Solar Energy
And Sustainable Development
Refereed, biannual scientific journal issued by
Center for Solar Energy Research and Studies

# تأثير التكاليف المصاحبة لإضافة العازل الحراري إلى الجدران الخارجية للمباني على السمك الأمثل وفترة الاسترداد

مهاب البزنطي، أحمد شنشن، عبد اللطيف الزقلعي، وسامح الغول[1*]

قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، كلية الهندسة، جامعة طرابلس. طرابلس - ليبيا

Email: [1] s.alghoul@uot.edu.ly

ملخص: تحظى دراسات العزل الحراري للجدران الخارجية بأهمية كبيرة، وذلك لما لها من آثار واضحة في توفير استهلاك الطاقة في المباني. وتبحث الدراسة الحالية تأثير التكاليف المصاحبة لإضافة العازل الحراري لجدران المباني على السمك الأمثل للعازل وفترة الاسترداد. حيث تتمثل هذه التكاليف في: تكلفة الحائط الإضافي، وتكلفة اليد العاملة، والتكلفة الناتجة عن زيادة سمك السملة. هذه الدراسة مبنية على البيانات المناخية لمدينة طرابلس الغرب، وكذلك على مواصفات مواد البناء المستخدمة في المنطقة. وقد تم حساب الأحمال الحرارية باستخدام طريقة درجات حرارة أيام التدفئة والتبريد، وكان التحليل الاقتصادي على أساس تحليل تكلفة دورة الحياة. حيث أظهرت النتائج ان السمك الأمثل للعازل في الحالة التي فُرض فيها سمك ثابت للسملة يساوي 6.0 سم، أي أنه لم يتأثر بالتكاليف المصاحبة، بينما زادت فترة الاسترداد من 2.14 سنة إلى 4.63 سنة. أما في الحالة التي كان فيها سمك السملة متغيراً، فقد أظهرت النتائج أن السمك الأمثل تراوح بين ٥.١ سم و٦.٠ سم، وتراوحت فترة الاسترداد بين 2.14 سنة و5.01 سنوات وذلك عند إضافة كافة التكاليف المصاحبة. وعليه فإن الدراسة قد أظهرت أهمية أخذ التكاليف المصاحبة في الإعتبار والتي يمكن تلخيصها بإنخفاض من الممكن أن يصل إلى 15 % من قيمة السمك الأمثل للعازل وارتفاع يصل إلى 134 % في فترة الاسترداد..

# The Impact of the Costs Associated with Adding Thermal Insulation to the Exterior Walls of Buildings on Optimal Thickness and Payback Period

Mohab Albizanti, Ahmad Shinshin, Abdullatif Zgalei, Samah Alghoul*

Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Tripoli, Tripoli, Libya

* *Corresponding author*

*DOI: 10.51646/jsesd.v11i1.118*

*This is an open access article under the CC BY-NC license (http://Attribution-NonCommercial 4.0 (CC BY-NC 4.0)).*

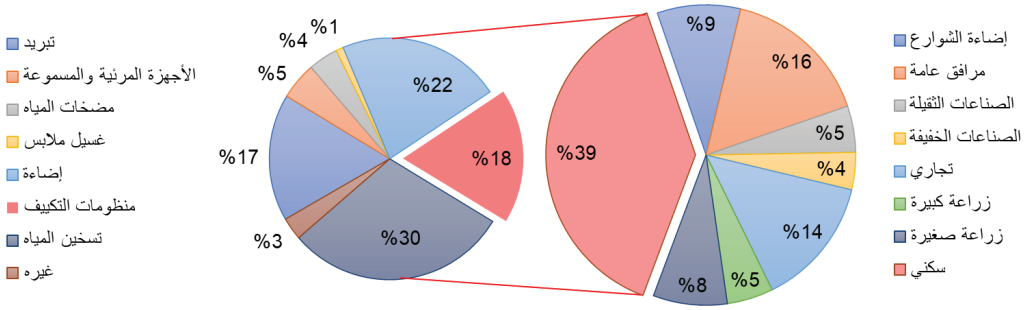
Abstract: Thermal insulation of external walls is of great importance because of its direct effect on saving energy consumption in buildings. This study examines the effect of the associated costs of thermal insulation on the optimal thickness of the insulation and the payback period. These costs are: the cost of the additional wall, the cost of labor work, and the cost resulting from increasing the thickness of the wall beam. The study is based on the climatic data of the city of Tripoli, and also on the specifications of the building materials used in the local region. The thermal loads were calculated using the method of heating and cooling degree-days, and the economic analysis was based on the life cycle cost analysis. The results showed that the optimum insulation thickness (6.0 cm), in the case of fixed beam thickness, was not affected by the associated costs, while the payback period increased from 2.14 years to 4.63 years. In the case of variable beam thickness, the optimal insulation thickness ranged between 5.1 cm and 6.0 cm, and the payback period ranged between 2.14 years and 5.01 years that is when all associated costs were added. Accordingly, the study showed the importance of taking the associated costs into consideration, which resulted in a decrease of up to 15% of the optimal insulation thickness and a rise of up to 134% in the payback period.

**كلمات الاستدلالية:** – التكاليف المصاحبة، العازل الحراري، جدران المباني، درجات أيام التدفئة والتبريد، تحليل تكلفة دورة الحياة.

