

## تأثير استخدام السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة على توفير الطاقة

"دراسة تطبيقية على الغلاف الخارجى للمباني السكنية على مستوى عدد من المناطق الجغرافية المختلفة بمصر"

### The Impact of Using the Optimum Insulation Thickness on Energy Saving

"Applied research on external residential buildings envelope in different geographical regions of Egypt"

درويش، إسلام مصطفى: مدرس العمارة والتخطيط العمراني، كلية الهندسة، جامعة بورسعيد  
قنديل، أحمد أنور: مدرس مساعد بقسم العمارة والتخطيط العمراني، كلية الهندسة، جامعة بورسعيد

#### ملخص البحث:

يعتبر العزل الحراري للحوائط الخارجية واحد من أكثر الوسائل تأثيراً لخفض كمية الطاقة اللازمة لتبريد أو تدفئة الفراغات المعمارية، لا سيما في ظل الطلب المتزايد على الطاقة وارتفاع تكلفتها البيئية والاقتصادية. لذا كان حساب السمك الأمثل لطبقة العزل الحراري والذي يحقق أعلى كفاءة بيئية واقتصادية أحد أهم الدراسات التي تتعلق بالكفاءة الإيكولوجية للمباني.

وتقدم الورقة البحثية نتائج موثقة قائمة على تحليلات رياضية و عملية تربط بين سمك الطبقة العازلة للحرارة بالحوائط الخارجية وبين التكلفة السنوية الكلية للمتر المربع التي تشمل تكلفة الطاقة المستخدمة للتبريد أو التدفئة وتكلفة العزل نفسه، طبقاً لنوع العازل المستخدم، وتصميم قطاع الحائط الخارجي، والمواد المستخدمة في البناء، والموقع الجغرافي للمبنى، وذلك باستخدام أكثر من تصميم لقطاع الحائط الخارجي ومكوناته للوصول الى تحديد السمك الأمثل للمادة العازلة الذي يحقق أكبر كفاءة في مجال العزل الحراري مع تحقيق أقل تكلفة كلية وقد انتهت الدراسة بتصميم برنامج حاسوبي رقمي خاص بالبحث باسم BID (Building Insulation Design) تمت برمجته باستخدام برنامج Visual Basic تكون مهمته تحديد السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة الذي يحقق أقل تكلفة سنوية ممكنة للمتر المربع من الحائط.

#### مقدمة:

إن معدل الطلب على الطاقة يزداد عالمياً بشكل مستمر بسبب الزيادة السكانية والتطور التكنولوجي المستمر. وللحفاظ على التطور في مستوى المعيشة، فإنه لا يمكن تفادي الزيادة المستمرة في استهلاك الطاقة، ولكن يمكن زيادة كفاءة استخدامها وتعزيز الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة.

يتوزع استهلاك الطاقة عالمياً على أربع قطاعات رئيسية (Bolatturk, 2008):

١. قطاع المباني السكنية والتجارية.

٢. قطاع الصناعة.

٣. قطاع المواصلات.

٤. قطاع الزراعة.

والجزء الأهم في استراتيجية أي دولة في مجال الطاقة هو ترشيد الاستهلاك نظراً لمحدودية المصادر، والتلوث الناتج عن استخدام الوقود الأحفوري في توليد الطاقة (Dombayci, 2006).

تعتبر مصر في السنوات الأخيرة من أسرع الأسواق نمواً في مجال الطاقة، وتؤكد الدراسات توقع زيادة معدل التسارع في السنوات القادمة (IEA, 2010). ويعتبر قطاع المباني السكنية من أكثر القطاعات استهلاكاً للطاقة الكهربائية في مصر. وفيما يلي بعض الإحصائيات التي توضح زيادة الطلب على الطاقة في مصر، خاصةً في قطاع الأبنية السكنية:

• بلغ استهلاك القطاعات الأربعة الرئيسية المختلفة من الطاقة في مصر المعدلات الآتية (Patlitzianas, 2011):

- قطاع المباني السكنية والتجارية: ٢٠%.

- قطاع الصناعة: ٤٧%.

- قطاع المواصلات: ٢٩%.

- قطاع الزراعة: ٢%.

• نسبة استهلاك قطاع المباني السكنية من إجمالي الطاقة الكهربائية بلغت ٣٧,١% (إسكوا، ٢٠٠٢).

• الطلب المصري على الطاقة يزداد بنسبة ٢,٦% سنوياً ليصل إلى ١٠٩ مليون طن مكافئ نפט بحلول عام ٢٠٣٠ (Patlitzianas, 2011).

• من المتوقع أن يتضاعف الاستهلاك الكلي للطاقة الكهربائية من ٩٢ تيرا وات ساعة في عام ٢٠٠٣ إلى ١٨٨ تيرا وات ساعة بحلول عام ٢٠٣٠ (Patlitzianas, 2011).

وتؤكد الدراسات أنه من الممكن خفض ما يوازي من ٣٠% من الانبعاثات الأساسية المتوقعة في قطاع الإسكان بحلول سنة ٢٠٣٠. فمن الممكن خفض استهلاك الطاقة في المباني عن طريق زيادة استخدام التقنيات القائمة بزيادة كفاءة الاستهلاك، والإضاءة والأجهزة ذات الكفاءة العالية، ونظم التهوية والتبريد ذات الكفاءة العالية، وسخانات المياه التي تعمل بالطاقة الشمسية، والتصميم البيئي والعزل الحراري لأغلفة الباني، واستخدام مواد بناء تعمل على انعكاس أشعة الشمس (وحدة التغيرات المناخية، ٢٠٠٨).

يعتبر الغلاف الخارجي للمبنى من أهم عناصر المبنى السكني لأنه يعمل بمثابة البشرة في جسم الإنسان، فهو الذي يحمي المبنى من مختلف العوامل الجوية الخارجية، ويقدر الاهتمام بتصميم هذا الغلاف يكون النجاح في توفير بيئة داخلية مناسبة تتمتع بشروط الراحة الحرارية.

