

Determination of the ideal thickness of a wall containing a Phase Change Material (PCM) and submitted to a daily variation temperature. Numerical simulation.

Dr. Maha Ahmad*

(Received 13 / 6 / 2017. Accepted 18 / 12 / 2017)

□ ABSTRACT □

The hot countries consume a significant amount of energy for the air conditioning and for realizing thermal comfort. As the walls containing of Phase Change Material (PCM) can play a significant role in the air conditioning of the buildings, we study in this research the thermal behavior of a wall with a metallic structure made of honeycombs which contain a Phase Change Material (PCM) which helps to keep constant the temperature of the interior of the room then limiting the use of air conditioning.

For the study, we have carried out a numerical simulation on a wall whose the metallic structure is in aluminum. The metal helps to improve the low conductivity of the PCM and thus to realize a compromise between the temperature inside the PCM and the time of fusion. The structure of a honeycomb is equivalent to fins which increase the speed of the diffusion of heat inside the PCM.

The objective of this study is to determine the ideal sizes of this wall. when it undergoes a variable temperature which simulates boundary realistic conditions.

At the beginning, the PCM alone was studied, then the PCM behavior was studied when it is contained in honeycomb cells, considering that the temperature has a sinusoidal variation on the external side whereas it is constant on the interior side.

The study was carried out by a numerical simulation using COMSOL® software using the differential equation of heat transfer by conduction.

Keywords: Phase Change Material (PCM), honeycomb, COMSOL®,

* Assistant professeur, Departement of Mecanical power Engeneering, Faculty of Mechanical and Electrical Engeneering, TishreenUniversity, Lattakia, Syria.

تعيين الأبعاد المثالية لجدار يحتوي على مواد متغيرة الطور (PCM) ويخضع لدرجات حرارة متغيرة، محاكاة رقمية

د.مها احمد*

تاريخ الإيداع 13 / 6 / 2017. قُبِلَ للنشر في 18 / 12 / 2017

□ ملخص □

تستهلك البلدان الحارة كمية هامة من الطاقة من أجل تكييف الهواء وتحقيق الشعور بالارتياح الحراري. بما أنه يمكن للجدران التي تحتوي على مواد متغيرة الطور (PCM) أن تلعب دوراً هاماً في تكييف الأبنية، سنقوم في هذا البحث بدراسة السلوك الحراري لجدار له بنية معدنية على شكل خلايا نحل تحوي مادة متغيرة الطور (PCM) تساعد في الحفاظ على درجة حرارة ثابتة للوسط الداخلي للغرفة وتقلل من استخدام تكييف الهواء. من أجل الدراسة، قمنا بإجراء محاكاة رقمية على جدار معدني مصنوع من الألمنيوم. يسمح المعدن بتحسين الإيصالية الحرارية الضعيفة للمادة متغيرة الطور، وبالتالي بتحقيق توافق جيد بين درجة الحرارة داخل المادة متغيرة الطور وبين زمن الانصهار. بنية خلايا النحل تكافئ الزعانف التي تعمل على زيادة سرعة انتشار الحرارة داخل الـ PCM.

الهدف من هذه الدراسة هو تعيين الأبعاد المثالية لهذا الجدار عندما يخضع لدرجة حرارة خارجية متغيرة تحاكي الشروط الحدية الواقعية.

بداية، درسنا المادة متغيرة الطور على انفراد، ثم قمنا بدراسة سلوك المادة متغيرة الطور عندما تكون محتواة ضمن خلايا النحل، معتبرين أنّ درجة الحرارة تتغير من الجهة الخارجية بشكل جيبي بينما تكون ثابتة من الجهة الداخلية.

تمّت الدراسة بمساعدة البرنامج الرقمي COMSOL[®] انطلاقاً من المعادلة التفاضلية لانتقال الحرارة بالتوصيل.

الكلمات المفتاحية: مادة متغيرة الطور (PCM) ، خلية نحل، COMSOL[®].

* أستاذ مساعد . قسم القوى الميكانيكية. كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية. جامعة تشرين. اللاذقية. سورية.

مقدمة

من الطرق الرئيسية التي تساعد في تخفيض غازات الاحتباس الحراري هي تقليل استهلاك الطاقة التي مصدرها الوقود الأحفوري ضمن الأبنية. لكن قد يؤثر ذلك سلباً على الشعور بالارتياح الحراري. بما أنّ مفهوم الارتياح الحراري يرتبط بطبيعة جسم الإنسان، لذلك من الضروري أن تكون درجة حرارة الجدران مناسبة بحيث تضبط عملية الإشعاع الحراري من وإلى الجدران والأجسام.

يختلف الشعور بالارتياح الحراري تبعاً لموقع الشخص في الغرفة وذلك إذا كانت درجة حرارة جدرانها مختلفة كثيراً عن بعضها البعض [1]. ولهذا يكون من الضروري القدرة على التحكم بدرجة حرارة الجدران.

يساعد استخدام المواد متغيرة الطور (PCM) مع مواد البناء في تخزين الطاقة الحرارية ضمن حجم أصغر للجدار، بالإضافة إلى تحقيق الشعور بالارتياح الحراري.

يوجد طرق مختلفة لدمج المواد متغيرة الطور مع الجدران من أجل تخزين/ تحرير الطاقة القادمة من الشمس أو من داخل المبنى، فمثلاً نجد أنّ بعض الباحثين قاموا بدمج المواد متغيرة الطور (PCM) مع جدران مصنوعة من الجص أو من الببتون [2]، [3]، [4]، [5]، [6]، [7]، البعض الآخر بيّن أنه يمكن وضع المواد متغيرة الطور ضمن كبسولات بوليميرية قطرها بحدود $0,1-100\mu\text{m}$ [8] [9] [10] تساعد في منع تسرب المادة متغيرة الطور عندما تكون في الطور السائل. كما يمكن المزوجة بين المادة متغيرة الطور مع مادة ذات إيصالية حرارية كبيرة مثل حقن المادة متغيرة الطور ضمن هيكل معدني يساعد في تحسين الإيصالية الحرارية للضعيفة للمواد متغيرة الطور [11]، أو حقن المواد متغيرة الطور ضمن لوح معدني ذي بنية على شكل خلايا النحل [12].