## 1. المقدمة

يمكن الحصول على بيئة داخلية مناسبة في المباني مع ظروف الراحة الحرارية وتوفير الطاقة من خلال إعطاء المزيد من الاهتمام لمواصفات إنشاء الجدران الخارجية. بالإضافة، فإن دراسات العزل الحراري لجدران المباني ينبغي أن تحظى بأهمية كبيرة، لما لها من آثار في خفض استهلاك الطاقة، وبالتالي في كبح جماح الطلب المتزايد على الطاقة، حيث إن تركيب العوازل الحرارية تقلل تسرب الحرارة خلال جدران المبنى. وعلى الرغم من وجود عجز في توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا، ووجود حاجة ماسة للدفع باتجاه تركيب العوازل الحرارية للجدران الخارجية للمباني للتقليل من استهلاك الطاقة، إلا أن تركيب العوازل الحرارية لم يحظ بالاهتمام اللازم من قبل الباحثين والمشرعين والمنفذين.

فئات الطلب ونسب استهلاك الطاقة في ليبيا والموضحة في الشكل 1 تبين أن القطاع السكني هو الأكثر طلباً للطاقة بنسبة 39 % من إجمالي الطاقة المستهلكة. 18 % من هذه القيمة تستهلك بواسطة منظومات تكييف الهواء بالتبريد أو التدفئة [1]. بالإضافة إلى ذلك فإن هناك نسب أخرى غير معلومة تستهلك في تكييف المباني الصناعية والإدارية والخدمية.




شكل (1): نسب استهلاك الطاقة في ليبيا [2,1].

وفي هذا السياق كانت هناك بعض الدراسات المتعلقة بموضوع عزل الجدران الخارجية. منها دراسة بواسطة قويشة وآخرون أجريت سنة 2016 [3]، استخدم فيها طريقة درجات أيام التدفئة وتكلفة دورة الحياة في ثلاث مدن ليبية مختلفة. اظهرت نتائج الدراسة أن عازل البوليسترين هو المفضل في جميع المواقع، حيث وجد أن السمك الأمثل يتراوح بين7.2 و14.7 سم، وكان التوفير في تكلفة استهلاك الطاقة يتراوح بين 6.6 و16.2 دينار ليبي لكل متر مربع، وفترة الاسترداد من 1.5 إلى 2.3 سنة.

وفي نفس السياق تم إجراء دراسة سنة 2016 بواسطة الغول وأخرون [4]، حول تأثير تسعيرة الكهرباء (التعريفة) في ليبيا على استهلاك الطاقة الكهربائية وعلاقتها بالسمك الأمثل للعازل الحراي. وتم استخدام طريقة قيم درجات أيام التدفئة والتبريد لتقدير كمية التدفئة والتبريد السنوية المطلوبة لكل متر مربع من مساحة الجدران الخارجية، وتم استخدام طريقة تحليل تكلفة دورة الحياة لحساب السمك الأمثل للعازل. أظهرت النتائج أن كمية الطاقة الموفرة تصل إلى 16.9 كيلوات ساعة/متر مربع، مع توفير في التكلفة خلال العمر الافتراضي يصل إلى 46.1 دولار/متر مربع، وتم توفير ما يقرب 68 مليون دولار سنويا بتطبيق الدراسة على 10000 وحدة سكنية متوسطة المساحة. كما اظهرت الدراسة ان سعر الطاقة الكهربائية الحالي المدعوم لا يشجع المستهلكين على استخدام العوازل الحرارية.

أما خارج نطاق ليبيا فقد أجريت العديد من الدراسات في نفس السياق منها دراسة بواسطة بوجناح وأخرون [5] على ست مدن مغربية. وجد أن سمك العزل الأمثل يتراوح بين 0.013 و0.077 متر، كما تراوح التوفير في التكلفة بين 1.77 و 38.70 دولار لكل متر مربع، وكانت فترة الاسترداد بين 6.06 و 13.67 سنة، والنقاط الثلاث الماضية اعتمدت في تغيرها على مصدر الطاقة ونوع العازل والمدينة التي تمت دراستها، وأظهرت الدراسة أيضًا أنه عند تطبيق سمك العزل الأمثل، فإن نسبة الانخفاض في استهلاك الوقود تتراوح بين 39.85 % و 87.84 %، اعتمادًا على المدينة ونوع الوقود والعازل.

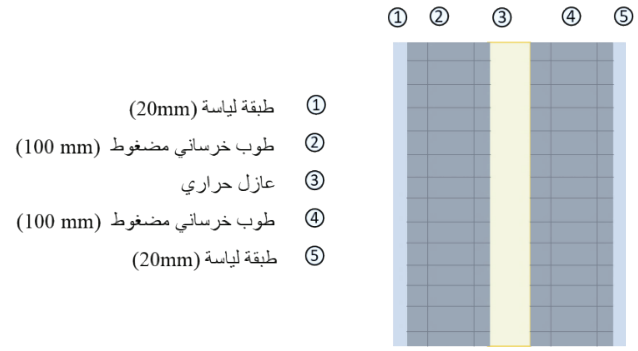
وفي دراسة اخرى تم إجرائها على مدينة دوالا في الكاميرون سنة 2015 بواسطة نيماتشوا [6]، تم فيها استخدام حوائط طوب خرساني مجوف (HCB) وطوب أرضي مضغوط مستقر (CSEB)، كما تم حساب أحمال التبريد باستخدام طريقة الفروق المحدودة الصريحة تحت الظروف المستقرة، كما تم تحديد 22 سنة كعمر افتراضي للمبنى. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها وفي مجال البحث أن أدنى قيمة للسمك الأمثل للعازل تساوي 0.09 متر مع توفير في الطاقة بلغ 79.8 % للجدار الموجه نحو الجنوب، بينما فترة الاسترداد الأعلى لجميع اتجاهات الجدران كانت 4.73 سنة. بالإضافة فقد وجد أن السمك الأمثل للعازل أعلى في جدار(HCB) منه في جدار (CSEB).

