانات الجغرافية إما في ملفات منفصلة أو في قاعدة بيانات واحدة يمكن إدارتها من خلال برامج إدارة قواعد البيانات Data Base Management Systems (DBMS)، والاختيار الأخير هو المطبق في الجهات والمؤسسات الكبرى حيث يمكن لعدد من المستخدمين استخدام نفس البيانات في نفس الوقت وأيضا للحصول علي مستويات عالية من الأمان.

حديثا أصبحت قواعد البيانات الجغرافية ضخمة الحجم و معقدة للغاية، فعلي سبيل المثال فأن قاعدة بيانات الصور الجوية التي تعطي الولايات المتحدة الأمريكية يصل حجمها إلي ٢٥ تيرابايت، كما يصل حجم قاعدة بيانات مرئيات القمر الصناعي لاندسات للعالم كله (بدقة وضوح مكاني ١٥ متر) إلي ٦.٥ تيرابايت (١ تيرابايت يساوي ١٠٠٠ جيجابايت).

٣٤-٩ نظم إدارة البيانات

من الممكن تخزين قواعد البيانات البسيطة المستخدمة من خلال عدد قليل من المستخدمين علي ديسك أو اسطوانة مدمجة في صورة ملفات. لكن قواعد البيانات الضخمة التي يستخدمها العشرات أو المئات بل حتى الآلاف من المستخدمين تتطلب برنامج خاص لإدارتها. إن نظام إدارة البيانات DBMS هو برنامج كمبيوتر مصمم لتنظيم التخزين الكفء والفعال للبيانات و التعامل معها. وتشمل إمكانيات هذا البرنامج:

- وجود نموذج بيانات data model يسمح بتخزين عدة أنواع من بيانات العالم الحقيقي.
- أدوات لتحميل البيانات data load .
- فهرسة البيانات index لسهولة البحث.
- لغة استعلام query للحصول علي بيانات ذات شروط محددة.
- الحصول المشروط علي البيانات من خلال عدة مستويات من الأمان security.
- تحديث البيانات مشروط لمن يملك هذه الصلاحية من المستخدمين.
- عمل نسخ احتياطية من البيانات و استرجاعها backup and recovery.
- أدوات إدارة وصيانة البيانات.
- أدوات التطبيق من خلال واجهة مستخدم قياسية بسيطة للمستخدمين العاديين.
- واجهة برمجه للمستخدمين المبرمجين لإنشاء أدوات خاصة بهم.

بصفة عامة توجد ثلاثة أنواع من قواعد البيانات المستخدمة في نظم المعلومات الجغرافية: قواعد البيانات العلاقية relational DBMS، قواعد البيانات الهدفية object DBMS، وقواعد البيانات العلاقية-الهدفية object-relational DBMS.

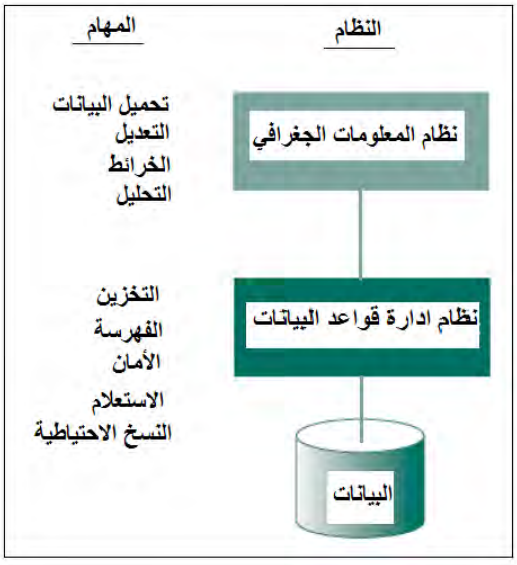
تتكون قواعد البيانات العلاقية من مجموعة من الجداول (كلا منهم عبارة عن مصفوفة) لسجلات البيانات غير المكانية attribute للأهداف قيد الدراسة. ولسهولة تركيب هذا النوع من قواعد البيانات فانه تقريبا يمثل ٩٥% من قواعد البيانات المستخدمة حاليا. أما قواعد البيانات الهدفية فأنها مصممة لمعالجة أحد أوجه النقص في قواعد البيانات العلاقية ألا وهو عدم القدرة علي تخزين السجل الكامل للهدف (حالة الهدف و سلوكه). فقواعد البيانات العلاقية مناسبة لتطبيقات الأعمال البسيطة مثل البنوك وإدارة الموارد البشرية والمخزون ...الخ، وبذلك فهي لا تستطيع تخزين عدة أنواع من البيانات الجغرافية عن نفس الهدف المكاني (مثل الصور الفوتوغرافية و ملفات الفيديو). لكن لم تنتشر قواعد البيانات الهدفية علي مستوي واسع في التطبيق العملي حيث لجأ مستخدمي قواعد البيانات العلاقية (البسيطة) إلي تزويد هذا النوع ببعض إمكانيات ومميزات قواعد البيانات الهدفية لينتجوا نوعا جديدا من قواعد البيانات العلاقية-الهدفية. وتتميز قواعد البيانات العلاقية-الهدفية المستخدمة في نظم المعلومات الجغرافية بعدة إمكانيات للتعامل مع طبيعة البيانات الجغرافية مثل:

- منظم الاستعلام query optimizer: وهو القادر علي الاستعلام عن خصائص جغرافية للأهداف، مثل الإجابة علي السؤال: ما هي المنازل التي تقع علي بعد ٣ كيلومترات من

السوق التجاري ويزيد دخل الأسرة فيها عن ١٠،٠٠٠ دولار؟. وهو السؤال الذي يحتوي علي معلومات مكانية (المسافة) ومعلومات غير مكانية (مستوي الدخل) في نفس الوقت.

- لغة استعلام query language: تستطيع التعامل مع أنواع الأهداف الجغرافية (نقاط، خطوط، مضلعات) وطبيعة خصائصها المكانية (مثل الاستعلام عن المضلعات المتجاورة). وهذه اللغات تسمي لغات الاستعلام التركيبية القياسية structured/standard query أو اختصارا SQL.
- خدمات الفهرسة indexing services: بحيث يمكن فهرسة البيانات الجغرافية في مستويات ثنائية الأبعاد (x,y) وثلاثية الأبعاد (x,y,z).
- إدارة التخزين storage management: يتطلب الحجم الكبير للبيانات الجغرافية نظام إدارة جيد من خلال تركيب ذو كفاءة عالية.

بصفة عامة يوجد نوعين من قواعد البيانات المستخدمة في معظم نظم المعلومات الجغرافية وهما نوع DB2 من شركة IBM، ونوع Spatial Oracle من شركة أوراكل. وتجدر الإشارة إلي نظام إدارة البيانات ليس نظام معلومات جغرافي في حد ذاته إلا أنه مكون أساسي من مكونات هذا النظام. فنظام إدارة البيانات هو المسئول عن اخزين و استرجاع و إدارة البيانات، لكنه لا يستطيع التعامل (التعديل و التحليل) مع البيانات الجغرافية ذاتها فهذا دور نظام المعلومات الجغرافي ذاته.



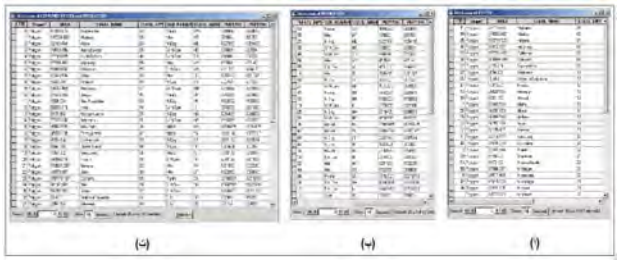
شكل (٣٤-١٨) دور نظام المعلومات الجغرافي و نظام إدارة البيانات

٣٤-١٠ تخزين البيانات في جداول قواعد البيانات

إن ابسط طرق تخزين البيانات الجغرافية هو التخزين في فئات classes أو طبقات layers أو فئات الأهداف feature classes، فالفئة هي عبارة عن مجموعة من البيانات عن مفردات ظاهرة جغرافية معينة (مثل مجموعة خطوط الأنابيب في شبكة مياه، أو مجموعة مضلعات أنواع التربة في وادي، أو مجموعة نقاط مناسيب في سطح تضاريسي). ويتم تخزين كل فئة في جدول

table في نظام إدارة البيانات، حيث كل جدول يتكون من مصفوفة من السطور و الأعمدة. تمثل الصفوف في الجدول الأهداف (المفردات) لمجموعة الظاهرات المكانية، بينما تمثل الأعمدة خصائص كل هدف من هذه الأهداف (الشكل أ). وتتميز قواعد البيانات الجغرافية عن غيرها من قواعد البيانات بوجود عمود هندسي يمثل النوع الهندسي (غالبا يسمي عمود الشكل shape column) للهدف. ولزيادة كفاءة التخزين والأداء فأن إحداثيات كل هدف يتم تخزينها في صورة ثنائية binary (وليس صورة نصية text) في ملف مضغوط في قاعدة البيانات.

يتم ربط الجداول معا join من خلال عمود أساسي (يسمي عمود المفتاح key) حيث تكون قيمة هذا العمود واحدة لنفس الهدف في أكثر من جدول. فعلي سبيل المثال فالجدول في الشكل أ يمثل البيانات الأساسية للولايات الأمريكية، بينما الجدول في الشكل ب يمثل أعداد السكان. وفي كلا الجدولين يوجد عمود المفتاح STATE_FIPS الذي يمكننا من ربط بيانات نفس الولاية في كلا الجدولين. أما الشكل ت فهو جدول متكامل إذا تخيلنا أن كلا الجدولين قد ضمهما معا.

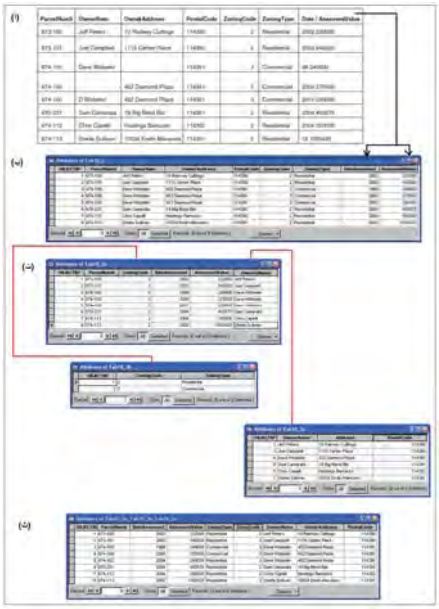


شكل (٣٤-١٩) نموذج لجداول قواعد البيانات الجغرافية

في السبعينات من القرن العشرين الميلادي قدم Ted Codd من شركة IBM خمسة قواعد لتركيب قواعد البيانات العلاقية لزيادة كفاءتها وتشمل:

١. توجد قيمة واحدة فقط في الخلية التي يتقاطع عندها العمود من السطر.
٢. كل قيم العمود الواحد تتعلق بموضوع واحد.
٣. كل سطر متفرد (أي لا يوجد ازدواج في السجلات).
٤. ترتيب السطور غير مؤثر.
٥. ترتيب الأعمدة غير مؤثر.

والشكل التالي يقدم مثالا توضيحيا لتطبيق هذه المبادئ الخمسة في قواعد البيانات الجغرافية، ففي الشكل (أ) يمثل الجدول قاعدة بيانات تقدير الضرائب، وفي الشكل (ب) تم تمثيل هذه القاعدة في قاعدة بيانات نظام معلومات جغرافي حيث تم تقسمه العمود الأخير في الجدول الأصلي إلي عمودين منفصلين تطبيقا للمبدأ الأول من المبادئ الخمسة، مع إضافة عمود المفتاح OBJECTID، وفي الشكل (ت) تم تجزئة قاعدة البيانات إلي ثلاثة جداول منفصلة لتتناسب مع تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في مجال تقدير الضرائب مع وجود عمود مفتاح مشترك لربط البيانات بين الجداول الثلاثة، وعند تطبيق عملية الربط join بين الجداول الثلاثة نحصل علي الجدول المجمع في الشكل (ث).



شكل (٣٤-٢٠) نموذج لقواعد البيانات الجغرافية في مجال تقدير الضرائب

٣٤-١١ لغة الاستعلام SQL

تعد لغة الاستعلام التركيبية القياسيةStructured/standard Query Language (أو اختصارا SQL) هي اللغة القياسية المطبقة في معظم برامج نظم المعلومات الجغرافية. وعادة فأن استعلامات SQL يتم تنفيذها compilation من خلال واجهة مستخدم رسومية حيث تكون عمليات التنفيذ مخفية وتظهر نتيجة الاستعلام مباشرة للمستخدم. وتتكون أوامر أو جمل statements لغة SQL من ثلاثة أنواع: لغة تحديد البيانات data definition language (DDL)، لغة إدارة البيانات data manipulation language (DML)، و لغة التحكم في البيانات data control language (DCL). وعلي سبيل المثال فالشكل التالي يمثل استعلام SQL للبحث عن قطع الأراضي من النوع السكني و التي تزيد قيمة الضريبة لها عن ٣٠٠٠ دولار. وبالطبع هناك كتب متخصصة في تعلم لغة SQL للمستخدمين.

```
SELECT Tab10_3a.ParcelNumb, Tab10_3c.Address,
   Tab10_3a.AssessedValue
FROM (Tab10_3b INNER JOIN Tab10_3a ON
   Tab10_3b.ZoningCode =
   Tab10_3a.ZoningCode) INNER JOIN Tab10_3c
   ON Tab10_3a.OwnersName =
   Tab10_3c.OwnerName
WHERE (((Tab10_3a.AssessedValue)>300000) AND
   ((Tab10_3b.ZoningType)="Residential"));
```

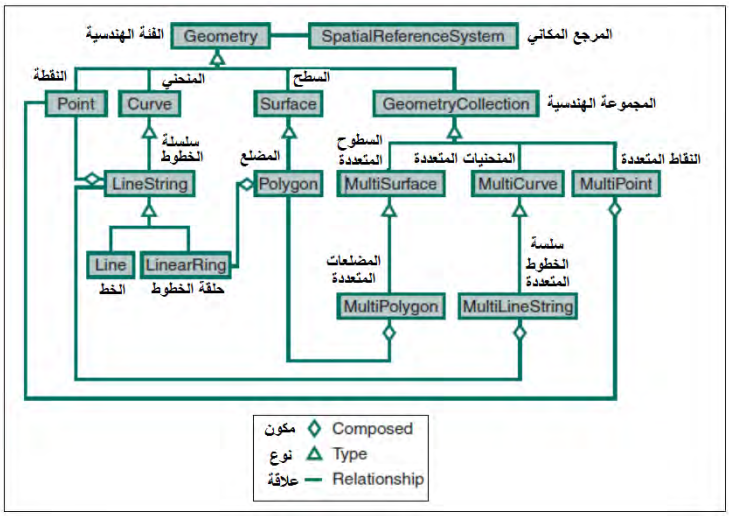
شكل (٣٤-٢١) مثال للاستعلام باستخدام لغة SQL

٣٤-١٢ أنواع ووظائف قواعد البيانات الجغرافية

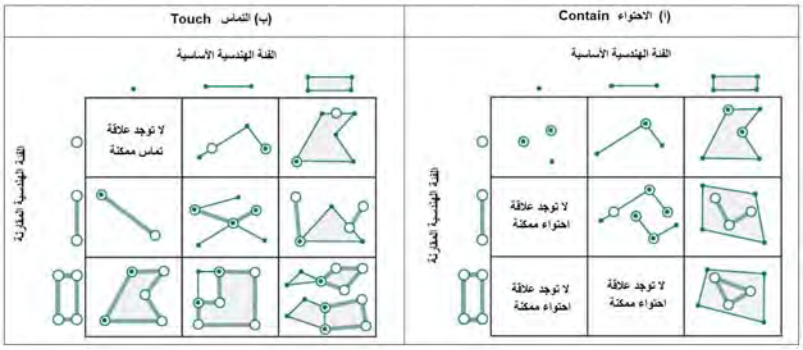
توجد عدة محاولات لتحديد أنواع ووظائف البيانات الجغرافية في صورة قياسية لتمثيل و استخدام هذه البيانات في قواعد البيانات. ومن أهم هذه المواصفات القياسية تلك التي طورتها المنظمة الدولية للمعايير القياسية ISO واللجنة الدولية للمعلومات المكانية OGC، وهو ما سنتعرض له في هذا الجزء.

تم تحديد أنواع ووظائف البيانات الجغرافية المستخدمة في قواعد البيانات في الصورة الهرمية الهندسية الممثلة في الجزء السابق. فالفئة الهندسية geometry class هي الأساس، ويوجد معها مرجع مكاني spatial reference (نظام إحداثيات و نظام إسقاط). وتشمل الأنواع الفرعية أو الثانوية للفئة الهندسية كلا من: النقطة point، المنحني curve، السطح surface، والمجموعة الهندسية geometry collection. أما الفئات الأخرى (المربعات) و العلاقات (الخطوط) في الشكل فتمثل كيفية إنشاء فئة هندسية لنوع محدد من الفئات الأخرى، فمثلا سلسلة الخطوط line string هي مجموعة من النقاط.

بناءا علي هذه المعايير القياسية فهناك تسعة طرق لاختبار العلاقات المكانية بين هذه الأهداف الهندسية، وكل طريقة تعتمد علي اثنين من المدخلات input لعمل تقويم أو اختبار إن كانت العلاقة حقيقية أم لا. وعلي سبيل المثال فالشكل التالي يوضح مثاليين للعلاقات المكانية الممكنة بين النقاط و الخطوط و المضلعات. ففي الشكل (أ) نري حالة الاحتواء contain بين النقاط، فهناك دوائر الدوائر الكبيرة التي تحتوي داخلها دوائر صغيرة. أما الشكل (ب) فيوضح حالة التلامس touch بين الخطوط والمضلعات، فنري الخطين يلامسان المضلع حيث أنهما يقطعان حدوده.



شكل (٣٤-٢٢) التركيب الهيكلي الهرمي للفئات الهندسية



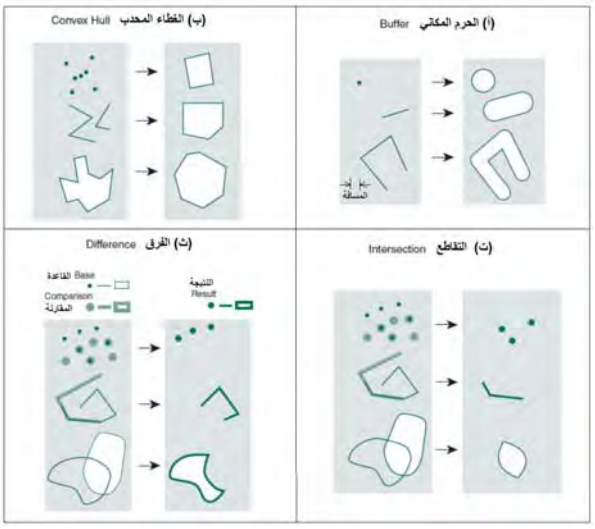
شكل (٣٤-٢٣) مثال للعلاقات المكانية الممكنة بين فئتين هندسيتين

كما تشمل المعاملات المنطقية (أو المعاملات غير الجبرية) Boolean operators لاختبار العلاقات المكانية أيضا:

- التساوي equal: هل الفئة الهندسية واحدة؟
- الفصل disjoin: هل الفئات الهندسية تتقاسم نقطة مشتركة؟
- التقاطع intersect: هل الفئات الهندسية تتقاطع؟
- التلامس touch:هل الفئات الهندسية تتقاطع في حدودها؟
- العبور cross:هل الفئات متداخلة؟
- الداخل within: هل فئة داخل فئة أخري؟
- الاحتواء contain: هل فئة تقع بالكامل داخل فئة أخري؟
- التداخل overlap: هل تتداخل فئتين؟
- الاتصال relate: هل التقاطعات بين الحدود الداخلية أم خارج الفئة؟

هناك سبعة طرق تدعم التحليل المكاني للعلاقات الهندسية (المنطقية) للفئات الهندسية وتشمل:

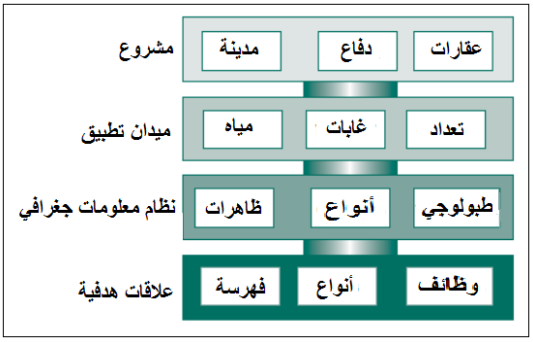
- المسافة distance: قياس أقصر مسافة بين أي نقطتين في فئتين.
- الحرم المكاني buffer: تحديد فئة تمثل جميع النقاط التي لها مسافة أقل من أو تساوي المسافة التي يحددها المستخدم.
- التقاطع intersection: تحدد فئة تضم كل النقاط المشتركة فقط من كلا الفئتين الأساسيتين.
- الاتحاد union: تحدد فئة تضم كل النقاط من كلا الفئتين الأساسيتين.
- الفرق difference: تحدد فئة تضم النقاط المختلفة بين كلا الفئتين الأساسيتين.
- الفرق التماثلي systematic difference: تحدد فئة تضم النقاط الموجودة في احدي (وليس كلا) الفئتين الأساسيتين.
- الغطاء المحدب convex hull: تحدد فئة تمثل غطاء محدب لفئة أخري (أي أصغر مضلع يمكنه تغليف أو تطويق فئة أخري بدون وجود أية أجزاء مقعرة).



شكل (٣٤-٢٤) مثال لبعض طرق التحليل المكاني

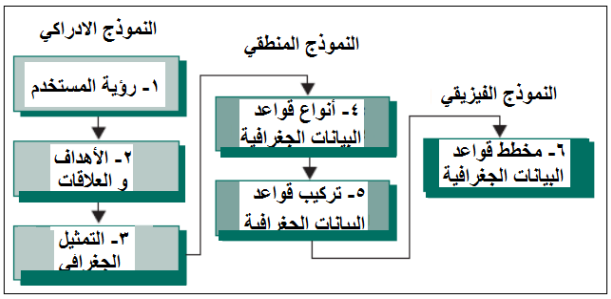
٣٤-١٣ تصميم قواعد البيانات الجغرافية

إن كل نظام معلومات جغرافي و كل نظام إدارة قواعد البيانات لديه نموذج بيانات أساسي يحدد أنواع الأهداف و العلاقات التي يمكن استخدامها في أي تطبيق. ويكون برنامج إدارة قواعد البيانات هو الذي يحدد و يقوم بتطبيق نموذج أنواع البيانات ووسائل الوصول إليها مثل استخدام لغة الاستعلام SQL، حيث يسمح هذا البرنامج بالتعامل مع أنواع الظاهرات البسيطة (النقاط و الخطوط و المضلعات) وأيضا العلاقات المكانية. ثم يأتي نظام المعلومات الجغرافي ليبني فوق هذه الأهداف البسيطة ليطور منها أهدافا وعلاقات متقدمة و معقدة مثل شبكات المثلثات غير المنتظمة TIN والبناء الطبولوجي. ويتم دمج أنواع نظم المعلومات الجغرافية مع نماذج البيانات لميادين التطبيق، التي تحدد فئات و مجالات التطبيق (مثل شبكات المياه وخرائط الملكيات ..الخ). وأخيرا تقوم المشروعات الخاصة بإنشاء النموذج الفيزيقي للبيانات. فعلي سبيل المثال ستقوم إدارة تخطيط المدينة بإنشاء قاعدة بيانات لخطوط الصرف الصحي مستخدمة نموذج البيانات الأساسي لهذه الشبكة (أي كقالب template) لبناء كلا من نظام المعلومات الجغرافي و نظام إدارة قواعد البيانات.



شكل (٣٤-٢٥) أربعة مستويات لنماذج البيانات في مشروعات نظم المعلومات الجغرافية

يشمل تصميم قواعد البيانات الجغرافية تطوير ثلاثة نماذج: النموذج الإدراكي conceptual والنموذج المنطقي logical و النموذج الفيزيقي أو الطبيعي physical، وذلك من خلال ستة خطوات عملية كما في الشكل التالي.



شكل (٣٤-٢٦) مراحل تصميم قواعد البيانات الجغرافية

يبدأ النموذج الإدراكي بنموذج رؤية المستخدم user's view وهو الذي يحدد طبيعة وظائف المؤسسة أو الجهة التي ستتعامل مع قاعدة البيانات الجغرافية وأيضا تحديد نوعية البيانات التي تتطلبها هذه الوظائف، مع تقسيم البيانات إلي مجموعات لتسهيل عمليات إدارة البيانات. ويمكن جمع هذه المعلومات إما في تقارير أو رسومات بيانية. ثم تأتي الخطوة الثانية لتحديد الأهداف و العلاقات objects and relationships وتهدف لتحديد أنواع الأهداف (الفئات) والعلاقات بينهم وأيضا الوظائف المنشودة. أما الخطوة الثالثة فتتكون من اختيار طريقة التمثيل الجغرافي (الأهداف المنفصلة أو المجالات المتصلة) المناسبة للتطبيق قيد الدراسة.

يهدف النموذج المنطقي لعمل ملائمة بين أنواع الأهداف و طرق تمثيل البيانات (أي أنواع قواعد البيانات) المستخدمة في نظم المعلومات الجغرافية. ثم تأتي بعد ذلك خطوة تركيب أو تكوين قاعدة البيانات مثل تحديد العلاقات الطبولوجية و تحديد نوع نظم الإحداثيات و نزع المسقط المستخدم. وفي الخطوة الأخيرة يتم بناء النموذج الفيزيقي للبيانات من خلال تكوين مخطط أو نموذج تطبيقي schema لقاعدة البيانات في صورتها النهائية المطلوبة.

٣٤-١٤ نظم المعلومات الجغرافية التوزيعية

قديما كانت أسعار أجهزة الكمبيوتر مكلفة جدا مما كان يضطر الجهات و المؤسسات لجعل خدمات الكمبيوتر في صورة مركزية (إدارة ومكاتب محددة) وجعل المستخدمين يأتون لهذا المكان ليتعاملوا مع البيانات. وتغير هذا الوضع الآن مع رخص أسعار أجهزة الكمبيوتر، ومن ثم أصبحت هناك إمكانية أن يكون كل جزء من مكونات نظم المعلومات الجغرافية متواجدين في عدة أماكن منفصلة، ومن هنا ظهر مصطلح نظم المعلومات الجغرافية التوزيعية distributed GIS. وقد سبق الذكر في الفصل السابع أن هناك عدة هيئات لنظم المعلومات الجغرافية، وهي تعد أمثلة لهذا المفهوم الجديد في علم نظم المعلومات الجغرافية. فهناك العديد من الشركات المنتجة لبرامج نظم المعلومات الجغرافية تطور برامج خاصة تسمح بالعمل علي الأجهزة المحمولة يدويا (مثل الألواح الكفية PDA و أجهزة الجي بي أس). وهذه الأنواع من الأجهزة صارت واسعة الاستخدام لجمع

المعلومات الميدانية أو الحقلية ثم إرسالها upload للمكتب أو الكمبيوتر الرئيسي (الشكل ١١-١). أيضا تتيح مثل هذه البرامج ما يعرف باسم نظم المعلومات الجغرافية للخادم Server GIS أو نظم المعلومات الجغرافية علي الانترنت Internet GIS، والتي تتيح للمستخدمين الولوج لقاعدة البيانات الجغرافية من بعد.