أهمية البحث وأهدافه

إنّ تحقيق الشعور بالارتياح الحراري بواسطة الطرق التقليدية مثل مكيفات الهواء يتطلب استهلاكاً زائداً للطاقة، لكن يمكن تخفيض استهلاك الطاقة وتحقيق الارتياح الحراري بنفس الوقت بواسطة الأنظمة السلبية (passive system). تسمح هذه الأنظمة بتخزين الطاقة عندما تكون متوفرة ومن ثمّ باستخدامها فيما بعد. إنّ استخدام المواد متغيرة الطور ضمن الجدران يساعد في تخزين الطاقة الحرارية، وفي التحكم بدرجة حرارة الجدران عند الاختيار الصحيح لدرجة حرارة تغيير الطور.

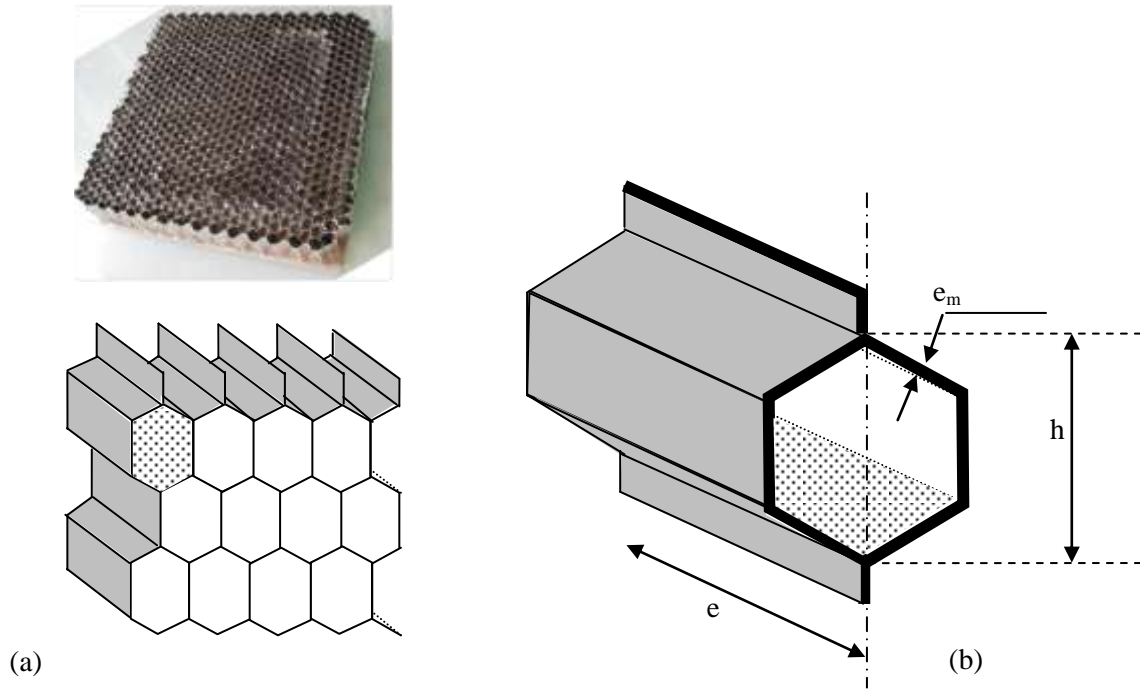
نحاول في هذا البحث دراسة السلوك الحراري للجدار الذي سيتمّ احتواء المادة متغيرة الطور ضمنه، وتحديد أبعاده المثالية وذلك عندما يخضع لشروط حديّة واقعيّة.

طرائق البحث ومواده

تبيّن دراسة سابقة [13]، أنّ الجدار المكوّن من خلايا على شكل خلايا النحل مصنوع من الألمنيوم (الشكل 1a) يساعد في تحسين الإيصالية الحرارية للضعيفة للمادة متغيرة الطور، ويسمح بتغيير كامل للطور صلب/سائل (وبالعكس). تلعب الخلايا دور الزعانف [12] التي تؤدي إلى تحسين عملية الانصهار وعملية التصلّب، وأيضاً تمنع تسرب المادة متغيرة الطور عندما تكون في الطور السائل. بالإضافة إلى أنّ الألمنيوم مناسب من ناحية الوزن والسعر ومتوفر [14]. من أجل الحصول على توافق جيّد بين زمن انصهار المادة متغيرة الطور وتجانس درجة

الحرارة ضمنها، يمكننا استخدام ألواح سماكتها $e=5\text{mm}$ [13]، لذلك سنعمد هذه البنية وسنعمل على تعيين أبعاد خلية النحل التي تحوي بداخلها المادة متغيرة الطور. سنعتبر أنّ المادة متغيرة الطور عبارة عن البارافين ذو درجة حرارة تغيير الطور صلب/سائل تساوي $297,5\text{K}$.

سماكة جدار الخلية والتي تمثل سماكة المعدن المكوّن لهيكل الخلية (وأيضاً سماكة الزعنفة) هي e_m . تتواجد الخلية ضمن لوح سماكته e (الشكل 1b). يتوضع هذا اللوح بين الوسط الخارجي ووسط داخلي (الغرفة).



الشكل 1 : رسم توضيحي: a- اللوح على شكل خلايا النحل.

b- أبعاد خلية النحل حيث e_m سماكة معدن الخلية، h : ارتفاع الخلية، e : سماكة اللوح.

تخضع الخلية المدروسة إلى شروط حدية من نوع نيومان (الشكل 2)، حيث تكون كثافة التدفق الحراري المتبادل بين سطح اللوح والوسط المحيط به هي:

- من الجهة الداخلية:

$$\varphi_i = h_i(T_{pi} - T_i) \quad (1)$$

حيث،

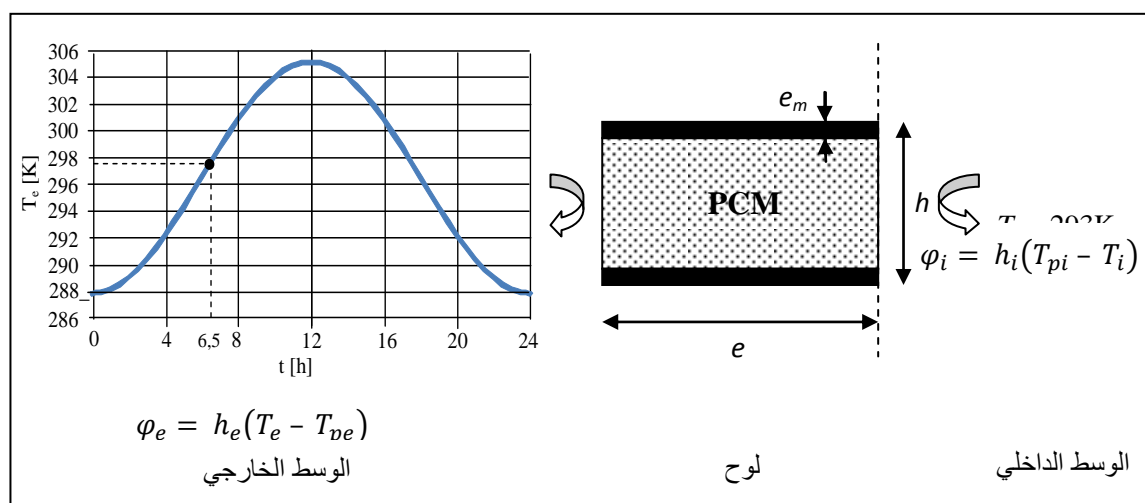
φ_i هي كثافة التدفق الحراري المتبادل (W.m^{-2})، h_i عامل انتقال الحرارة بالحمل بين السطح الداخلي والوسط الداخلي ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)، T_{pi} درجة حرارة السطح الداخلي (K)، T_i درجة حرارة الوسط الداخلي (الغرفة) واعتبرنا أنّها ثابتة وتساوي 293K .

- من الجهة الخارجية:

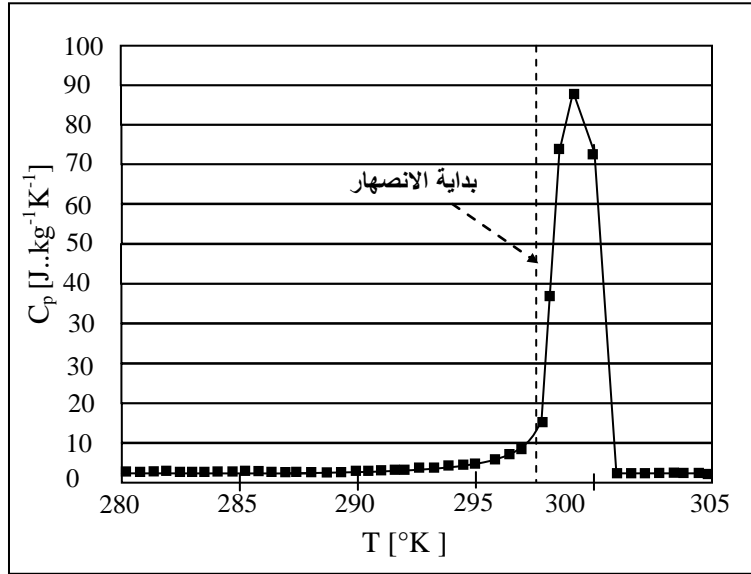
$$\varphi_e = h_e(T_e - T_{pe}) \quad (2)$$

حيث،

φ_e هي كثافة التدفق الحراري المتبادل ($W.m^{-2}$)، h_e هو عامل انتقال الحرارة بالحمل بين السطح الخارجي والوسط الخارجي ($W.m^{-2}.K^{-1}$)، T_{pe} درجة حرارة السطح الخارجي (K).
 T_e هي درجة حرارة الوسط المحيط (K)، وحتى تمثل التغير اليومي لدرجات الحرارة الخارجية سنعتبر عنها بشكل جيبى كما يلي: $T_e = T_m + A \cdot \sin(\frac{2\pi}{\tau} \cdot t - \frac{\pi}{2})$ ، حيث τ هي الفترة الزمنية والتي تمثل يوماً كاملاً (24h)، T_m هي درجة الحرارة الوسطية ولقد اعتبرنا أنها تساوي 296,5K، و A هي سعة المنحنى الجيبى واعتبرنا أنها 8,5K حيث تكون درجة الحرارة الخارجية أعظمية عند الظهيرة (305K أي $32^\circ C$).
 يوافق التغير اليومي لدرجات الحرارة الخارجية المعتبر التغير الوسطي لدرجات الحرارة ليوم صيفي في بعض المناطق الواقعة على البحر الأبيض المتوسط أو بعض مناطق غرب أوروبا.



بالنسبة لنمذجة الطور فإنه يوجد طرق مختلفة منها موديل Kondo [15] الذي يقوم بتمثيل السعة الحرارية التقريبية C_p من خلال منحنيات ذات أشكال مختلفة، أو بأخذ المنحنى الحقيقي للسعة الحرارية والذي يمكن قياسه كتابع لدرجة الحرارة بواسطة كالوري متر (DSC (differential scanning spectroscopy)، ولقد أثبت Alisetti and Roy [16] أن لشكل المنحنى الممثل للسعة الحرارية C_p تأثير ضعيف على نتائج حساب انتقال الحرارة خلال الجدار. سنقوم إذاً باستخدام المنحنى الحقيقي للسعة الحرارية الكتلية (الشكل 3)؛ والذي تمّ قياسه كتابع لدرجة الحرارة بواسطة كالوري متر [13]. تمثل المساحة المحصورة ضمن المنحنى قيمة الحرارة الكامنة L_m ، كما يتضح وجود ذروة عند لحظة تغير الطور.



الشكل 3: تغير السعة الحرارية الكتلية (المقاس بواسطة DSC)

للمادة متغيرة الطور (البارافين) كتابع لدرجة الحرارة وحدث تغير الطور [13].

ستتم الدراسة عن طريق المحاكاة الرقمية من خلال نمذجة خلية ثنائية البعد (2D) تمثل مقطعاً طولياً في خلية النحل، أي أنّ المادة متغيرة الطور ستكون محتواة ضمن خلية لها اثنتين من الزعانف. سيتم إجراء المحاكاة باستخدام البرنامج الرقمي COMSOL® الذي يعتمد طريقة العناصر المنتهية، ويسمح بمحاكاة العديد من التطبيقات الفيزيائية والهندسية.

سنقوم بدراسة السلوك الحراري للمادة متغيرة الطور لوحدها، ومن ثم سنقوم بدراسة السلوك الحراري للمادة متغيرة الطور عندما تكون موضوعة ضمن خلية النحل، حيث سنعمل على تعيين تأثير كمية المعدن المصنوعة منه الخلية، وأيضاً تأثير أبعادها على تغير درجة حرارة المادة متغيرة الطور من أجل تحديد الأبعاد المثالية.