بالإضافة إلى دراسة سمك العازل ونوعه وفترة الاستراد، فإن الباحثون لم يهملوا انبعاثات الكربون الناتجة عن صناعة العوازل الحرارية في حد ذاتها. حيث أجرى الباحث اكوبولوس[7] ، دراسة للسمك الأفضل للعوازل في الحوائط الخارجية والذي يحقق أقل انبعاث لثاني أكسيد الكربون. بالإضافة لحساب الإنبعاثات الناجمة عن إنتاج الطاقة تم أيضا حساب الانبعاث الناتجة عن صناعة العوازل. وقد أشارت النتائج إلى أن السمك الأمثل للعازل يتراوح بين 11.2 سنتمتر و23.4 سنتمتر حسب الاتجاهات المختلفة، حيث انخفض الإنبعاث الحراري لكل وحدة مساحة من الجدار بنسب تتراوح بين 63.2% و72.2%. كما أنه من الجدير بالذكر، أن تقليل إنبعاثات ثاني أكسيد الكربون لا تتوافق مع أقل قيمة لتوفير تكلفة الطاقة، وذلك عند الأخذ في الإعتبار تقليل التكلفة الكلية.

ونضع بين أيديكم هذا البحث لكشف النقاب عن جانب من جوانب تركيب العوازل الحرارية للجدران الخارجية للمباني، وهي التكاليف المصاحبة لتركيب العوازل الحرارية – ويعبر مصطلح "التكاليف المصاحبة" عن التكاليف المتعلقة ببناء الجدران، وتكاليف السملات وغيرها من التكاليف، والتي سيتم التطرق إليها في هذا البحث، وتأثير تلك التكاليف المصاحبة على السمك الأمثل للعازل وفترة الإسترداد. تستخدم هذه الدراسة البيانات المناخية لمدينة طرابلس الغرب، ويتم فيها حساب الأحمال الحرارية باستخدام طريقة درجات أيام التدفئة والتبريد بينما يجرى التحليل الاقتصادي على أساس تحليل تكلفة دورة الحياة.

## 2. الحالة الدراسية

يقتصر مجال عمل هذه الورقة البحثية على دراسة التكاليف المصاحبة لإضافة العازل لجدران المباني الخارجية في مدينة طرابلس الغرب. حيث تم الاعتماد على مواصفات مواد البناء الشائعة الاستخدام في المنطقة وعلى البيانات المناخية المتوفرة. الجدار المستهدف، من الممكن أن يكون جدار خاص بمبنى سكني، أو صناعي، أو إداري. ويتكون الجدار، كما هو مبين بالشكل 1، من حائطين من الطوب الخرساني المضغوط كل منهما بسمك 10 سنتمترات مع وجود عازل في المنتصف، يتم تحديد نوعه وقيمته المثلى لاحقاً. وقد تم اختيار الطوب الخرساني المضغوط لاعتباره أكثر أنواع الطوب الشائعة الاستخدام في بناء المباني بالمنطقة، وخاصة في السنوات الأخيرة [3,4,8]، بالإضافة إلى أبعاده المضبوطة التي تمكن الباحثين من تحديد مواصفاته بسهولة.




**شكل (2): تركيبة الحائط المستخدم في هذه الدراسة [8]**

جدول 1 يوضح أهم المواصفات الحرارية والفيزيائية لمكونات الجدار الموضح في الشكل 1. ويلاحظ في هذا الشكل أن التركيبة الإنشائية للجدار متماثلة وذلك بسبب وضع العازل في الوسط وأن الطبقات على طرفي العازل لها نفس المواصفات والترتيب.

**جدول (1) : قيم الموصلية الحرارية والسمك والمقاومة الحرارية لطبقات الجدار [9].**

| الطبقات | الموصلية الحرارية (W/m.°C) | السمك (mm) | المقاومة الحرارية (m2°C/W) | الكثافة (kg/m3) |
|---|---|---|---|---|
| طبقة الهواء الداخلية | – | – | 0.12 | - |
| طبقة لياسة داخلية | 0.72 | 20 | 0.0278 | 1860 |
| طوب خرساني مضغوط | 0.85 | 95 | 0.1118 | 1323 |
| مادة العزل | - | - | - | - |
| طوب خرساني مضغوط | 0.85 | 95 | 0.1118 | 1323 |
| طبقة لياسة خارجية | 0.72 | 20 | 0.0278 | 1860 |
| طبقة الهواء الخارجية | - | - | 0.044 | - |

ونظراً لأن بعض الدراسات السابقة [3,4,8] قد توصلت إلى أن البولسترين هو العازل الأمثل في منطقة طرابلس، فقد تم التركيز في هذه الدراسة على الأنواع المختلفة منه لتحديد المواصفات الأفضل، وذلك بناءً على تحليل تكلفة دورة الحياة. جدول 2 يوضح قيم الموصلية الحرارية وكثافة الأنواع المختلفة من البولستيرين المتوفر في الأسواق المحلية.