## ١. مفهوم السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة في أغلفة المباني الخارجية:

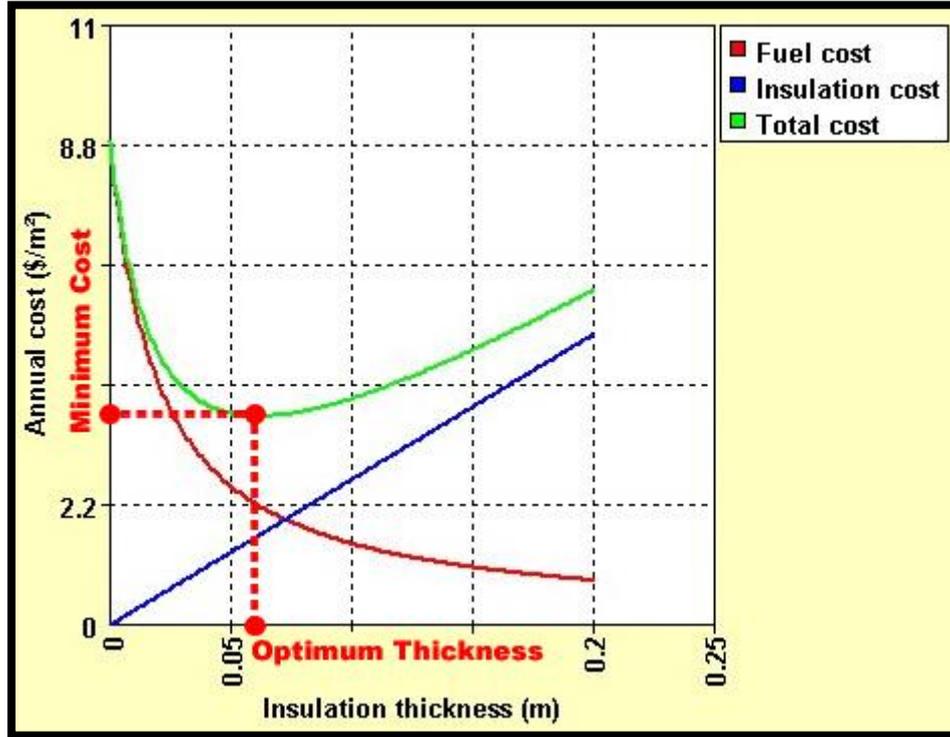
يعتمد تقييم سمك الطبقة العازلة للحرارة على عاملين رئيسيين:

١. مقدار التوفير الذي تحققه الطبقة العازلة في تكلفة الوقود المستخدم للتبريد أو التدفئة.
  ٢. تكلفة الطبقة العازلة نفسها، فمن المنطقي أن تكلفة العزل تزداد كلما زاد سمك الطبقة العازلة.
- وبالجمع الرياضي لتكلفة الوقود المستخدم للتبريد أو التدفئة وتكلفة الطبقة العازلة نفسها تنتج التكلفة الإجمالية لتصميم الغلاف، وعلى ذلك يكون السمك الأمثل للطبقة العازلة هو السمك الذي يحقق أقل تكلفة إجمالية (Ucar, 2010). ويوضح الشكل رقم (١) المنحنى الذي يربط العلاقة بين سمك المادة العازلة وكل من:

١. تكلفة الوقود المستخدم للتبريد أو التدفئة.

٢. تكلفة العزل.

٣. التكلفة الإجمالية.



شكل رقم (١): منحنى العلاقة بين سمك المادة العازلة وبين تكلفة الوقود وتكلفة العزل والتكلفة الكلية للمتر المربع.

ويتضح من الشكل السابق أنه بزيادة سمك الطبقة العازلة للحرارة تزداد تكلفتها بشكل خطي، في حين تنخفض تكلفة الوقود المستخدم للتبريد أو التدفئة بمعدل كبير في البداية ثم ينخفض هذا المعدل مع زيادة السمك بشكل كبير. ومن هنا ينتج منحنى التكلفة الإجمالية حيث تنخفض التكلفة في البداية مع زيادة سمك الطبقة العازلة، ثم تبدأ في الارتفاع نتيجة زيادة تكلفة العزل بشكل لا يعوضه التوفير في تكلفة الوقود، ويتحدد السمك الأمثل بالسمك المقابل لأقل تكلفة موقعة على هذا المنحنى. ويجب ملاحظة أن

السلك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة في حالة التبريد يختلف عنه في حالة التدفئة تبعاً لطبيعة الإقليم أو المنطقة، ففي المناطق الحارة حيث تكون الحاجة أعلى للتبريد فإن السلك الأمثل الذي يحقق أعلى كفاءة تبريد يكون أكبر من السلك الأمثل الذي يحقق أعلى كفاءة تدفئة، والعكس صحيح بالنسبة للمناطق الباردة. وبناءً عليه فإنه يتم احتساب السلك الأمثل في حالتي التدفئة والتبريد واختيار السلك الأكبر كسلك مثالي.

## ٢. العوامل التي يتوقف عليها تحديد السلك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة:

### ١-٢. الموقع:

إن كمية الطاقة اللازمة للتبريد أو التدفئة في أي موقع في العالم تتوقف أساساً على قيمة (الدرجة/اليوم) للتبريد أو التدفئة (Bolatturk, 2008). ويعتبر مصطلح (الدرجة/اليوم) للتدفئة Heating Degree Days (HDD) أو التبريد Cooling Degree Days (CDD) من أهم المصطلحات المناخية للتعبير عن طبيعة الحرارة في منطقة ما، ويعرف كل منهما كالآتي:

١. (الدرجة/اليوم) للتدفئة HDD: هي مجموع درجات الحرارة الأقل من درجة حرارة أساس معينة، أو بصيغة أخرى هي القيمة المطلقة (الموجبة) للفرق بين متوسط درجات الحرارة اليومية  $T_{av}$  و درجة حرارة الأساس  $T_b$ ، وتحسب رياضياً كالآتي (Ucar, 2010):

$$HDD = \sum_{1}^{365} |T_b - T_{av}| \quad \dots \dots \dots (1)$$

حيث: HDD : قيمة (الدرجة/اليوم) للتدفئة.

$T_b$  : درجة حرارة الأساس.

$T_{av}$  : متوسط درجات الحرارة اليومية.

وتختلف درجة حرارة الأساس حسب الموقع والتصميم والوظيفة وطموحات المصمم، وهي تتراوح عادةً من  $16^{\circ}C$  إلى  $20^{\circ}C$ . وتعتبر قيمة (الدرجة/اليوم) للتدفئة عن مقدار الحاجة إلى التدفئة في المنطقة أو المدينة، فقيمتها لمدينة باردة مثل برلين وباستخدام درجة أساس  $18^{\circ}C$  هي 3076. في حين أن قيمتها لمدينة حارة مثل الرياض لنفس درجة الأساس هي 448 فقط. وهذا يدل على أن المناطق الباردة تحتاج إلى طاقة أكبر للتدفئة من المناطق الحارة.