سيتم إجراء الحساب بمساعدة المعادلة التفاضلية لانتقال الحرارة بالتوصيل:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (3)$$

حيث:

λ : الإيصالية الحرارية المكافئة للجملة المدروسة (مادة متغيرة الطور PCM / معدن الخلية). ρ : الكتلة

الحجمية المكافئة، C_p : السعة الحرارية الكتلية المكافئة.

-الإيصالية الحرارية المكافئة-

يوجد علاقات عديدة تم اقتراحها من أجل ربط الإيصالية الحرارية للمادة المركبة مع الإيصالية الحرارية والنسب الحجمية لمكوناتها [17]. يفترض النموذج الأكثر بساطة توزيع بسيط للمكونات بالنسبة لتدفق الحرارة، فعندما تتوضع المكونات بشكل متوازي فإن ذلك يؤدي إلى مقاومة حرارية أصغر وإيصالية حرارية فعلية أعظمية تُحسب بالعلاقة:

$$\lambda = f_M \lambda_M + (1 - f_M) \lambda_{PCM} \quad (4)$$

حيث f_M هي النسبة الحجمية للمعدن المكوّن للخلية وتساوي إلى نسبة حجم المعدن على الحجم الكلي، ويمكن أن نحسبها من أجل الخلية من العلاقة: $f_M = \frac{e_m}{h - e_m}$.
 λ_{PCM} الإيصالية الحرارية لمعدن الخلية. λ_{PCM} الإيصالية الحرارية للمادة متغيرة الطور.
 أما عندما تتوضع المكونات على التسلسل فإن ذلك يؤدي إلى إيصالية حرارية أصغر يمكن حسابها من العلاقة:

$$\lambda = \frac{\lambda_{PCM}\lambda_M}{\lambda_M\lambda_{PCM} + (1-f_M)\lambda_M} \quad (5)$$

اخترنا في دراستنا التوضع على التوازي وذلك من أجل تبسيط الحسابات لتعيين الإيصالية الحرارية المكافئة.
- الكتلة الحجمية
 يمكن حساب الكتلة الحجمية المكافئة للمادة متغيرة الطور ولمعدن الخلية معاً من القانون التالي:

$$\rho = \rho_M f_M + \rho_{PCM}(1 - f_M) \quad (6)$$

حيث:

ρ هي الكتلة الحجمية لمعدن الخلية ، ρ_{PCM} هي الكتلة الحجمية للمادة متغيرة الطور.

- السعة الحرارية الكتلية

تُعطى السعة الحرارية الكتلية المكافئة بالمعادلة:

$$C_p = C_{pPCM}f'_M + C_{pPCM}(1 - f'_M) \quad (7)$$

حيث f'_M هو التركيز الكتلي للمعدن ويمكن حسابه بدلالة النسبة الحجمية للمعدن f_M كما يلي:

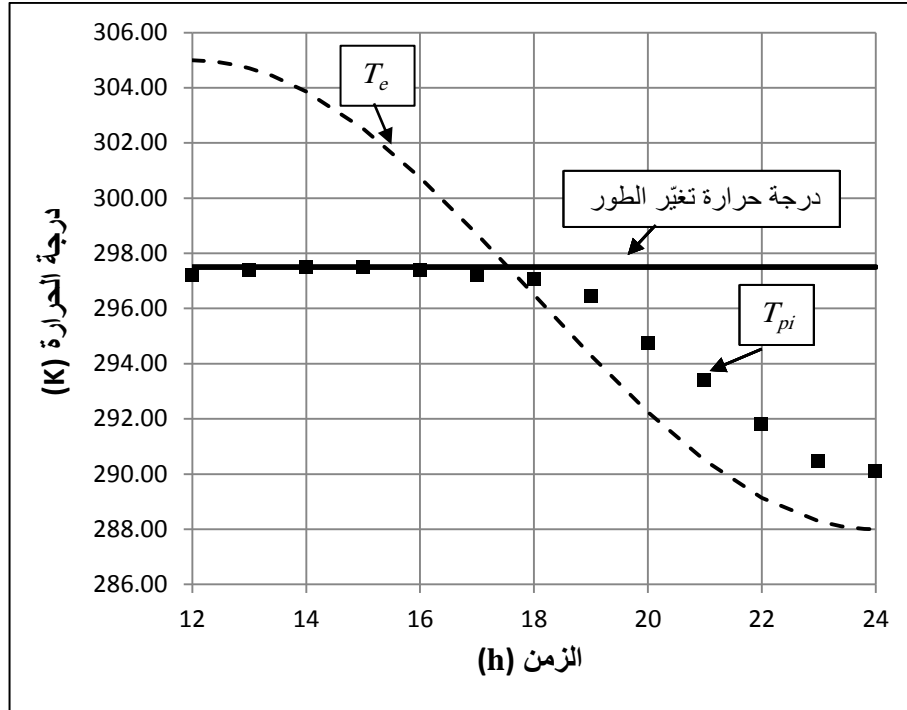
$$f'_M = \frac{\rho_M f_M}{\rho_M f_M + \rho_{PCM}(1 - f_M)} \quad (8)$$

النتائج والمناقشة:

1- دراسة السلوك الحراري للمادة متغيرة الطور

سنقوم فيما يلي بدراسة تغيّر درجة حرارة المادة متغيرة الطور ذو درجة حرارة تغيّر الطور 297,5K، باعتبار أنّ النسبة الحجمية للمعدن المكوّن للخلية هي $f_M = 0$. أي سيكون لدينا جدار مكوّن من المادة متغيرة الطور فقط سماكته $e = 5\text{mm}$ وسنعتبر أنّ ارتفاعه هو 100mm. (اخترنا ارتفاعاً كبيراً بالمقارنة مع السماكة من أجل تجنب تأثير الأطراف edge effects وذلك لأننا نعتبر أنّ الجدار مكوّن فقط من PCM أي أنه لا يوجد هيكل للخلية يمكن أن نفرض عليه الشروط الحدية للجملة).

يوضح الشكل 4 تغيّر درجة حرارة السطح الداخلي للجدار تبعاً للزمن. يبدأ انصهار الـ PCM اعتباراً من الجهة الخارجيّة، وتبلغ درجة حرارة السطح الداخلي للجدار (T_{pi}) درجة حرارة تغيّر الطور حالما تنصهر الـ PCM بالكامل.



الشكل 4: تغيير درجة حرارة السطح الداخلي للجدار المكون فقط من المادة متغيرة الطور (T_{pi}) تبعاً للزمن.