**جدول 2: مواصفات وأسعار عوازل البولسترين المختلفة [9].**

| المادة | الكثافة ($kg/m^3$) | الموصلية الحرارية (W/m.K) |
|---|---|---|
| بوليسترين ممدد | 15 | 0.037 |
| بوليسترين ممدد | 20 | 0.034 |
| بوليسترين ممدد | 25 | 0.033 |
| بوليسترين ممدد | 30 | 0.0325 |
| بوليسترين مبثوق | 22 | 0.035 |

كما تم الحصول على كافة البيانات اللازمة لحساب الأحمال الحرارية وتحليل دورة الحياة من دراسة سابقة [□]. حيث تتمثل هذه البيانات في بيانات مناخية: درجات أيام التبريد والتدفئة؛ بيانات تقنية: معامل الأداء، وكفاءة الطاقة لأنظمة التكييف المستخدمة؛ وبيانات اقتصادية: تكلفة الكهرباء، والعمر الافتراضي للعازل. وقد تم عرض قيم هذه البيانات في الجدول 3.

جدول 3: جدول يوضح المتغيرات المستخدمة في هذه الدراسة

| المتغير | الرمز | الوحدات | القيمة [4] |
|---|---|---|---|
| درجات أيام التبريد | CDD | درجة مئوية | 555 |
| درجات أيام التدفئة | HDD | درجة مئوية | 558 |
| معامل الأداء | COP | - | 2.3 |
| كفاءة الطاقة | EER | - | 1.9 |
| العمر الافتراضي | LT | سنة | 10 |

## 3. النموذج الرياضي

يتم في هذا الجزء توضيح تفصيلي للمعادلات المستخدمة في النموذج الرياضي للحالة الدراسية بما في ذلك اشتقاق المعادلات والفرضيات المستخدمة. وببساطة فإن أحمال التبريد والتدفئة السنوية يمكن تقديرها بضرب معامل انتقال الحرارة الكلي للحائط في فرق درجات الحرارة السنوية والمعروفة باسم درجات أيام التدفئة والتبريد ومن ثمه يتم استخدام طريقة تكلفة دورة الحياة، حيث يتم تجميع قيمة تكلفة رأس المال وتكلفة الطاقة الموفرة على مدى عمر الحائط وتحديد سمك الحائط الأمثل الذي ينتج عنه أقل قيمة لمجموع التكاليف الكلية.

### 1.3 درجات أيام التدفئة والتبريد

تُعرّف درجات أيام التبريد أو التدفئة على أنها مجموع فروقات درجات الحرارة الموجبة على مدار السنة بين درجة حرارة ثابتة، تعرف بدرجة الأساس، ودرجة الحرارة اليومية المتوسطة. وتستخدما في تقدير الأحمال الحرارية، ويتم حسابهما بواسطة المعادلتين التاليتين [4]:

$$CDD_{24} = \sum_{1}^{365} |T_{av} - T_b|^{+} \quad \text{..... (1)}$$

$$HDD_{18} = \sum_{1}^{365} |T_b - T_{av}|^{+} \quad \text{..... (2)}$$

حيث إن متوسط درجة الحرارة اليومية و $T_b$ هي درجة الحرارة الأساس. وبناءً على اعتبار درجة حرارة الأساس 24°C في معادلة درجات أيام التبريد فقد وجد أن CDD=555 °C، و عند استخدام درجة حرارة الأساس 18°C في معادلة درجات أيام التدفئة، فقد وجد أن [4] HDD = 558 °C .

### 2.3 معامل انتقال الحرارة الكلي للجدار

يُعرف معامل انتقال الحرارة الكلي بأنه مقلوب مجموع المقاومات الحرارية، وفي هذه الدراسة يمكن صياغته وفق المعادلة التالية:

$$U = \frac{1}{R_i + R_w + R_{ins} + R_o} \quad \text{..... (3)}$$

حيث إن معامل انتقال الحرارة الكلي و و هما المقاومة الحرارية لطبقتي الهواء الداخلية والخارجية على التوالي، و هي المقاومة الحرارية لمكونات الجدار و هي المقاومة الحرارية للعازل وتكون جميع المقاومات المذكورة بوحدات ($m^2$ C°/W) . ويعرف المتغير RWT على أنه المقاومة الحرارية الكلية للحائط باستثناء طبقة العازل الحراري، فتكون معادلته كما يلي:

$$R_{wt} = R_i + R_w + R_o \quad \text{..... (4)}$$

وبالتالي يمكن كتابة معامل انتقال الحرارة كدالة في سمك العازل كما يلي:

$$U = \frac{1}{R_{wT} + R_{ins}} = \frac{1}{R_{wT} + \frac{x_{ins}}{k_{ins}}} \quad \text{.....} (5)$$

حيث يشير المتغير إلى سمك العازل ويقاس بوحدة (m)، والرمز يشير إلى الموصلية الحرارية للعازل وتقاس بوحدات ($W/m.C^{\circ}$).