شكل (٣٤-٢٧) تجميع البيانات ميدانيا في نظم المعلومات الجغرافية التوزيعية

٣٤-١٥ توزيع البيانات

منذ انتشارها في بداية التسعينات من القرن العشرين الميلادي أصبح لشبكة الانترنت العديد من التأثيرات الهائلة علي الوصول لبيانات نظم المعلومات الجغرافية، مما نتج عنه قدرة المستخدمين علي مشاركة قواعد البيانات. يمكن القول أن الانترنت قد أنهت ذلك العصر الذي لم تكن فيه المعلومات الجغرافية متوافرة إلا من خلال الخرائط الورقية. والآن أصبحت هناك مواقع علي الانترنت يصل حجم المعلومات المكانية بها إلي البيتابايت betabyte (حيث يمكن تخزين محتويات مليون ونصف مليون اسطوانة مدمجة CD).فعلي سبيل المثال فأن موقع نظم بيانات و معلومات أرصاد الأرض EOSDIS الممول من وكالة الفضاء الأمريكية ناسا يقوم بتوزيع بيانات و صور أقمار صناعية تصل إلي ما يزيد عن التيرابايت يوميا.

يعد نوع "بيانات مستوي الهدف object-level metadata" أو اختصارا OLM من أهم أنواع فهرسة البيانات التوزيعية، فيمكن تخيله كما لو كان "أرشيف مكتبة" يمكن المستخدم من سرعة البحث عن كتاب معين. وفي نظم المعلومات الجغرافية التوزيعية distributed GIS يعمل نموذج OLM علي إتمام البحث بسرعة عالية بالإضافة للتأكد من وجود قاعدة البيانات التي تفي بمتطلبات المستخدم، فمثلا تحديد مستوي الوضوح المكاني spatial resolution لقاعدة البيانات وهل هي مناسبة للاستعلام المحدد من قبل المستخدم أم لا. كما يؤدي نموذج OLM وظيفة ثالثة ألا

وهي إمداد المستخدم ببعض البيانات التقنية الهامة، مثل صيغة البيانات التي تم العثور عليها و اسم برنامج الكمبيوتر الذي يصلح للتعامل معها. وبالطبع فأن إنشاء نموذج "بيانات مستوي الهدف OLM" لقواعد البيانات الجغرافية يتطلب مستوي عالي من الخبرة التقنية، كما يتطلب التقيد بمواصفات قياسية تلتزم بها جميع الشركات المنتجة للبرامج. والمواصفات القياسية الواسعة الانتشار هي تلك التي طورتها اللجنة الأمريكية للبيانات الجغرافية الرقمية CSDGM التي تم نشرها لأول مرة في عام ١٩٩٣م (١٤١٢ هـ). وعلي سبيل المثال فأن برنامج Arc GIS يستخدم صيغتين لنماذج OLM إحداهما باستخدام لغة XLM واسعة الانتشار، والأخرى باستخدام صيغة خاصة بشركة ايزري ذاتها.

تختلف قواعد البيانات الجغرافية في طبيعتها عن أيه أنواع أخري من البيانات، ومن ثم فأن البحث في قواعد البيانات الجغرافية يعتمد علي أولا علي طبيعة البيانات ثم لاحقا علي خاصيتين: الموقع و الزمن. فعند البحث في قواعد البيانات الجغرافية الرقمية الضخمة فأن البداية تكون بتحديد "مجال coverage" لقاعدة البيانات، ثم لاحقا يتم البحث داخل هذه المجموعة من البيانات عن البيانات التي تفي بمعايير الموقع و التاريخ المحددين من قبل المستخدم. ومن هنا ظهر مصطلح "المكتبة الجغرافية geo-library" ليصف المكتبات الرقمية التي يمكن البحث داخلها عن أية بيانات مكانية عن موقع جغرافي محدد.

أيضا يوجد نوع آخر من أنواع الفهرسة في نظم المعلومات الجغرافية التوزيعية وهو المعروف باسم بيانات مستوي المجموعة collection-level metadata أو اختصارا CLM. هذه الطريقة تعتمد علي وصف "مجموعة" من قواعد البيانات وليس قاعدة بيانات واحدة مثل الطريقة السابقة، مما يجعل عملية البحث تتم بصورة أسرع و أكفأ.

٣٤-١٦ نظم المعلومات الجغرافية المحمولة

أصبحت أجهزة الكمبيوتر جزءا هاما من حياتنا اليومية، وهناك من لا يستطيع تخيل الحياة بدون جهاز كمبيوتر!. ومع بداية الثمانينات من القرن العشرين الميلادي ظهر الكمبيوتر المحمول ليفتح آفاقا جديدة لم تكن معروفة من قبل. ثم ظهرت شبكات البيانات اللاسلكية (مثل الواي فاي WiFi) لتتيح تبادل البيانات بين الأجهزة والدخول علي شبكة الانترنت بصورة لاسلكية. وأتسع مجال الأجهزة المحمولة بصورة كبيرة ليشمل أجهزة اللوح الكفي PDA والتابلت tablet وأجهزة التليفون المحمول (الموبايل أو الجوال) .... وغيرها الكثير. ومن المتوقع انتشار ما يعرف باسم الكمبيوتر الملبوس wearable computer في السنوات القليلة القادمة، حيث ستكون أجزاء الكمبيوتر مدمجة في ملابس المستخدم (مثل ساعة اليد و الحزام و النظارة ...الخ) ليكون هذا الجهاز مع المستخدم أينما كان التالي.

شكل (٣٤-٢٨) الكمبيوتر الملبوس: الجيل الجديد من الكمبيوتر

مع انتشار تطبيقات تقنية النظام العالمي لتحديد المواقع (الجي بي أس) ظهرت نوعية جديدة من أجهزة الاستقبال مخصصة لتجميع البيانات في إطار نظم المعلومات الجغرافية. وتتميز هذه المجموعة الجديدة من الأجهزة بعدة خصائص تناسب هذا التطبيق أو الاستخدام الحديث. فمن حيث الدقة كانت الأجهزة الملاحية التقليدية (المحمولة يدويا) تتراوح دقتها في حدود عدة أمتار قليلة، بينما كانت الأجهزة الجيوديسية تصل في دقتها الي عدة ملليمترات. وعلي الجانب الآخر فقد كانت أسعار الأجهزة الهندسية مرتفعة بدرجة تجعلها غير مناسبة لمشروعات نظم المعلومات الجغرافية. من هنا فقد تميزت المجموعة الجديدة من الأجهزة بوصولها الي دقة متوسطة (عدة ديسيمترات) مع أسعار متوسطة أيضا تجعلها اختيارا مناسبا لتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية. أما ثاني مميزات هذه النوعية من أجهزة الجي بي أس فتمثل في ظهور إصدارات جديدة من برامج نظم المعلومات الجغرافية مخصصة للتثبيت و العمل علي هذه الأجهزة (مثل برنامج ArcPAD من شركة ايزري). ومن ثم فقد أصبح تسجيل البيانات غير المكانية attribute data متاحا أثناء العمل الميداني مع تحديد مواقع أو إحداثيات المظاهر المكانية المرصودة. كما توافرت إمكانيات لتصدير ملفات البيانات الميدانية إلي صيغ تتعامل مباشرة مع برامج نظم المعلومات الجغرافية الشهيرة (مثل صيغة shapefiles). أيضا تتميز بعض هذه الأجهزة بوجود وسائل نقل بيانات متعددة (من خلال البلوتوث أو الواي فاي) لتوفر نقل البيانات بين الأجهزة و الحاسبات بصورة سريعة دون الحاجة لكابلات نقل البيانات التقليدية. كما يمكن لهذه النوعية من الأجهزة أن تتواصل مع شبكات بث تصحيحات الجي بي أس (نظم الازدياد) من خلال شريحة تليفون محمول تمكنها من الولوج لشبكة الانترنت مباشرة في الموقع. ومع وجود كاميرا رقمية مدمجة داخل جهاز الجي بي أس أصبح تسجيل صور المعالم المرصودة ميدانيا في نفس الوقت أسهل وأسرع.

ويمكن تقسيم هذه الأجهزة إلي فئتين رئيسيتين من حيث دقة إحداثيات المواقع المرصودة:

- أجهزة تصل دقتها إلي ما دون مستوي المتر الواحد وتعتمد في طريقة عملها علي أسلوب خط القاعدة المتبع في القياسات المساحية الدقيقة حيث يوجد جهاز ثابت static يحتل

نقطة معلومة الإحداثيات بينما يتحرك الجهاز الثاني rover لرصد النقاط أو المعالم الجديدة. ويقوم الجهاز الثابت بحساب أخطاء إشارات الأقمار الصناعية عند النقطة المعلومة ليستفيد منها الجهاز المتحرك (إما لحظيا من خلال بث التصحيحات أو لاحقا في المكتب في خطوة الحساب data processing) للوصول إلي دقة ديسيمترات في إحداثيات النقاط الجديدة.

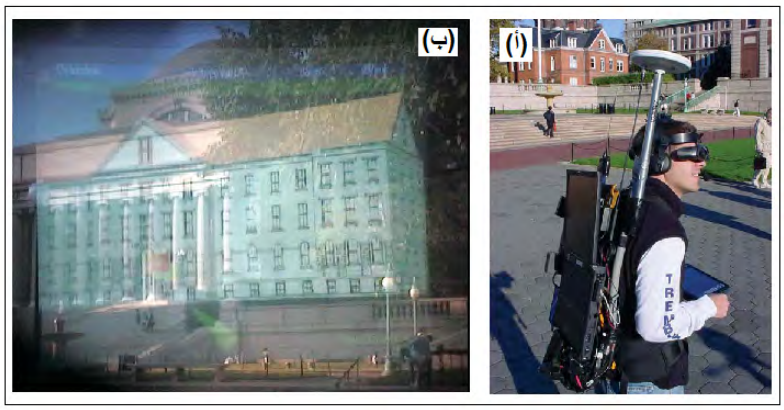
- أجهزة نعمل بمفردها stand alone بحيث لا يكون هناك إلا جهاز واحد فقط يمكنه الوصول إلي دقة ٢-٥ متر، مع الاحتفاظ بكافة المميزات الأخرى لتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية.

-

شكل (٣٤-٢٩) نماذج لأجهزة الجي بي أس المخصصة لنظم المعلومات الجغرافية

ظهر مصطلح الحقيقية التخيلية أو الواقع التخيلي Virtual Reality (أو اختصارا VR) ليدل علي تطبيق خاص من تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في السنوات الماضية. هذا التطبيق يسمح بإمداد المستخدم بمحتويات قاعدة بيانات بصورة مجسمة أو ثلاثية الأبعاد، من خلال نظارات خاصة أو بإسقاط هذه المعلومات علي حائط بجانب المستخدم، مما يسمح للمستخدم بالانتقال (التخيلي) إلي بيئة أخري أو واقع آخر تمثله هذه البيانات. فعلي سبيل المثال يمثل الشكل التالي نموذج ثلاثي الأبعاد قام بتطويره معمل الواقع الافتراضي بجامعة كاليفورنيا الأمريكية، وهو يمثل كاتدرائية سانتا ماريا في مدينة روما الايطالية (والتي دمرت في عام ٤٤٠ ميلادي). ثم تلا ذلك ابتكار تقنية جديدة في تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية تحت مسمي الحقيقية المدمجة أو الواقع المدمج Augmented Reality (أو اختصارا AR) حيث يتم دمج معلومات من قاعدة بيانات مع حواس المستخدم ذاته. ففي هذا النوع من التطبيقات يمكن للمستخدم أن يتخطى ما يراه في العالم الحقيقي لكي يري معلومات مصورة من عالم آخر (مثل معلومات تاريخية أو معلومات مستقبلية تخيلية). فالشكل التالي يمثل نموذجا للواقع المدمج AR حيث يوجد جهاز جي بي أس لتحديد المواقع ونظام معلومات جغرافي يحتوي معلومات تفصيلية عن البيئة أو الواقع التخيلي. وفي هذا المثال فأن المستخدم يسير في موقع محدد (أ) بينما يري بصورة تخيلية ما كان يحتويه هذا المكان في فترة تاريخية سابقة (ب).

شكل (٣٤-٣٠) مثال للواقع التخيلي أو الحقيقية التخيلية VR



شكل (٣٤-٣١) مثال للواقع المدمج أو الحقيقة المدمجة AR

من الأنواع الأخرى لنظم المعلومات الجغرافية المحمولة ما يعرف باسم الخدمات المعتمدة علي الموقع Location-Based Services (أو اختصارا LBS). وُيعرف نظام الخدمات المعتمدة علي الموقع بأنه خدمة معلوماتية تقدم من خلال جهاز قادر علي تحديد الموقع وقادر أيضا علي تعديل هذه المعلومات المعروضة. وتعد أبسط أنواع هذه الأجهزة هي التي تحتوي جهاز جي بي أس لتحديد المواقع مع جهاز كمبيوتر محمول للوصول إلي قاعدة بيانات الخدمة، ويكون غالبا مجهز بكارت PCMCIA للاتصال بالانترنت لحظيا. ومن أهم التطبيقات التي أدت لظهور هذا النوع من الخدمات تلك التطبيقات المستخدمة في عمليات الإنقاذ والطوارئ (الإسعاف و الدفاع المدني و المرور) حيث يمكن تحديد موقع المتصل بالخدمة ومن ثم معرفة موقعه بدقة وتوقيعه علي نظام معلومات جغرافي (في المركز الرئيسي للجهة) وبالتالي تحديد أقرب مركز طوارئ لهذا المكان مما يسمح بسرعة إرسال الخدمة المطلوبة لهذا المستخدم. وفي هذا التطبيق أيضا أمكن وضع جهاز جي بي أس في كل سيارة من سيارات الطوارئ و الإنقاذ بحيث يمكن للمركز الرئيسي تحديد أقرب سيارة لموقع المتصل و توجيها إليه بسرعة. وكمثال آخر فتوجد خدمات تقدمها شركات الاتصالات المحمولة بحيث يمكنها إرسال معلومات للشخص المتصل (مثل أقرب مطعم أو محطة قطار أو بنك ...الخ) بناءا علي تحديد موقعه.

٣٤-١٧ برامج نظم المعلومات الجغرافية

بصفة عامة فان البرامج يتم توزيعها بعدة صور: (١) البرامج التجارية الجاهزة software وهي التي توزع علي اسطوانات الفيديو المدمجة DVD ويتكون كلا منها من مجموعة برامج - وليس برنامجا واحدا - وبرنامج بسيط للتحميل install وملفات للمساعدة help وبعض البيانات للتدريب، (٢) البرامج المتقاسمة shareware وهي التي يتم بيعها بعد فترة تجربة أولية للمستخدم، (٣)البرامج الخفيفة liteware وهي برامج متقاسمة لكن بقدرات محددة، (٤) البرامج المجانية freeware وهي برامج مجانية لكن مع قيود علي الاستخدام، (٥) برامج عامة public-domain software وهي برامج مجانية بدون أية قيود، (٦) برامج مفتوحة المصدر open-source software وهي برامج مجانية مع إتاحة مصدر البرنامج الأصلي source code للمستخدم لكي يمكنه تعديلها و تطويرها. وبالطبع فان شبكة الانترنت أصبحت حاليا الوسيط أو وسيلة النقل الأساسية لتوزيع البرامج.

٣٤-١٧-١ تطور برامج نظم المعلومات الجغرافية

في الفترة الأولي لظهور نظم المعلومات الجغرافية كان البرنامج الواحد مكونا ببساطة من مجموعة من البرامج الفرعية routines التي يمكن لمستخدم ذو خبرة في البرمجة استخدامها لبناء برنامج تنفيذي. أيضا كانت هذه البرامج تختلف بشدة في إمكانياتها الفنية ومتطلبات تشغيلها. ومع نمو سوق برامج نظم المعلومات الجغرافية في السبعينات و الثمانينات من القرن العشرين الميلادي زاد الطلب علي برامج ذات إمكانيات اعلي و لها واجهة تنفيذية قياسية مختلفة عن طريقة كتابة الأوامر command line من خلال لوحة المفاتيح. ومن هنا بدا تطبيق واجهة المستخدم بالرسومات graphical user interface وذلك من خلال إنشاء القوائم menus والأيقونات icons. أيضا بدأت البرامج تحتوي إمكانية البرمجة programming لكي يستطيع المستخدم إنشاء تطبيقات لاستخدامات خاصة specific-purposes لا تتوافر بالبرنامج الأساسي (وذلك من خلال لغات البرمجة مثل الجافا Java أو الفيجوال باسيك Visual Basic).

مع انتشار الاعتماد علي نظم المعلومات الجغرافية بدأ ظهور برامج مخصصة لتطبيقات محددة لتفي بمتطلبات هذا القطاع الواسع من المستخدمين المختلفين، فبدأ ظهور برامج معلومات التخطيط (Planning Information Systems)، وبرامج للخرائط الرقمية (Automated Mapping/Facility Management Systems)، وبرامج معلومات الأراضي والملكيات (Land Information Systems)، وبرامج معلومات الخدمات (Location-based Services Systems).

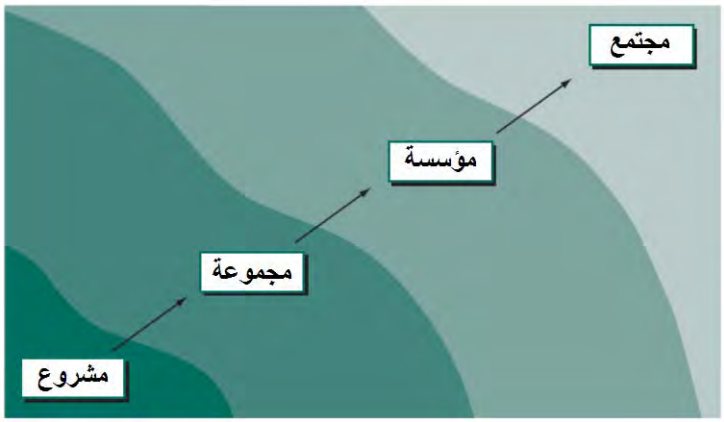
في السنوات القليلة الماضية بدا ظهور طريقة جديدة لتعامل البرامج مع مستخدميها وذلك من خلال شبكة الانترنت، وهو ما يعرف باسم بخدمات نظم المعلومات الجغرافية علي الانترنت web-services. وتسمح هذه الطريقة الجديدة للمستخدمين بتطبيق أو تشغيل برنامج نظم معلومات جغرافية من خلال الانترنت وأيضا باستخدام قواعد البيانات المتاحة من خلال هذه الخدمة. فعلي سبيل المثال يمكن لمدير احدي الشركات الذي يريد تحديد انسب مكان لاختيار موقع فرع جديد للشركة أن يتعامل من خلال خدمات الانترنت مع قواعد بيانات السكان (المتاحة علي الانترنت) و

أيضا مع أدوات نظم المعلومات الجغرافية الخاصة باختيار المواقع ليؤدي الوظيفة المطلوبة، وذلك دون أن تكون هذه الأدوات أو البرامج و قواعد البيانات موجودة بالفعل علي الكمبيوتر الخاص به.

٣٤-١٧-٢ أساليب بناء برامج نظم المعلومات الجغرافية

أنواع تطبيقات برامج نظم المعلومات الجغرافية

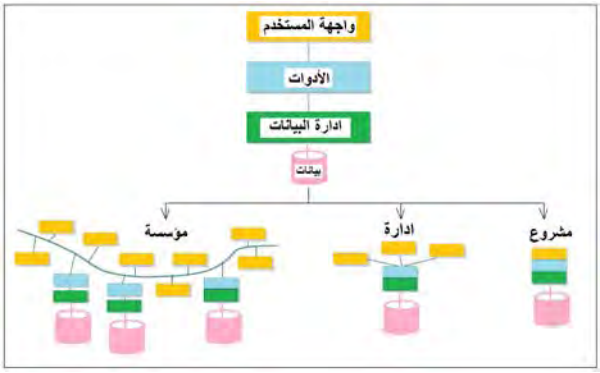
مع بدء دخول برامج نظم المعلومات الجغرافية في التطبيق داخل الجهات كانت النظرة الأساسية لاستخدام البرنامج هي كونه برنامج لمشروع محدد Project GIS حيث يتم جمع المعلومات و تخزينها وتحليلها لمشروع معين مهما طالت فترته الزمنية. وحتى في الجهات أو المؤسسات الكبيرة كان يتم استخدام البرنامج لعدة مشروعات بطريقة تعتمد علي هذه الفكرة الأولية، بمعني أن لكل مشروع قاعدة بيانات خاصة به بل وحتى أفراد مخصصين لكل مشروع. ومع انتشار الاعتماد علي برامج نظم المعلومات الجغرافية وبهدف خفض التكلفة الاقتصادية والتشجيع علي مشاركة البيانات بدأ النظر لبرامج نظم المعلومات الجغرافية علي أنها يمكن استخدامها لعدة مشروعات داخل نفس الإدارة، ومن ثم ظهرت برامج الإدارة Departmental GIS. وتعتمد هذه النوعية من البرامج علي إمكانيات جديدة خاصة في مشاركة و إدارة قواعد البيانات. ثم كانت المرحلة الثالثة عندما زاد اعتماد المؤسسات الكبيرة علي برامج نظم المعلومات الجغرافية في عدد كبير من التطبيقات داخل نفس المؤسسة فظهرت البرامج المؤسسية Enterprise GIS. وتتيح هذه النوعية من البرامج مشاركة البيانات بين عدد من أقسام المؤسسة، وأيضا تقلل من تكلفة تحديث البرامج والبيانات، كما تتيح إدارة مركزية للموارد. أما المرحلة الرابعة فكانت في ظهور البرامج المجتمعية Societal GIS حيث يمكن لمئات - بل وحتى آلاف - من المستخدمين التعامل مع نظم المعلومات الجغرافية من خلال شبكات الكمبيوتر. فكمثال هناك نظام معلومات جغرافي لدولة قطر يضم ١٦ مؤسسة حكومية متصلين معا فيما يعرف باسم نظام معلومات جغرافي لدولة كاملة Nationwide GIS (مع الأخذ بالاعتبار صغر مساحة دولة قطر).



شكل (٣٤-٣٢) أنواع تطبيقات برامج نظم المعلومات الجغرافية

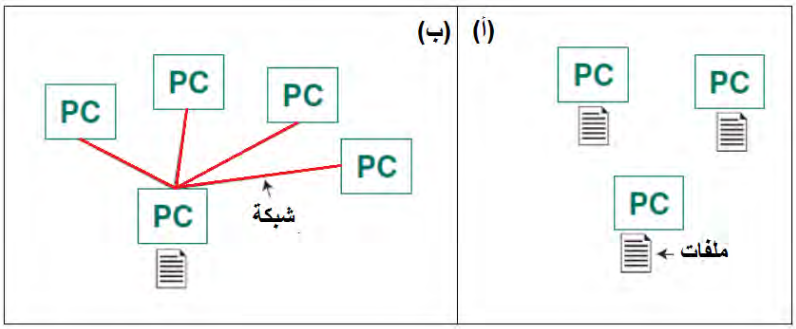
٣٤-١٧-٣ البناء الثلاثي لبرامج نظم المعلومات الجغرافية

من وجهة نظر برامج المعلومات فأن برنامج نظم المعلومات الجغرافية يتكون أساسا من ثلاثة مكونات وهي واجهة المستخدم user interface و الأدوات tools و نظام إدارة البيانات data management system. تتكون واجهة المستخدم من مجموعة القوائم و الأيقونات وشرائط الأدوات التي تسمح للمستخدم بصورة رسومية بسيطة من التعامل مع أدوات البرنامج ذاته. أما الأدوات فهي التي تحدد إمكانيات برنامج نظم المعلومات الجغرافية في معالجة و تحليل البيانات. ثم يأتي نظام إدارة البيانات الذي يتحكم في طرق تخزين و معالجة وإدارة ملفات أو قواعد البيانات. وهذا التركيب البنائي لبرامج نظم المعلومات الجغرافية معروف باسم البناء ثلاثي العجلات three-tire architecture.



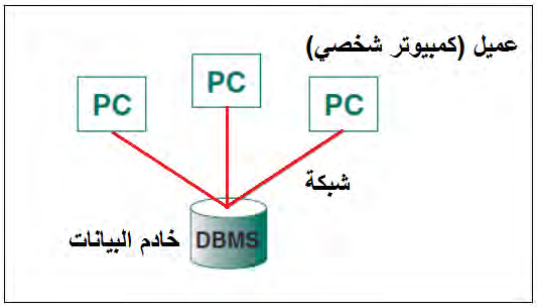
شكل (٣٤-٣٣) البناء التقليدي الثلاثي لبرنامج نظم معلومات جغرافية

ويتم تطبيق هذا البناء التركيبي لبرامج نظم المعلومات الجغرافية في أربعة صور أو هيئات مختلفة: كمبيوتر شخصي desktop، و خادم لعميل client-server، كمبيوتر مركزي centralized desktop، و خادم مركزي centralized server. في الهيئة أو الصورة الأولي (شكل أ) تكون المكونات الثلاثة للتركيب البنائي للبرنامج موجودة في كمبيوتر واحد (غالبا كمبيوتر شخصي PC). ومن الممكن أيضا أن تكون ملفات البيانات مخزنة علي خادم كمبيوتر مركزي مع وجود أكثر من مستخدم متصلين معا من خلال شبكة (شكل ب). وهاتين الصورتين يتم استخدامهما في البرامج المخصصة لمشروع محدد Project GIS.



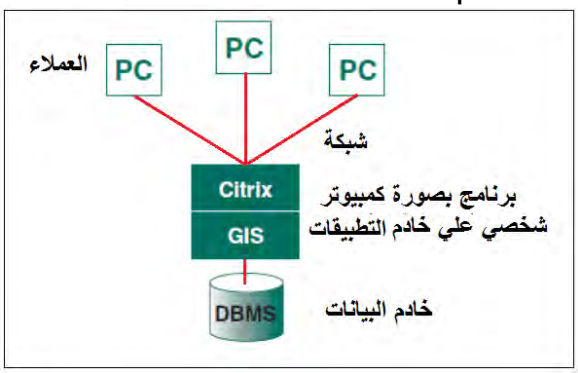
شكل (٣٤-٣٤) هيئة كمبيوتر شخصي لبرامج نظم المعلومات الجغرافية

يتم تطبيق الهيئة الثانية (خادم لعميل) في برامج الإدارات Departmental GIS حيث يوجد أكثر من مجموعة من مجموعات المستخدمين، وهنا يمكن لكل مستخدم في كل مجموعة أن يتعامل من خلال الكمبيوترات الشخصية والبرامج المحملة عليها، إلا أن ملفات البيانات ذاتها تكون مخزنة علي خادم مركزي متصل بالشبكة. وجاء اسم هذه الصورة "خادم لعميل" حيث أن كل مستخدم "عميل" يطلب من الخادم الحصول علي بيانات معينة أو يطلب أداء وظيفة معينة وعلي الخادم تنفيذ طلبات هؤلاء العملاء.