نلاحظ أنه لم يتم انصهار المادة متغيرة الطور بشكل كامل إلا عند الساعة 14h (لذلك لم نعرض سوى النصف الثاني من النهار على الشكل 4). يُعتبر هذا الوقت متأخراً، وهذا غير جيد لأنه حتى تتم الاستفادة الأعظمية من المادة متغيرة الطور في المحافظة على درجة حرارة الوسط الداخلي ثابتة يجب أن تتمكن من امتصاص الطاقة الحرارية، وهذا يتطلب أن تنصهر في وقت أبكر من النهار.

تبلغ المادة متغيرة الطور مباشرة بعد ذلك درجة حرارة تغيير طورها لتتصلب، وهذا لا يسمح بوجود مجال زمني كاف ترتفع خلاله درجة حرارة المادة متغيرة الطور.

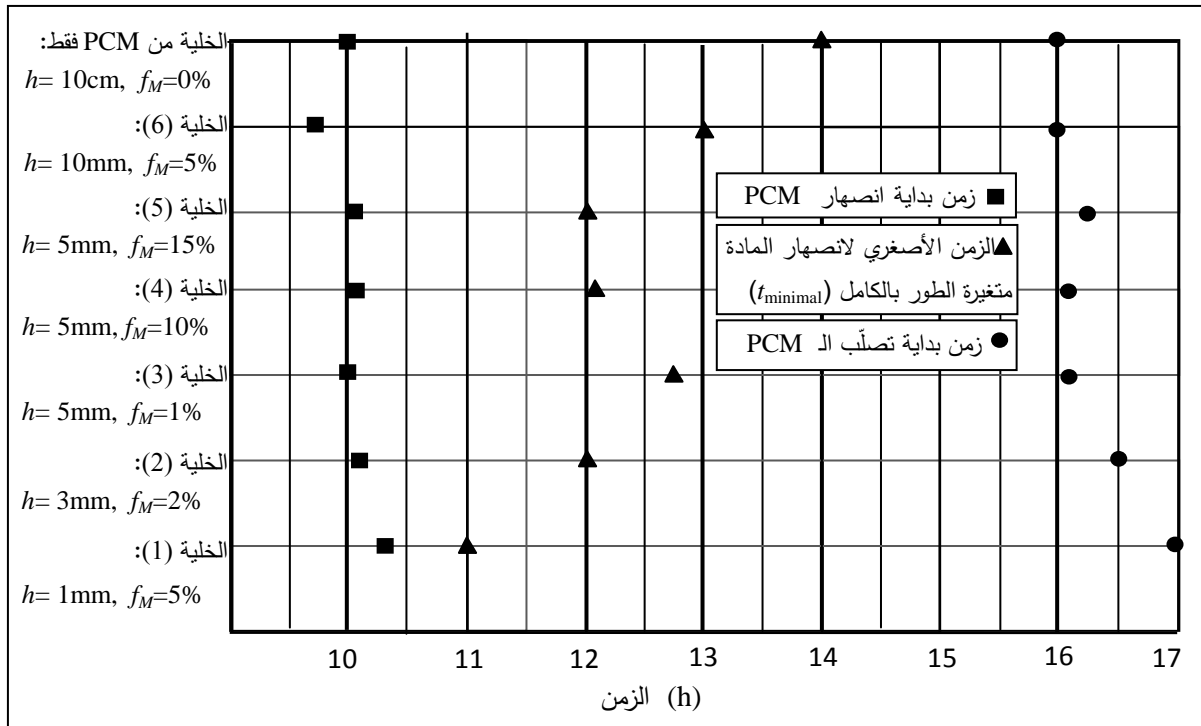
كما يبين منحنى السعة الحرارية (الشكل 3) أن درجة حرارة تغيير الطور تقع بين 297K و 300K، وبما أن المادة متغيرة الطور تمتص الطاقة الحرارية الكامنة أثناء الانتقال من درجة الحرارة 297K إلى درجة الحرارة 300K، فإنه يكون من الضروري أن تنصهر المادة متغيرة الطور بالكامل حتى تمتص طاقة حرارية كامنة بشكل أكبر. من هنا تأتي أهمية إضافة زعانف للخلية تعمل على نشر الحرارة داخل كامل المادة متغيرة الطور.

2- دراسة السلوك الحراري للمادة متغيرة الطور المحتواة ضمن خلية معدنية ذات زعانف

من أجل دراسة تغيير درجة الحرارة للمادة متغيرة الطور عندما تكون محتواة ضمن خلية من الألمنيوم ذات زعانف، قمنا بإجراء المحاكاة الرقمية على عدد من الخلايا التي تختلف عن بعضها بالارتفاع وبالنسبة الحجمية للألمنيوم بينما سماكة اللوح لجميع الخلايا هي $e=5\text{mm}$ ، حيث قمنا بتعيين زمن بداية انصهار المادة متغيرة الطور، وزمن انتهاء انصهارها بالكامل وهو ما سندعوه بالزمن الأصغري لانصهار المادة متغيرة الطور بالكامل (t_{minimal})، والزمن الذي تبدأ عنده بالتصلب (الشكل 5).

كما نوضح على الجدول 1 مدة تخزين الطاقة الحرارية في كل خلية وهي عبارة عن الفترة الزمنية اعتباراً من لحظة بداية انصهار المادة متغيرة الطور حتى بداية تصلبها، كما نوضح درجة الحرارة الأعظمية التي تبلغها الخلية،

والزمن الفعلي اللازم للانصهار وهو عبارة عن الفترة الزمنية الواقعة بين لحظة بداية انصهار المادة متغيرة الطور ولحظة انتهاء انصهارها بالكامل.



الشكل 5: زمن انصهار وتصلب المادة متغيرة الطور تبعاً لارتفاع الخلية والنسبة الحجمية للمعدن.

الجدول 1: مدة تخزين الطاقة الحرارية ودرجة الحرارة الأعظمية التي تبلغها الخلايا.