٢. (الدرجة/اليوم) للتبريد CDD: هي مجموع درجات الحرارة الأعلى من درجة حرارة أساس معينة، أو بصيغة أخرى هي القيمة المطلقة (الموجبة) للفرق بين درجة حرارة الأساس  $T_b$  ومتوسط درجات الحرارة اليومية  $T_{av}$ ، وتحسب رياضياً كالآتي (Ucar, 2010):

$$CDD = \sum_{1}^{365} |T_{av} - T_b| \quad \dots \dots \dots (2)$$

حيث: CDD : قيمة (الدرجة/اليوم) للتبريد.

وتختلف درجة حرارة الأساس حسب الموقع والتصميم والوظيفة وطموحات المصمم، وهي تتراوح عادةً من 24°C إلى 28°C. وتعتبر قيمة (الدرجة/اليوم) للتبريد عن مقدار الحاجة إلى التبريد في المنطقة أو المدينة، فنجد أن قيمتها لمدينة باردة مثل برلين وباستخدام درجة أساس 26°C هي 49 فقط. في حين أن قيمتها لمدينة حارة مثل الرياض لنفس درجة الأساس هي 1998. وهذا يدل على أن المناطق الحارة تحتاج إلى طاقة أكبر طاقة أكبر للتبريد من المناطق الباردة. ويوجد عدد من المواقع الإلكترونية التي تحسب قيمة (الدرجة/اليوم) للتبريد والتدفئة للعديد من المدن على مستوى العالم، لعل من أشهرها موقع (Bizee Degree Days (www. degreedays.net).

## ٢-٢. نوع الوقود المستخدم:

تعتبر خصائص الوقود المستخدم للتبريد أو التدفئة من أهم العوامل التي تؤثر في تحديد السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة. وللوقود ثلاثة خصائص أساسية:

١. القيمة الحرارية Heat Value: وهي تعبر عن كمية الطاقة الحرارية التي تعطيها وحدة الوقود المستخدم، وبالتالي تعبر عن القدرة على تحويل هذه الطاقة الحرارية إلى شغل يستفاد منه (الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ، ٢٠٠١).

٢. كفاءة الوقود Feul Efficiency: وهي النسبة بين الطاقة المستفاد من آلة إلى الطاقة المستهلكة، حيث يكون هناك دائماً فاقد في الطاقة عند استخدامها أو تحويلها من صورة لأخرى (صلاح الدين، ٢٠١١).

٣. تكلفة الوقود: وهي تكلفة وحدة الوقود المستخدم في التبريد أو التدفئة.

## ٢-٣. خصائص طبقات غلاف المبنى:

تقوم طبقات غلاف المبنى بعملية انتقال الحرارة من الخارج إلى الداخل أو العكس، لذا فإن مقاومة هذه الطبقات لانتقال الحرارة تؤثر بشكل مباشر في كمية الحرارة المنتقلة عبر الغلاف وبالتالي في تكلفة الطاقة المستخدمة للتبريد أو التدفئة اللازمة لتحديد السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة. وتتوقف مقاومة الحائط لانتقال الحرارة على أربعة عوامل رئيسية (سيد، ٢٠٠٦):

١. سمك كل طبقة من طبقات الغلاف: فكلما زاد سمك الطبقة زادت مقاومته لانتقال الحرارة.

٢. معامل التوصيل الحراري Thermal Conductivity لكل طبقة من طبقات الحائط: وهي خاصية للمادة أو الوسط ومؤشر على قدرة الوسط على توصيل الحرارة وتقاس بكثافة سريان الطاقة خلال سمك متر واحد من المادة مع وجود فارق درجة واحدة مئوية.

٣. المقاومة السطحية لطبقة الهواء الداخلية الملامسة لغلاف المبنى: وهي طبقة الهواء الملامسة لسطح الغلاف من الداخل وتعمل على مقاومة انتقال الحرارة من وإلى غلاف المبنى.

٤. سرعة الهواء الخارجي: وهي تحدد المقاومة السطحية لطبقة الهواء الخارجية الملامسة لغلاف المبنى.

## ٢-٤. خصائص المادة العازلة للحرارة:

المادة العازلة للحرارة هي طبقة من طبقات الغلاف الخارجي للمبنى، وهي الطبقة التي تقوم بالدور الأساسي في عملية العزل الحراري ومقاومة انتقال الحرارة من وإلى الفراغ الداخلي. وفي هذا السياق يجب تحديد سمك هذه الطبقة ومعامل التوصيل الحراري لها، بالإضافة إلى تكلفة العزل التي تتوقف على طبيعة نوع المادة العازلة وسمك الطبقة العازلة في الغلاف.

### ٣. حساب السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة:

إن الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحديد أفضل سمك يحقق أقل معدل لانتقال الحرارة خلال وحدة المساحة من الغلاف بأقل تكلفة ممكنة، وذلك بغض النظر عن فروق درجات الحرارة التي تؤدي لعملية انتقال الحرارة، لذلك فالحسابات الرياضية تتعامل في الأساس مع تصميم قطاع الحائط، بغض النظر عن مساحة الحائط أو حجم الفراغ.

يتم حساب كمية الحرارة السنوية المفقودة خلال وحدة المساحة لحائط خارجي في منطقة معينة باستخدام قيمة (الدرجة/اليوم) للتبريد أو التدفئة من خلال المعادلة الآتية (Sisman, 2007):

$$q_A = 86400 * DD * U \quad \dots \dots \dots (3)$$

حيث:  $q_A$  : كمية الحرارة السنوية المفقودة خلال وحدة المساحة لحائط خارجي، (J/m<sup>2</sup>-year).

$DD$  : (الدرجة/اليوم) للتبريد أو التدفئة.

$U$  : معامل انتقال الحرارة، (W/m<sup>2</sup> K).

ويتم احتساب كمية الطاقة المطلوبة للتبريد أو التدفئة عن طريق قسمة الحرارة السنوية المفقودة خلال وحدة المساحة على كفاءة الوقود المستخدم من خلال المعادلة الآتية (Ucar, 2010):

$$E_A = \frac{86400 * DD * U}{\eta_s} \quad \dots \dots \dots (4)$$

حيث:  $E_A$  : كمية الطاقة المطلوبة للتبريد أو التدفئة، (J/m<sup>2</sup>-year).