### 3.3 الأحمال السنوية للتدفئة والتبريد

بصفة عامة يمكن حساب كمية الحرارة المنتقلة عبر وحدة مساحة باستخدام المعادلة التالية:

$$q = U\Delta T \quad \text{.....} (6)$$

حيث إن هو معامل إنتقال الحرارة الكلي كما سبق ذكره، و هو الفرق بين درجتي الحرارة للهواء في الخارج والداخل. ويمكن حساب كمية الحرارة $q_H$ بوحدات kWh والتي تنتقل سنويًا عبر وحدة مساحة اعتمادًا على قيمة درجات أيام التدفئة باستخدام القانون التالي:

$$q_H = 0.024HDDU \quad \text{.....} (7)$$

بينما تكون معادلة حساب كمية الحرارة المنتقلة بناء على قيم درجات أيام التبريد $q_C$ بوحدات kWh، كالتالي:

$$q_c = 0.024CDDU \quad \text{.....} (8)$$

كما سيتم في هذه الدراسة استخدام نظام تدفئة مع معامل أداء يشار إليه بالرمز COP، ونظام تبريد يستخدم مضخة حرارية ولها تصنيف كفاءة الطاقة يشار إليه بالرمز EER. فتكون الطاقة المستهلكة السنوية بواسطة نظام التدفئة لكل وحدة مساحة EH على النحو التالي:

$$E_H = \frac{q_H}{COP} = \frac{0.024HDD}{\left(R_{wT} + \frac{x_{ins}}{k_{ins}}\right)COP} \quad \text{.....} (9)$$

بينما تعرف معادلة الطاقة المستهلكة السنوية بواسطة نظام التبريد لكل وحدة مساحة $E_C$ على النحو التالي:

$$E_c = \frac{q_c}{EER} = \frac{0.024CDD}{\left(R_{wT} + \frac{x_{ins}}{k_{ins}}\right)EER} \quad \text{.....} (10)$$

## 4. تحليل تكلفة دورة الحياة والسمك الأمثل للعازل

لإجراء تحليل تكلفة دورة الحياة [3-13]، تم تحويل التوفير في الطاقة على مدى عمر العازل إلى القيمة الحالية بواسطة معامل القيمة الحالية (PWF)، والذي يتم تعريفه بالمعادلة التالية [4]:

$$PWF = \frac{LT}{(1+i)}, i = g \quad \text{.....} (11)$$

حيث إن يرمز إلى معدل الفائدة، و يرمز إلى معدل التضخم، والرمز يرمز للعمر الإفتراضي للعازل أو المبنى أيهما أقل. ويتم حساب التكلفة الإجمالية لدورة الحياة CT بوحدات $LD/m^2$ باستخدام العلاقة التالية:

$$C_T = PWF \times C_{el} \times (E_H + E_c) + C_{ins} + C_{other} \quad \text{.....} (12)$$

حيث إن سعر الكهرباء (kWh/LD)، و هما تكلفة العازل والتكاليف المصاحبة بالدينار، على التوالي. أما بالنسبة لتكلفة العازل فإنه يتم حسابها من المعادلة:

$$C_{ins} = x_{ins} C_i \quad \text{..... (13)}$$

حيث هو تكلفة العازل لكل وحدة حجم ($LD/m^3$)، بينما تعرف التكلفة المصاحبة كالتالي:

$$C_{other} = C_{wall} + C_{beam} + C_{labour} \quad \text{..... (14)}$$

حيث $C_{Wall}$ و $C_{beam}$ و $C_{labour}$ تمثل التكلفة لكل متر مربع لكل من الجدار، والسملة، واليد العاملة، على التوالي. وهنا يجدر الذكر أن تكلفة كل من الجدار واليد العاملة لا تتأثر بسمك العازل، بينما يمكن أن يتأثر سمك السملة بسمك العازل؛ أي أن تكلفة السملة تكون دالة في سمك العازل كالتالي:

$$C_{beam} = (x_{ins} + 2 \times \text{block thickness}) C_b \quad \text{..... (15)}$$

حيث هوتكلفة المواد الخاصة بالسملة لكل وحدة حجم. وللحصول على معادلة السمك الأمثل يتم تفاضل معادلة التكلفة الإجمالية السابقة ومساواتها بالصفر، وفي النهاية نفصل المتغير في الطرف الأيسر وباقي المتغيرات في الطرف الأيمن، فيتم الحصول على للسمك الأمثل $x_{opt}$ بوحدات دينار/متر$^2$ من المعادلة التالية:

$$x_{opt} = \left( \frac{0.024 \times DD \times PWF \times C_{el} \times k_{ins}}{C_i + C_b} \right)^{\frac{1}{2}} - R_{wt} \times k_{ins} \quad \text{..... (16)}$$

حيث يرمز DD إلى درجات أيام التدفئة والتبريد المشتركة، ويعرف بالمعادلة التالية:

$$DD = \left( \frac{HDD}{COP} + \frac{CDD}{EER} \right) \quad \text{..... (17)}$$

كما يمكن حساب قيمة التوفير السنوي للطاقة EAS، باستخدام العزل ذي السماكة المثلى ($x_{opt}$)، على النحو التالي:

$$EAS = C_{el} \left[ E_H(noins) - E_H(x_{opt}) + E_C(noins) - E_C(x_{opt}) \right] \quad \text{..... (18)}$$

وفي نهاية هذا النموذج الرياضي، نتوجه إلى معادلات فترة الإسترداد PP للحالات التي سبق ذكرها، حيث تم افتراض أن معدل الفائدة يساوي معدل التضخم، فتكون المعادلات الأساسية على النحو التالي:

$$PP = \frac{(C_{ins} + C_{other})(1 + i)}{EAS} \quad \text{..... (19)}$$

وبأخذ معادلة التوفير السنوي والتعويض بها في المعادلة السابقة، وبوضع معادلة كل من و يتم الحصول على المعادلة العامة التالية لحساب فترة الإسترداد.