10	5	5	3	1	ارتفاع الخلية التجريبية h (mm)
5	5	5	5	5	سماكة اللوح e (mm)
5	10	1	2	5	النسبة الحجمية للمعدن f_M (%)
3h15	2h04	2h45	2h12	35min	الزمن الفعلي للانصهار
6h15	6h04	6h10	6h18	6h35	مدة تخزين الطاقة الحرارية
297,7	297,95	297,75	298	298,4	درجة الحرارة الأعظمية التي تبلغها الخلية (K)

بالمقارنة بين نتائج المحاكاة للمادة متغيرة الطور لوحدها مع نتائج المحاكاة للخلية المزعنة الموضحة على الشكل 5 والجدول 1، نجد مايلي:

من أجل خلايا ذات ارتفاع معين، تنصهر المادة متغيرة الطور بالكامل عند الساعة 12h بينما وجدنا أنّ الانصهار الكامل للمادة متغيرة الطور وحدها يحصل عند الساعة 14h، أي أننا نربح فترة من الزمن قدرها ساعتين. يتعلق الزمن الفعلي اللازم للانصهار بارتفاع الخلية. حيث يتراوح بين 35min من أجل خلية ارتفاعها قصير جداً ($h=1mm$) و 3h15 من أجل خلية ذات ارتفاع أكبر ($h=10mm$).

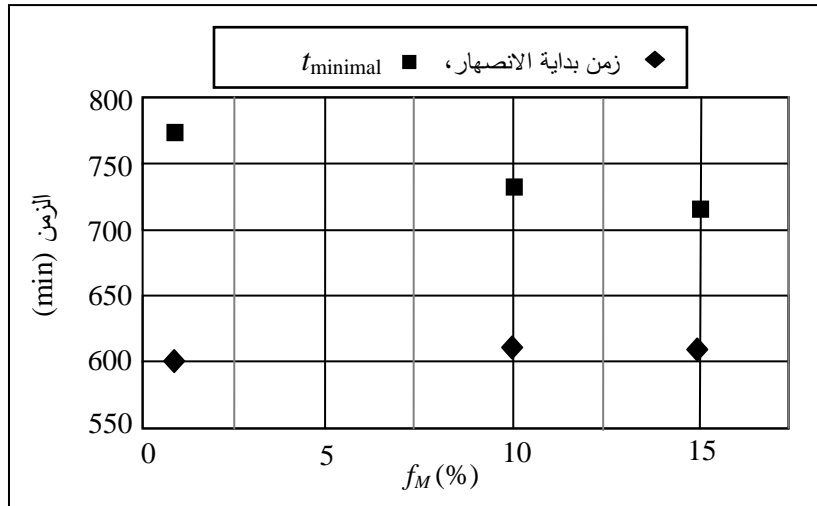
يختلف زمن تخزين الطاقة الحرارية تبعاً لأبعاد الخلية قليلاً ويساوي 6h تقريباً. كما أنّ درجة الحرارة الأعظميّة التي تمّ بلوغها تساوي 298,4K، حيث يمكن أن يحصل عندها دائماً تغيير في الطور كون درجة حرارة تغيير الطور محصورة بين 297K و 300K كما وجدنا من منحنى السعة الحرارية (الشكل 3).

تقوم المادة متغيرة الطور بتخزين الطاقة الحرارية خلال هذه الساعات الستة على شكل حرارة كامنة، ومن ثمّ ستتمكن من طرح الطاقة الحرارية التي امتصتها أثناء تغيير الطور سائل/صلب إلى الوسط الداخلي.

تبدأ عملية انصهار المادة متغيرة الطور بحدود الساعة 10h صباحاً بينما تصبح درجة الحرارة الخارجيّة مساوية لدرجة حرارة تغيير الطور (297,5K) عند الساعة 6h30 صباحاً (كما هو واضح على الشكل 2). أي أنّ المادة متغيرة الطور تحتاج إلى فترة زمنية معينة حتى تتفاعل مع تغييرات درجة الحرارة.

3- تأثير النسبة الحجمية للمعدن المكوّن للخلية (f_M)

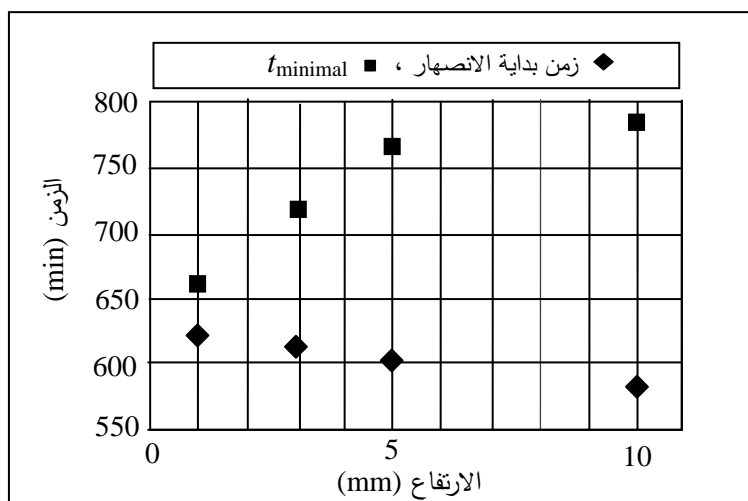
قمنا بإجراء المحاكاة الرقمية على خلية سماكتها $e = 5mm$ من أجل تعيين تأثير النسبة الحجمية للمعدن على زمن بداية انصهار المادة متغيرة الطور، وعلى الزمن الأصغري ($t_{minimal}$) الذي تنصهر عنده بالكامل (الشكل 6). نلاحظ أنّ تغيير النسبة الحجمية حتى 15% لها تأثير قليل على السلوك الحراري للمادة متغيرة الطور.



الشكل 6: تأثير النسبة الحجمية لمعدن الخلية f_M على زمن انصهار المادة متغيرة الطور، ($t_{minimal}$: الزمن الأصغري لانصهار المادة متغيرة الطور بالكامل). سماكة الخلية المدروسة $e = 5mm$.

4- تأثير ارتفاع الخلايا على السلوك الحراري للمادة متغيرة الطور

يوضح الشكل 7 تأثير ارتفاع الخلايا (h) على زمن بداية انصهار المادة متغيرة الطور وعلى الزمن الأصغري ($t_{minimal}$) الذي تنصهر عنده المادة متغيرة الطور بالكامل. من أجل إجراء المحاكاة، قمنا بأخذ ارتفاعات (h) مختلفة للخلية مع المحافظة على سماكتها ($e=5mm$) ثابتة. ولم نأخذ النسبة الحجمية لمعدن الخلية بعين الاعتبار كون تأثيرها مهماً.



الشكل 7: تأثير ارتفاع الخلايا (h) على زمن بداية انصهار المادة متغيرة الطور،
(t_{minimal} : الزمن الأصغري لانصهار المادة متغيرة الطور بالكامل). سماكة الخلية 5mm.