$\eta_s$  : كفاءة الوقود المستخدم.

ويتم احتساب معامل انتقال الحرارة الكلي من خلال المعادلة الآتية (Ucar, 2010):

$$U = \frac{1}{R_i + R_w + R_{ins} + R_o} \quad \dots \dots \dots (5)$$

حيث:  $R_i$  : المقاومة السطحية لطبقة الهواء الداخلية الملامسة للحائط، (m<sup>2</sup> K/W).

$R_w$  : مقاومة طبقات الحائط مجتمعة بدون العازل، (m<sup>2</sup> K/W).

$R_{ins}$  : مقاومة الطبقة العازلة، (m<sup>2</sup> K/W).

$R_o$  : المقاومة السطحية لطبقة الهواء الخارجية الملامسة للحائط، (m<sup>2</sup> K/W).

ويتم احتساب مقاومة أي مادة لانتقال الحرارة من المعادلة الآتية (Szokolay, 2008):

$$R = \frac{\Delta x}{K} \quad \dots \dots \dots (6)$$

حيث:  $\Delta x$  : سمك المادة، (m).

$K$  : معامل توصيل المادة، (W/m K).

وفي الفراغ الداخلي حيث يكون الهواء ساكناً تقريباً، يتم افتراض المقاومة السطحية لطبقة الهواء الملامسة للحائط من الداخل بقيمة  $0.167 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$ ، أما المقاومة السطحية لطبقة الهواء الخارجية فتتوقف على سرعة الهواء الخارجي ويتم احتسابها من خلال المعادلة الآتية (Szokolay, 2008):

$$R_o = \frac{1}{5.8 + 4.1 * v} \quad \dots \dots \dots (7)$$

حيث:  $v$  : سرعة الهواء الخارجي، (m/s).

ويتم احتساب تكلفة التبريد أو التدفئة لوحدة المساحة من خلال المعادلة الآتية (Ucar, 2010):

$$C_A = \frac{E_A * C_f}{H_u} \quad \dots \dots \dots (8)$$

حيث:  $C_A$  : تكلفة التبريد أو التدفئة لوحدة المساحة، ( $\$/\text{m}^2$ ).

$C_f$  : تكلفة الوقود المستخدم للتبريد أو التدفئة، ( $\$/\text{Unit}$ ).

$H_u$  : القيمة الحرارية للوقود المستخدم، ( $\text{J}/\text{Unit}$ ).

وبتجميع المعادلات السابقة يمكن احتساب تكلفة التبريد لوحدة المساحة من خلال المعادلة الآتية:

$$C_A = \frac{86400 * DD * C_f}{\left\{ \left( \sum_1^n \frac{x_1}{K_1} + \frac{x_2}{K_2} + \dots + \frac{x_n}{K_n} \right) + \frac{1}{5.8 + 4.1 * v} + R_i + \frac{x_{ins}}{K_{ins}} \right\} * H_u * \eta_s} \quad \dots \dots \dots (9)$$

#### ٤ . تصميم برنامج (Building Insulation Design) BID

في إطار محاولة التوصل للسمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة لأي تصميم لقطاع الحائط الخارجي، ولأي ظروف موقع، وأي مواد بناء مستخدمة، وأي نوع من أنواع الطبقات العازلة، وكأحد المخرجات الثانوية للبحث فقد تم تصميم برنامج رقمي باسم "Building Insulation Design (BID)" تكون مهمته هي حساب السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة طبقاً للبيانات المدخلة. وقد تمت البرمجة باستخدام برنامج Visual Basic، وتم تزويد البرنامج بقاعدة بيانات Data Base للعديد من بيانات المواقع على مستوى العالم، وأنواع الوقود المستخدم للتبريد أو التدفئة ومواصفاتها والأسعار التقريبية لها حسب آخر تحديث لمنظمة إسكوا (Economic and Social Commission for Western Asia (ESCWA)). كما تضمنت قاعدة البيانات العديد من البيانات الخاصة بأنواع وخواص مواد البناء والعزل الحراري، والأسعار التقريبية لها، مع إمكانية دائمة لإضافة أي بيانات أو قيم جديدة لا تتضمنها قاعدة البيانات الملحق بالبرنامج، كما يمكن التعديل في أي قيمة من قيم قاعدة البيانات الحالية بناءً على رغبة المستخدم.

يقوم برنامج BID بحساب التكلفة الكلية لوحدة المساحة من الطبقة العازلة للحرارة، وذلك بجمع تكلفة الوقود المستهلك للتبريد أو التدفئة مع تكلفة الطبقة العازلة نفسها، وذلك لقيم مختلفة لسمك الطبقة العازلة تبدأ من الصفر وحتى سمك 20 cm وذلك بزيادة قدرها 1 mm لكل مرة لينتج في النهاية ثلاثة منحنيات مختلفة، شكل رقم (٢)، حيث يعبر المنحنى الأزرق عن تغير تكلفة العزل بزيادة سمك المادة العازلة للحرارة، ويعبر المنحنى الأحمر عن تغير تكلفة الوقود المستخدم للتبريد أو التدفئة بزيادة سمك المادة

العازلة للحرارة، أما المنحنى الأخضر فهو يعبر عن تغير التكلفة الكلية بزيادة سمك المادة العازلة للحرارة، وقيم هذا المنحنى هي قيم حاصل الجمع الحسابي لقيم المنحنيين السابقين. أي أن المنحنيات الثلاثة تظهر تأثير تغير سمك المادة العازلة للحرارة لوحدة المساحة من الحائط الخارجي على كل من تكلفة العزل وتكلفة الوقود المستخدم للتبريد أو التدفئة و التكلفة الكلية وهي حاصل جمع التكاليفتين السابقتين.