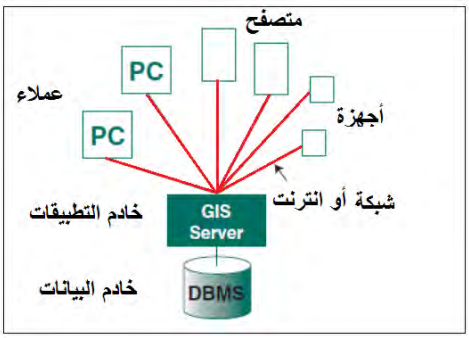


شكل (٣٤-٣٥) هيئة خادم لعميل لبرامج نظم المعلومات الجغرافية

في هيئة الكمبيوتر المركزي يتم استضافة كلا من واجهة المستخدم و الأدوات في خادم مركزي يسمي خادم التطبيقات application server، وغالبا يكون ذلك في صورة برنامج نم معلومات جغرافية من نوع الكمبيوتر الشخصي Desktop GIS. لم يكون هناك برنامج آخر (مثل Citrix أو Window Terminal Server) محمل علي خادم التطبيقات ويهدف إلي أن يكون برنامج نظم المعلومات الجغرافية متاحا لجميع المستخدمين (العملاء) المتصلين بهذا الخادم من خلال إما شبكة لمنطقة صغيرة Local Area Network (LAN) أو شبكة لمنطقة كبيرة Wide Area Network (WAN). أيضا تكون ملفات و قواعد البيانات مخزنة علي خادم آخر يسمي خادم البيانات Data Server حيث يوجد برنامج معالجة و إدارة البيانات Data Base Management System (DBMS). أما هيئة الخادم المركزي ففيها يمكن أيضا السماح بدخول بعض الأجهزة أو متصفحات الانترنت علي خادم التطبيقات من خلال الشبكة المحلية أو شبكة الانترنت ذاتها. وهاتين الهيئتين أو الصورتين هي الأكثر شيوعا في برامج نظم المعلومات الجغرافية للمؤسسات Enterprise GIS.



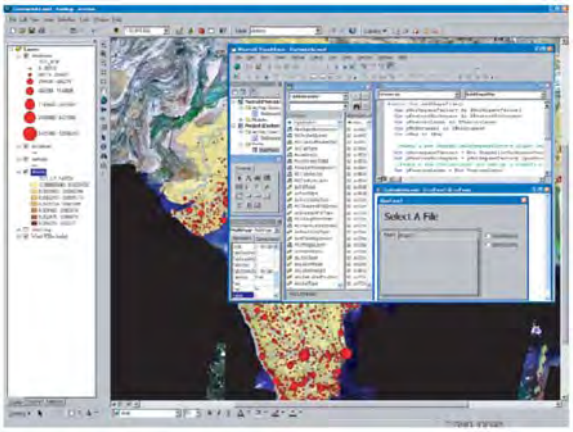
شكل (٣٤-٣٦) هيئة كمبيوتر مركزي لبرامج نظم المعلومات الجغرافية



شكل (٣٤-٣٧) هيئة خادم مركزي لبرامج نظم المعلومات الجغرافية

٣٤-١٧-٤ التخصيص في برامج نظم المعلومات الجغرافية

التخصيص customization هي عملية تعديل برنامج نظم معلومات جغرافي، مثل إضافة تطبيقات أو وظائف جديدة علي سبيل المثال. وبدأت هذه العملية في الظهور مع بداية التسعينات من القرن العشرين الميلادي حيث بدأت شركات البرامج تضم بعض إمكانيات التخصيص ليستخدمها العملاء من المطورين. وحاليا أصبحت عملية التخصيص موجودة في جميع البرامج خاصة باستخدام لغات البرمجة الشهيرة مثل الجافا و الفيجوال باسيك والبايثون Python التي يمكن للمستخدم تطبيقها في كتابة برامج تضيف إمكانيات أو وظائف جديدة لبرنامج نظم المعلومات الجغرافية. والشكل التالي يعرض نموذج لنافذة البرمجة باستخدام الفيجوال باسيك داخل برنامج Arc GIS الشهير من هيئة الكمبيوتر الشخصيDesktop GIS . أما برامج نظم المعلومات الجغرافية من الهيئة المعتمدة علي الخوادم server-based GIS فالأشهر هو استخدام لغة الجافا أو لغة السي C.



شكل (٣٤-٣٨) إمكانيات التخصيص في برنامج نظم المعلومات الجغرافية Arc GIS

٣٤-١٧-٥ منتجي برامج نظم المعلومات الجغرافية

من أمثلة الشركات المنتجة لبرامج نظم المعلومات الجغرافية ما يلي:

ايزري ESRI: تأسست في عام ١٩٦٩م (١٣٨٨ هـ) علي يد كلا من Jack and Luara Dangermond في ولاية كاليفورنيا الأمريكية. وهذه الشركة تخدم أكثر من مليون عميل علي مستوي العالم ويزيد دخلها السنوي علي نصف المليار دولار. وتركز ايزري علي إنتاج برامج نظم المعلومات الجغرافية بصفة أساسية، إلا أنها أيضا تعمل في مجال تقديم الخدمات الاستشارية لعملائها. وتنتج ايزري عائلة متكاملة من البرامج تحت اسم Arc GIS والتي يمكن استخدامها في الأجهزة المحمولة يدويا والكمبيوترات الشخصية و الخوادم.

انترجراف Intergraph: تأسست أيضا في نفس العام ١٩٦٩م كشركة خاصة - في ولاية ألاباما الأمريكية - تركز علي برامج الرسومات بالكمبيوتر. وتتكون انترجراف من أربعة أقسام أحدهما (قسم الحلول المكانية Geospatial Solutions) هو المختص ببرامج نظم المعلومات الجغرافية. وتنتج انترجراف برنامج جيوميديا GeoMedia و الذي يمكن تطبيقه علي الكمبيوترات الشخصية و الخوادم أيضا.

أوتوديسك Autodesk: اشتهرت شركة أوتوديسك علي مستوي العالم ببرنامجها الشهير AutoCAD للتصميم الهندسي باستخدام الكمبيوتر، والذي يزيد عدد مستخدميه علي الأربعة ملايين. وللشركة ثلاثة منتجات لنظم المعلومات الجغرافية أحدهم Auto Map 3D يعمل علي الكمبيوتر الشخصي، والثاني Map Guide مخصص للانترنت، والثالث OnSite يعمل علي الأجهزة المحمولة يدويا.

جي اي للطاقة GE Energy: تختلف هذه الشركة البريطانية عن سابقيها في أن برامجها تركز علي مجال تطبيقات تصميم و إدارة و تشغيل شبكات الخدمات العامة خاصة شبكات الكهرباء والغاز. وتنتج هذه الشركة برنامج Small world الممكن تطبيقه علي الكمبيوترات الشخصية و الخوادم.

وهناك جهات أخري تنتج برامج تضم إمكانيات نظم المعلومات الجغرافية و الاستشعار عن بعد معا، مثل شركة PCI Geomatics وجامعة كلارك المطورة لبرنامج IDRISI وشركة Leica Geosystems المطورة لبرنامج Erdas Imagine.

٣٤-١٨ أنواع برامج نظم المعلومات الجغرافية

يوجد ما يقارب المائة برنامج تجاري تدعي أن بها إمكانيات للخرائط و نظم المعلومات الجغرافية. ويمكن بصفة عامة تقسيم أنواع البرامج إلي أربعة أنواع: برامج مكتبية، برامج للخادم، برامج تطويرية، وبرامج محمولة يدويا، بالإضافة لبرامج أخري.

البرامج المكتبية

تعد برامج نظم المعلومات الجغرافية المخصصة للكمبيوتر الشخصي Desktop GIS النوع الرئيسي من أنواع البرامج التي تعمل - غالبا - تحت نظم التشغيل ويندوز. فهذه النوعية من البرامج تقدم للمستخدم أدوات إنتاجية شخصية في نطاق واسع من التطبيقات و التخصصات، وخاصة مع رخص سعر أجهزة الكمبيوتر الشخصية PC. وتغطي هذه البرامج نطاق واسع من الاختيارات و الإمكانيات تتراوح ما بين برامج بسيطة لعرض المعلومات الجغرافية (مثل برامج Arc Reader, GeoMedia Viewer) إلي برامج بإمكانيات متوسطة (مثل برامج AutoCAD Map 3D, Arc View, GeoMedia) إلي البرامج ذات الإمكانيات العالية للمحترفين (مثل برامج Arc Info, MapInfo Professional, GeoMedia Professional). أما عن أسعار برامج الكمبيوتر الشخصي فهي تتراوح بين ١٠٠-٢٠٠٠ دولار للبرامج المتوسطة الإمكانيات و ٧٠٠٠-٢٠,٠٠٠ دولار للبرامج الاحترافية.

برامج الخادم

من المتوقع أن يزداد الاعتماد في السنوات القادمة علي برامج الخادم Server GIS لنظم المعلومات الجغرافية. وتعتمد هذه النوعية علي وجود البرنامج محملا علي كمبيوتر مركزي يمكنه خدمه عدد كبير من العملاء المتصلين علي الشبكة. ومن أهم مميزات هذه البرامج تكلفتها الاقتصادية القليلة مع التمتع بالإمكانيات التقنية الهائلة لأجهزة الكمبيوتر الخادم. ومن أمثلة برامج الخادم: ArcGIS Server, GeoMedia Webmap, MapInfo MapXtreme. وتتراوح أسعار برامج نظم المعلومات الجغرافية للخوادم بين ٥٠٠٠-٢٥،٠٠٠ دولار.

البرامج التطويرية

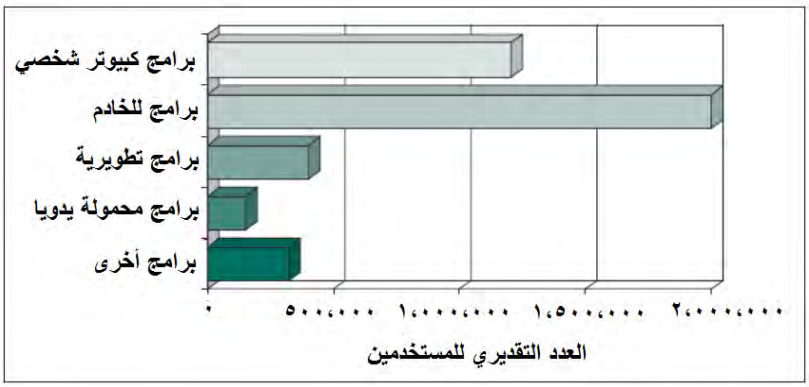
تتمتع هذه النوعية من برامج نظم المعلومات الجغرافية Developer GIS بأنها تقدم أدوات تطويرية للمستخدمين المحترفين (ذوي الخبرة في البرمجة) لتمكنهم من تطوير تطبيقات أو أدوات جديدة. ومن أمثلة هذه البرامج ArcGIS Engine, GeoObjects, Blue Marble Geographics. وغالبا فأن سعر منتج التطوير في برامج نظم المعلومات الجغرافية يتراوح بين ١٠٠٠-٥٠٠٠ دولار.

البرامج المحمولة يدويا

حديثا تم تطوير برامج نظم معلومات جغرافية يمكنها العمل مع الأجهزة المحمولة يدويا Hand-Held GIS وخاصة لخلق التكامل بين نظم المعلومات الجغرافية و تقنية النظام العالمي لتحديد المواقع GPS وأيضا أجهزة الجوالات (الموبايل) الذكية smart phones. وبالرغم من صغر حجم هذه الأجهزة المحمولة يدويا فأن إمكانيتها التقنية كبيرة مما يسمح لها بالتعامل مع حجم كبير من البيانات. ومن أمثلة هذه النوعية من البرامج Arc Pad, Autodesk OnSite, Intelliwhere. وتتراوح أسعار البرامج المحمولة يدويا بين ٤٠٠-٦٠٠ دولار.

برامج أخرى

توجد أيضا نوعيات أخرى من البرامج التي تقدم "إمكانيات" لنظم المعلومات الجغرافية. فمثلا توجد برامج من الممكن أن نطلق عليها اسم البرامج الشبكية raster-based GIS والتي تعتمد في الأساس علي توفير إمكانيات تقنية عالية لتحليل الملفات الشبكية raster، وان كانت لا تخلو من بعض إمكانيات التعامل مع الملفات الخطية vector أيضا. ومن أمثلة هذه البرامج Erdas Imagine, Idrisi. وتتراوح أسعار هذه النوعية من البرامج بين ٥٠٠-١٠،٠٠٠ دولار. أيضا توجد نوعية أخرى من البرامج تسمي برامج التصميم المعتمد علي الكمبيوتر Computer-Aided Design (CAD) وهي واسعة الانتشار بين المهندسين و المخططين. ويمكن النظر لهذه البرامج علي أنها بصورة أو بآخري برامج لنظم المعلومات الجغرافية، مع أن إمكانياتها في تحليل البيانات قد تكون بسيطة. ومن أمثلة هذه البرامج AutoCAD Map 3D, GeoGraphics. وتتراوح أسعار هذه النوعية من البرامج بين ٣٠٠٠-٥٠٠٠ دولار.



شكل (٣٤-٣٩) أنواع برامج نظم المعلومات الجغرافية

٣٤-١٩ نظم المعلومات الجغرافية الديناميكية

تم في التسعينات من القرن العشرين الميلادي تطوير نظم تقنية تهدف إلي "عمل الخرائط المحمولة mobile mapping systems" أو اختصارا MMS. وتتميز هذه الطرق بالاعتماد علي عدة تقنيات لتجميع البيانات المكانية (مثل المسح الجوي الأرضي terrestrial photogrammetry و الرادار و الليزر والجي بي أس) بصورة سريعة و دقيقة ورخيصة اقتصاديا أيضا حيث أنها تقلل من تكلفة العمل الحقلي. وتتكون مثل هذه التقنيات الحديثة من سيارة مركبا عليها مجموعة من أجهزة القياس و التسجيل مثل الكاميرات الفوتوغرافية الرقمية أو كاميرات الفيديو الرقمية وأجهزة الجي بي أس و أجهزة الليزر، بحيث يتم تجميع قياسات هذه الأجهزة بأسلوب تكاملي لحظي باستخدام جهاز كمبيوتر محمول. وبهذا الأسلوب التكاملي يمكن قياس الإحداثيات ثلاثية الأبعاد لكل المعالم المكانية التي يتم تصويرها (فوتوغرافيا أو فيديو) علي طول مسار السيارة، وتوقيع هذه القياسات لحظيا علي الخرائط علي الكمبيوتر لتطوير خريطة رقمية في نفس وقت العمل الميداني. وتصل دقة بعض نظم الخرائط المحمولة إلي عدة سنتيمترات في المستوي الأفقي. ويشتهر تطبيق

هذه التقنية في إنشاء و تحديث خرائط شبكات الطرق وكذلك في أعمال صيانة و إدارة شبكات المواصلات من طرق و سكك حديدية.

شكل (٣٤-٤٠) نماذج لنظم الخرائط المحمولة

الفصل الخامس و الثلاثين

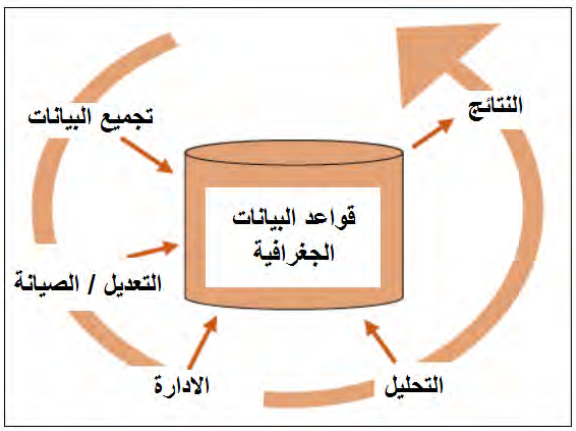
الخرائط و التحليل و النمذجة فى نظم المعلومات الجغرافية

يتعرض هذا الفصل لأسس الكارتوجرافيا و تطوير الخرائط وأيضا أدوات التحليل المكاني و النمذجة المكانية في نظم المعلومات الجغرافية بالإضافة لموضوع ادارة نظم المعلومات الجغرافية.

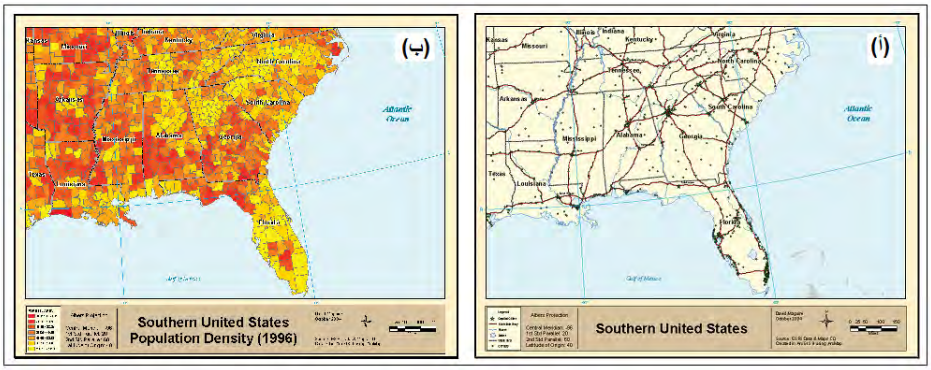
٣٥-١ الكارتوجرافيا و انتاج الخرائط

تمثل منتجات نظم المعلومات الجغرافية الثمرة الرئيسية في الكثير من المشروعات، مما يجعلها هامة للغاية للمديرين و المهندسين و العلماء. إن الخرائط مازالت تمثل وسيلة فعالة للغاية لتلخيص و نشر نتائج عمليات نظم المعلومات الجغرافية لدي قطاع واسع من الجمهور. وتجدر الإشارة إلي أن جزء كبير من مستخدمي نظم المعلومات الجغرافية مازالوا يعتمدون علي الخرائط بصورة أو بآخري.

توجد عدة تعريفات للخريطة - سواء كانت ورقية أو رقمية - ومنها التعريف التالي المعتمد علي نظم المعلومات الجغرافية: الخريطة هي الناتج النهائي لعدة خطوات من مراحل معالجة البيانات داخل نظام المعلومات الجغرافي بداية من تجميع البيانات ومعالجتها و صيانتها وصولا إلي مرحلة إدارة البيانات و تحليلها للوصول إلي الخريطة.وهناك نوعين أساسين من الخرائط: الخرائط المرجعية reference maps التي تمثل معلومات جغرافية عامة مثل الخرائط الجغرافية و الخرائط الطبوغرافية و الخرائط التفصيلية، والخرائط الموضوعية thematic maps التي تمثل موضوعا جغرافيا محددا مثل التعداد السكاني أو التربة. ففي الشكل (أ) نري خريطة طبوغرافية للولايات الجنوبية في أمريكا، بينما يمثل الشكل (ب) التوزيع السكاني لهذه الولايات.



شكل (٣٥-١) عمليات نظم المعلومات الجغرافية لإنتاج الخريطة



شكل (٣٥-٢) مثال لأنواع الخرائط

تؤدي الخرائط وظيفتين رئيسيتين، فهي وسيلة فعالة لحفظ وأيضا نشر المعلومات الجغرافية. فقديما كنا نقول أن "الصورة تغني عن ألف كلمة"، والآن يمكننا أن نقول أن "الخريطة تغني عن ألف بايت byte ". فالخريطة من الممكن أن تمثل معلومات خام raw data في صورة رقمية، ومن الممكن أيضا أن تمثل نتائج عمليات التحليل المكاني لظاهرة محددة. أيضا فالخريطة تقدم علاقات مكانية عن الظاهرات الممثلة علي نفس الخريطة أو علاقات مكانية بين عدة مواقع جغرافية. وتتطلب عملية اتخاذ القرار توافر الخرائط الدقيقة و الحديثة عن منطقة الدراسة.

غيرت نظم المعلومات الجغرافية الطريقة التقليدية لإنشاء و استخدام الخرائط، ويمكننا القول أن الكارتوجرافيا الرقمية digital cartography قد حررت صانع الخريطة من عدة قيود كانت موجودة في إنتاج الخرائط الورقية، ومنها:

١. تعتمد الخريطة الورقية علي مقياس رسم محدد fixed scale، لكن إمكانيات التكبير و التصغير zoom in/zoom out الموجودة في برامج نظم المعلومات الجغرافية تتيح رؤية و طباعة الخريطة في عدة مقاييس رسم.
٢. تغطي الخريطة الورقية امتداد جغرافي محدد fixed extend، بينما تتيح نظم المعلومات الجغرافية التعامل (في مشهد واحد) مع عدة خرائط متجاورة تغطي منطقة جغرافية كبيرة.
٣. تمثل معظم الخرائط الورقية نظرة ثابتة static view للعالم، بينما تستطيع طرق التمثيل في نظم المعلومات الجغرافية استنباط رؤية ديناميكية dynamic view للواقع الجغرافي.
٤. الخرائط الورقية مستوية أو ثنائية الأبعاد، بينما تستطيع نظم المعلومات الجغرافية التعامل مع البيانات ثلاثية الأبعاد 3D وتمثيلها كمجسم أو سطح.
٥. تعطي الخرائط الورقية نظرة للعالم كما لو كان كاملا، بينما مفهوم الطبقات layers في نظم المعلومات الجغرافية تتيح إظهار أو إخفاء طبقة (أو طبقات) معينة لفحص البيانات بتمعن.

تعد عملية تصميم الخريطة عملية فنية خلاقة يحاول من خلالها الكارتوجرافي أو صانع الخريطة إيصال المعلومات بصورة سهلة و بسيطة تناسب الهدف من الخريطة ذاتها. فالأهداف الرئيسية للخريطة تشمل مشاركة المعلومات وإبراز الأنماط والعمليات وتمثيل النتائج، بينما تشمل الأهداف

الثانوية تطوير صورة سهلة الفهم واضحة وجميلة أيضا دون الإخلال بالأهداف الرئيسية. ومن ثم فأن عملية تصميم الخريطة ليست عملية بسيطة، لكنها تحتاج المقارنة المتزامنة بين المتغيرات و الطرق المختلفة للوصول لأفضل تصميم. ولا يوجد تعريف محدد للتصميم الأفضل للخريطة، لكن بصفة عامة توجد سبعة عناصر تتحكم في عملية تصميم الخريطة وتشمل:

١. الهدف من الخريطة: هو أهم معامل يتحكم في نوعية البيانات التي ستظهر علي الخريطة وكيفية تمثيلها. فالخرائط المرجعية تعد خرائط عامة متعددة الاستخدامات بينما الخريطة الموضوعية يكون لها هدف واحد فقط.
٢. الواقع: غالبا فأن ظاهرات الواقع المطلوب تمثيلها تؤثر علي تصميم الخريطة ذاتها، فعلي سبيل المثال فأن اتجاه امتداد المنطقة الجغرافية سيحدد توجيه الخريطة (طوليا أو عرضيا).
٣. البيانات المتاحة: طبيعة البيانات المتاحة (خطية vector أو شبكية raster) يؤثر أيضا علي تصميم الخريطة وخاصة في تصميم مفتاح الخريطة.
٤. مقياس الرسم: يؤثر مقياس رسم الخريطة علي كمية البيانات الممكن تمثيلها (نتحدث هنا عن الخريطة عند طباعتها، وليس علي الخريطة داخل GIS فهي لا تعتمد علي المقياس كما سبق الذكر).
٥. الجمهور: لكل فئة من الجمهور المستخدم للخرائط متطلبات مختلفة في البيانات المراد إظهارها علي الخريطة، فعلي سبيل المثال فالمديرين يريدون رؤية خلاصة النتائج بينما المستخدمين المتخصصين يطلبون معلومات أكثر تفصيلا.
٦. شروط الاستخدام: البيئة التي سيتم فيها استخدام الخريطة قد تفرض قيودا معينة، فالخرائط المستخدمة في الهواء الطلق تتطلب مواصفات معينة عن الخرائط المفترض استخدامها داخل الغرف والمعامل المغلقة.
٧. القيود الفنية: هل سيتم التعامل مع الخريطة رقميا أم سيتم طباعتها ورقيا سيؤثر أيضا علي تصميم الخريطة، فمثلا خرائط الانترنت التي تظهر علي الأجهزة المحمولة ستكون أبسط من تلك التي سيتم التعامل معها علي شاشات الكمبيوترات الشخصية (ذات قدرة التوضيح resolution الأعلى).

٣٥-٢ التصور الجغرافي

٣٥-٢-١ مقدمة

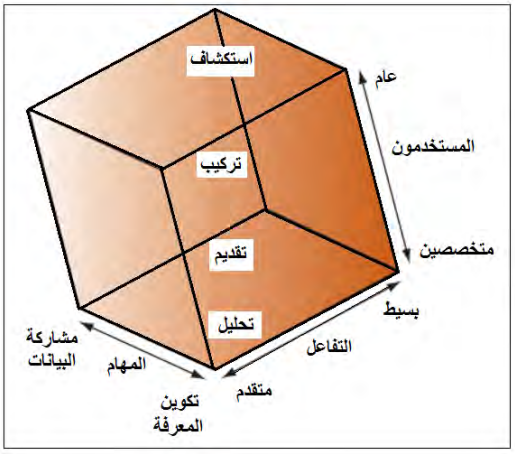
يعد التصور (أو التمثيل المرئي) الجغرافي geo-visualization أحد أهم مميزات نظم المعلومات الجغرافية من حيث تقديم المعلومات مرئية بصريا للمستخدم. فنظم المعلومات الجغرافية تمتلك وسائل أغني وأقوي وأكثر كفاءة في تمثيل المعلومات والتوزيعات عند مقارنتها بالخرائط الورقية. تتطلب عملية اتخاذ القرار (بالاعتماد علي نظم المعلومات الجغرافية) إيصال رسالة تمثيل البيانات الضخمة المتاحة في صورة بسيطة و سهلة الفهم للمديرين و التنفيذيين. وُتعرف عملية التصور الجغرافي علي أنها عملية ابتكار و استخدام طرق التمثيل البصري لتسهيل فهم واستيعاب المعلومات الجغرافية وتكوين المعرفة عن البيئة البشرية و البيئية المحيطة. ومن ثم فأن التصور الجغرافي هو مجال بحثي يستخدم أساليب التمثيل المستنبطة من عدة علوم تشمل علوم الكمبيوتر و الكارتوجرافيا وتحليل المرئيات بالإضافة لعلم نظم المعلومات الجغرافية. ويهدف هذا المجال

لتطوير نظريات و طرق و تحليلات مناسبة لتمثيل المعلومات المكانية، أي أنه يتخطي الطرق التقليدية لتصميم الخرائط إلي مرحلة تطبيقية جديدة لإيصال المعلومات الجغرافية لقطاع واسع من المستخدمين في التطبيقات العلمية و الاجتماعية.