تبيّن المحاكاة أنّ زمن بداية انصهار المادة متغيرة الطور يتأثر قليلاً تبعاً لتغيّر حجم الخلية، بينما الزمن الأصغري الذي تنصهر عنده المادة متغيرة الطور بالكامل يتأثر بشكل كبير. فكلما قلّ حجم الخلية، كلما كان انصهار كامل المادة متغيرة الطور أسرع. أي أنّ استخدام الزعانف المعدنية؛ من جهة؛ من أجل زيادة الإيصالية الحرارية واستخدام خلية صغيرة الحجم؛ من جهة أخرى؛ يسمح بالحصول على فائدة مضاعفة. ومع هذا فإنه يجب ألا يكون حجم الخلية صغيراً جداً وذلك لأنه في هذه الحالة سيكون تأثير المعدن قوياً وستنصهر المادة متغيرة الطور بسرعة كبيرة جداً. حيث نلاحظ من أجل الارتفاع $h=1\text{mm}$ بأنّ الانصهار يبدأ عند $10\text{h}25$ (625min) وينتهي عند 11h (660min) ويبدأ التصلّب عند الساعة 17h، تتواجد المادة متغيرة الطور بين 11h و 17h بالطور السائل وقد تسخن وترتفع درجة حرارتها خلال هذه الفترة إلى قيمة أعلى من درجة حرارة تغيّر الطور وهذا غير مناسب للحفاظ على درجة حرارة الجدار عند درجة حرارة تغيّر الطور (297,5 K). كما أنه في هذه الحالة يكون إنتاج لوح الألمنيوم ذو بنية خلية النحل أكثر دقة وأعلى ثمناً، لذلك نستبعد الارتفاع $h=1\text{mm}$. أما عندما يكون $h=10\text{mm}$ ، فإنّ انصهار المادة متغيرة الطور يبدأ حوالي $9\text{h}45$ (585min) لكن تحتاج الحرارة إلى زمن أطول حتى تنتشر ضمن كامل اللوح وذلك بسبب وجود كمية كبيرة من المادة متغيرة الطور فيتأخر انتهاء الانصهار حتى 13h (780min). إذاً نعتبر أنّ الارتفاع المناسب للخلية هو 3-5mm (فمن أجل $h=3\text{mm}$ يبدأ الانصهار عند 12h وينتهي عند $16\text{h}30$ ، حيث تبقى درجة حرارة اللوح خلال هذه الفترة ثابتة عند 297,5K وهذا مانريده)

نبيّن على الجدول 2 تأثير ارتفاع الخلية (h) على زمن انصهار المادة متغيرة الطور اعتباراً من اللحظة التي تبلغ فيها درجة حرارتها درجة حرارة تغيّر طورها، وذلك من خلال حساب فرق الزمن Δt بين اللحظة التي انصهرت عندها المادة متغيرة الطور بالكامل (t_{minimal}) و $6\text{h}30$ (اللحظة التي تصبح بها درجة الحرارة الخارجية مساوية لدرجة حرارة تغيّر الطور كما هو موضح على الشكل 2) وذلك من أجل خلايا سماكتها 5mm.

الجدول 2: تأثير حجم الخلايا (الارتفاع h) على الزمن الأصغري لانصهار المادة متغيرة (t_{minimal}) بالكامل، وعلى فرق الزمن Δt (حيث $\Delta t = t_{\text{minimal}} - 6h30$)، وعلى الزمن الذي تبدأ عنده الخلية بالتصلب. سماكة الخلية 5mm.

ارتفاع الخلية (mm)	1	3	5	10
الزمن الأصغري للانصهار الكامل (min)	660	720	730	780
Δt (min)	270	330	340	390
زمن بداية التصلب (min)	1020	990	970	960

نلاحظ من الجدول أنه كلما كان حجم الخلية صغيراً، كلما كان فرق الزمن (Δt) بين لحظة انصهار كامل المادة متغيرة الطور واللحظة التي تبلغ بها درجة حرارة تغيير طورها أقل. أي كلما بلغت المادة متغيرة الطور بأكملها درجة حرارة تغيير طورها صلب / سائل بسرعة أكبر. هذه الخاصية مهمة لأنه في الحالة التي نقوم بدراستها في بحثنا، التكييف من أجل الارتياح الحراري في الصيف، يجب أن تبلغ كل المادة متغيرة الطور درجة حرارة انصهارها بسرعة حتى تتمكن من البدء بعملية امتصاص الطاقة الحرارية بسرعة وبالتالي تقوم بتكييف الوسط الداخلي خلال الفترة الأكثر سخونة من اليوم.

نبين أيضاً على الجدول 2 نتائج المحاكاة من أجل ارتفاعات مختلفة للخلية من أجل توضيح تأثير حجم الخلايا على الزمن الذي تبدأ عنده المادة متغيرة الطور بالتصلب، حيث نلاحظ أنه، كلما كانت الخلية أصغر كلما احتاجت المادة متغيرة الطور إلى زمن أطول حتى تبدأ بالتصلب. وبما أن تخزين الطاقة الحرارية يتم أثناء الانصهار على شكل حرارة كامنة، فهذا يعني أنه سيكون للمادة متغيرة الطور فرصة أكبر لتخزين الطاقة الحرارية الكامنة. إن هذه الخاصية هامة لأننا نرغب بأن تتصلب المادة متغيرة الطور في نهاية النهار لكي تحرر إلى الوسط الداخلي المراد تكييفه الطاقة الحرارية التي كانت قد امتصتها، وبالتالي نجنبه من انخفاض درجة حرارته بشكل مفاجئ خلال المساء حيث تنخفض درجة الحرارة الخارجية إلى مادون درجة حرارة تغيير الطور. (نستطيع أن نلاحظ من الشكل 2 والجدول 2 أن درجة الحرارة الخارجية تنخفض وتصبح أقل من درجة حرارة تغيير الطور من أجل خلية ارتفاعها $h=3\text{mm}$ وسماكتها $e=5\text{mm}$ اعتباراً من الساعة 16h30 (990min)، حيث تبدأ المادة متغيرة الطور عند هذا الزمن بالتصلب وتحرير الحرارة المخزنة مقللة بذلك من التغيير في درجة حرارة الوسط الداخلي والمحافظة عليها ثابتة تقريباً عند درجة حرارة تغيير الطور (أو أعلى قليلاً 298K) محققة بذلك الشعور بالارتياح الحراري).