$$PP = \frac{(C_{ins} + C_{other})(R_{wt}^2 \times k_{ins} + R_{wt} \times x_{ins})(i + 1)}{0.024 \times DDx_{ins} \times C_{el}} \quad \text{..... (20)}$$

## 5. عرض ومناقشة النتائج

كما تم توضيحه في سابقاً، فإن النتائج التي سيتم عرضها مبنية على التحليل الاقتصادي لتكلفة دورة الحياة. تم تقسيم النتائج لجزئين رئيسيين: حيث يهتم الجزء الأول بتحديد نوع العازل الحراري الأمثل من الناحية الأقتصادية وناحية الأداء الحراري وانعكاسه على التوفير في استهلاك الطاقة. بينما يركز الجزء الثاني، وبناءاً على النتيجة المتحصل عليها من الجزء الأول، على التكاليف المصاحبة، وهي الموضوع الرئيسي لهذه الورقة البحثية.

تحديد مواصفات العازل الأفضل

نظراً لأن بعض الدراسات السابقة [2,6] "[2,7]" "[3,8]": "أثبتت أن البوليسترين هو أفضل أنواع العوازل التي يمكن استخدامها في المنطقة الجغرافية قيد الدراسة، فإنه سيتم هنا اختيار العازل الأمثل من بين خمسة أنواع من عوازل البولستيرين المتوفرة في السوق. كما أن النتائج ستكون لحائط يتكون من طوب خرساني مضغوط مزدوج بسمك 10 سم

مع وجود العازل في المنتصف كما تم توضيحه مسبقاً في الشكل 1. وبالتطبيق في المعادلات المذكورة في النموذج الرياضي، فقد وُجد أن العازل الأمثل هو البوليسترين الممدد بكثافة 15 كجم/متر مكعب، وكانت الأفضلية من حيث التوفير في الطاقة الكهربائية على مدى عمر العازل، بالإضافة إلى تمتعه بأقل فترة استرداد من بين العوازل الأخرى. ويظهر الجدول التالي النتائج التي تم الحصول عليها.

جدول (4) السمك الأمثل والتوفير وفترة الاسترداد للعوازل المستخدمة في هذه الدراسة.

| اسم العازل | ρ ($kg/m^3$) | السمك الأمثل (m) | Eho ($kWh/m^2$) | Eco ($kWh/m^2$) | Etot ($kWh/m^2$) | التوفير خلال دورة الحياة ($LD/m^2$) | فترة الإسترداد (years) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| بوليسترين ممدد | 15 | 0.06 | 2.810 | 3.384 | 6.195 | 77.5 | 2.14 |
| بوليسترين ممدد | 20 | 0.05 | 2.880 | 3.468 | 6.348 | 76.4 | 2.19 |
| بوليسترين ممدد | 25 | 0.05 | 3.009 | 3.624 | 6.634 | 74.5 | 2.29 |
| بوليسترين ممدد | 30 | 0.05 | 3.149 | 3.791 | 6.939 | 72.5 | 2.40 |
| بوليسترين مبثوق | 22 | 0.04 | 3.927 | 4.728 | 8.655 | 61.7 | 2.99 |

وتظهر هذه النتائج أن العازل الأفضل هو البوليسترين الممدد بكثافة 15 كجم/متر مكعب، بسمك أمثل 0.06 متر وفترة استرداد 2.14 سنة، وتوفير خلال دورة الحياة قيمته77.5 دينار/متر مربع. بينما كان البوليسترين الناتج من عملية البثق ذو أكبر فترة استرداد وهي 2.99 سنة وبسمك أمثل 0.04 متر.

## التكاليف المصاحبة في حالة تثبيت سمك السملة

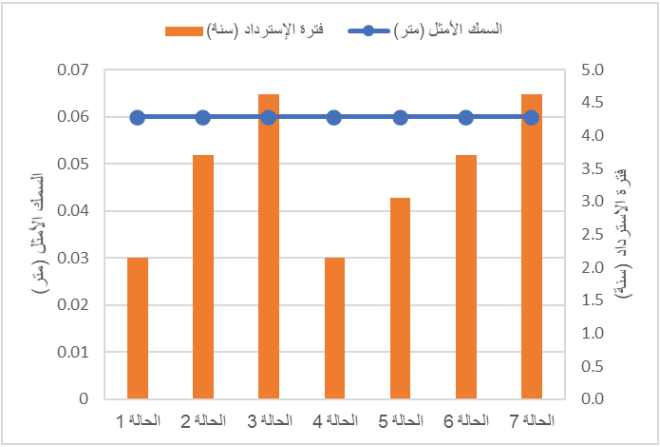
في الجزء السابق كان البولسترين الممدد بكثافة 15 كجم/متر مكعب هو العازل الأفضل، لذلك سيتم استخدامه هنا لدراسة تأثير التكاليف المصاحبة لتركيب العازل، حيث سيتم هنا تثبيت سمك السملة بقيمة 24 سم. جدول 5 يوضح النتائج المتحصل عليها في حالة كان سمك السملة ثابت.