واجهة إدخال البيانات

Input data

**Site data**

Country : EGYPT  
 City : Aswan  
 CDD (K-days) : 1825  
 HDD (K-days) : 224

**Fuel data**

Type of fuel : Electricity  
 Price (\$/Unit) : 0.1059  
 Heating value (J/Unit) : 3599000  
 Efficiency : 0.99

**Wall layers**

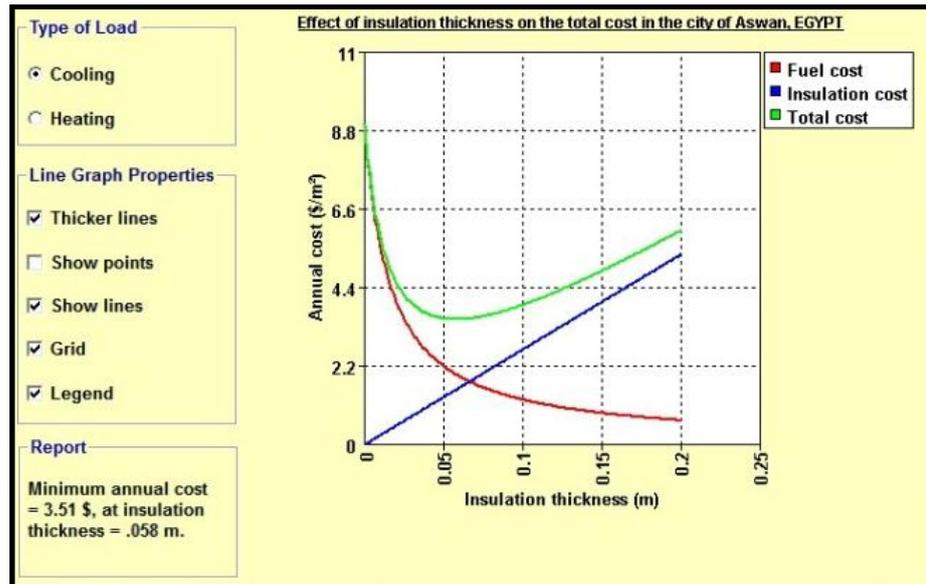
Layers No.	X Layer (m)	k Layer (W/m K)
1	0.2	1.3
2	0.06	0.89
3	0.04	2

Inside air-film thermal resistances (Ri) (m<sup>2</sup> K/W) : 0.167  
 Outside air velocity (m/sec<sup>2</sup>) : 3  
 Insulation layer after wall layer No. : 1  
 Cost of insulation (\$/m<sup>2</sup>) : 26.69  
 Conductivity of insulation (W/m K) : 0.038

Wall layers profile

Calculate the annual cooling and heating cost (\$/m<sup>2</sup>)

نافذة النتائج



شكل رقم (٢): برنامج BID لحساب السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة.

## • قيم المتغيرات المختلفة:

لتحقيق نتائج دقيقة وواقعية ومحايدة، تم افتراض قيم عدد من المتغيرات لتكون ثوابت في المقارنات. وتم تقسيم هذه الثوابت إلى قسمين رئيسيين هما:

### ١. قيم خاصة بنوع الوقود المستخدم:

تم اعتماد الطاقة الكهربائية كوقود أساسي في عملية التبريد والتدفئة على أساس انتشاره كطاقة أساسية لغالبية الاستخدامات السكنية، كما تتميز الكهرباء كطاقة بكفاءة عالية في التبريد والتدفئة، وقيمة حرارية عالية نسبياً، وتكلفة متوسطة، بالإضافة لسهولة استخدامها وعدم وجود مخلفات أو عوادم نتيجة التشغيل. وتم الحصول على القيم التالية لخواص الوقود المستخدم (Ucar, 2010):

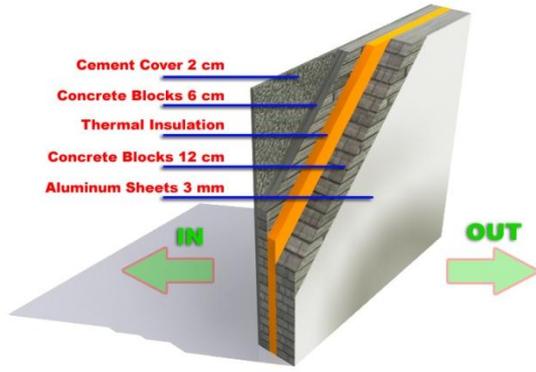
جدول رقم (١): القيم الافتراضية الخاصة بنوع الوقود المستخدم.			
نوع الطاقة	التكلفة (\$/kW.h)	القيمة الحرارية (J/kW.h)	كفاءة التبريد أو التدفئة
كهرباء	0.1059	3599000	0.99

### ٢. قيم خاصة بمقاومة طبقتي الهواء على جانبي الحائط:

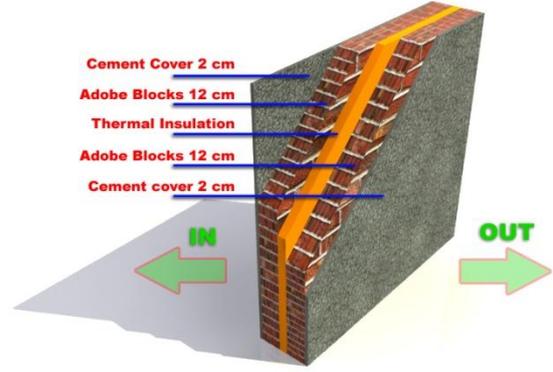
تم افتراض المقاومة السطحية لطبقة الهواء الداخلية الملامسة للحائط بقيمة  $0.167 \text{ m}^2 \cdot \text{C}/\text{W}$ ، وهي قيمة متوسطة توصلت إليها مجموعة من الأبحاث والدراسات التي اعتمدت على طرق القياس التجريبي (Ucar, 2010). وتم افتراض سرعة الهواء الخارجي  $3 \text{ m/s}$  كسرعة متوسطة للهواء في منطقة الإقليم الحار الجاف لاستنتاج المقاومة السطحية لطبقة الهواء الخارجية الملامسة للحائط من خلال المعادلة (7). لتكون قيمة المقاومة السطحية لطبقة الهواء الخارجية بعد حسابها هي  $R_o = 0.0552 \text{ m}^2 \text{ K}/\text{W}$ . هذه قيم افتراضية متوسطة الغرض من تثبيتها هو مقارنة النماذج في ظروف متماثلة.