٣٥-٢-٢ التصور الجغرافي و الاستعلام المكاني

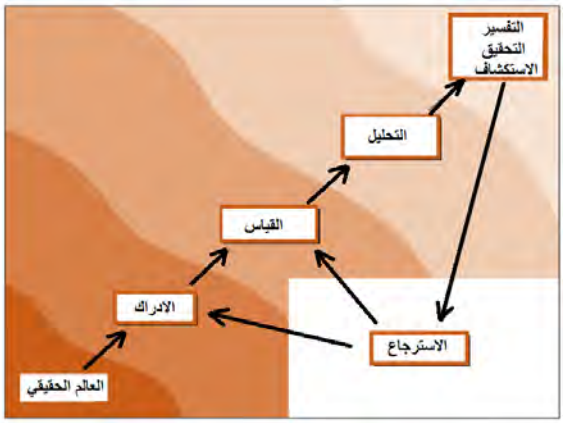
يعتمد التصور الجغرافي الجيد علي فهم طرق الإدراك البشري للأشكال وطبيعة تفكير الإنسان عن المكان و الزمان ومن ثم كيف يمكن تمثيل البيئة المكانية تمثيلا أفضل باستخدام الكمبيوتر و البيانات الرقمية. وفي هذا الإطار فهناك أربعة أهداف للتصور الجغرافي:

- الاستكشاف exploration : تحديد هل يمكن أن تكون الرسالة العامة لقاعدة البيانات حساسة لتضمين أو استثناء عنصر معين من البيانات.
- التركيب الاصطناعي synthesis : تقديم قاعدة بيانات - أو أكثر - معقدة ومليئة بالتفاصيل بصورة يسهل فهمها للمستخدم.
- التقديم presentation : تقديم الرسالة العامة لقاعدة البيانات بطريقة سهلة و ذكية تجعل المستخدم يفهم الإطار العام لجودة التمثيل.
- التحليل analysis : تقديم وسيلة أو وسط مناسب يدعم طرق و تقنيات التحليل المكاني.
- يهدف التصور الجغرافي إلي جعل المستخدمين يستكشفون و يركبون و يقدمون و يحللون بياناتهم الخاصة، حتى و إن اختلفوا في المهام (من مشاركة البيانات وحتى تكوين المعرفة) أو اختلفوا في الخبرات أو اختلفوا في درجات التفاعل.



شكل (٣٥-٣) وظائف التصور الجغرافي

يمكن أخذ التصور الجغرافي في الاعتبار وعلاقته بمفهوم عدم اليقين ليتكون لدينا الآن شكلا جديدا لهذا النموذج، بحيث لا يكون التحليل الجغرافي هو نقطة النهاية بل سيكون بمثابة نقطة بداية جديدة لعملية الاسترجاع feedback وإمكانية فحص بدائل أخري للتمثيل.



شكل (٣٥-٤) التحليل ليس نقطة النهاية في نمذجة العالم الحقيقي

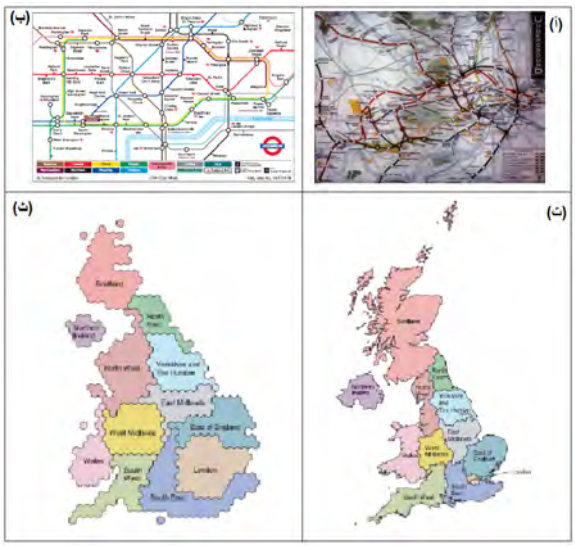
يكون أبسط طرق تقويم وإعادة تشكيل نموذجا تمثيليا للعالم الحقيقي من خلال الاستعلام المكاني spatial query للإجابة علي عدة أسئلة مثل: أين؟ ماذا يوجد في مكان محدد؟ ما العلاقة المكانية بين ....؟ ما هو المماثل لـ ....؟ أين يقع الحدث .... ؟ ماذا تغير منذ .... ؟ ما هو النمط المكاني لـ ... ؟ وكل برامج نظم المعلومات الجغرافية تتيح شرائط أدوات و أيقونات لتنفيذ عمليات الاستعلام المكاني. أيضا تتيح مواقع خدمات نظم المعلومات الجغرافية علي الانترنت هذه الوظائف حيث أن الاستعلام المكاني يعد من أهم وظائف نظم المعلومات الجغرافية. وربما تبدو عملية الاستعلام المكاني عملية بسيطة، إلا أنها معقدة بطبيعتها خاصة في التطبيقات التي تعتمد علي تحديث البيانات بصورة مستمرة (مثل خدمات المرور).

٣٥-٢-٣ التصور الجغرافي و تحويل صور البيانات

تحويل صور البيانات transformation هي عملية تغيير صورة تمثيل البيانات غير المكانية attribute للمساعدة في عمليات التحليل المكاني لخصائص الظاهرات الجغرافية. فعلي سبيل المثال فأن خطوط الشواطئ يتم قياسها (من الخريطة الممسوحة ضوئيا) كمجموعة متتالية من الخطوط المرقمة، لكن تصورها جغرافيا قد يكون في صورة خط واحد يعبر عن الاتجاه العام للشاطئ. أيضا وكمثال آخر فأن الحقول الزراعية يتم قياسها في صورة مضلعات محددة، بينما يمكن تصورها جغرافيا في هيئة مضلعات تعبر عن فئات متجانسة من المحاصيل. أما الأهداف ثلاثية الأبعاد مثل نقاط الارتفاعات المقاسة فيمكن تصورها جغرافيا في صورة نموذج ارتفاعات رقمي. وهذه العمليات من تحويل صور البيانات تهدف لجعل تصورها أو تمثيلها بصريا أسهل في الفهم و التحليل.

الكارتوجرام cartograms هي نوعية خاصة من الخرائط التي لا تحافظ علي الصحة الأفقية ويتم وضع تشوه متعمد للمسافات أو المساحات عليها لأهداف خاصة. وأهم أهداف عمل الكارتوجرام هو إظهار أنماط ربما لا يمكن ملاحظتها في حالة الخرائط العادية لكي تكون الخريطة سهلة القراءة و التفسير. فعلي سبيل المثال فالشكل (أ) يمثل الصورة الحقيقية لمترو الأنفاق في مدينة لندن في عام ١٩٩٣م، وهي ليست خريطة سهلة الفهم لركاب المترو خاصة من الأجانب.

ويمثل الشكل (ب) كارتوجرام لشبكة المترو في صورة أكثر بساطة وأسهل فهما. أما الشكل (ت) فيمثل خريطة أقاليم المملكة المتحدة، بينما نري بعض التضخيم exaggeration في الكارتوجرام المناظر (الشكل ث) الذي يمثل الأقاليم متساوية السكان. ويمكننا تخيل هذا الكارتوجرام كما لو كان إسقاط من نوع خاص حيث يتم رسم كل إقليم نسبة لعدد سكانه، لكن بحيث أن الشكل العام لحدود الإقليم ما يزال بقدر الإمكان يشبه شكله الجغرافي الحقيقي. توجد بعض الطرق نصف الآلية semi-automatic لإنشاء الكارتوجرام، إلا أن معظمها يحتاج للتدخل البشري للتعديل النهائي.



شكل (٣٥-٥) أمثلة لتطبيقات الكارتوجرام في التصور الجغرافي

٣٥-٣ التصور الجغرافي و نظم المعلومات الجغرافية للجمهور

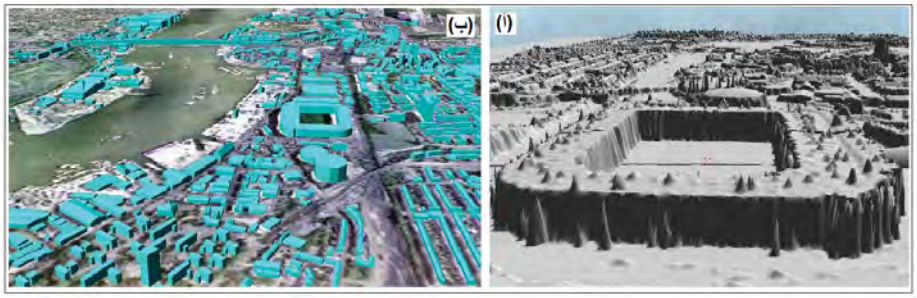
تعد نظم المعلومات الجغرافية من أهم أدوات اتخاذ القرار في العديد من عمليات التنمية. لكن من الأفضل أن يجمع متخذي القرار أراء الجمهور في أية مشروعات تنموية ليتم أخذها في الاعتبار قبل و أثناء تنفيذ هذه المشروعات. ومن هنا ظهر مصطلح جديد يمكن أن نطلق عليه اسم نظم المعلومات الجغرافية للجمهور Public-Participation GIS أو اختصارا PPGIS. وعلي المستوي التقني فأن هذا الأسلوب الجديد يهدف أيضا لتشجيع الجمهور العام علي استخدام نظم المعلومات الجغرافية وإبداء أرائهم ومقترحاتهم لمتخذ القرار في عمليات التنمية المجتمعية. وبالطبع فأن هذا الأسلوب يتطلب إنشاء أكثر من تمثيل لتبسيط عدة أنواع من البيانات غير المكانية attribute للجمهور غير المتخصص لكي يستطيع أن يكون صورة جيدة عن العالم الحقيقي في البيئة المحلية. وتتطلب نظم المعلومات الجغرافية للجمهور برامج من نوع خاص تسمح بعرض بيئة متحركة و تفاعلية interactive and dynamic مع المستخدم، وهنا يلعب التصور الجغرافي دورا مؤثرا.

أيضا يتم تطبيق أساليب التمثيل الجغرافي في طرق الواقع الافتراضي VR بعدة صور لكي تمكن المستخدمين من التعامل مع عدة مناظر من البيانات المكانية بصورة افتراضية. هنا يتم توظيف

التمثيل الجغرافي لإنشاء بيئة افتراضية ثلاثية الأبعاد للظاهرات الطبيعية و الصناعية، مع إعطاء المستخدم أدوات للتكبير zoom in و التصغير zoom out و الحركة pan داخل كل نموذج.

يمكن الاستفادة من التصور الجغرافي في تمثيل البيانات ثلاثية الأبعاد 3D لإعطاء صورة أفضل و أسهل في الفهم للظاهرات المجسمة. فعلي سبيل المثال فالشكل (أ) يمثل قياسات الارتفاعات الحقيقية للمنطقة المحيطة بالإستاد الرياضي في مدينة ساوثهامبتون البريطانية باستخدام تقنية المسح الجوي الليزري (المعروف باسم LiDAR). وفي الشكل (ب) تم إسقاط هذه النماذج ثلاثية الأبعاد علي صورة جوية للمدينة بحيث يمكن ملاحظة ارتفاعات الظاهرات المكانية.

شكل (٣٥-٦) التصور الجغرافي و تمثيل الواقع الافتراضي



شكل (٣٥-٧) التصور الجغرافي و التمثيل ثلاثي الأبعاد

٣٥-٤ الاستعلام و القياس و التحويل

٣٥-٤-١ مقدمة: ما هو التحليل المكاني؟

التحليل المكاني هو العملية التي من خلالها يتم تحويل البيانات الخام إلي معلومات مفيدة تستخدم للدراسات العلمية أو لاتخاذ القرار. وبمعني آخر فالتحليل المكاني هو جوهر نظم المعلومات الجغرافية، حيث أنه يضم جميع عمليات إدارة و معالجة البيانات واكتشاف الأنماط وفجوات البيانات التي لا تظهر بصريا بسهولة بهدف اتخاذ القرار. والمصطلح الشائع الاستخدام هو التحليل "المكاني spatial" وليس التحليل "الجغرافي" حيث أن هذا التحليل يعتمد علي تحليل البيانات في أي حيز مكاني space سواء كان هذا المكان هو الحيز الجغرافي للأرض، أو الحيز الفضائي لأي كوكب، أو حتى الحيز الدماغي لمخ الإنسان. ويعد التحليل المكاني سابقا علي وجود نظم المعلومات الجغرافية ذاتها، فقديما كان هناك "الكارتوجرافيا التحليلية analytical cartography" حيث يتم استخدام طرق تحليل الخرائط الورقية - من خلال القياسات المستنتجة بأجهزة بسيطة - بهدف استنباط معلومات هامة منها.

تتعدد طرق و أساليب التحليل المكاني بشدة، فقد تكون طرق بسيطة للغاية وقد تكون طرق رياضية و إحصائية معقدة للغاية. لكن هذه العملية لا تعتمد فقط علي قوة ومواصفات الكمبيوتر و البرامج المستخدمة، إنما أيضا تحتاج لمستخدم ذكي. فمن الممكن أن نتخيل أن عين و مخ الإنسان يقومان بعمل تحليل بصري بمجرد النظر للخريطة للورقية بهدف استنباط معلومات مفيدة من الخريطة. فإذا استخدمنا الكمبيوتر و البرامج لتحل محل العين البشرية فمازال دور العقل البشري هاما للغاية في إكمال التحليل المكاني الجيد. وهذه نقطة هامة جدا يجب الانتباه إليها:

Effective spatial analysis requires an intelligent user, not just a powerful computer

يختلف التحليل المكاني عن أي نوع آخر من التحليل في أنه يعتمد علي مكان محدد، ومن ثم فمن الممكن تعريف التحليل المكاني علي أنه مجموعة من الطرق التي ستختلف نتائجها باختلاف مكان الأهداف والظاهرات قيد الدراسة. وبالطبع فأن نظم المعلومات الجغرافية تعد منصة مثالية للتحليل المكاني حيث أن كل مفردات قواعد البيانات الجغرافية مرجعة جغرافيا أي لها مواقع مكانية محددة. وتوجد ستة أساليب عامة لطرق التحليل المكاني وتشمل:

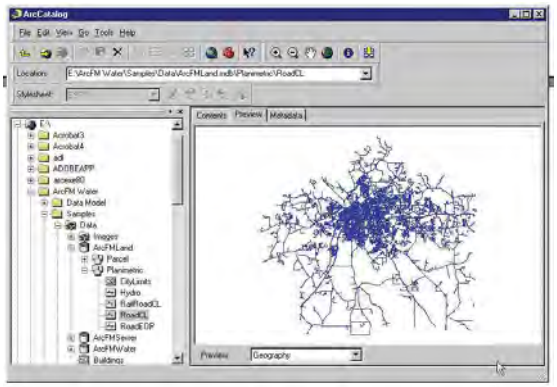
١. الاستعلام query : من أبسط طرق التحليل المكاني حيث يستطيع نظام المعلومات الجغرافي الإجابة علي أسئلة بسيطة من قبل المستخدم مثل: ما عدد المنازل الموجودة في نطاق كيلومتر واحد من هذه النقطة؟ ما هي أقرب مدينة شمالا من مدينة لوس أنجلوس؟. وفي هذه الطريقة لا تحدث أية تغييرات علي قاعدة البيانات الجغرافية ولا يتم إضافة أية بيانات جديدة للنظام.
٢. القياسات measurements : عمل قياسات للحصول علي قيم رقمية بسيطة تصف طبيعة البيانات الجغرافية، مثل القياسات البسيطة كالطول و المساحة والاتجاه.

٣. التحويلات transformations : طرق بسيطة للتحليل المكاني يتم فيها تغيير مجموعة البيانات مثل دمج مجموعتين أو مقارنتهم. ومن أمثلة التحويلات تحويل البيانات الخطية vector إلي بيانات شبكية raster والعكس أيضا.
٤. التلخيص الوصفي descriptive summary : الوصول لملخص مجموعة بيانات من خلال رقم أو رقمين (مثل المتوسط و الانحراف المعياري)، وهو المقابل لفرع الإحصاء الوصفي في علم الإحصاء.
٥. التحديد الأمثل optimization : طرق قياسية تصمم لاختيار الموقع المثالي للأهداف بناءا علي معايير أو شروط محددة.
٦. الاختبار الافتراضي hypothesis testing : الاختبارات التي تركز علي منطقية اعتبار نتائج عينة تمثل نتيجة عامة لمجتمع كامل من البيانات.

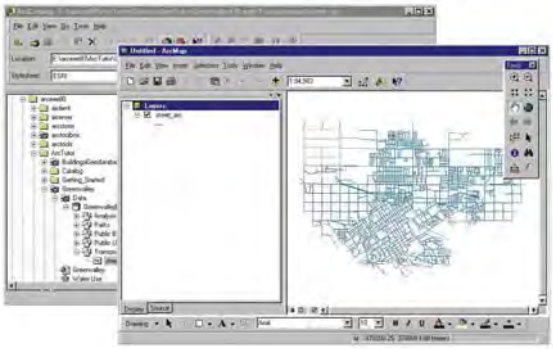
٣٥-٤-٢ الاستعلام

يتيح أي نظام معلومات جغرافي مثالي للمستخدم إمكانية استجواب interrogation النظام عن أيا من محتوياته، ليحصل علي أجوبة فورية. وقد يكون هذا الاستجواب بالتحديد علي الشاشة أو بكتابة السؤال أو من خلال الاختيار في قائمة من شرائط أدوات البرنامج أو (حديثا) من خلال توجيه السؤال شفويا للنظام (في تطبيقات الملاحة بالسيارات حيث لا يمكن الكتابة أثناء القيادة). يتيح أبسط أنواع الاستعلام التفاعل بين المستخدم ومجموعة المشاهدات views التي تقدمها نظم المعلومات الجغرافية. فمشاهدة الكتالوج catalogue view تعرض محتويات قاعدة البيانات المخزنة علي القرص الصلب للكمبيوتر أو علي الاسطوانة المدمجة أو الذاكرة المحمولة (الفلاش ميموري). وعادة يكون الكتالوج في صورة هرمية لعرض محتويات كل مجلد والمجلدات الفرعية به، من خلال صورة تفاعلية مع المستخدم. ومعظم البرامج تتيح للمستخدم معرفة خصائص أي ملف من قاعدة البيانات (مثل نوع المسقط ونوع نظام الإحداثيات) بمجرد الضغط علي اسم الملف واختيار أمر "خصائص properties".

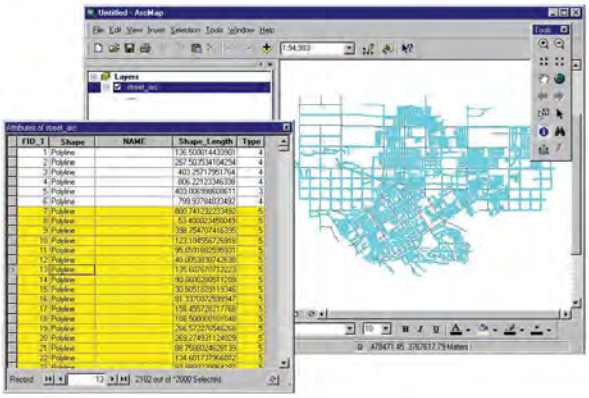
أما مشاهدة الخريطة map view فتعرض محتويات مجموعة البيانات بصورة بصرية وتفتح إمكانيات أكثر للاستعلام، فمثلا بمجرد الإشارة (أو المرور) بالماوس لأي نقطة علي الخريطة يتم عرض إحداثيات هذا الموقع. أما في حالة البيانات الشبكية فيمكن عرض الإحداثيات أو عرض رقم الصف و رقم العمود للخلية.
أما مشاهدة الجدول table view فتعرض مصفوفة من الصفوف التي تمثل الأهداف و الأعمدة التي تمثل البيانات غير المكانية، وهو ما يسمي بجدول البيانات غير المكانية attribute table. وبعض برامج نظم المعلومات الجغرافية تعرض مشاهدات أخري مثل الهستوجرام histogram والذي يعرض نوع من البيانات غير المكانية في صورة أعمدة، والتوقيع المشتت scatter plot الذي يوقع قيم نوعين من البيانات غير المكانية في صورة x,y وهذا ما يسمح للمستخدم من اكتشاف أي ارتباط بين هذين النوعين من البيانات.



شكل (٣٥-٨) مثال لمشاهدة الكتالوج في برنامج ArcGIS



شكل (٣٥-٩) مثال لمشاهدة الخريطة في برنامج ArcGIS



شكل (٣٥-١٠) مثال لمشاهدة الجدول في برنامج ArcGIS

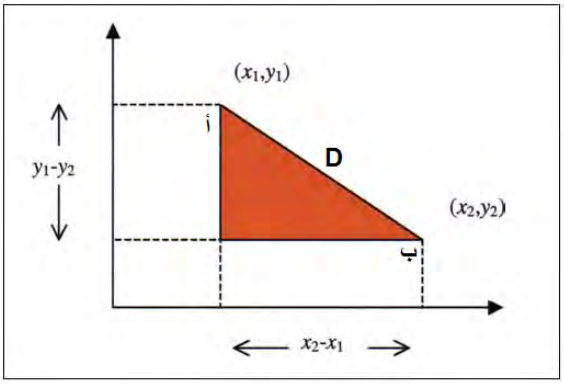
تعرض معظم برامج نظم المعلومات الجغرافية أكثر من مشاهدة في نفس الوقت مما يتيح للمستخدم فحص البيانات بصورة تفاعلية أكثر كفاءة. فعلي سبيل المثال يمكن عرض مشاهدة الخريطة و مشاهدة الجدول معا بحيث أن تحديد أهداف معينة في قاعدة البيانات يؤدي لتحديد (تظليل) نفس هذه

الأهداف في مشاهدة الخريطة. أما استخدام لغة الاستعلام التركيبية القياسية SQL فهو الأسلوب الأكثر قوة في تطبيق الاستعلام في قاعدة البيانات غير المكانية وقواعد البيانات العلاقية.

٣٥-٤-٣ القياسات

من المهم لمستخدم نظم المعلومات الجغرافية أن يقوم بعمل القياسات (مثل مساحة قطعة أرض، أو طول شارع، أو المسافة بين نقطتين) للحصول علي معلومات هامة للمظاهر الجغرافية. وكانت مثل هذه القياسات صعبة و تستغرق وقتا طويلا و تتعرض للأخطاء في مرحلة الخرائط الورقية. ثم أبتكر الإنسان بعض الأجهزة البسيطة لمساعدته في عمل هذه القياسات (مثل جهاز البلانيمتر لقياس المساحات من الخرائط). ثم أتت نظم المعلومات الجغرافية لتجعل هذه القياسات تتم بصورة مبسطة و كفاءة و دقة عالية. وتتم هذه العمليات من خلال برامج فرعية تقوم بتطبيق العلاقات الرياضية بسرعة ودقة، فحساب المسافة المستوية (ولنسميها D) بين نقطتين معلومتين الإحداثيات (نقطة أ: x1,y1 ، ونقطة ب: x2,y2) يتم من خلال المعادلة:

$$D = \sqrt{(x2 - x1)^2 + (y2 - y1)^2} \qquad (35\text{-}1)$$



شكل (٣٥-١١) حساب المسافة المستوية بين نقطتين

لكن - وكما سبق الذكر - فأن الأرض لا يمكن اعتبارها أو افتراضها مستوي إلا في المسافات القصيرة جدا فقط. ومن ثم فعند حساب المسافات الكبيرة فيتم استخدام معادلة رياضية أخري لحساب المسافات علي مسطح كروي (معادلة الدائرة العظمي great circle). ففي الشكل التالي نري تأثير كروية الأرض علي حساب المسافة، فالخط الأحمر يمثل المسافة المستقيمة المباشرة بين مدينتي لوس أنجلوس الأمريكية و لندن البريطانية وطوله ٩٨٠٧ كيلومتر، بينما الخط الأسود يمثل أقصر مسافة علي الكرة (دائرة عظمي) بينهما وطوله ٨٨٠٠ كيلومتر. بل أنه أيضا في بعض التطبيقات - التي تتطلب دقة عالية - يجب الأخذ في الاعتبار أن الأرض ليست كرة كاملة الاستدارة إنما هي اليبسويد، وهنا يتم استخدام نوع ثالث من معادلات حساب المسافة. تجدر الإشارة أيضا إلي أن المسافة بين نقطتين في حالة تمثيل كلاهما بأبعاد ثلاثية (x,y,z) لن تكون مساوية للمسافة الأفقية بينهما في حالة تمثيل كلاهما بالأبعاد الأفقية فقط (x,y). وهذا الفرق بين كلتا المسافتين قد

يكون كبيرا في حالة وجود فرق ارتفاع كبير بينهما، وغالبا فأن برامج نظم المعلومات الجغرافية تقوم بحساب كلتا المسافتين (في حالة قواعد البيانات ثلاثية الأبعاد) وتترك الحكم للمستخدم ذاته. وكذلك سيكون الحال عند حساب مساحات الأشكال طبقا لنوع قواعد البيانات الجغرافية (ثنائية أو ثلاثية الأبعاد). لكن بصفة عامة فأنه في تطبيقات حساب الملكيات فأن المساحة المعتمدة لقطعة أرض هي مساحتها الأفقية وليست مساحتها السطحية المجسمة.

من القياسات التي يتم الاعتماد عليها في فحص و تحليل الظاهرات الجغرافية المكانية تحديد الشكل shape. وفي هذا الإطار يتم الاعتماد علي معادلة حساب مؤشر الشكل أو مؤشر الاندماج compactness factor باستخدام المعادلة التالية:

شكل (٣٥-١٢) تأثير كروية الأرض في حساب المسافات

$$s = P / 3.54\sqrt{A} \qquad (35\text{-}2)$$

حيث: s = معامل الاندماج، P = محيط الشكل، A = مساحة الشكل. فشكل الدائرة يعطي معامل اندماج يساوي ١ بينما الأشكال المنتفخة و الملتوية تعطي قيم أكبر.

تعد نماذج الارتفاعات الرقمية Digital Elevation Models (أو اختصارا DEM) أفضل أنواع تمثيل التضاريس في نظم المعلومات الجغرافية. DEM هو تمثيل شبكي raster يكون فيه قيمة الخلية أو البكسل مساوية لقيمة ارتفاع سطح الأرض أو المنسوب، وبالتالي فهو يمثل تضاريس سطح الأرض من خلال مجال متصل من قيم الارتفاعات. ونماذج الارتفاعات الرقمية هامة للغاية في العديد من تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية مثل التنبؤ بآثار ظاهرة الاحتباس الحراري وتقدير تأثيرات ارتفاع سطح البحر علي المدن الشاطئية. أما من حيث القياسات فأن نماذج الارتفاعات الرقمية يتم استخدامها في حساب الميول slopes والأوجه aspects. توجد عدة طرق رياضية لحساب الميول و الأوجه، واحدي هذه الطرق المعتمدة علي النقاط الثمانية المحيطة بالنقطة الأصلية (طريقة المتجاورات الثمانية eight neighbors) تتم كالتالي:

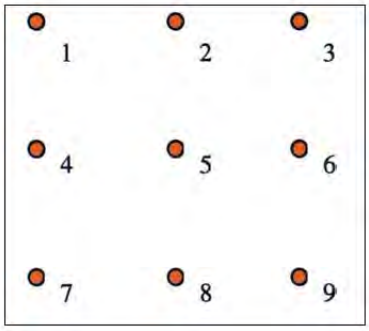
$$b = (z3 + 2z6 + z9 - z1 - 2z4 - z7) \Big/ 8D \qquad (35\text{-}3)$$

$$c = (z1 + 2z2 + z3 - z1 - 2z8 - z9) \Big/ 8D \quad (35\text{-}4)$$

$$\tan(slope) = \sqrt{b^2 + c^2} \quad (35\text{-}5)$$

$$\tan(aspect) = b / c \quad (35\text{-}6)$$

حيث: D تمثل مسافة الخلية أو عرض البكسل، z تمثل قيمة الارتفاع عند كل خلية من الخلايا الثمانية التي تحيط بالخلية الأصلية (الخلية ٥ في الشكل التالي)، slope هو الميل، aspect هو الوجه.