جدول (5) جدول يوضح السمك الأمثل وفترة الإسترداد عند إضافة تكاليف مختلفة مع تثبيت سمك السملة.

| الرقم | التكاليف المصاحبة | السمك الأمثل (m) | فترة الإسترداد (years) |
|---|---|---|---|
| الحالة 1 | العازل فقط (لا توجد تكاليف مصاحبة) | 0.060 | 2.14 |
| الحالة 2 | العازل والحائط | 0.060 | 3.71 |
| الحالة 3 | العازل والحائط واليد العاملة | 0.060 | 4.63 |
| الحالة 4 | العازل والسملة | 0.060 | 2.14 |
| الحالة 5 | العازل والسملة واليد العاملة | 0.060 | 3.06 |
| الحالة 6 | العازل والحائط والسملة | **0.060** | **3.71** |
| الحالة 7 | التكلفة الكلية | **0.060** | **4.63** |

يمكن أن نلاحظ من الجدول السابق أن سمك العازل الحراري في جميع الحالات متساوي، وهذا يعنى أن التكاليف التي تم إضافتها لا تؤثر مطلقا في قيمة السمك الأمثل وذلك لأنها ثابتة ولا تعتمد على سمك العازل. أما بالنسبة لفترة الإسترداد فقد كانت متغيرة بسبب تغير التكاليف، وقد كانت أقل فترة استرداد في الحالة رقم 1 بقيمة 2.4 سنة، والتي تم فيها إضافة تكلفة العازل فقط، بينما كانت أعلى فترة استرداد في الحالة رقم 7 والتي تم تسميتها بالتكاليف الكلية، حيث بلغت 4.63 سنة. وهذه النتائج تعتبر مهمة للغاية وذلك للتأثير الواضح للتكايف المصاحبة على فترة الاسترداد، حيث تجاوزت

قيمة هذه الفترة الضعف تقريباً عند الأخذ في الاعتبار كافة التكاليف المصاحبة لإضافة العزال الحراري.




شكل (3): السمك الأمثل وفترة الاسترداد للحالات السبع مع تثبيت سمك السملة.

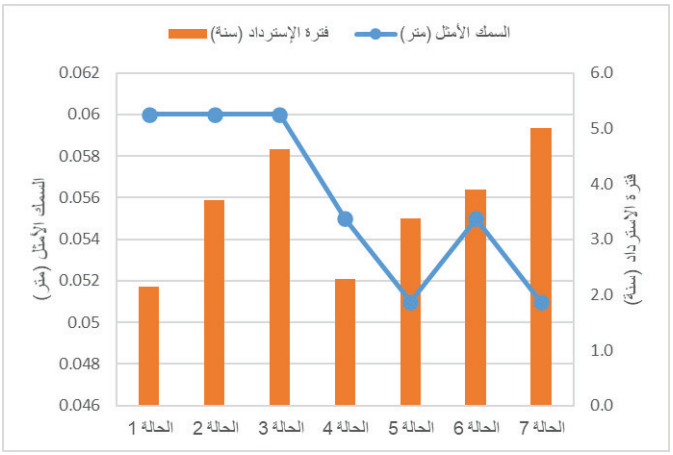
## تأثير التكاليف المصاحبة في حالة تغيير سمك السملة

كما سبق فإنه سيتم استخدام البوليسترين الممدد بكثافة 15 كجم/متر مكعب كعازل، مع الأخذ في الاعتبار أن سمك السملة في هذه الحالة سوف يتغير ليتسع للعازل وباقي التركيب الإنشائي للحائط؛ أي أن سمك السملة سوف يساوي 24 سم بالإضافة إلى سمك العازل المجهول. جدول 6 يوضح أهم النتائج التي تم الحصول عليها في حالة تغير سمك السملة مع تغير سمك العازل.

جدول (6): جدول يوضح السمك الأمثل وفترة الإسترداد عند إضافة تكاليف مختلفة مع تغير سمك السملة

| الرقم | التكاليف المصاحبة | السمك الأمثل (m) | فترة الإسترداد (years) |
|---|---|---|---|
| الحالة 1 | العازل فقط | 0.060 | 2.14 |
| الحالة 2 | العازل والحائط | 0.060 | 3.71 |
| الحالة 3 | العازل والحائط واليد العاملة | 0.060 | 4.63 |
| الحالة 4 | العازل والسملة | 0.055 | 2.29 |
| الحالة 5 | العازل والسملة واليد العاملة | 0.051 | 3.38 |
| الحالة 6 | العازل والحائط والسملة | 0.055 | 3.89 |
| الحالة 7 | التكلفة الكلية | 0.051 | 5.01 |

يمكن أن نلاحظ أن السمك الأمثل في الحالات الثلاث الأولى ثابت، وهذا يرجع إلى أن التكاليف التي تم إضافتها لا تؤثر في قيمة السمك الأمثل، حيث بلغ السمك الأمثل 0.060 متر، كما كان السمك الأمثل لكل من الحالات 4 و 6 متساوي وبقيمة 0.055 متر، ويمكن إرجاع ذلك إلى اشتراكهما في إضافة تكلفة السملة، وكذلك كان السمك الأمثل متساوي في كل من الحالات 5 و 7 وبقيمة 0.051 متر، وهما يشتركان أيضاً في إضافة تكلفة السملة وتكلفة اليد العاملة الخاصة بالسملة، وأما بالنسبة لفترة الإسترداد فقد تراوحت بين 2.14 سنة كما في الحالة الأولى، و5.01 سنة كما في الحالة رقم 7. وبالتالي فإن السمك الأمثل قد انخفض بنسبة تصل إلى 15 % بينما ارتفعت فترة الاسترداد بنسبة تصل إلى 134 % وذلك عند أخذ كافة التكاليف المصاحبة بعين الاعتبار. الشكل التالي يوضح ملخص لتغير سمك العازل وفترة الإسترداد في كل حالة من الحالات السبعة السابقة مع تغير سمك السملة.