### ٥. الحالات الدراسية والنتائج:

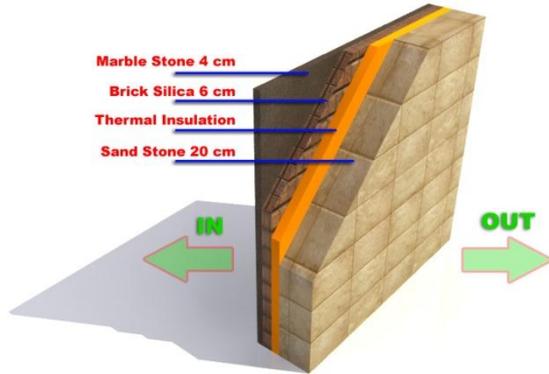
تمت المقارنة بين أربعة قطاعات مختلفة للغلاف الخارجي تختلف في تركيبها ومكوناتها والخواص الحرارية لمواد البناء، شكل رقم (٣)، كما تم استخدام أربعة من مواد العزل الحراري ذات الخواص الحرارية والأسعار المختلفة، جدول رقم (٢). وقد تم تطبيق ذلك في أربعة مدن تنتمي لأربعة أقاليم جغرافية مختلفة (حنا، ١٩٩٨)، جدول رقم (٣). حيث تم استخدام هذه القيم كمدخلات لبرنامج BID لحساب السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة بغلاف المبنى، وحساب التكلفة السنوية للطاقة المستخدمة لوحدة المساحة من الحائط ( $\$/\text{m}^2$ ).



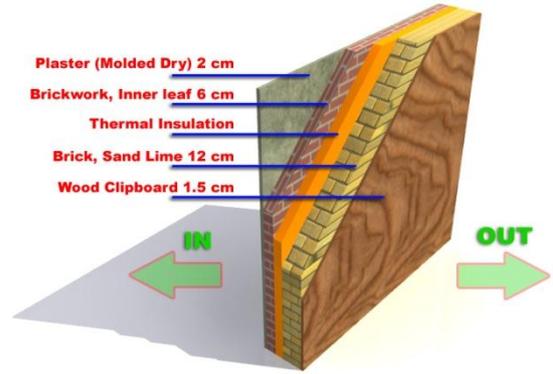
نموذج القطاع رقم (٢)



نموذج القطاع رقم (١)



نموذج القطاع رقم (٤)



نموذج القطاع رقم (٣)

شكل رقم (٣): نماذج القطاعات الأربعة محل المقارنة.

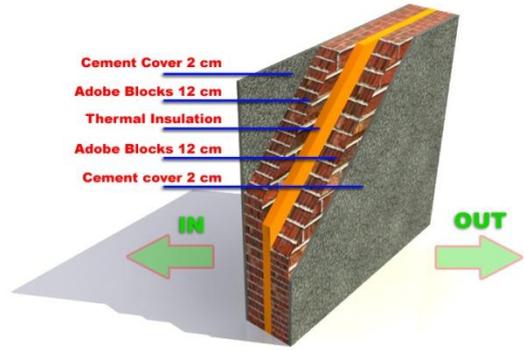
جدول رقم (٢): خواص مواد العزل الحراري المستخدمة في الاختبارات، (Szokolay, 2008).				
Material	Cork	Phenolic Foam	Rubber Sheet	Wood Wall Slab
Conductivity (W/m K)	0.038	0.040	0.160	0.100
Price (\$/m <sup>3</sup> )	26.69	15.78	42.26	32.34

جدول رقم (٣): الأقاليم الجغرافية وقيمة (الدرجة/اليوم) للمدن التي تم فيها الاختبار، (www. degreedays.net).					
المدينة	أسوان	أسيوط	القاهرة	بورسعيد	الأقليم الجغرافي
قيمة	1825	987	712	462	صحراوي شديد الجفاف
(الدرجة/اليوم)	224	578	325	281	صحراوي
					شبه صحراوي
					بحر متوسط

ويتضح من الجدول رقم (٣) أن قيمة (الدرجة /اليوم) للتبريد أعلى منها للتدفئة في كل المواقع، ما يعني أن السمك الأمثل سيتم حسابه على أساس التبريد فقط. والأشكال من ٤ إلى ١٩ توضح نتائج المقارنة بين نماذج القطاعات الأربعة. وقد تم كتابة السمك الأمثل بالمتر (m)، والتكلفة السنوية الكلية لوحدة المساحة من الحائط بالدولار (\$/m<sup>2</sup>)، لتسهيل قراءتها بدلاً من استنتاجها من المنحنيات.

٥-١. نموذج القطاع رقم (١):

Material	Thickness (m)	Conductivity (W/m.°C)
Cement Cover (in)	<b>0.02</b>	<b>0.38</b>
Adobe Blocks (in)	<b>0.12</b>	<b>1.25</b>
Adobe Blocks (out)	<b>0.12</b>	<b>1.25</b>
Cement Cover (out)	<b>0.02</b>	<b>0.38</b>



Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السلك الأمثل						
<b>6.11</b>	<b>0.068</b>	<b>7.75</b>	<b>0.050</b>	<b>3.11</b>	<b>0.088</b>	<b>3.83</b>	<b>0.062</b>

شكل رقم (٤): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (١) بمدينة أسوان.

Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السلك الأمثل						
<b>4.04</b>	<b>0.037</b>	<b>4.76</b>	<b>0.015</b>	<b>2.20</b>	<b>0.059</b>	<b>2.68</b>	<b>0.040</b>

شكل رقم (٥): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (١) بمدينة أسيوط.

Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السلك الأمثل						
<b>3.18</b>	<b>0.023</b>	<b>3.52</b>	<b>0.000</b>	<b>1.82</b>	<b>0.047</b>	<b>2.20</b>	<b>0.031</b>

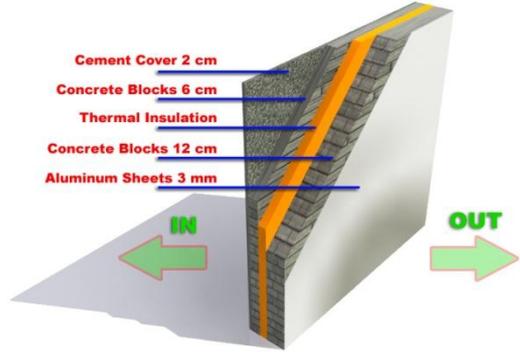
شكل رقم (٦): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (١) بمدينة القاهرة.

Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السلك الأمثل						
<b>2.24</b>	<b>0.009</b>	<b>2.28</b>	<b>0.000</b>	<b>1.40</b>	<b>0.034</b>	<b>1.67</b>	<b>0.021</b>

شكل رقم (٧): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (١) بمدينة بورسعيد.

٥-٢. نموذج القطاع رقم (٢):

Material	Thickness (m)	Conductivity (W/m.°C)
Cement Cover (in)	<b>0.02</b>	<b>0.38</b>
Concrete Blocks (in)	<b>0.06</b>	<b>0.19</b>
Concrete Blocks (out)	<b>0.12</b>	<b>0.19</b>
Aluminum Sheets (out)	<b>0.003</b>	<b>236</b>



Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السلك الأمثل						
<b>6.08</b>	<b>0.068</b>	<b>7.69</b>	<b>0.049</b>	<b>3.11</b>	<b>0.088</b>	<b>3.83</b>	<b>0.062</b>

شكل رقم (٨): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (٢) بمدينة أسوان.

Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السلك الأمثل						
<b>4.01</b>	<b>0.036</b>	<b>4.70</b>	<b>0.013</b>	<b>2.19</b>	<b>0.059</b>	<b>2.67</b>	<b>0.04</b>

شكل رقم (٩): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (٢) بمدينة أسيوط.

Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السلك الأمثل						
<b>3.15</b>	<b>0.022</b>	<b>3.46</b>	<b>0.000</b>	<b>1.82</b>	<b>0.047</b>	<b>1.66</b>	<b>0.031</b>

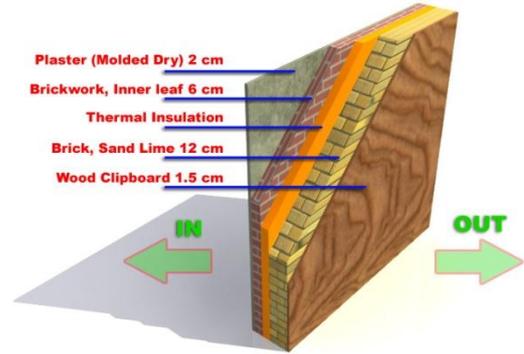
شكل رقم (١٠): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (٢) بمدينة القاهرة.

Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السلك الأمثل						
<b>2.21</b>	<b>0.008</b>	<b>2.25</b>	<b>0.000</b>	<b>1.40</b>	<b>0.034</b>	<b>1.66</b>	<b>0.021</b>

شكل رقم (١١): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (٢) بمدينة بورسعيد.

٥-٣. نموذج القطاع رقم (٣):

Material	Thickness (m)	Conductivity (W/m.°C)
Plaster (Molded Dry) (in)	<b>0.02</b>	<b>0.43</b>
Brickwork, Inner Leaf (in)	<b>0.06</b>	<b>0.62</b>
Brick, Sand Lime (out)	<b>0.12</b>	<b>1.08</b>
Wood Clipboard (out)	<b>0.015</b>	<b>0.078</b>



Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السلك الأمثل						
<b>5.62</b>	<b>0.053</b>	<b>6.74</b>	<b>0.026</b>	<b>3.02</b>	<b>0.082</b>	<b>3.68</b>	<b>0.056</b>

شكل رقم (١٢): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (٣) بمدينة أسوان.

Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السلك الأمثل						
<b>3.56</b>	<b>0.022</b>	<b>3.79</b>	<b>0.000</b>	<b>2.11</b>	<b>0.053</b>	<b>2.53</b>	<b>0.035</b>

شكل رقم (١٣): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (٣) بمدينة أسيوط.

Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السلك الأمثل						
<b>2.70</b>	<b>0.008</b>	<b>2.73</b>	<b>0.000</b>	<b>1.73</b>	<b>0.041</b>	<b>2.05</b>	<b>0.026</b>

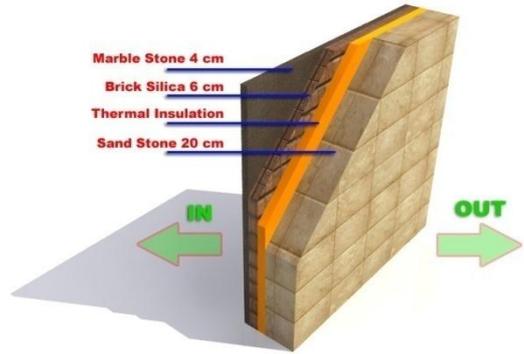
شكل رقم (١٤): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (٣) بمدينة القاهرة.

Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السلك الأمثل						
<b>1.77</b>	<b>0.000</b>	<b>1.77</b>	<b>0.000</b>	<b>1.31</b>	<b>0.028</b>	<b>1.52</b>	<b>0.016</b>

شكل رقم (١٥): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (٣) بمدينة بورسعيد.

٥-٤. نموذج القطاع رقم (٤):

Material	Thickness (m)	Conductivity (W/m.°C)
Marble Stone (in)	<b>0.04</b>	<b>2.00</b>
Brick Silica (in)	<b>0.06</b>	<b>0.89</b>
Sand Stone (out)	<b>0.20</b>	<b>1.30</b>



Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السكك الأمثل						
<b>6.29</b>	<b>0.074</b>	<b>8.12</b>	<b>0.059</b>	<b>3.15</b>	<b>0.090</b>	<b>3.89</b>	<b>0.064</b>

شكل رقم (١٦): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (٤) بمدينة أسوان.

Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السكك الأمثل						
<b>4.22</b>	<b>0.042</b>	<b>5.14</b>	<b>0.024</b>	<b>2.24</b>	<b>0.062</b>	<b>2.74</b>	<b>0.042</b>

شكل رقم (١٧): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (٤) بمدينة أسيوط.

Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السكك الأمثل						
<b>3.36</b>	<b>0.029</b>	<b>3.90</b>	<b>0.009</b>	<b>1.86</b>	<b>0.050</b>	<b>2.25</b>	<b>0.033</b>

شكل رقم (١٨): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (٤) بمدينة القاهرة.

Wood Wall Slab		Rubber Sheet		Phenolic Foam		Cork	
التكلفة السنوية	السكك الأمثل						
<b>2.42</b>	<b>0.014</b>	<b>2.56</b>	<b>0.000</b>	<b>1.44</b>	<b>0.036</b>	<b>1.72</b>	<b>0.023</b>

شكل رقم (١٩): ملخص نتيجة استخدام مواد العزل المختلفة لنموذج القطاع رقم (٤) بمدينة بورسعيد.

## ٦. الخلاصة:

باستخدام برنامج BID الذي تم تصميمه باستخدام برنامج Visual Basic لحساب السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة والتكلفة السنوية الكلية لوحدة المساحة من الحائط الخارجي لأربعة نماذج قطاعات مختلفة وتطبيق ذلك على أربعة مدن تنتمي لأربعة أقاليم مناخية مختلفة داخل جمهورية مصر العربية، يمكن تلخيص نتائج البحث في النقاط التالية:

١. أقل سمك أمثل للطبقة العازلة للحرارة كانت في حالتها استخدام مادة Wood Wall Slab مع نموذج القطاع رقم (٢)، و(٣) بمدينة بورسعيد والقاهرة على الترتيب، حيث كان السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة هو 0.008 m، مقابل تكلفة سنوية مقدارها  $2.21 \$/m^2$  باستخدام نموذج القطاع رقم (٢) بمدينة بورسعيد، مقابل  $2.70 \$/m^2$  باستخدام نموذج القطاع رقم (٣) بمدينة القاهرة.