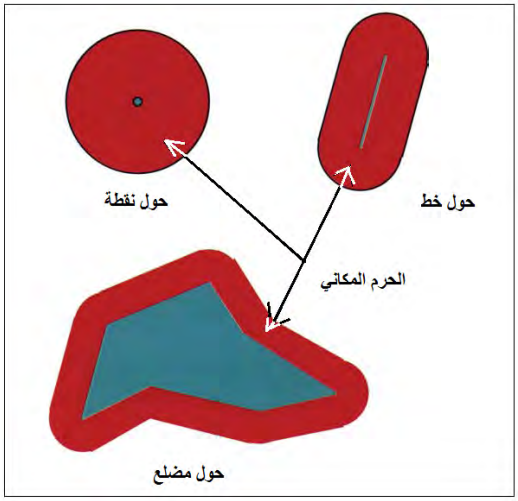
شكل (٣٥-١٣) مثال لحساب الميل و الوجه بطريقة المتجاورات الثمانية

٣٥-٤-٤ التحويلات

تستخدم التحويلات transformations لتحويل أهداف و قواعد بيانات نظم المعلومات الجغرافية إلي منتجات مفيدة وذلك من خلال تطبيق قواعد بسيطة. وهذه التحويلات مفيدة للغاية لأنها قد تظهر معلومات لا يمكن بسهولة ملاحظتها في البيانات الأصلية.

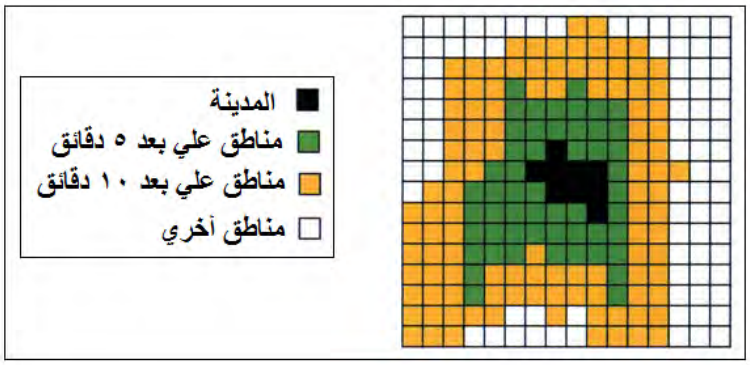
الحرم المكاني

هذه العملية تقوم بتحديد حرم أو حزام مكاني buffer حول الأهداف (نقاط أو خطوط أو مضلعات) بقيمة أو مسافة يحددها المستخدم. وللحرم المكاني عدة استخدامات مثل تحديد مسافة معينة حول الطريق لمنع إقامة أية منشئات فيها (حرم الطريق)، تحديد مسافة معينة حول المجاري المائية لمنع إقامة أية منشئات قد تتعرض للخطر في حالات الجريان السطحي و السيول، تحديد مسافة معينة حول موقع متجر جديد لمعرفة عدد المنازل و عدد السكان الذين سيخدمهم هذا المتجر عند إنشاؤه.



شكل (٣٥-١٤) الحرم المكاني للبيانات الخطية

يمكن تنفيذ وظيفة الحرم المكاني علي البيانات الخطية و البيانات الشبكية، حيث ستكون النتيجة عبارة عن مضلع في حالة البيانات الخطية و ستكون النتيجة في حالة البيانات الشبكية تصنيف كل خلية إن كانت تقع داخل الحرم أم خارجه. وأحيانا يكون الحرم المكاني مفيد للغاية للبيانات الشبكية، فعلي سبيل المثال فالشكل التالي يوضح مدينة وكل خلية في هذه الشبكة تمثل قيمة الزمن المستغرق للوصول إليها. وبتطبيق وظيفة الحرم المكاني يمكن تحديد المناطق المحيطة بالمدينة التي يمكن الوصول إليها في مدة ٥ دقائق، والمناطق التي يمكن الوصول إليها في مدة ١٠ دقائق (أي أننا استخدمنا الحرم المكاني بناءا علي الزمن و ليس بناءا علي المسافة من هذه المدينة).

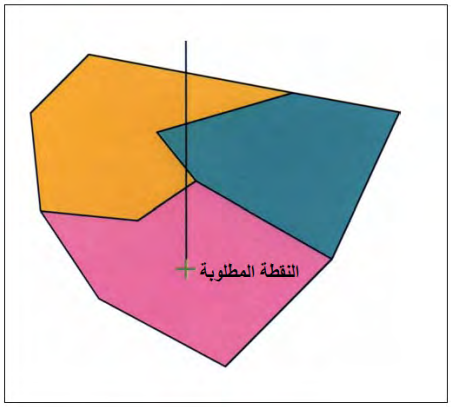


شكل (٣٥-١٥) مثال للحرم المكاني للبيانات الشبكية

نقطة في مضلع

تهدف هذه الوظيفة - في أبسط صورها - لتحديد عما إذا كانت نقطة معينة تقع داخل أو خارج حدود مضلع محدد. وفي صورة أكبر من الممكن تحديد مضلع (من مجموعة مضلعات) تقع داخله كل نقطة (من مجموعة نقاط)، وفي حالة وجود عدة مضلعات متداخلة فمن الممكن للنقطة أن تقع داخل مضلع واحد أو أكثر من مضلع أو لا تقع داخل أي مضلع. وتستخدم هذه الوظيفة في الإجابة عن عدد من الأسئلة مثل: تمثل النقاط مواقع الإصابة بمرض معين بينما تمثل المضلعات حدود المدن، والسؤال هو ما عدد الإصابات بهذا المرض في كل مدينة من هذه المدن؟.

رياضيا يتم تنفيذ هذه الوظيفة من خلال رسم خط موازيا لاتجاه المحور y يصل إلي موقع النقطة المطلوبة، ثم يتم تحديد عدد نقاط التقاطع بين هذا الخط و كل مضلع من المضلعات. فإذا كان عدد التقاطعات مع مضلع عددا زوجيا فهذا يدل علي أن النقطة تقع خارج هذا المضلع ، وان كان عدد التقاطعات مع مضلع عددا فرديا فهذا يدل علي أن النقطة تقع داخل هذا المضلع.

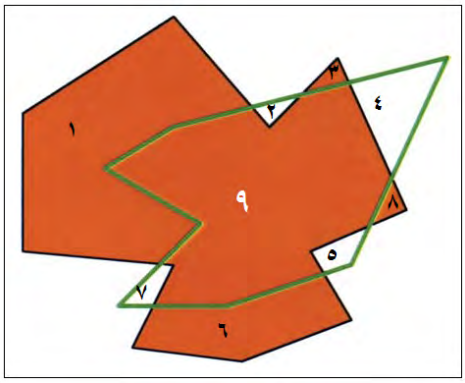


شكل (٣٥-١٦) طريقة تحديد موقع النقطة داخل مضلع

تداخل المضلعات

تمثل وظيفة تداخل المضلعات polygon overlay احدي وظائف فحص تداخل الأهداف المطلوبة في تحليلات نظم المعلومات الجغرافية سواء للبيانات الخطية أو للبيانات الشبكية. ففي البيانات الخطية يتم استخدام هذه الوظيفة لمعرفة إن كان مضلعين متداخلين أم لا، وأيضا تحديد منطقة التداخل. يمثل الشكل التالي مساحتين إحداهما تمثل تصنيف غطاءات الأراضي طبقا للاستخدام و الأخرى تمثل تصنيف الأراضي طبقا للمالك، وتستخدم وظيفة تداخل المضلعات للإجابة عن: ما هو نوع غطاء الأرض لقطعة أرض المالك المحدد؟ ما إجمالي مساحات الأراضي التي يملكها هذا المالك وتقع داخل نوع محدد من الغطاءات؟. وكما نري في الشكل فأن تداخل هذين المضلعين ينتج عته ٩ مضلعات صغيرة، أربعة منهم (أرقام ١، ٣، ٦، ٨) يملكان خصائص المضلع الرئيسي الأول فقط، بينما هناك أربعة مضلعات (أرقام ٢، ٤، ٥، ٧) يملكان خصائص المضلع الرئيسي الثاني فقط، وهناك مضلع واحد فقط (رقم ٩) يملك خصائص كلا المضلعين الرئيسين، وهذا هو الذي يمثل منطقة التداخل المطلوبة. أما في حالة البيانات الشبكية فيتم إنشاء

مجموعة بيانات dataset جديدة تحتوي تقسيم المنطقة إلي أجزاء (مساحات) صغيرة، حيث ستحمل كل مساحة في هذه المجموعة الجديدة نوعين من البيانات غير المكانية attribute من كلا من الشبكتين الأصليتين. ثم يتم تحديد المساحات الصغيرة التي تحمل كلا النوعين المطلوبين من البيانات غير المكانية، ومن ثم تحديد منطقة التداخل وتمثيلها في مجموعة البيانات الجديدة للإجابة عن أسئلة التداخل.



شكل (٣٥-١٧) تداخل المضلعات

الاستنباط المكاني

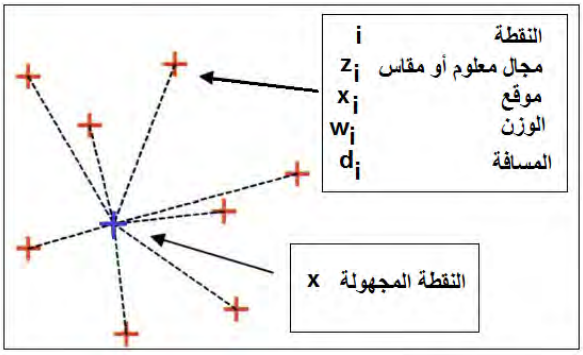
الاستنباط المكاني spatial interpolation هو العملية التي من خلالها يمكن تقدير قيمة مجال متصل عند موقع (أو نقطة) محددة لا توجد لها قياسات لهذا المجال. فعلي سبيل المثال تقدير قيمة درجة الحرارة عند موقع بالقرب من مجموعة محطات أرصاد مناخية، أو تقدير قيمة الارتفاع عند نقطة محددة بناءا علي نموذج ارتفاعات رقمية. وتوجد عدة طرق رياضية و إحصائية لعمل الاستنباط المكاني، و سنتعرض هنا لطريقتين منهما فقط:

طريقة مقلوب المسافة الموزونة:

تعد طريقة مقلوب المسافة الموزونة Inverse-Distance Weighting (أو اختصارا IDW) من أكثر طرق الاستنباط المكاني المطبقة في برامج نظم المعلومات الجغرافية. والنموذج الرياضي لهذه الطريقة يتكون من:

$$z(x) = \sum_i w_i z_i \Big/ \sum_i w_i \qquad (35\text{-}7)$$

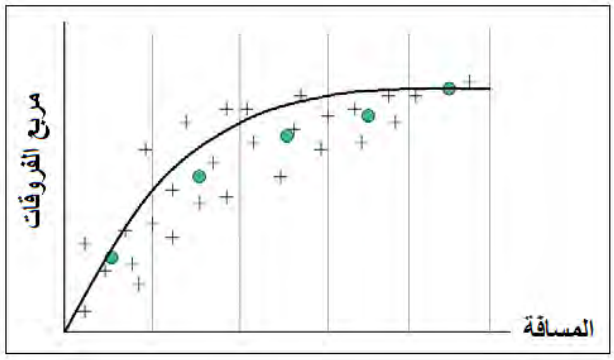
حيث: x النقطة المجهولة المطلوب عندها الحساب، z(x) قيمة المجال عند هذه النقطة المجهولة، i تمثل النقاط المعلومة التي يبلغ عددها n، z_i قيمة المجال (القياسات)عند كل نقطة معلومة، w_i قيمة الوزن عند كل نقطة معلومة ويتم حسابه علي أنه مقلوب المسافة بين النقطة المجهولة وكل نقطة من النقاط المعلومة مما يتيح وزنا أكبر للنقاط القريبة من الموقع المطلوب الحساب عنده.



شكل (٣٥-١٨) طريقة مقلوب المسافة الموزونة للاستنباط المكاني

طريقة Kriging:

طريقة تعتمد أولا علي تحديد الخصائص الإحصائية للمجال المقاس، ثم تطبيق هذه الخصائص في حساب قيمة المجال عند النقطة (أو النقاط) المجهولة. وبصورة مبسطة يمكننا أن نبدأ بنقطة معينة x ونقارن قيمة المجال عندها مع قيم المجال عند النقاط القريبة منها. فإذا كان المجال ناعما smooth فلن يكون الفرق بين قيمته عند النقطة x (أي القيمة $z(x)$) وقيمته عند النقطة القريبة (أي القيمة $z(x_i)$) فرقا كبيرا، وهنا سنعتمد علي قيمة مربع الفرق $(z(x) - z(x_i))^2$ وسنبدأ في توقيع هذه الفروقات علي شكل بياني يسمي "شكل التغيرات" variogram ثم يتم استنباط نموذج رياضي يتوافق مع هذه الفروقات (أي معادلة رياضية دالة في المسافة). ولإتمام الاستنباط المكاني يتم تطبيق النموذج الرياضي الذي تم الحصول عليه لتقدير قيمة المجال عند النقطة المجهولة المطلوبة.



شكل (٣٥-١٩) مثال لشكل التغيرات في طريقة Kriging للاستنباط المكاني

٣٥-٥ التلخيص الوصفي و التصميم و الاستنتاج

٣٥-٥-١ مقدمة: المزيد من التحليل المكاني؟

مع ابتكار الكمبيوتر وتوافر قواعد البيانات الضخمة تطورت طرق التحليل المكاني إلي أبعد من تلك الطرق البسيطة التي ناقشناها في الفصل السابق. وظهر مصطلح "التنقيب في البيانات data mining"ليدل علي فحص البيانات بصورة أكثر عمقا لمحاولة اكتشاف وجود أية قيم شاذة أو وجود أنماط معينة في التوزيع. فعلي سبيل المثال يتم تطبيق "التنقيب في البيانات" في التطبيقات التجارية لاكتشاف حالات الاشتباه في سرقة كروت الائتمان credit cards. فمع كل عملية استخدام لكارت الائتمان يمكن معرفة مكان استخدامه، ويبدأ الشك عند حدوث عدة عمليات شراء بمبالغ كبيرة في فترة زمنية قصيرة وفي مكان بعيد عن موقع إقامة صاحب الكارت الأصلي. وهنا قد يكون هذا التغير المفاجئ غير المعتاد anomalies في نمط البيانات الرقمية دليلا علي وجود مشكلة (سرقة كارت الائتمان في هذه الحالة). فأسلوب التنقيب في البيانات يهدف لاكتشاف الأنماط و التغيرات المفاجئة في قواعد البيانات الرقمية التي قد تعطي معلومات هامة للغاية. وتجدر الإشارة إلي أن هذا الأسلوب كان وراء اكتشاف ثقب الأوزون فوق القطب الجنوبي.

٣٥-٥-٢ التخليص الوصفي

المراكز

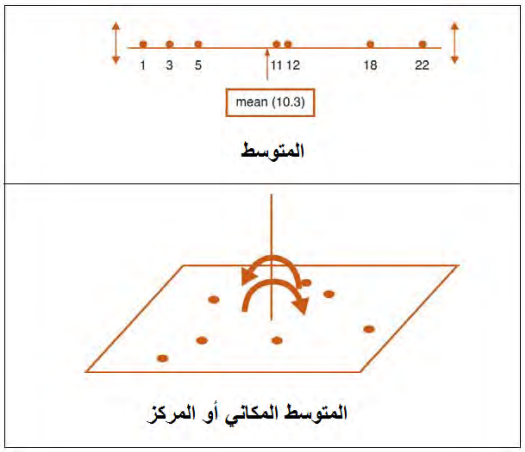
إذا أردنا أن نلخص - بصورة رقمية - حالة الطقس في منطقة فسنستخدم قيمة المتوسط average or mean، فالمتوسط هو أحد مؤشرات قياس ما يسمي بالنزعة المركزية central tendency والتي تهدف لتلخيص مجموعة من البيانات في صورة رقم واحد. ومن المؤشرات الأخرى للنزعة المركزية الوسيط median وهو القيمة التي تتوسط مجموعة من الأرقام بعد ترتيبها تنازليا أو تصاعديا، أو هو القيمة التي تقسم مجموعة من الأرقام إلي قسمين بحيث يكون عدد القيم الأكبر منها مساويا عدد القيم الأصغر منها. أيضا يمكن استخدام مؤشر المنوال mode وهو القيمة التي تتكرر أكثر من غيرها من القيم، أو هو القيمة الأكثر شيوعا أو الأكثر تكرارا بين مجموعة الأرقام.

للبيانات المكانية يوجد مقابل مكاني (أي ثنائي الأبعاد) لمؤشر المتوسط، وهو أحد مؤشرات المراكز centers التي تهدف لتلخيص مجموعة من المواقع (لمجموعة من النقاط) لتحديد مركزها المكاني. يعد المتوسط المكاني centroid or mean center هو النقطة المكانية التي تتوازن عندها مجموعة المواقع (النقاط) في مستوي ثنائي الأبعاد كما أن المتوسط هو نقطة توازن مجموعة القيم. ويتم حساب إحداثيات نقطة المتوسط المكاني الموزون (في حالة أخذ أوزان في الاعتبار) بمثل طريقة حساب المتوسط العددي الموزون، إلا أنه سيكون هناك معادلة لكل إحداثي (x,y) لهذه النقطة المركزية:

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{n} x_i w_i / w_i \qquad (35\text{-}8)$$

$$\bar{y} = \sum_{i=1}^{n} y_i w_i / w_i \qquad (35\text{-}9)$$

حيث: x_i الاحداثي السيني للنقطة رقم i ، y_i الاحداثي الصادي للنقطة رقم i ، w_i الوزن للنقطة رقم i ، n عدد النقاط.



شكل (٣٥-٢٠) المتوسط المكاني أو المركز

التشتت

إن المتوسط بمفرده لا يقدم صورة دقيقة عن مجموعة بيانات من حيث طبيعة توزيعها وتغير قيمها. يقصد بالتشتت في أي مجموعة من القيم dispersion التباعد بين مفرداتها أو التفاوت أو الاختلاف بينها. ويكون التشتت صغيرا إذا كان التفاوت بين قيم الظاهرة قليلا أي متى كانت القيم قريبة من بعضها البعض، ويكون التشتت كبيرا متى كانت القيم بعيدة عن بعضها أو متفاوتة في قيمها بدرجة كبيرة. و تهتم مقاييس التشتت و التباين بالتعرف علي مقدار انتشار البيانات أو القيم. ومن أهم و أشهر مؤشرات قياس التباين قيمة الانحراف المعياري standard deviation والذي يتم حسابه بالمعادلة التالية:

$$s = \sqrt{\sum_i (x_i - \bar{x})^2 / n} \qquad (35\text{-}10)$$

وفي حالة أخذ الأوزان في الاعتبار تصبح معادلة الانحراف المعياري كالتالي:

$$s = \sqrt{\sum_i w_i (x_i - \bar{x})^2 / \sum_i w_i} \qquad (35\text{-}11)$$

للبيانات المكانية ثنائية الأبعاد فأن مفهوم الانحراف المعياري يتحول إلي مفهوم المسافة المتوسطة من المركز mean distance from the centroid (أو المسافة المعيارية standard

distance). فالمسافة المعيارية مؤشر لقياس مدي تباعد أو تركز مفردات الظاهرة مكانيا. وغالبا يتم استخدام قيمة المسافة المعيارية لرسم دائرة تسمي الدائرة المعيارية standard circle والتي يمكن من خلالها معرفة مدي تركز أو انتشار البعد المكاني للظاهرة، ويكون مركز هذه الدائرة هو موقع (إحداثيات) المركز المتوسط. وكلما كبرت قيمة المسافة المعيارية و كبر حجم الدائرة المعيارية كلما دل ذلك علي زيادة الانتشار و التشتت المكاني لتوزيع الظاهرة، و العكس صحيح أيضا.

شكل (٣٥-٢١) المسافة المعيارية و الدائرة المعيارية

٣٥-٥-٣ قياس الأنماط: البيانات المكانية للنقاط

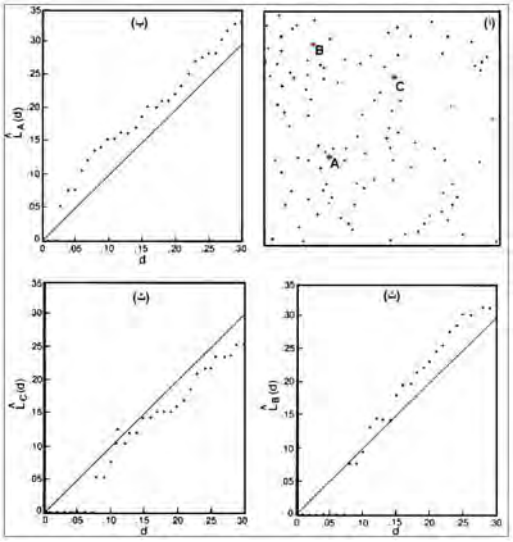
عند فحص مواقع بعض الظاهرات (الممثلة بواسطة نقاط) من المهم اكتشاف إن كان هناك "نمط pattern" معين لتوزيع هذه النقاط. وبمعني آخر هل وجود نقطة من هذه النقاط كان سببا في وجود نقطة أخرى؟. وبصفة عامة فأن الأنماط تنقسم إلي ثلاثة أنواع:

- النمط العشوائي random : مواقع النقاط مستقلة عن بعضها البعض، وكل المواقع لها نفس الاحتمالية المتساوية.
- النمط المركز أو المجمع clustered : بعض المواقع لها احتمالية أكبر من غيرها، فوجود نقطة قد يجذب نقاط أخري بجوارها.
- النمط المتباعد أو المنتظم dispersed : وجود نقطة قد يقلل من احتمالية وجود نقاط أخري في محيطها.

توجد عدة طرق و أساليب لقياس الأنماط، وسيتم التركيز في هذا الجزء علي حالة فحص مواقع النقاط (البيانات المكانية فقط) دون أخذ البيانات غير المكانية attribute في الاعتبار. ومن هذه الطرق ما يعرف باسم دالة k، وهي الدالة function التي تهدف لتحديد مدي التجمع clustering, والتشتت dispersion بين مواقع مجموعة من النقاط. ويتم حساب الدالة k(d) بقسمة العدد المتوقع للنقاط في حدود مسافة معينةd علي كثافة النقاط. وفي حالة النمط العشوائي فأن هذا الرقم سيكون πd^2 ومن ثم فأننا نقوم بتوقيع الدالة:

$$L(d) = \sqrt{k(d)/\Pi} \qquad (35\text{-}12)$$

الشكل التالي (أ) يوضح مواقع ثلاثة أشجار A, B, C في غابة، بينما الأشكال ب، ت، ث تمثل قيمة الدالة L(d) لكل شجرة من هذه الأشجار مقارنة بالمسافة d علي المحور الأفقي (أي أن كل شكل يمثل توزيع أشجار الغابة مقارنة بأحدي الشجرات الثلاثة قيد الدراسة). نلاحظ في الشكل (ب) وجود أشجار قليلة بالقرب من الشجرة A في المسافات القريبة، لكن تزداد أعداد الأشجار في المسافات الأكبر من ٣٠% من منطقة الدراسة، مما يدل علي وجود درجة من التركز أو التجمع. أما الشكل (ت) للشجرة B فلا يوجد أشجار قريبة لكن يوجد نوع من التركز للمسافات البعيدة. والشكل (ث) للشجرة C يوضح أعدادا بسيطة من الأشجار المتواجدة علي جميع المسافات.



شكل (٣٥-٢٢) تحليل الأنماط باستخدام الدالة k

٣٥-٥-٤ قياس الأنماط: البيانات غير المكانية للنقاط

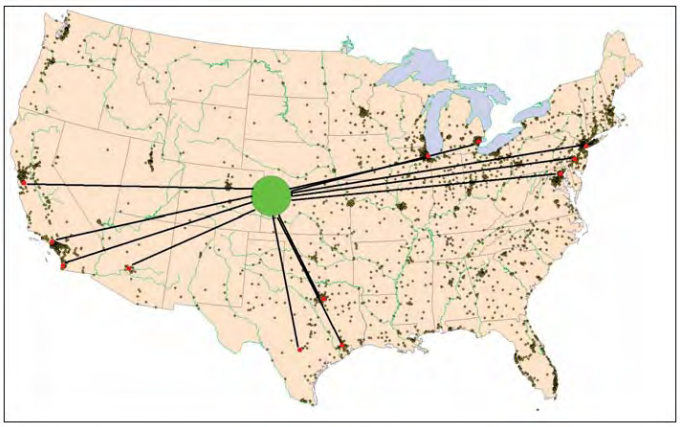
يتغير مفهوم قياس الأنماط بدرجة كبيرة عند أخذ البيانات غير المكانية attribute في الاعتبار، فهنا سيكون السؤال عن هل القيم الكبيرة (للبيانات غير المكانية) متقاربة أو مركزة أم هي متباعدة و مشتتة. وفي هذا الإطار فأن معامل موران Moran Index يعد من أفضل مقاييس قياس الأنماط، فهو يستطيع التمييز بين: (أ) الأنماط ذات الارتباط المكاني الموجب حيث القيم الكبيرة تكون محاطة بقيم كبيرة أيضا وكذلك الحال للقيم الصغيرة، (ب) الأنماط العشوائية حيث القيم المتجاورة غير مرتبطة بعضها البعض، (ج) الأنماط المشتتة أو المتباعدة حيث القيم الكبيرة تكون محاطة بقيم صغيرة و العكس صحيح

٦-٣٥ الموقع الأمثل

يتم استخدام التحليل المكاني (خاصة قياس الأنماط) في مجالات أخري تختلف عن مجرد اكتشاف تخليل الأنماط واكتشاف الشاذات أو التغيرات المفاجئة، إنما تتعدي ذلك إلي محاولة الوصول لإنشاء تصميم أفضل. ومثل هذه الأهداف للتحليل المكاني تشمل تقليل زمن السفر بين نقطتين، تقليل تكلفة إنشاء مواقع جديدة، تعظيم جدوى الاستفادة. وفي نظم المعلومات الجغرافية يتم تطبيق طرق و أساليب التصميم بهدف دعم اتخاذ القرار، ولذلك تسمي هذه الطرق بنظم دعم القرار المكاني spatial-decision support systems (أو اختصارا SDSS). وتطبق طرق SDSS لتوفير الاسترجاع feedback (أي آراء الجمهور) عن تنفيذ مقترحات متعددة، ومن ثم تقويم كل مقترح منهم. وتنقسم طرق التصميم إلي عدة مجموعات تشمل إيجاد أفضل موقع لنقطة، إيجاد أفضل مسار في شبكة، إيجاد أفضل مسار يمر بعدد من المجالات المختلفة.