**شكل (4): السمك الأمثل وفترة الاسترداد للحالات السبع لسمك سملة متغير.**

## الخلاصة

استخدمت هذه الدراسة البيانات المناخية لمدينة طرابلس الغرب، وتم حساب الأحمال الحرارية بطريقة درجات أيام التدفئة والتبريد، وكان التحليل الاقتصادي على أساس تحليل تكلفة دورة الحياة. تم في هذه الدراسة تحديد نوع العازل الأفضل من بين مجموعة من العوازل وهو البوليسترين الممدد بكثافة 15 كجم/متر مكعب، في نظام جداري يتكون من طوب خرساني مضغوط مزدوج بسمك 10 سم بحيث كان العازل في المنتصف. في حالة عدم أخذ التكلفة المصاحبة في الاعتبار كان السمك الأمثل 6.0 سم وفترة الاسترداد 2.14 سنة، وكان التوفير خلال دورة الحياة 77.5 دينار/متر مربع. بالإضافة، فقد درس تأثير التكاليف المصاحبة لتركيب العازل على السمك الأمثل وفترة الاسترداد لسبعة حالات مختلفة. فأما في الحالة التي تم فيها تثبيت سمك السملة، فقد أظهرت النتائج أن السمك الأمثل في الحالات السبع متساوي وبقيمة 6.0 سم، وهذا يعنى أن التكاليف المصاحبة لا تؤثر مطلقا على قيمة السمك الأمثل، أما بالنسبة لفترة الاسترداد فقد زادت في جميع الحالات التي تم دراستها للتكاليف المصاحبة، حيث بلغت أعلى قيمة لنسبة الزيادة حوالي الضعف. بالنسبة للحالة التي فُرض فيها أن سمك السملة متغير، فقد أظهرت النتائج أن السمك الأمثل يتغير في الحالات التي تدخل فيها تكلفة السملة في الحسبان، حيث وجد أن السمك الأمثل يقل بنسبة تصل إلى 15 %. بينما ارتفعت فترة الاسترداد بنسبة تصل إلى 134 %، وذلك عند أخذ كافة التكاليف المصاحبة بعين الاعتبار.

## المراجع

*[1]- GECOL. Annual Report Statistics. Tripoli- Libya: 2010.*

[2]- خيري قاسم آغا، محمد خلاط، السيد شوية، مصطفى صوفية، ناصر كريمة، رمضان. «إمكانية مساهمة الطاقة الشمسية في تسخين المياه المنزلية: الجدوى الفنية والإقتصادية». تقرير الشركة العامة للكهرباء، طرابلس: 2013.

[3]- عمار قويشة، عبد الرؤوف النعاس، سامح الغول. تحديد السمك الأمثل للعازل الحراري لحوائط المباني في ثلاث مدن ليبية على أساس التحليل الاقتصادي لحمل التدفئة الكهربائية. مجلة البحوث الهندسية 1;2016.

[4]- *Alghoul SK, Gwesha AO, Naas AM. The Effect of Electricity Price on Saving Energy Transmitted from External Building Walls. Energy Res J 2016;7:1–9.*

*[5]- Boujnah M, Jraida K, Farchi A, Mounir I. Thickness optimization for building walls in Morocco : Economic and Environmental analysis. Int J Tech Sci Res Eng 2018;1:22–35.*

*[6]- Nematchoua MK, Raminosoa CRR, Mamiharijaona R, René T, Orosa JA, Elvis W, et al. Study of the economical and optimum thermal insulation thickness for buildings in a wet and hot tropical climate: Case of Cameroon. Renew Sustain Energy Rev 2015;50:1192–202.*

*[7]- Axaopoulos I, Axaopoulos P, Gelegenis J, Fylladitakis ED. Optimum external wall insulation thickness considering the annual $CO_2$ emissions. J Build Phys 2018;42:527–44. https://doi.org/10.1177/1744259118774711.*

*[8]- Elmzughi M, Alghoul S, Mashena M. Optimizing thermal insulation of external building walls in different climate zones in Libya. J Build Phys 2020:1744259120980027. https://doi.org/10.1177/1744259120980027.*

*[9]-* البزنطي م، شنشن أ. العزل الحراري للجدران الخارجية للمباني: تأثير التكاليف المصاحبة لتركيب العازل على السمك الأمثل وفترة الإسترداد. مشروع تخرج بكالوريس، جامعة طرابلس، طرابلس: 2020.

*[10]- Hasan A. Optimizing insulation thickness for buildings using life cycle cost. Appl Energy 1999;63:115–24.*

*[11]- Ozel, M., 2013. Determination of optimum insulation thickness based on cooling transmission load for building walls in a hot climate. Energy Convers. Manage., 66: 106-114. DOI: 10.1016/j.enconman.2012.10.002*

*[12]- Comaklı K. , Yuksel B., Optimum insulation thickness of external walls for energy saving, Applied Thermal Engineering, 23-473–479 , 2003.*

*[13]- Sofrata H., Salmeen B., Optimization of insulation thicknesses using micros, Energy Conversion and Management, 34 (6) -471–479,1995.*

*[14]- J. P. L., Hansson. ''Ocean acidification background and history'', (2011), Oxford University Press, Oxford p. 1-20.*