٢. أقل تكلفة سنوية للمتر المربع كانت في حالة استخدام مادة Phenolic Foam مع نموذج القطاع رقم (٣) بمدينة بورسعيد، حيث كانت تكلفة المتر المربع هي  $1.31 \$/m^2$  عند استخدام سمك أمثل للطبقة العازلة للحرارة بمقدار 0.028 m.

٣. أكبر سمك أمثل للمادة العازلة للحرارة كانت في حالة استخدام مادة Phenolic Foam مع نموذج القطاع رقم (٤) بمدينة أسوان، حيث كان السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة هو 0.090 m، مقابل تكلفة سنوية مقدارها  $3.15 \$/m^2$ .

٤. أكبر تكلفة سنوية للمتر المربع كانت في حالة استخدام مادة Rubber Sheet مع نموذج القطاع رقم (٤) بمدينة أسوان، حيث كانت تكلفة المتر المربع هي  $8.12 \$/m^2$  عند استخدام سمك أمثل للطبقة العازلة للحرارة بمقدار 0.059 m.

٥. قد يكون استخدام بعض مواد العزل الحراري غير مجدي اقتصادياً مع بعض القطاعات في بعض المواقع، وهو ما ينتج عنه سمك مثالي يساوي الصفر. ومثال ذلك استخدام مادة Rubber Sheet في نموذج القطاع رقم (١) بمدينة القاهرة وبورسعيد.

ومن هنا يتضح أن السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة يختلف من قطاع لآخر ومن مادة عازلة لأخرى، بل إن نفس الطبقة العازلة يختلف سمكها الأمثل والتكلفة السنوية المقابلة لاستخدام هذا السمك بمقدار كبير عند اختلاف تركيب وطبقات قطاع الحائط الخارجي المستخدم. وأيضاً فإن قطاع الحائط الواحد يختلف السمك الأمثل للطبقة العازلة للحرارة به والتكلفة السنوية المقابلة لاستخدام هذا السمك بمقدار كبير عند اختلاف نوع الطبقة العازلة للحرارة. وبالطبع فإن الاختلافات قد تتزايد وتتناقص وتتغير إذا ما أخذنا في الاعتبار إمكانية اختلاف نوعية الوقود المستخدم للتبريد أو التدفئة، وسرعة الهواء الخارجي. سيظهر عند ذلك عدد كبير من النتائج والأرقام المتنوعة. لذا فعند اعتماد سمك المادة العازلة يجب الاهتمام بكل البيانات للخروج بنتائج واقعية.

## المراجع:

### • أولاً: المراجع العربية:

١. إسكوا، الأمم المتحدة (٢٠٠٢)، "ترشيد استهلاك الطاقة في قطاع الأبنية - أوراق موجزة"، اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا، مؤتمر القمة العالمي للتنمية المستدامة، جوهانسبرج، جنوب أفريقيا.
٢. الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (٢٠٠١)، "دليل الممارسات السليمة في عملية حصر انبعاثات غازات الاحتباس الحراري ودرجة عدم التيقن في تقديراته"، برنامج عمليات حصر انبعاثات غازات الاحتباس الحراري الوطنية، الأمم المتحدة.
٣. حنا، جورج باسيلي - عبد القادر، مراد - يوسف، وجيه فوزي - الوكيل، شفق العوضي (١٩٩٨)، "دليل العمارة والطاقة"، جهاز تخطيط الطاقة، القاهرة، جمهورية مصر العربية.
٤. سيد، علي إبراهيم - الفيتوري، عبد السلام - علي، محمد رياض - حسن، أبو الحسن توني (٢٠٠٦)، "انتقال الحرارة في التطبيقات الهندسية"، دار الفجر للنشر والتوزيع، جمهورية مصر العربية.
٥. صلاح الدين، مصطفى محمد (٢٠١١)، "كفاءة الطاقة وأثرها على البيئة"، مجلة العلوم والبيئة، المجلة العلمية أهرام، القاهرة، جمهورية مصر العربية.
٦. وحدة التغيرات المناخية، جهاز شئون البيئة (٢٠٠٨)، "مصر وقضية تغير المناخ، نحو اقتصاد أقل اعتماداً على الكربون"، يوم البيئة العالمي ٥ يونيو ٢٠٠٨، وزارة الدولة لشئون البيئة، جمهورية مصر العربية.

### • ثانياً: المراجع الأجنبية:

7. Bolatturk, A. (2008), "**Optimum Insulation Thicknesses for Building Walls with Respect to Cooling and Heating Degree-Hours in the Warmest Zone of Turkey**", Building and Environment Journal, Elsevier, Oxford, United Kingdom.
8. Dombayci, OA. - Golcu, M. - Pancar, Y. (2006), "**Optimization of Insulation Thickness for External Walls Using Different Energy-Sources**", Applied Energy Journal, Elsevier, Oxford, United Kingdom.
9. International Energy Agency (IEA) (2010), "**Key World Energy Statistics**", 1st ed., OECD/IEA, Paris, France.
10. Patlitzianas, Konstantinos D. (2011), "**Solar Energy in Egypt: Significant Business Opportunities**", Renewable Energy Journal, Elsevier, Oxford, United Kingdom.
11. Sisman, Nuri - Kahya, Emin - Aras, Nil - Aras, Hayder (2007), "**Determination of Optimum Insulation Thickness of the External Walls and Roof (Ceiling) for Turkey's Different Degree-day Regions**", Energy Policy, Elsevier Ltd, Oxford, United Kingdom.
12. Szokolay, Steven V. (2008), "**Introduction to Architectural Science- The basis of sustainable design**", Elsevier Ltd, Oxford, United Kingdom.
13. Ucar, Aynur - Balo, Figen (2010), "**Determination of the Energy Saving and the Optimum Insulation Thickness in the Four Different Insulated Exterior Walls**", Renewable Energy Journal, Elsevier Ltd, Oxford, United Kingdom.

### • ثالثاً: المواقع الإلكترونية:

14. Bizee Degree Days: <http://www.degreedays.net>