٦-٣٥ - ١ أفضل موقع لنقطة

يطلق علي تطبيقات إيجاد أفضل optimum موقع لنقطة مصطلح مشاكل "الموقع-التوزيع location-allocation" حيث أنها تتطلب اتخاذ قرارين: (١) أين يمكن وضع النقطة الجديدة، (٢) كيف يمكن توزيع الخدمة مركزيا. فعلي سبيل المثال في إنشاء سوبر ماركت جديد فالسؤال هو ما هو أفضل موقع للإنشاء، و أيضا كيف يمكن التنبؤ باختيارات العملاء من كل خيارات التسوق المتاحة في هذه المنطقة. والقرار الثاني يتم بناءا علي نماذج معروفة باسم نماذج التفاعل المكاني وهي مطبقة كثيرا في تطبيقات بحوث الأسواق. والشكل التالي يوضح مثالا لتطبيقات اختيار أفضل موقع، حيث يتم البحث عن أفضل مكان لإنشاء خدمة مركزية جديدة لخدمة عملاء متفرقين (في أكبر ١٢ مدينة بالولايات المتحدة الأمريكية). ومن الممكن اعتبار أن وظيفة المركز المتوسط الموزون تعد من أبسط طرق اختيار الموقع المثالي في بعض التطبيقات. أيضا توجد نماذج رياضية أخري لحل المشكلة من خلال اختيار موقع النقطة الذي يقلل إجمالي المسافات المستقيمة minimum aggregate travel (أو اختصارا MAT).

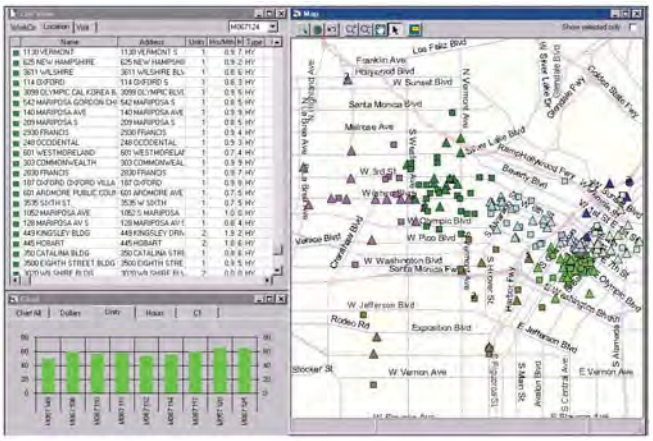


شكل (٣٥-٢٣) مثال لاختيار أفضل موقع لنقطة

٣٥-٦ ـ ٢ أفضل مسار

من تطبيقات التصميم بالاعتماد علي نظم المعلومات الجغرافية إيجاد أفضل مسار، فعلي سبيل المثال تصميم أفضل مسار لسيارات خدمة معينة (سيارات المدارس وسيارات توزيع البريد). وفي هذه التطبيقات توجد نقطة بداية و نقطة نهاية، وقد توجد عدة نقاط للتوقف علي المسار. وتعتمد هذه التطبيقات علي مفهوم أقصر مسار shortest path يجعل المسافات المقطوعة أقل ما يمكن، وأحيانا يتم الاعتماد علي إيجاد المسار الذي يقلل زمن الرحلة. وهنا تكون البيانات غير المكانية attribute للشبكة ذات دور مؤثر، مثل طول الطريق و السرعة المسموح بها، عدد الحارات بالشارع، هل الطريق اتجاه واحد أم اتجاهين، عدد التقاطعات أو إشارات المرور علي الطريق....الخ. الآن أصبح تطبيق إيجاد أقصر مسار من التطبيقات الشائعة لدي عملاء نظم المعلومات الجغرافية، وتوجد مواقع علي الانترنت (مثل www.mapquest.com) تقدم هذه الخدمة، كما أن هذه الخدمة أصبحت متاحة في تطبيقات الملاحة باستخدام التليفون المحمول أيضا.

من أبسط طرق إيجاد أفضل مسار ما يعرف بمشكلة رجل المبيعات المسافر traveling-salesman problem (أو اختصارا TSP). في هذا السيناريو يوجد نقطة بداية و عدد من المواقع الواجب زيارتها حيث المسافة معلومة بين كل موقعين، والمطلوب إيجاد أفضل مسار يقلل المسافة الإجمالية المقطوعة. وتوجد عدة طرق رياضية لحل هذه المشكلة. والشكل التالي يقدم مثالا لتطبيقات إيجاد أفضل مسار لأحدي شركات صيانة المصاعد الأمريكية (Schindler's GIS) حيث يتم يوميا إعداد مسار بتحركات كل فني من فنيين الشركة لزيارة عدد من المواقع التي تتطلب صيانة المصاعد بها.



شكل (٣٥-٢٤) مثال لاختيار أفضل مسار

٣٥-٦ ـ ٤ الاختبارات الإحصائية

يعد الاستنتاج inferential من أهم أدوات علم الإحصاء، فهو يستخدم المعلومات المستنتجة من العينة للوصول إلي توصيات عامة عن المجتمع الكبير الذي تمثله هذه العينة. فعلي سبيل المثال إذا أخذنا عينة عشوائية مكونة من ١٠٠٠ شخص وتم سؤالهم عن الشخص الذي سيرشحونه في

الانتخابات القادمة، وأفاد ٤٥% منهم أنهم سيختارون المرشح "أ". فيقول لنا علم الإحصاء أن ٤٥% من الناخبين سيختارون هذا المرشح، لكن أيضا يفيدنا علم الإحصاء بأن هناك "هامش خطأ margin of error" أو تقدير لكيف سيكون الاختيار بالنسبة لمجتمع الناخبين كله وليس للعينة المختارة. وغالبا يعبر عن هامش الخطأ بمصطلح "حدود الثقة confidence limits"، أي نقول أنه بنسبة ثقة ٩٥% سيكون المجتمع مماثل للعينة. وفي أحد طرق التحليل الإحصائي (توزيع ذو الحدين) فأن حدود الثقة التي نسبتها ٩٥% تساوي ٣%، بمعني أنه يمكننا أن نقول أن نسبة من سيصوتون للمرشح "أ" ستكون بين ٤٢% و ٤٨% من حجم مجتمع الناخبين.

بالمثل فأن معظم الاختبارات التي يتم تطبيقها علي البيانات المكانية (خاصة اختبارات تحليل الأنماط) يكون لكل منها حدود ثقة معينة، وغالبا فأن هذا يكون ضمن النتائج التي توفرها معظم برامج نظم المعلومات الجغرافية. كما أنه توجد برامج إحصائية مخصصة لاختبار البيانات المكانية (مثل برنامج GeoDa من موقع www.csiss.org).

٣٥-٧ النمذجة المكانية

٣٥-٧-١ مقدمة

بداية يجب الإشارة إلي أن النمذجة المكانية تختلف تماما عن نماذج البيانات data model التي تعرضنا لها في الفصل الثامن، فتلك النماذج تهتم بكيفية تمثيل البيانات داخل نظم المعلومات الجغرافية، أي بمعني آخر فهي نماذج توضح كيف "يبدو" العالم. أما مصطلح النمذجة المكانية spatial modeling فيدل علي كيفية بناء نماذج تبين لنا كيف "يعمل" العالم وتساعد في حل المشكلات الحقيقية التي نواجهها. والنماذج المكانية قد تشمل نماذج العمليات الاجتماعية مثل حركة السيارات علي الطرق السريعة، وقد تشمل عمليات التصميم للبحث عن أفضل البدائل مثل إيجاد أفضل موقع لمنشأة جديدة، وقد تشمل إجراء عمليات حسابية لمؤشرات التنبؤ المستقبلي مثل نمذجة تغيرات المياه الجوفية في منطقة محددة. وفي هذا الإطار فأن جوهر النمذجة المكانية يكمن في إدارة البيانات الجغرافية من خلال عدة مراحل. ففي بعض الأحيان قد تتكون النمذجة من تحليل بسيط للمدخلات والحصول علي نتائج، وفي أحيان أخري قد تشمل عملية النمذجة حلقة loop من الخطوات لمحاكاة النمذجة و تقدير تأثير عدة عوامل علي العملية. وبالطبع فأن النمذجة المكانية تتم في عادة بيئة رقمية باستخدام الكمبيوتر و البرامج، ومن ثم فالبعض يستخدم مصطلح "الحسابات الجغرافية geo-computation" لوصف تطبيقات النماذج الحسابية علي المشكلات الجغرافية.

تعتمد النمذجة المكانية علي مستوي التفاصيل المتاح في قاعدة البيانات المستخدمة، وهو ما يطلق عليه درجة الوضوح المكاني spatial resolution كما سبق التعرض إليه في الفصول السابقة. وأيضا تعتمد عملية النمذجة علي درجة الوضوح المؤقتة temporal resolution وهي التي تدل علي أقصر فترة زمنية تم عندها رصد تغيرات الظاهرات الجغرافية، فبعض النماذج المكانية تكون ديناميكية لنمذجة التغيرات الزمنية لظاهرة للتنبؤ بتغيراتها المستقبلية. وكلا درجتي الوضوح (المكانية و المؤقتة) تتحكمان أيضا في التكلفة الاقتصادية لعملية النمذجة، فهما يحددان حجم و سعر البيانات المطلوبة قبل بدء النمذجة input (فمثلا البيانات ذات الوضوح المكاني العالي high-

resolution ستكون أغلي تكلفة من تلك ذات الوضوح المكاني المنخفض) وأيضا الوقت و المواصفات الفنية المطلوبين لأجهزة الكمبيوتر المستخدمة في النمذجة.

يتم بناء النماذج لعدة أسباب، فالنموذج قد يستخدم لعملية اتخاذ القرار التي يريد المستخدم فيها إيجاد حل لمشكلة مكانية بناءا علي أفضل السيناريوهات الممكنة. ثانيا فيمكن للنموذج أن يقدم للمستخدم التجريب و التعامل مع نموذج يحاكي العالم الحقيقي، وهذا عندما تكون تكلفة عمل التجارب الحقيقية عالية أو عندما يكون الحصول علي النتائج من النموذج أسرع. أيضا فالنماذج تعطي للمستخدم إمكانية فحص و تحليل الظاهرات الديناميكية، فكلما تغير المدخلات أمكن للمستخدم معرفة كيف ستتغير النتائج. وهذه النقطة الأخيرة هامة للغاية و كثيرا ما يتم استخدامها في عمل المحاكاة وعرض نتائج النمذجة للجمهور وللعامة غير المتخصصين. فالشكل التالي يعرض "اللوحة الحية live table" وهي لوحة يتم إسقاط شاشة الكمبيوتر عليها، وتوضح في هذا المثال مواقع مصادر التلوث في منطقة محددة، وهذه اللوحة مرتبطة بكمبيوتر موجود عليه برنامج نموذج هيدرولوجي بحيث أن المستخدم يستطيع أن يحرك احدي النقاط الممثلة لمصدر تلوث (علي اللوحة) فيعمل برنامج الكمبيوتر لتعديل نموذج التلوث ويعيد إسقاط النتائج علي اللوحة مرة أخري بصورة ديناميكية. وفي هذا المثال يتم استخدام النماذج المكانية لعمل المحاكاة الدينامكية لظاهرة و إمداد متخذي القرار بتمثيل مرئي ممتاز لكافة البدائل المستقبلية التي يمكن اتخذها.

شكل (٣٥-٢٥) مثال لعرض نتائج نموذج مكاني ديناميكي للجمهور

ويختلف التحليل عن النمذجة، فطرق التحليل التي تم التعرض لها في الفصلين السابقين تتميز بأنها (أ) أساليب ثابتة static أي لنقطة زمنية محددة، (ب) يفيد البحث عن الأنماط والتغيرات المفاجئة في تكوين رؤى و فرضيات جديدة، (ج) يفيد التنقيب في البيانات في اكتشاف ما لا يمكن رؤيته بسهولة. أما النماذج المكانية فتتميز بأنها (١) تتكون من مراحل متعددة ربما لتمثيل الظاهرات زمنيا، (٢) تعتمد علي الرؤى و الفرضيات، (٣) تهدف لتجربة السياسات و السيناريوهات المختلفة.

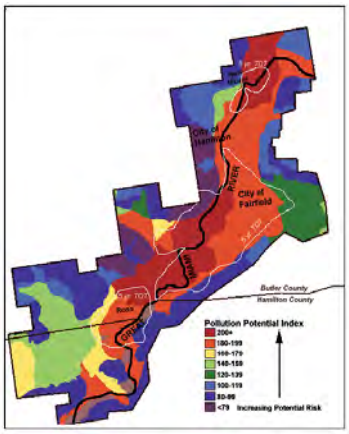
٣٥-٧ ـ ٢ أنواع النماذج

النماذج الثابتة و المؤشرات

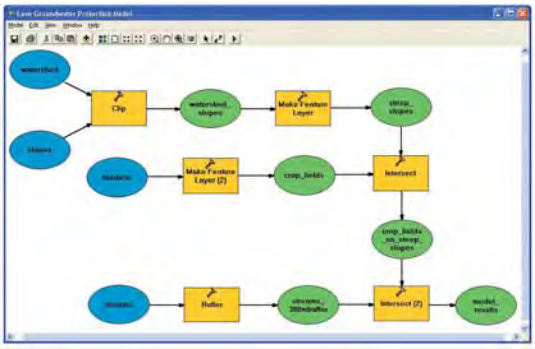
يعبر النموذج المكاني الثابت عن نقطة محددة في الزمن، وعادة ما يتكون من عدد من المدخلات للوصول إلي نتيجة واحدة. وبمعني آخر فلا يوجد مراحل زمنية متعددة و لا حلقات تكرارية في النموذج الثابت، وتكون النتائج هامة للغاية كمؤشرات مستقبلية. فعلي سبيل المثال تقدم المعادلة التالية (المعادلة العالمية لتأكل التربة USLE) نموذج لخسارة التربة soil loss عند نقطة محددة بناءا علي خمسة متغيرات كمدخلات:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \qquad (35\text{-}13)$$

حيث: A يمثل معدل التعرية أو التآكل المستقبلي، R معامل المطر، K معامل تعرية التربة، LS معامل تغير الميل، C معامل إدارة المحاصيل، P معامل الإدارة الزراعية. وتقدم المعادلة مثالا لنموذج مكاني حيث أن كل عامل من المدخلات (المتغيرات) يعتمد علي المكان، أي ستتغير قيمته من موقع إلي آخر. فإذا نظرنا بتمعن للمعادلة نجد أن أفضل تطبيق لها يجب أن يتم داخل نظام معلومات جغرافي، فمثلا المعامل LS يتطلب الحسابات من نموذج ارتفاعات رقمية. كما أن عرض المدخلات و النتائج أيضا من خلال تمثيل رقمي سيكون هو الخيار الأفضل بدلا من العرض في صورة جداول إحصائية أو خرائط ورقية. أيضا من الشائع أن يتم دمج بيانات النموذج مع أنواع أخري من البيانات لإجراء تحليلات أخري، ومن ثم فأن هذا يتطلب نظام معلومات جغرافي (سيكون أفضل بالطبع من استخدام برامج الحسابات مثل الإكسل لتطوير النتائج). وعادة يتم استخدام النماذج المكانية الثابتة في النمذجة البيئية، فعلي سبيل المثال فنموذج DRASTIC يقوم بحساب معامل تأثر (أو نقص) المياه الجوفية groundwater vulnerability model اعتمادا علي عدة مدخلات. ومن أهم مميزات برامج نظم المعلومات الجغرافية أنها تتيح برامج خاصة لبناء النماذج، مثل برنامج "بناء النماذج Model Builder" المتوافر في برنامج ArcGIS من شركة ايزري. فبعد بناء النموذج يتم تطبيقه علي عدد من المدخلات (عدة مناطق) بصورة آلية.



شكل (٣٥-٢٦) نموذج معدل تأثر المياه الجوفية: مثال للنماذج المكانية الثابتة

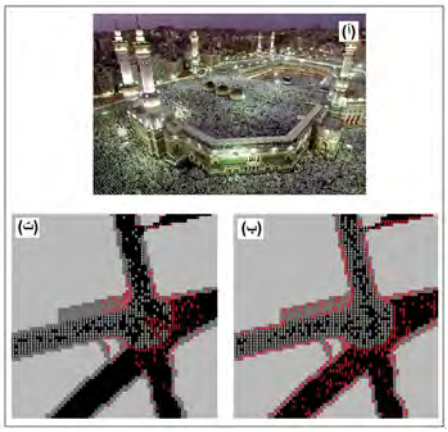


شكل (٣٥-٢٧) نموذج لبرنامج بناء النماذج في برنامج ArcGIS

النماذج الفردية و الإجمالية

تعتمد النماذج الفردية علي نمذجة ظاهرة واحدة، بينما النماذج الإجمالية تعتمد علي نمذجة عدد من الظاهرات في إطار متكامل. وبصفة عامة فان نمذجة النظم الفيزيقية أو الطبيعية تتطلب أسلوب النمذجة الإجمالية حيث يجب نمذجة جميع الظاهرات التي تؤثر كلا منها علي الأخرى، بينما النماذج الفردية غالبا ما تكون مناسبة للتطبيقات البشرية.

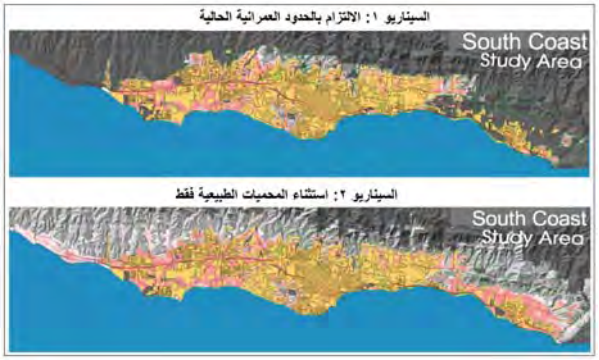
يطلق علي النماذج الفردية مصطلح نماذج خدمة العميل agent-based models (أو اختصارا ABM) وأيضا تسمي بنماذج العميل المستقلautonomous agent models. ومع تزايد المواصفات الفنية للكمبيوترات الشخصية وتوافر لغات وإمكانيات البرمجة، أصبح من السهولة تطبيق نماذج ABM بصورة فردية لمستخدم واحد. ومن أمثلة تطبيقات النماذج الفردية تلك النماذج التي تهدف للتحكم في حركة الحشود الضخمة، مثل موسم الحج في مدينة مكة المكرمة (الشكل أ) ومهرجان Notting Hill الذي يعقد سنويا في غرب مدينة لندن. والشكل (ب) يعرض نموذج محاكاة لحركة الجمهور في ذلك المهرجان والذي بعد دراسته أمكن وضع تصميم للحواجز التي تهدف لتنظيم حركة المشاة و تفتيت الموجة البشرية الهائلة إلي فئات أصغر يسهل التحكم في حركتها (الشكل ج).



شكل (٣٥-٢٨) نماذج لتطبيقات النماذج المكانية الفردية

النماذج الخلوية

في هذا النوع من النماذج المكانية يتم التعامل مع سطح الأرض من خلال الخلايا، ولذلك سميت بالنماذج الخلوية cellular models. وهنا تكون كل خلية cell في الشبكة raster تحمل داخلها عدد من الحالات الممكنة والتي تتغير مع الزمن بناءا علي تطبيق عدد من القواعد الانتقالية. وعادة ما تكون هذه القواعد مرتبطة بحالة الخلايا المجاورة والتي من خلالها يمكن التنبؤ بحالة الخلية قيد الدراسة. ومن أشهر تطبيقات النماذج الخلوية دراسات محاكاة النمو العمراني. فحالة كل خلية (قطعة أرض) تعتمد علي عدة عوامل مثل الميل و طرق المواصلات وموقعها بالنسبة للمخططات الجديدة، والأهم هنا هو موقعها بالنسبة للمناطق التنموية الأخرى. وبدراسة حالة الخلايا المجاورة يمكن التنبؤ بحالة الخلية - قيد الدراسة - وتحديد هل ستبقي هذه الخلية ضمن نوع الخلايا الساكنة أم أنها ستنتقل إلي حالة الخلايا النشطة (أي هل ستبقي كما هي أم هي مرشحة لتكون ضمن مناطق النمو العمراني المستقبلي). وبالطبع فأن أي نموذج يجب معايرته و اختباره علي بيانات حقيقية لتحديد أفضل قيم عناصره والتأكد من كونه يصلح للتطبيق بكفاءة.



شكل (٣٥-٢٩) مثال لتطبيقات النماذج الخلوية في التنبؤ بالنمو العمراني (مدينة سانتا باربرا بولاية كاليفورنيا الأمريكية)

النمذجة الكارتوجرافية وجبر الخرائط

تتكون عملية النمذجة من عدد من خطوات أو مراحل إدارة البيانات في إطار واحد لهدف محدد. وقد تتكون هذه المراحل من عدد متغير من أساليب التحليل المكاني التي توفرها نظم المعلومات الجغرافية. في الفصل الرابع عشر تم تقسيم هذه الأساليب إلي ستة أنواع بناءا علي الأهداف الإدراكية لكل أسلوب منهم. لكن هذا التقسيم ليس هو الوحيد لتصنيف العدد الكبير من أساليب التحليل المكاني المتاحة في نظم المعلومات الجغرافية. فهناك تقسيم آخر قدمه Dana Tomlin وأسماه "النمذجة الكارتوجرافية cartographic modeling أو جبر الخرائط map algebra"، حيث قام بتقسيم طرق إدارة البيانات الشبكية raster إلي ٤ أقسام رئيسية:

١. عمليات محلية local operations : تقوم بفحص كل خلية داخل طبقة وتقارن قيمتها بقيمة نفس الخلية في طبقة أو طبقات أخري.
٢. عمليات بؤرية focal operations : تقوم بمقارنة قيمة كل خلية داخل طبقة بقيمة الخلايا المجاورة (غالبا ٨) في نفس الطبقة.

٣. عمليات شاملة global operations : تقوم بعمل نتائج تصلح للطبقة كلها، مثل حساب قيمة المتوسط.
٤. عمليات شرائحية zonal operations : تقوم بحساب نتائج لشرائح (أو مناطق محددة) في الطبقة بحيث أن كل خلايا الشريحة ستأخذ نفس القيمة.

وهذا التقسيم يسهل عملية البرمجة لإعداد النماذج المكانية، بشرط أن تكون مدخلات و مخرجات النموذج في صورة شبكية. فعلي سبيل المثال فمعادلة جبر الخرائط: A = B + C تدل علي أن قيمة كل خلية في الشبكة A ستكون مجموع قيمتي الخلايا المناظرة في كلا الشبكتين B و C (أي سيتم تنفيذ المعادلة خلية بخلية). ومن أمثلة أدوات برامج نظم المعلومات الجغرافية المبنية علي النمذجة الكارتوجرافية أو جبر الخرائط أداة الآلة الحاسبة الشبكية raster calculator المتاحة في برنامج ArcGIS. كما توجد برامج متخصصة في التحليل المكاني الشبكي مثل برنامج PC Raster المطور بواسطة احدي الجامعات الهولندية (www.pcraster.geog.uu.nl).

٣٥-٧-٣ تقنيات النمذجة

يمكن تعريف النموذج علي أنه مجموعة متتالية من العمليات، ومعظم برامج نظم المعلومات الجغرافية تتيح أدوات النمذجة للمستخدم. والنموذج قد يتم التعبير عنه في صورة اسكريبت script (أي نص مكتوب للأوامر المتتابعة) أو في صورة بصرية مثل خرائط التدفق flowcharts. في البداية كانت إمكانيات البرمجة المتاحة في برامج نظم المعلومات الجغرافية مرهقة و شاقة لأنها كانت تتطلب أن يتعلم المستخدم لغة برمجة محددة تعتمد علي البرنامج المستخدم (مثل لغة Arc Macro Language أو اختصارا AML من شركة ايزري). أما الآن فأصبحت البرمجة تعتمد علي استخدام اللغات العامة في كتابة الاسكريبت، مثل لغات visual basic, Perl, and Python. ومن ثم فأصبح الاسكريبت يتم تطبيقه لتنفيذ عمليات نظم معلومات جغرافية تتطلب مدخلات من المستخدم ثم تعرض النتائج. أيضا ومع انتشار منصات التطبيقات القياسية بين البرامج (مثل Microsoft .Net) أصبح من الممكن أن يشتمل اسكريبت معين استدعاء برنامج آخر، فمثلا يمكن استدعاء وظيفة معينة من برنامج الإكسل ليتم تنفيذها في خطوة محددة من خطوات الاسكريبت.

إن برامج نظم المعلومات الجغرافية غير مصممة في الأساس لتكون منصة لتطوير البرامج، ومهما كانت إمكانيات البرمجة التي تتيحها هذه البرامج فإنها قد تعجز في أحيان كثيرة عن البرمجة، خاصة في حالة التعامل مع قواعد بيانات ضخمة أو الحاجة لعمل خطوات تكرارية في الحسابات iterations. وفي مثل هذه التطبيقات يكون من الأفضل إعداد البرامج باستخدام لغات البرمجة المتخصصة ذات الإمكانيات التقنية العالية (مثل لغة C علي سبيل المثال) واستدعاء هذه البرامج ليتم تنفيذها داخل برنامج نظم المعلومات الجغرافية للاستفادة من إمكانيات النظم في عرض النتائج بصريا.

تجدر الإشارة لقيام بعض الجهات و الشركات العاملة في مجال نظم المعلومات الجغرافية بتكوين مكتبات للبرامج (اسكريبت) التي يصممها المستخدمين ويريدون مشاركتها مع الآخرين. فعلي سبيل

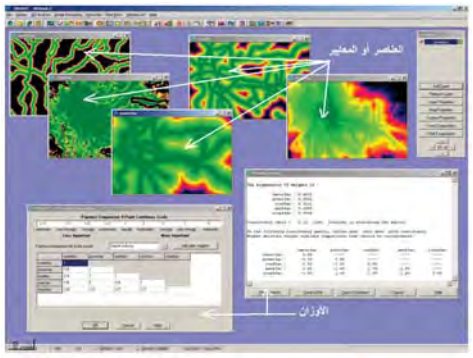
المثال يوجد لدي شركة ايزري موقع Arc Scripts الذي يضم بضعة آلاف من الاسكريبت المصممة للعمل داخل برنامج Arc GIS لتقوم بتنفيذ عدد كبير من التطبيقات البرمجية.