الاستنتاجات والتوصيات

قمنا في هذا البحث بمساعدة البرنامج الرقمي COMSOL® بدراسة السلوك الحراري للمادة متغيرة الطور المحتواة ضمن لوح على شكل خلايا النحل بهدف تعيين الأبعاد المثالية لهذا اللوح. اعتبرنا أن الخلايا ثنائية البعد ذات زعانف ومصنوعة من الألمنيوم، ومملوءة بالبارافين كمادة متغيرة الطور، وتخضع إلى تغيير جيبى لدرجة الحرارة من الجهة الخارجية يمثل التغيير اليومي لدرجات الحرارة، بينما درجة الحرارة من الجهة الداخلية والتي تمثل درجة حرارة الوسط الداخلي ثابتة، ووجدنا أن:

- من الضروري أن تنصهر المادة متغيرة الطور بالكامل حتى تتمكن من امتصاص أكبر للطاقة الحرارية الكامنة، يمكن تحقيق ذلك من خلال استخدام خلية معدنية ذات زعانف تساعد في نشر الحرارة داخل كامل المادة متغيرة الطور.

- زيادة النسبة الحجمية لمعدن الخلية المزعنفة حتى 15% لا يؤدي إلى تأثير ذو أهمية على السلوك الحراري للمادة متغيرة الطور.
- زمن بداية انصهار المادة متغيرة الطور يتأثر بشكل طفيف مع تغيير ارتفاع الخلية.
- كلما قل ارتفاع الخلية كلما ازدادت سرعة انصهار المادة متغيرة الطور، وكلما احتاجت المادة متغيرة الطور إلى زمن أطول حتى تتصلب.
- نستطيع أن نعتبر أن الأبعاد المثالية للخلية هي عندما يكون ارتفاعها $h=3\text{mm}$ وسماكتها $e=5\text{mm}$.
- يجب متابعة الدراسة باعتبار الخلية ثلاثية البعد 3D، ودراسة تأثير الشكل الهندسي للخلية وطبيعة المادة متغيرة الطور، وإجراء الدراسة تجريبياً ومطابقة النتائج.
- بما أنه تم اختيار درجة حرارة تغيير الطور للمادة المدروسة (297K) بحيث تساعد في عملية تكييف الهواء فإنها لن تكون نافعة خلال فصل الشتاء، لذلك من أجل الاستفادة من المواد متغيرة الطور في عملية التدفئة شتاء فإنه يجب متابعة البحث، ودراسة مواد جديدة قادرة على تغيير طورها عند ظروف درجات حرارة فصل الشتاء، ودراسة الجدار الذي يسمح بالمزاوجة بينها وبين المادة المستخدمة للتكييف.

المراجع:

- [1] LAVIGNE, P. *Architecture bioclimatique*. Edisud, Aix-en-Provence, France, 1994.
- [2] SALYER, I.O. SIRCAR, A.K. CHARTOFF, R.P. MILLER, D.E. *Advanced phase change materials for passive solar storage applications*. in Proceedings of the 20 th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference. Warrendale. Pa, USA, 1985, 699 – 709.
- [3] SHAPIO, M. FELDMAN, D. HAWES, D. BANU, D. *PCM thermal storage in drywall using organic phase change material*. Passive Solar Journal, Vol. 4, 1987, 419 – 438.
- [4] BABICH, M.W. BENRASHID, R. MOUNTS, R.D. *DSC studies of energy storage materials. Part 3: Thermal and flammability studies*. Thermchimica acta, Vol. 243, 1994, 193 – 200.
- [5] BANU, D. FELDMAN, D. HAGHIGHAT, F. PARIS, J. HAWES, D. *Energy storing wallboards: flammability tests*. Journal of Materials and Civil Engineering, Vol. 10, 1998, 98 – 105.
- [6] TYAGI, V.V. BUDDHI, D. *PCM thermal storage in building: A state of art*. Renewable & Sustainable Energy Reviews, Vol. 11, 2007, 1146 – 1166.
- [7] XU, X. ZHANG, Y. LIN, K. DI, H. YANG, R. *Modeling and simulation on the thermal performance of shape – stabilized phase change material floor used in passive solar buildings*. Energy and Buildings, Vol. 37, N°10, 2008, 1084 – 1091.
- [8] CALVET. N. PY, X. OLIVÈS, R. BÉDÉCARRATS, J.-P. DUMAS, J.-P. JAY, F. *Enhanced performances of macro-encapsulated phase change materials (PCMs) by intensification of the internal effective thermal conductivity*, Energy, 55, 2013, 956-964.
- [9] SU, W. DARKWA, J. KOLOIANNAKIS, G. *Review of solid–liquid phase change materials and their encapsulation technologies*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 48, 2015, 373–391.

- [10] KHADIRAN, T. HUSSEIN, M. Z. ZAINAL, Z. RUSLI, R. *Encapsulation techniques for organic phase change materials as thermal energy storage medium, A review*, Solar Energy Materials & Solar Cells 143, 2015, 78–98.
- [11] ZHANG, P. XIAO, X. MA, Z.W. *A review of the composite phase change materials: Fabrication, characterization, mathematical modeling and application to performance enhancement*, Applied Energy, 165, 2016, 472-510.
- [12] HASSE, C. GRENET, M. BONTEMPS, A. DENDIEVEL, R. SALLÉE, H. *Realisation, test and modelling of honeycomb wallboards containing a Phase Change Material*, Energy and Buildings, 43, 2011, 232–238.
- [13] احمد، مها. الجدار الأمثل الحاوي على مواد متغيرة الطور (PCM) موضوعة ضمن هيكل معدني، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية، سلسلة العلوم الهندسية، المجلد 39، العدد 1، 2017.
- [14] احمد، مها. اختيار المواد متغيرة الطور (PCM) من أجل تكييف هواء المنازل في فصل الصيف، مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية، سلسلة العلوم الهندسية، المجلد 38، العدد 4، 2016.
- [15] KONDO, T. IBAMOTO, T. TSUBOTO, Y. *Research on the thermal storage of PCM wallboard*. Workshop for International Energy Agency, Annex 10, Japan, 2000.
- [16] ALISETTI, E. L. ROY, K. *Forced convection heat transfer to phase change material slurries in circular ducts*, Journal of Thermophysics and heat transfer, 14, Janvier –Mars 2000, 15 – 118.
- [17] ALBERTO, Z. FINA, A. *Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review*, Progress in Polymer Science, 36, 2011, 914–944.