٣٥-٧ - ٤ الطرق متعددة المعايير

في بعض تطبيقات اتخاذ القرار تكون هناك عدة عوامل تؤثر معا علي الظاهرة قيد الدراسة ويجب أخذها جميعا في الاعتبار. فعلي سبيل المثال عند دراسة ظاهرة نقص المياه الجوفية في بقعة محددة فان الدراسة ستعتمد علي ميول الأرض والمسافات من المجاري المائية و استخدامات الأراضي في هذه المنطقة. ولكل عنصر من هذه العناصر معايير تحدد درجة تأثيره علي المياه الجوفية، فمثلا كلما زادت المسافة من المجاري المائية كلما قل تواجد المياه الجوفية. فإذا أردنا ترجمة هذه المعايير في صورة رياضية فسيكون هناك عدد من العناصر سنرمز لها بالرموز x_1 إلي x_n، وسنرمز لتأثير كل عنصر منهم بدالة f(x)، وحيث أن وزن كل عنصر سيكون متغيرا فسنرمز للأوزان بالرمز wi، ومن ثم يمكننا تكوين المعادلة للتعبير عن تأثُير هذه العناصر مجتمعة:

$$l = \sum_{i=1}^{n} w_i f(x_i) \qquad (35\text{-}14)$$

وفي هذه المعادلة يجب تحديد الدالة $f(x_i)$ والوزن x_i لكل عنصر من العناصر، فمثلا دالة عنصر الميل ستكون دالة متناقصة بمعني أنه كلما قل الميل كلما قل تأثير هذا العنصر. ويتم دراسة تأثير كل عنصر أولا، ثم يتم دمج كل هذه التأثيرات معا مع إعطاء الوزن المناسب لكل عنصر. وهذا الأسلوب في النمذجة يسمي بأسلوب اتخاذ القرار بناءا علي معايير متعددة multi-criteria decision making (أو اختصارا MCDM). ومن الممكن أن يتم أخذ آراء الجمهور والاعتماد عليها في تحديد الوزن المناسب لكل عنصر في حالة نظم المعلومات الجغرافية للجمهور PP GIS بحيث تكون عملية اتخاذ القرار عملية تشاركية بين التنفيذيين و الجمهور. كما أن هذا الأسلوب يسمح بدمج تأثير عدد من العناصر الهندسية و البيئية و الاقتصادية و الاجتماعية قبل اتخاذ القرار الأفضل في المشروعات التنموية. ومعظم برامج نظم المعلومات الجغرافية تتيح إمكانيات النمذجة بالمعايير المتعددة، إلا أن برنامج الإدريسي IDRIS من جامعة كلارك يعد من أفضل البرامج في هذا المجال (www.clarklabs.org).



شكل (٣٥-٣٠) مثال لتطبيقات اتخاذ القرار بناءا علي معايير متعددة

٣٥-٧-٥ الدقة و الفعالية: اختبار النماذج

عادة ما تتكون النماذج المكانية من تركيبات معقدة وتكون نتائجها توقعية للمستقبل، لكن هل يمكن اختبار هذه النماذج؟. للأسف فالكثيرون يثقون في نتائج النماذج المكانية بصورة مطلقة طالما أنها ناتجة باستخدام الكمبيوتر. عادة فان العلماء يخابرون نتائج نماذجهم بمقارنتها بالحقائق الفعلية، لمن في حالة النماذج المكانية المستقبلية فلا توجد حقائق فعلية. ومن ثم فيجب اللجوء لطرق أخري لاختبار دقة و جودة النماذج المكانية.

من طرق اختبار جودة النماذج المكانية ما يعرف باسم طريقة الفعالية المتقاطعة cross-validation، وهي الطريقة التي تعتمد علي تقسيم البيانات المتاحة إلي جزأين الأول يستخدم في بناء ومعايرة النموذج calibration والثاني يستخدم في التحقق من فعالية نتائجه validation. ويمكن تطبيق هذه الطريقة بتقسيم البيانات إما إلي جزأين زمنيين (كلا منهما يغطي فترة زمنية مختلفة) أو جزأين مكانيين (كلا منهما يغطي منطقة مكانية مختلفة). لكن يجب اخذ الحيطة في حالة أن الظاهرة قيد الدراسة تتغير مع مرور الزمن أو تتغير بتغير موقعها المكاني.

أيضا يمكن اختبار النماذج المكانية للعالم الحقيقي من خلال التجربة، من خلال التأكد أن كل مركب من مركبات النموذج يعكس الحقيقة فعلا. فمثلا في النماذج الخلوية يجب اختبار أن الحالة الانتقالية للخلايا تتغير فعلا في الحقيقية كما تبدو نتائجها المستنبطة من النموذج المكاني للنمو العمراني.

إن أي نموذج مكاني لن يمثل العالم الحقيقي المعقد بصورة مثالية، ويجب النظر للنموذج من خلال الاعتبارات التالية:

- يمكن للنموذج المكاني أن يعكس الواقع في الحالات "المثالية"، أي أنه يعد مبدأ لمقارنة الحقيقة.
- لا يمكن تقويم النموذج بناءا علي مدي قربه من الحقيقية، إنما علي مدي تقليله لعدم اليقين uncertainty عن المستقبل. أي أن النتائج المستقبلية للنموذج يجب أن يصاحبها مقاييس منطقية لعدم اليقين.
- النموذج هو وسيلة لبناء المعرفة اعتمادا علي عدد من المصادر ويقدم توصيات تعتمد علي المعلومات التي تم بناؤه منها.
- غالبا فأن النمذجة المكانية تقدم أفضل إطار تحليلي علمي "متاح" لمتخذي القرار في الوقت الراهن.

٣٥-٨ ادارة نظام معلومات جغرافي

٣٥-٨-١ مقدمة: النظرة العامة

أصبح إنشاء نظام معلومات جغرافي عملا روتينيا وان كان ليس بسيطا، لكن إدارة هذا النظام عملا هاما أيضا لضمان نجاحه. النجاح يتضمن مشاركة الخبرات و المعرفة مع الأفراد و الجهات الأخرى والاستمرار في الحصول علي نتائج طيبة واتخاذ قرارات بصفة دائمة.

عادة يكون السؤال الأول قبل البدء في أية خطوات وهو: هل هناك حاجة لإنشاء نظام معلومات جغرافي؟ وغالبا تكون الإجابة جاهزة عندما نري كيف استفادت المؤسسات المشابهة (في نفس نطاق العمل) من GIS. لكن بصفة عامة يوجد مطلبين و ثلاثة أسباب لإنشاء نظام معلومات جغرافي:

- خفض التكلفة cost reduction : تحل نظم المعلومات الجغرافية محل العمليات التقليدية مثل إنشاء الخرائط وجمع معلومات العملاء و إدارة الموارد، وذلك بكفاءة أعلي.
- تفادي التكلفة cost avoiding : فعلي سبيل المثال تستطيع نظم المعلومات الجغرافية اختيار أفضل المواقع للمنشئات مما يجنب الإنشاء في مواقع خطرة بيئيا، واختيار أنسب مسار لحركة المركبات.
- زيادة الدخل increase revenue : مثل تطوير و بيع الخرائط، وتوفير الاستشارات الفنية (في مجالات العقارات و الموارد الطبيعية مثلا).
- الحصول علي منتجات جديدة getting new products : مثل تطوير و بيع المرئيات الفضائية المسقط عليها بيانات مجسمة ثلاثية الأبعاد ، و تطوير و بيع خطط الإخلاء عند وقوع كوارث بيئية.
- الحصول علي فوائد غير ملموسة getting non-tangible benefits : مثل تقديم خدمات أفضل للعملاء، اتخاذ قرارات أفضل، استخدام المعلومات في كل إدارات المؤسسة بصورة أكثر كفاءة.

والشكل التالي يقدم مثالا لنظام المعلومات الجغرافي لإدارة الأراضي في مدينة سيول بكوريا الجنوبية، وهو المنشأ منذ عام ١٩٩٨م. ويقدم هذا النظام للجمهور إمكانية عرض بيانات الأراضي من خلال الانترنت، وإمكانية تقدير سعر أي قطعة أرض، بالإضافة لإجراء أية معاملات علي الأراضي بصورة آلية دون الحاجة للذهاب للمكاتب الحكومية المتخصصة. وتستخدم الحكومة هذا النظام كنظام اتخاذ القرار في عمليات التنمية بالمدينة (في إطار الحكومة الالكترونية e-government).

شكل (٣٥-٣١) نظام إدارة الأراضي في مدينة سيول الكورية

يقدم Roger Tomlinson (وهو من رواد نظم المعلومات الجغرافية علي مستوي العالم) ١٠ خطوات أو مراحل عملية للتخطيط لإنشاء نظام معلومات جغرافي يلبي متطلبات العميل، وتشمل:

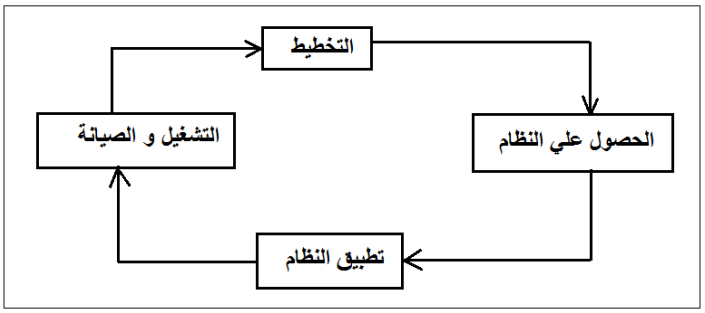
١. تحديد الهدف الاستراتيجي: فهذا الهدف هو الذي ينير الطريق أمام باقي مراحل إنشاء النظام، فالنظام الذي يجب إنشاؤه يجب أن يكون ملائما لهدف المؤسسة بصورة عامة.
٢. تخطيط التخطيط: عملية تخطيط إنشاء نظام المعلومات الجغرافية عملية ليست سهلة و تستغرق الوقت و الموارد أيضا، ومن ثم فهناك حاجة لأخذ موافقات وملاحظات المديرين التنفيذيين في المؤسسة.
٣. عمل ورشة عمل علمية: يهدف هذا اللقاء لمناقشة كافة الجوانب العلمية والعملية بين فريق التخطيط لإنشاء GIS وباقي أقسام المؤسسة.
٤. تحديد منتجات المعلومات: تحديد المنتجات التي يسعي GIS لتطويرها وما يمكن الحصول عليه من هذا النظام.
٥. تحديد متطلبات النظام: تحديد المطلوب من أجهزة و برامج و بيانات وفترات زمنية أيضا.
٦. إنشاء تصميم للبيانات: تحديد مصادر البيانات المطلوبة وهل ستكون من المعروض في الانترنت أم سيتم شراء قواعد بيانات تجارية أم سيتم إنشاء قواعد البيانات المطلوبة.
٧. اختيار نموذج البيانات المنطقي: تتيح نماذج البيانات الهدفية إمكانيات جيدة في نظم المعلومات الجغرافية و يجب أخذها في الاعتبار، مع أن نماذج البيانات العلاقية مازالت شائعة.
٨. توفير متطلبات النظام: توفير كافة متطلبات النظام والأخذ في الاعتبار القدرة علي تحديثهم باستمرار.
٩. تحليل المكاسب و الأخطار: إجراء تحليل للتكلفة و المكاسب وأيضا الأخطار المتوقعة.
١٠. وضع خطة التنفيذ: تصميم الخطة التفصيلية لتطبيق نظام المعلومات الجغرافي في المؤسسة.

٣٥-٨-٢ عملية تطوير نظام معلومات جغرافي قابل للاستدامة

مشروعات نظم المعلومات الجغرافية مثلها مثل مشروعات تقنيات المعلومات (information technology أو IT) يمكن تقسيمها إلي أربعة مراحل زمنية تشمل:

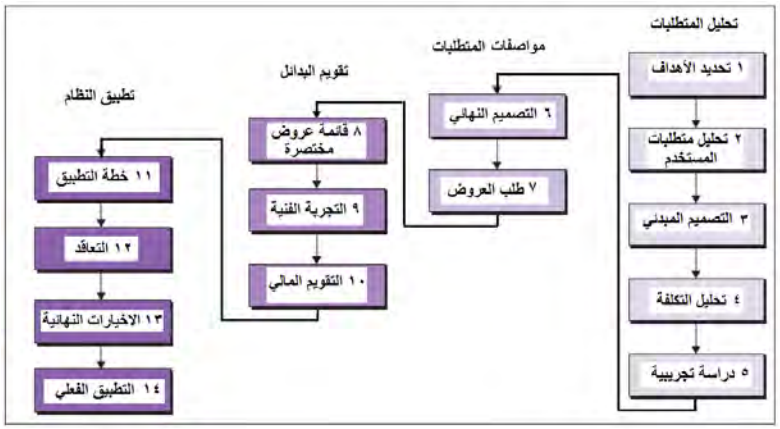
- التخطيط: التحليل الاستراتيجي و جمع المتطلبات.
- الحصول علي النظام: اختيار وشراء نظام.
- تطبيق النظام: تجميع كافة المكونات وتطوير الحلول الفعلية.
- التشغيل و الصيانة: الاستمرارية في عمل النظام.

وقد تكون هذه المراحل تكرارية، فمثلا للمشروعات التي تستمر فترة زمنية طويلة فتحدث تطورات تقنية تستوجب التطوير و الإحلال بصورة مستمرة.



شكل (٣٥-٣٢) مراحل مشروع نظام المعلومات الجغرافية

يعرض الشكل التالي نموذجا عاما للحصول علي نظام معلومات جغرافي قابل للاستدامة sustainable GIS (خاصة للمؤسسات الكبيرة)، و النموذج مكون من أربعة مراحل تشمل أربعة عشرة خطوة.



شكل (٣٥-٣٣) نموذج عام لعملية الحصول علي نظام معلومات جغرافي

المرحلة الأولي: تحليل المتطلبات

١. تحديد الأهداف: يتم تحديد أهداف النظام طبقا لأهداف المؤسسة وخطتها الإستراتيجية، وتحديد كيف سيؤثر نظام المعلومات الجغرافي في تنمية المؤسسة.
٢. تحليل متطلبات المستخدم: يحدد هذا التحليل كيف سيتم تصميم و تقويم نظام المعلومات الجغرافي، ويركز التحليل علي نوعية البيانات المستخدمة حاليا ومن يستخدمها وكيف يستخدمها. ويتم التحليل من خلال إجراء القابلات مع منسوبي المؤسسة وعمل ورش العمل، ويتم وضع نتائج التحليل في صورة خريطة تدفق تحدد مصادر البيانات الحالية وتكلفتها وعمليات معالجتها، ومن ثم يمكن عمل تصور لما سيؤدي نظام المعلومات الجغرافي عند تطبيقه.
٣. التصميم المبدئي: تحديد مواصفات عامة للنظام وتصميم مبدئي للنماذج وعمل مسح للنظم المعروضة في الأسواق. وتشمل هذه الخطوة تحديد مواصفات قواعد البيانات من حيث

حجم وأنواع البيانات المطلوبة، وأيضا نموذج البيانات الأنسب (نموذج خطي أم شبكي)، بالإضافة لعمل مسح للبرامج التجارية المتاحة في الأسواق وإمكانيات كلا منهم. أيضا يتم - في هذه الخطوة - اتخاذ القرار إن كان سيتم شراء البيانات مباشرة أم سيتم بناؤها.

٤. تحليل التكلفة: عمل تحليل اقتصادي لتكلفة النظام والفوائد المتوقعة من وراءه، وهل سيكون الناتج النهائي مربحا اقتصاديا أم من الأفضل الاستمرار بطريقة العمل الحالية المتبعة في المؤسسة. والجدول التالي يقدم مثالا لهذا التحليل.

المجموعة	التكلفة	الفوائد
الاقتصادية أو الملموسة	- معدات - برامج - تدريب - موظفين جدد - مكان أكبر - تجميع أو شراء البيانات	- خفض التكلفة - مخرجات أكثر - زيادة الدخل - فتح أسواق جديدة - تطوير منتجات جديدة
المؤسسية أو غير الملموسة	- تسريح العمال غير الأكفاء - تخفيض عدد العمال	- قرارات أفضل - تحسين العلاقات مع العملاء - تدفق معلومات أكثر كفاءة - مناخ عمل أفضل

٥. دراسة تجريبية: عمل دراسة لنظام معلومات جغرافي كامل وان كان مصغرا بهدف اختبار كل مكونات المشروع و كفاءتها، مثل اختبار مكونات التصميم ومتطلبات المستخدمين واختبار عينات من البيانات واختبار بسيط للمنتجات المطورة.

المرحلة الثانية: مواصفات المتطلبات

١. التصميم النهائي: يتم في هذه الخطوة تحديد العناصر النهائية المطلوبة لمشروع نظام المعلومات الجغرافية من تصميم و أجهزة و موارد مالية ...الخ، وبالتالي إعداد وثيقة طلب العروض Request for Proposals لطرحها علي الشركات المتخصصة.
٢. طلب العروض: تشمل وثيقة طلب العروض العناصر المالية والتجارية و القانونية والفترات الزمنية للتنفيذ. ثم يتم طرح هذه الوثيقة للشركات المتخصصة في نظم المعلومات الجغرافية لكي يقدموا عروضهم (الفنية و المالية) التي تلاءم متطلبات المؤسسة.

المرحلة الثالثة: تقويم البدائل

١. قائمة عروض مختصرة: في حالة تقدم عدد من الشركات بعروض للمؤسسة يتم تقويم كل عرض وإعطاء وزن لكل عنصر من عناصر العرض. ومن الأفضل أن يقوم أكثر من متخصص بعملية تقويم العروض ثم يتم عمل مقارنة بين نتائج كلا منهم للوصول إلي أفضل تقويم، بحيث ينتج في النهاية عمل قائمة مختصرة تضم أفضل العروض (من ٢ إلي ٤).

٢. التجربة الفنية : يتم عمل تقويم لكل عرض من العروض النهائية، بحيث تقدم كل شركة نموذجا مبدئيا لنظام المعلومات الجغرافية المطلوب ويتم اختبار كل نموذج مقارنة بمتطلبات المؤسسة طبقا للتصميم النهائي المطلوب للنظام.
٣. التقويم المالي: يتم مقارنة العروض التي اجتازت خطوة التجربة الفنية من وجهة النظر المالية لكل مكون من مكوناتها. وفي نهاية هذه الخطوة يتم عمل ترتيب لعروض الشركات من وجهتي النظر الفنية و المالية.

المرحلة الرابعة: تطبيق النظام

١. خطة التطبيق: تطوير خطة تطبيق النظام من حيث الأولويات و الفترات الزمنية للتوريد (الأجهزة و البرامج) والاختبار و التدريب والدفع.
٢. التعاقد: عمل العقد النهائي الذي يحدد كل مكونات المشروع (الفنية و المالية و القانونية) بدقة مع تحديد الاختصاصات و الشروط بين المؤسسة و الشركة الموردة للنظام.
٣. الاختبارات النهائية: للتأكد من أن البنود التي تم توريدها للمؤسسة مطابقة تماما للمواصفات المطلوبة.
٤. التطبيق الفعلي: قد يستغرق الحصول علي نظام GIS عدة أشهر أو ربما أطول، وتشمل هذه المرحلة الأخيرة تدريب موظفي المؤسسة وتجميع البيانات وصيانة النظام ومراقبة الأداء.

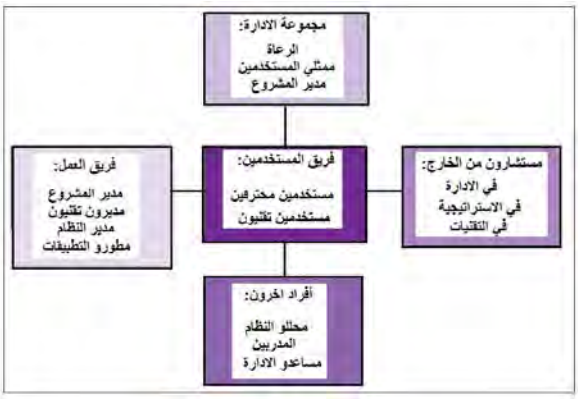
علي المستوي الإداري هناك عدة نقاط يجب علي مدير مشروع نظم المعلومات الجغرافية أخذها في الاعتبار وتشمل:

- التخطيط الجيد هو الأساس في كل مرحلة من مراحل المشروع.
- الحصول علي الدعم (من الخبراء والمتخصصين) باستمرار من أساسيات النجاح.
- التواصل مع المستخدمين من البداية هام جدا لمعرفة آرائهم و متطلباتهم.
- المراقبة الدائمة للأداء (الأفراد و الأجهزة و البيانات) هامة لتخطي العقبات الممكن حدوثها.
- عدم السعي وراء الخفض غير المسئول في التكلفة (شراء أجهزة أرخص و توظيف أفراد أقل خبرة).
- التأكد من جودة وأمان البيانات بصورة مستمرة طوال مراحل المشروع.
- حث أفراد المؤسسة علي الاستفادة من نظام المعلومات الجغرافية علي جميع المستويات.
- التخطيط الزمني الدقيق لمراحل المشروع يعود بفوائد اقتصادية جيدة.
- توفير الاعتمادات المالية المطلوبة في موعدها لتفادي أية مشكلات في تنفيذ المشروع.

٣٥-٨-٣ فريق العمل في نظام معلومات جغرافي قابل للاستدامة

"إن لم يعمل كل فرد من أفراد فريق العمل بكفاءة علي المستوي الفردي وعلي المستوي الجماعي فلن يتم الحصول علي مميزات نظام المعلومات الجغرافي" هذه قاعدة رئيسية يجب وضعها في الاعتبار.

يختلف عدد أفرا فريق العمل ودور كلا منهم باختلاف المشروعات، لكن عادة ما يكون هناك "مجلس إدارة" يختار المسئول التنفيذي (المدير) الذي يشرف علي المشروع. أما الأعمال اليومية فتتم من خلال ثلاثة مجموعات: فريق العمل، مستخدمي النظام، مجموعة الاستشارات الخارجية. ويشكل فريق عمل نظم المعلومات الجغرافية GIS team الأفراد المتخصصين الذين لديهم خبرات تقنية مناسبة ومعرفة جيدة بطبيعة عمل المؤسسة، ويقود هذا الفريق مدير نظم المعلومات الجغرافية GIS manager. يتكون مستخدمي النظام GIS users في المؤسسة من قسمين: مستخدمين محترفين ومستخدمين تقنيين. فالمحترفون (مثل المهندسين والمخططين والعلماء) لديهم خبرات عالية كلا في تخصصه، وربما ليس لديهم معرفة كبيرة بنظم المعلومات الجغرافية لكنهم عادة مستعدين للتعلم. أما المستخدمين التقنيين فربما يتم توظيفهم في المشروع داخل المؤسسة للقيام بعمليات مثل تجميع البيانات وإنتاج الخرائط. أما الفريق الثالث فهو الذي تلجأ إليه المؤسسات الكبرى لطلب الدعم و الاستشارات من خارج المؤسسة ذاتها. وهؤلاء قد يكونون خبراء في الإدارة أو خبراء إستراتيجيون أو خبراء تقنيون. وقد يتم النظر لهذا الفريق الثالث علي أنه "غير ضروري ومكلف"، إلا أنه في الحقيقة يعد إضافة كبيرة لمشروع نظم المعلومات الجغرافية خاصة في حالة أن المعرفة الداخلية للمؤسسة أو مواردها محدودة.



شكل (٣٥-٣٤) فريق العمل لمشروع نظام معلومات جغرافي بمؤسسة كبري

٣٥-٩ نظم المعلومات الجغرافية و الادارة و الاقتصاد المعرفي

٣٥-٩-١ الإدارة ونجاح نظم المعلومات الجغرافية

لدي الكثير من الناس فأن الإدارة تتضمن عمل روتيني لضمان أن التعليمات و الخطوات العملية يتم تطبيقها وأهداف الإنتاج يتم تحقيقها. لكن حاليا فان المديرون مطالبون بتوقع الفرص وأيضا المخاطر المستقبلية، واتخاذ ما يلزم من قرارات لتغيير العالم المحلي. فعلي المدير ان يتابع باستمرار التغيرات في أهداف المؤسسة التي يعمل (أو تعمل) بها، بل و المساعدة في تحقيق هذه التغيرات. فالإدارة هامة للغاية في نجاح أي مشروع، فلم تنجح شركة مايكروسوفت لأنها تنتج برامج جيدة بل لأنها إدارة جيدة وأفراد أذكياء. وفي عالمنا الحديث فأن العلوم و التقنيات الحديثة ليست كافية للنجاح. وهناك عدد من النقاط التي يجب أخذها في الاعتبار، وتشمل:

- يسبب الأفراد مشاكل أكبر من التي تسببها التقنيات.
- تتغير التقنيات وأيضا توقعات المستخدمين بسرعة.
- عدم اليقين متواجد معنا بصورة دائمة مهما اختلفت درجاته.
- عدم الاعتماد علي أن منتجات مؤسسة معينة لا يوجد مثيل أي منافس لها.
- لعملاء أي نظام فكرة ثابتة عما يريدونه، لكن هذا يتغير مع الزمن.
- لمشروعات نظم المعلومات الجغرافية تأثيرات مبهرة (حتى وان كانت غير مباشرة) ويجب استثمارها.
- يجب ملاحظة الفروق بين الثقافات المحلية و الإقليمية عند تطبيق نظم المعلومات الجغرافية، فعلي سبيل المثال عندما أطلقت مايكروسوفت نظام التشغيل ويندوز ٩٥ كانت هناك بعض الأخطاء الحدودية بين الهند و باكستان في خريطة المناطق الزمنية، مما أدي لسحب ٢٠٠،٠٠٠ نسخة من البرنامج مما كلف الشركة ملايين الدولارات!.

تعتمد الإدارة الجيدة لمشروع نظام معلومات جغرافي علي بذل جهد أكبر والذكاء والقدرة علي تقبل انتقادات الآخرين. فالجزء التقني في مشروعات نظم المعلومات الجغرافية (اقتناء أحدث البرامج و المعدات والبيانات) ليس كافيا للنجاح. فمن العوامل الهامة الأخرى الأخذ في الاعتبار الأوجه الإنسانية والمؤسسية للوصول إلي أفضل النتائج. فيجب العمل علي نشر الوعي بفوائد التقنيات الحديثة علي مستوي الأفراد ومستوي المؤسسة ككل حتى يكون هناك تقبل عام للمشروع.

٣٥-٩-٢ مهارات العاملين في نظم المعلومات الجغرافية

تختلف مهارات العاملين في مجال نظم المعلومات الجغرافية بدرجة كبيرة، وفي دراسة للوظائف المتاحة في هذا المجال وجد أن ٤٠% تتعلق بوظائف محللين نظم GIS analysts و ٢٥% للفنيين و ٢٢% للمديرين و ١٠% للمبرمجين.

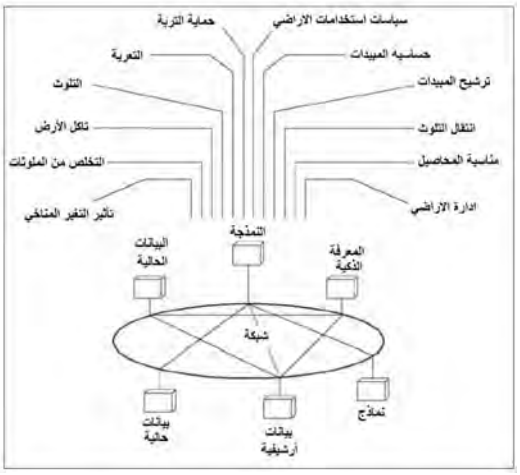
توجد عدة أنواع من مقررات التعليم و التدريب المتاحة في مجال نظم المعلومات الجغرافية وتشمل:

- مقررات تدريبية لبرنامج software ، وعادة ما تقدمها الشركات المنتجة للبرامج ذاتها.
- مقررات تطوير البرامج وغالبا ما تكون ضمن مقررات أقسام علوم الحاسب بالجامعات.
- التعليم الجامعي ويشمل درجات البكالوريوس في أقسام الجغرافيا والبيئة و الجيوماتكس و المساحة.
- التعليم بعد الجامعي ويشمل درجتي الماجستير و الدكتوراه.
- مقررات قصيرة للمحترفين وعادة ما تكون من متطلبات رخص العمل أو متطلبات الترقية في العمل.

٣٥-٩-٣ نظم المعلومات الجغرافية والتنمية المستدامة

تعرف التنمية المستدامة sustainable development (في أحد تعريفاتها) علي أنها التنمية التي تسعي لإيجاد حياة صحية متلائمة مع الطبيعة تراعي المتطلبات البيئية للأجيال الحالية و المستقبلية. ومن ثم فأن التنمية المستدامة تتضمن تطبيق النمذجة لمحاكاة التأثيرات المتوسطة و

البعيدة المدى لعمليات التنمية باستخدام عدة مصادر للبيانات المكانية. وهنا فأن نظم المعلومات الجغرافية ستلعب دورا بالغ الأهمية في التنمية المستدامة لما لها من إمكانيات في التعامل مع عدة أنواع من البيانات في مراحل الجمع و التحليل و النمذجة. وبالفعل فقد استخدمت نظم المعلومات الجغرافية بكثافة في العقدين الماضيين في مجالات تقليل المخاطر الناجمة عن الكوارث الطبيعية (مثل السيول و الانزلاقات الأرضية) ودراسة الآثار الناجمة عن المخاطر الطبيعية (مثل ظاهرة الاحتباس الحراري و ظاهرة ارتفاع منسوب سطح البحر) وكذلك تطبيقات تحديد الآثار البيئية للمشروعات الجديدة، بالإضافة لمشروعات التخطيط الحضري و الإقليمي.

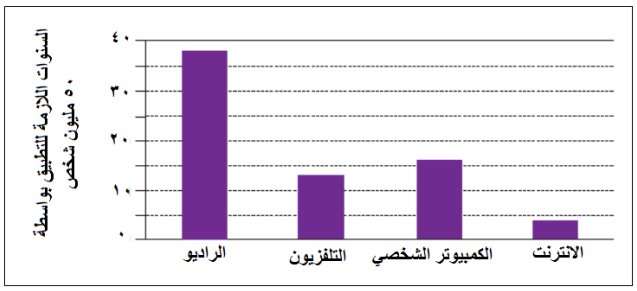


شكل (٣٥-٩١) نظم المعلومات الجغرافية و دعم التخطيط و التنمية المستدامة

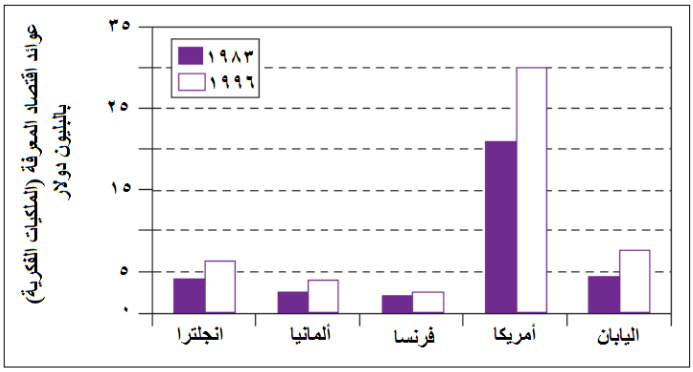
٣٥-٩-٤ اقتصاد المعرفة و نظم المعلومات الجغرافية

اقتصاد المعرفة knowledge economy هو استخدام الاقتصاد لجعل الأشياء تعمل بكفاءة أعلي، وأيضا لابتكار واستخدام أنواع جديدة من المعرفة، ومن ثم فأن الابتكارات المستمرة تعد أهم قواعد اقتصاد المعرفة. ويمكن تعريف الابتكارات innovations علي أنها الاستثمار الناجح للأفكار الجديدة، وغالبا ما يتضمن تقنيات جديدة أو تطبيقات تقنية جديدة. وللمستهلكين فأن الابتكارات تعني جودة أعلي وقيمة أفضل وخدمات أكثر كفاءة ومعايير أعلي للحياة. والشركات و المؤسسات التي تعتمد علي الابتكارات ستضمن فوائد أعلي لملاكها والمستثمرين بها، وتضمن لموظفيها بيئة عمل أفضل ومهارات أحسن وعائد أعلي.

في عالمنا الحاضر أصبح الناس أكثر تقبلا للابتكارات وتطبيقها بسرعة أكبر، فالشكل التالي يوضح عدد السنوات التي استغرقتها الابتكارات الجديدة ليقتنيها ٥٠ مليون شخص في أمريكا، ومنه نلاحظ أن تقبل الابتكارات الحديثة صار سيتم بسرعة كبيرة حاليا. كما أن العوائد الاقتصادية من ترخيص و بيع منتجات ابتكاريه جديدة قد زادت بسرعة في السنوات الأخيرة.



شكل (٣٥-٣٦) سرعة تقبل الابتكارات الجديدة



شكل (٣٥-٣٧) عوائد اقتصاد المعرفة

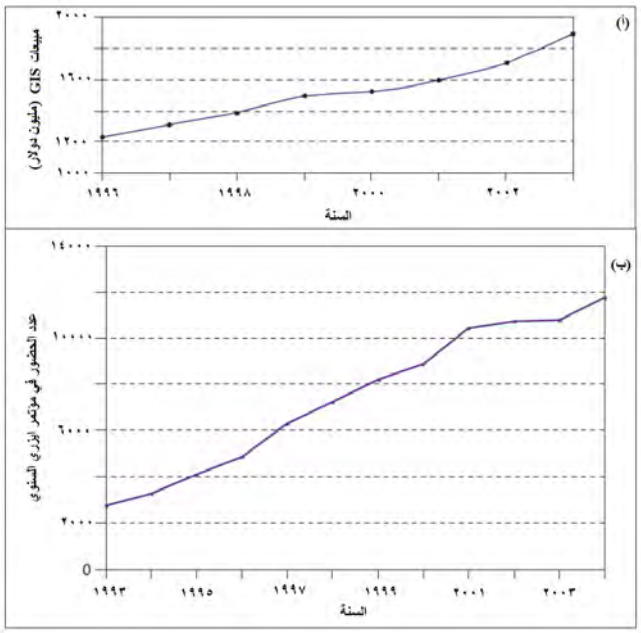
تعد المعلومات من أهم أسباب الوصول للقرار السليم، ومعلومات جيدة تعني في معظم الأحيان قرارات جيدة أيضا. لكن في بعض الحالات فأن متخذي القرار يعانون من وجود كم هائل من المعلومات المتداخلة (خاصة غير المتعلقة بالموضوع). وتلعب نظم المعلومات الجغرافية دورا بارزا في اقتصاد المعرفة، فبرامج نظم المعلومات الجغرافية تتابع في إصداراتها السنوية مما يفتح دائما الباب أمام تطبيقات ومجالات جديدة لهذه النظم. وفي المشروعات الكبيرة فأن نظم المعلومات الجغرافية تقدم عدة فوائد للمديرين وتشمل:

- تقديم معلومات واقعية عن مواقع الموارد المتاحة سواء الطبيعية أو البشرية.
- تقديم حسابات واقعية، مثل التلوث في حدود خمسة كيلومترات من نقطة محددة، أفضل المسارات علي شبكة معينة ...الخ.
- إمكانيات اختيار و تمثيل المعلومات لتسهيل عملية اتخاذ القرار.
- البحث عن الانتظام أو العشوائية في أنماط التوزيعات الجغرافية والارتباط بينهم، فمثلا هل الإنفاق علي سلع معينة يرتبط بالمسافة بين المنزل و المتجر؟.
- تطوير القيمة المضافة من خلال ربط معلومات من عدة مصادر، مما يوسع من الفرص الممكنة للتطبيقات.
- التنبؤ بالأحداث المستقبلية المرتبطة بالموقع المكاني.

مع الانتشار الهائل لاستخدام شبكة الانترنت علي المستوي العالمي فقد أضاف ذلك عدة مميزات لسوق تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية ومنها:

- سهولة استخدام أدوات المعلومات المكانية المتوافرة علي الشبكة.
- إمكانية الحصول علي و تطبيق عينة من المعلومات المكانية للتحقق من جدواها في تطبيق أو مشروع معين.
- القدرة علي الاختيار (برامج و بيانات) بين عدد كبير من البدائل.
- القدرة علي تحويل البيانات الجغرافية الضخمة بتكلفة بسيطة.
- سرعة الحصول علي البيانات المكانية.
- دفع تكلفة الحصول علي البيانات بسرعة أيضا (من خلال بطاقات الائتمان).

إن نظم المعلومات الجغرافية أصبحت سوقا هاما في حد ذاته سواء علي المستوي الاقتصادي أو علي مستوي الاهتمام المتزايد بها عالميا. فالشكل (أ) يقدم مثالا لنمو أرباح سوق نظم المعلومات الجغرافية علي المستوي العالمي، بينما يعرض الشكل (ب) النمو المتسارع في عدد الحاضرين للمؤتمر السنوي الذي تقيمه شركة ايزري. وهذا علي الجانب التجاري للمؤسسات الخاصة، بينما علي مستوي الجهات الحكومية فالأرقام ستكون أكبر بكثير. فعلي سبيل المثال فأن ميزانية هيئة المساحة العسكرية الأمريكية فقط تتخطي حاجز المليار دولار. ويقدر المحللون أن معدل نمو سوق نظم المعلومات الجغرافية في الولايات المتحدة الأمريكية يبلغ ١٠.٩% سنويا في الفترة ٢٠١٢-٢٠١٦، بينما يبلغ ٩.٦% علي المستوي العالمي.



شكل (٣٥-٣٨) أمثلة لنمو سوق نظم المعلومات الجغرافية

المراجع

(١) المراجع العربية

١-١ الكتب المطبوعة

الحسيني ، محمد صفوت (٢٠٠٢م) الجيوديسيا ، القاهرة ، مصر.

الشافعي ، شريف فتحي (٢٠٠٤م) المساحة التصويرية ، دار الكتب العلمية للنشر و التوزيع ، القاهرة ، مصر.

الشريعي ، أحمد البدوي محمد ، الخرائط الجغرافية: تصميم وقراءه وتفسير(٢٠٠٧م) دار الفكر العربي، القاهرة، مصر.

الربيش ، محمد بن حجيلان (٢٠٠٢م) النظام الكوني لتحديد المواقع – الرياض، المملكة العربية السعودية.

العيسي ، سميح يوسف (٢٠٠٦م) مبادئ عمل منظومة التوضع الجي بي إس – شعاع للنشر – حلب – سوريه.

الغزالي ، محمد شوقي ، ١٩٩٧ ، الجيوديسيا الهندسية و نظام تحديد المواقع العالمي ، القاهرة، مصر.

شكري ، علي سالم و عبد الرحيم ، محمود حسني و مصطفي ، محمد رشاد الدين (١٩٩٤م) المساحة المستوية: طرق الرفع و التوقيع ، منشأه المعارف ، الاسكندرية ، مصر.

شكري ، علي سالم و عبد الرحيم ، محمود حسني و مصطفي ، محمد رشاد الدين (١٩٩٤م) المساحة الطبوغرافية و تطبيقاتها في الهندسة المدنية ، منشأه المعارف ، الاسكندرية ، مصر.

شكري ، علي سالم و عبد الرحيم ، محمود حسني و مصطفي ، محمد رشاد الدين (١٩٨٩م) المساحة الجيوديسية ، منشأه المعارف ، الاسكندرية ، مصر.

شكري ، علي سالم و عبد الرحيم ، محمود حسني و مصطفي ، محمد رشاد الدين (١٩٩٨م) المساحة التصويرية و القياس الالكتروني و نظرية الاخطاء ، منشأه المعارف ، الاسكندرية ، مصر.

صيام ، يوسف (٢٠٠٢م) المساحة: أنظمة الاحداثيات و قراءة الخرائط ، عمان ، الاردن.

عبد العزيز ، يوسف ابراهيم و الحسيني ، محمد صفوت (٢٠٠٧م) المساحة ، دار المعرفة للنشر و التوزيع ، القاهرة ، مصر.

عبده ، وسام الدين محمد (٢٠١٢م) إدارة نظم المعلومات الجغرافية باستخدام البرنامج ArcGIS Desktop، مكتبة المتنبي ، الدمام، المملكة العربية السعودية.

عزيز ، محمد الخزامي (٢٠٠٤ م) نظم المعلومات الجغرافية: أساسيات و تطبيقات للجغرافيين – منشاة المعارف – الإسكندرية – مصر.

غازي ، ناصر محمد (٢٠٠٧م) القياس الالكتروني للمسافات و محطات الرصد المتكاملة ، دار المعرفة للنشر و التوزيع ، القاهرة ، مصر.

محسوب ، محمد صبري ، و الشريعي ، أحمد البدوي محمد (٢٠٠٥م) الخريطة الكنتورية: قراءة و تحليل ، القاهرة ، دار الفكر العربي ، القاهرة، مصر.

معوض ، معوض بدوي (٢٠٠٩م) مبادئ الاستشعار عن بعد و تدريباته العملية ، المنار للطباعة و النشر ، القاهرة ، مصر.

١-٢ الكتب الرقمية للمؤلف

المدخل إلي النظام العالمي لتحديد المواقع:
http://www.4shared.com/office/cF64h3W2/____2010.html
مبادئ المساحة:
http://www.4shared.com/office/W7ZVbmUR/__2012.html
المدخل إلي الخرائط الرقمية:
http://www.4shared.com/office/sktltH1z/__2012.html
أسس المساحة الجيوديسية و الجي بي أس:
http://www.4shared.com/office/kCpAymjl/2012.html
التحليل المكاني في إطار نظم المعلومات الجغرافية:
http://www.4shared.com/office/HvM0Ay-K/2012.html
المدخل الي الخرائط:
http://www.4shared.com/office/4uxcDpt8/___2013.html
مقدمة في الصور الجوية و المرئيات الفضائية:
http://www.4shared.com/office/79bhYBKb/____2013.html
الجيوماتكس: علم المعلوماتية الأرضية
http://www.4shared.com/office/_kV-o1gx/_2014.html
مبادئ علم نظم المعلومات الجغرافية:
http://www.4shared.com/office/wbpBh9Ngce/Dawod_GIS_Science_2014_-_Copy.html
رياضيات الهندسة المساحية:
http://www.4shared.com/office/6ywRVmgcba/Surveying_Mathematics.html
دراسات تطبيقية في الجيوماتكس:
http://www.4shared.com/office/i7f_Ya6_ba/____.html
أسس و تطبيقات الاستشعار عن بعد:
http://www.4shared.com/office/2VjkQJmOce/Dawod_Remote_Sensing_2015.html
مقدمة في العلوم و التقنيات المكانية:
http://www.4shared.com/office/iSonDfdeba/Dawod_Geospatial_Sciences_2015.html

١-٣ محاضرات فيديو للمؤلف:

دورة تدريبية في الجي بي أس:
https://www.youtube.com/watch?v=VUmyr9sMMeo&list=PL-2sBQtgS7Y4nZwe-XB8KjVJiWFIth6LL

دورة تدريبية في Arc GIS المستوي الأول:
https://www.youtube.com/watch?v=jiZsuWL45vo&list=PL-2sBQtgS7Y4H8EYoSCvdahCr2VxYz-P_

دورة تدريبية في Arc GIS المستوي الثاني:
https://www.youtube.com/watch?v=UP2X3GY-Q2c&list=PL-2sBQtgS7Y5WiwUGE033X4v6BMuaYILX

محاضرات المساحة و الجي بي أس:
https://www.youtube.com/watch?v=oqP0jROrjYc&list=PL-2sBQtgS7Y4RjI88wCkhzYe8hrtFO7b3

محاضرات في نظم المعلومات الجغرافية و الخرائط:
https://www.youtube.com/watch?v=Dty61-5dSpo&list=PL-2sBQtgS7Y43VsZ50qSpIo2yH7Domhma

محاضرات في الاستشعار عن بعد والصور الجوية:
https://www.youtube.com/playlist?list=PL-2sBQtgS7Y4z9S1jfopq3orVCLLNHpqV

محاضرات أخري:
https://www.youtube.com/watch?v=oJ-dUlHkLpg&list=PL-2sBQtgS7Y7afBQMOwK4BxffcV7mzCug

(٢) المراجع الأجنبية:

Al-Rabbany, A., 2002, Introduction to GPS: The Global Positioning System, Artech House, Inc., Boston, USA.

Anderson, J. and Mikhail, E., 1998, Surveying: Theory and practice, Seventh Edition, McGraw-Hill, New York, USA.

Borio, D., 2008, A statistical theory for GNSS signal acquisition, PhD Dissertation, Politecbco Di Torino, 291 pp.

Bossler, J., Camprell, J., McMaster, R., and Rizos, S. (Eds.) 2010, Manual of geospatial science and technology, CRC Press, New Yprk, USA.

Brimicombe, A., (2010) GIS, environmental modeling, and engineering, 2nd edition, CRC Press, New York, UA.

California Department of Transportation, 2006, Global Positioning System (GPS) survey specifications, California, USA, Available at: http://www.dot.ca.gov/hq/row/landsurveys/SurveysManual/06_Surveys.pdf.

Cojocaru, S., Birsan, E., Battinca, G., and Arsenie, P., 2009, GPS-GLONASS_GALILEO: A dynamical comparison, Journal of Navigation, 62: 135-150.

Dana, P., 2000, Map projection, The Geographer's Craft Project, Department of Geography, The university of Colorado at

Boulder,, USA, Available on-line at: http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/

DeMers, M. (2009) GIS for dummies, Wiley Publishing Inc., Indiana, USA.

Dodge, M., McDerby, M., and Yuner, M. (Eds.) (2008) Geographic visualization: Concepts, tools, and applications, Jon Wiley & Sons, Chichester, England.

Galati, S. (2006) Geographic Information Systems demystified, Artech House, Boston, USA.

Ghilani, C., and Wolf, P., 2006, Adjustment computations: Spatial data analysis, Forth edition, John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA.

Harvey, F. (2008) A primer of GIS: Fundamental geographic and cartographic concepts, The Guilfored press, New York, USA.

Heiskanean, W. and Moritz, H., 1967, Physical geodesy, W. H. Freeman and Company, San Francisco, USA.

Hofman-Wellenhof, B. and Moritz, H., 2005, Physical geodesy, Springer Wien, New York, USA.

Iliffe, J., 2005, Datums and map projection: For remote sensing, GIS, and surveying, CRC Press, Washington, DC, USA.

Jekeli, C., 2006, Geodetic reference systems in geodesy, Lecture notes, Division of geodesy and geospatial science, School of Earth sciences, Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.

Kaplan, E. and Hegarty, C., 2006, Understanding GPS: Principles and applications, Second Edition, Artech House, Inc., Boston, USA.

Koch, K., 1988, Parameter estimation and hypothesis testing in linear models, Second Edition, Springer-Verlag, Berlin, Germany.

Kuang, S., 1996, Geodetic network analysis and optimal design: Concepts and applications, Ann Arbor Press, Michigan, USA.

Lieck, A., 1995, GPS Satellite surveying, John Wiley & Sons Inc., New York, USA.

Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D., and Rhind, D., 2005, Geographical information systems and science, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England.

Mackaness, W., Ruas, A., and Sarjakoski, L., (Eds.), 2007, Generalization of geographic information: Cartographic modeling and applications, Elsevier, New York, USA.

Mendizabal, J., Berenguer, R., and Melendez, J., 2009, GPS & Galileo: Dual RF front-end receiver and design, fabrication, and test, McGraw Hill Co., New York, USA.

Mikhail, E., 1976, Observations and least squares, University press of America, New York, USA.

Mugnier, C., 2008a, Grids and Datums: Arab Republic of Egypt, ASPRS Newsletter, November, pp. 1307-1309, Available at: http://www.asprs.org/resources/Grids/11-2008-egypt.pdf .

Mugnier, C., 2008b, Grids and Datums: Kingdom of Saudi Arabia, ASPRS Newsletter, August, pp. 949-951, Available at: http://www.asprs.org/resources/Grids/08-2008-saudi.pdf .

NRC (Natural Resources Canada), Fundamentals of remote sensing, A free tutorial, available at: http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/pdf/resource/tutor/fundam/pdf/fundamentals_e.pdf

Nassar, M., 1987, Matrix treatment of adjustment computation in surveying, Ain Shams university, Cairo, Egypt.

Nassar, M., 1984, Geodetic position computations in two and three dimensions, Ain Shams university, Cairo, Egypt.

Nassar, M., and Abou-Beieh, O., 1994, Terrestrial and astronomic geodetic surveying, Ain Shams university, Cairo, Egypt.

Natural Resources Canada, 1995, GPS positioning guide, Third Edition, Ottawa, Canada, Available at: http://luna.csrs.nrcan.gc.ca/GPS_Guide_e/GPS_Guide_e.pdf

Pavlis, N., Holmes, S., Kenyon, S., and Factor, J. , 2008, An earth gravitational model to degree 2160: EGM2008, The European Geosciences Union (EGU) general Assembly, Vienna, Austria, Available at: http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/NPavlis&al_EGU2008.ppt .

Prasad, R. and Ruggieri, M., 2005, Applied satellite navigation using GPS, Galileo and augmentation systems, Artech House, Inc., Boston, USA

US Defense Mapping Agency: DMA, 1959, Geodesy for the layman, First edition, Available at: http://164.214.2.259/GandG/geolay/toc.htm

US National Imagery and Mapping Agency (NIMA), 2000, Department of Defense World Geodetic System 1984: Its definition and relationships with local geodetic system, Technical Report TR8350.2, Third Edition, Washington, DC, USA.

US Army Corps of Engineering, 1990, Survey markers and monumentation, Engineering manual No. 1110-1-1002, Washington, DC, USA, Available at: http://www.usace.army.mil/publications/eng-manuals/em1110-1-1002/toc.htm .

US Army Corps of Engineering, 2003, NAVSTAR Global Positioning System Surveying, Technical Manual No. EM1110-1-1003, Washington, D.C., USA.

Raizner, C., 2008, A regional analysis of GNSS-levelling, MSC Thesis, Stuttgart University, 133 pp.

Rapp, R., 1989, Geometric geodesy, Ohio State University, Columbus, Ohio, USA.

Seeber, G., 2003, Satellite Geodesy, Second Edition, Walter de Gruyter Co., Berlin, Germany

Taylor, G., and Blewitt, G., 2006, Intelligent positioning: GIS-GPS unification, John Wiley & Sons Ltd, West Sussex, England.

Torge, W., 1989, Gravimetry, Walter de Gruter, New York, USA.

van Oosterom, P., Zalatanova, S., Penninga, F., and Fendel, E. (Eds.), 2008, Advances in 3D geo-information systems, Springer, Berlin, Germany.

Verbyla, D., 2002, Practical GIS analysis, Taylor & Francis, New York, USA.

Uotila, U., 1986, Notes on adjustment computations: Part I, Lecture notes, Geodetic science and surveying department, Ohio state university, Columbus, Ohio, USA.

Vanicek, P., 2001, An online tutorial in Geodesy, http://gge.unb.ca/Research/GeodesyGroup/tutorial/tutorial.htm .

Yang, C., Wong, D., Miao, Q., and Yang, R. (Eds.), 2011, Advances geo-information science, CRC Press, New Yprk, USA.

Wells, D., Beck, N., Delikaraoglou, D., Kleusberg, A., Krakiwsky, E., Lacgapelle, G., Langley, R., Nakiboglu, M., Schwarz, K., Tranquilla, J., and Vanicek, P., 1986, Guide to GPS positioning, Department of geodesy and geomatics engineering lecture note 58, University of New Brunswick, Canada, 291 pp, Available at: http://gge.unb.ca/Pubs/LN58.pdf.

نبذة عن المؤلف

- الدكتور جمعة محمد داود محمود من مواليد السويس بجمهورية مصر العربية في عام ١٩٦٢م (الموافق ١٣٨٣هـ).

- حصل علي درجة البكالوريوس في الهندسة المساحية في عام ١٩٨٥م من كلية الهندسة بشبرا – جامعة بنها بمصر ، ودرجة الماجستير من قسم العلوم الجيوديسية والمساحة من جامعة ولاية أوهايو بالولايات المتحدة الأمريكية في عام ١٩٩١م، ودرجة الدكتوراه في عام ١٩٩٨م من كلية الهندسة بشبرا، جامعة بنها بمصر.

- حصل د. جمعة داود علي درجة أستاذ مشارك في عام ٢٠٠٤م وكذلك درجة الأستاذية في الهندسة المساحية في عام ٢٠٠٩م (١٤٢٩ هـ).

- يعمل د. جمعة داود منذ عام ١٩٨٧م بمعهد بحوث المساحة بوزارة الموارد المائية والري بمصر، وعمل بجامعة أم القرى بمكة المكرمة بالمملكة العربية السعودية في الفترة ٢٠٠٥-٢٠١٤م (١٤٢٦-١٤٣٥ هـ). كما أنه يعمل حاليا مستشارا فنيا للهيئة العامة للمساحة و لوزارة التخطيط في مصر خاصة لمشروع تطوير البنية المعلوماتية المكانية الوطنية.

- فاز د. جمعة داود بجائزة أفضل بحث في المساحة في مصر في أعوام ٢٠٠٥، ٢٠٠٦، ٢٠٠٧، ٢٠٠٩م كما تم اختياره في الموسوعة الدولية للعلوم والهندسة Who is Who للفترة ٢٠١١-٢٠١٢م.

- نشر د. جمعة داود حتى الآن أكثر من خمسين بحثا في الجيوماتكس منهم عشرون ورقة علمية في مجلات عالمية و مؤتمرات دولية في كل من الولايات المتحدة الأمريكية و انجلترا و ايطاليا و استراليا بالإضافة للنشر في مجلات و مؤتمرات في كلا من المملكة العربية السعودية و مملكة البحرين والمملكة المغربية و جمهورية مصر العربية، كما نشر ١٣ كتابا باللغة العربية في مجالات و تقنيات الجيوماتكس.

- د. جمعة داود متزوج من د. هدي فيصل الباحثة بمعهد بحوث المساحة وله ثلاثة أبناء مصطفي و محمد و سلمي.

- حج د. جمعة داود بيت الله الحرام أربعة مرات وأعتمر عدة مرات.