

## الجدار الأمتل الحاوي على مواد متغيرة الطور (PCM) موضوعة ضمن هيكل معدني

د. مها احمد\*

(تاريخ الإيداع 26 / 7 / 2016. قُبل للنشر في 3 / 1 / 2017)

### □ ملخص □

تلعب الجدران الحاوية على مواد متغيرة الطور (PCM) دوراً مهماً في تكييف هواء الأبنية. لكن تُعتبر الإيصالية الحرارية الضعيفة للمواد متغيرة الطور بأنها إحدى الخواص التي تحدّد من استخدامها. يمكن حلّ هذه المشكلة من خلال المزوجة بين هيكل معدني مع المادة متغيرة الطور. هدف هذه الدراسة هو تحديد الأبعاد المثالية للجدار بحيث تسمح بتغيّر كامل للطور، وبمجانسة درجة الحرارة من دون أن يحصل تغيّر سريع في الطور. من أجل دراسة السلوك الحراري للجدار، قمنا بإجراء محاكاة رقمية باستخدام البرنامج <sup>®</sup> COMSOL على خلية عنصرية. ومن أجل وصف تغيّر الطور، استخدمنا طريقة السعة الحرارية المكافئة. اخترنا البارافين (الذي درجة حرارة انصهاره 24,5 °C) كمادة متغيرة الطور. كما قمنا بتعيين تأثير كلّ من نوع معدن الخلية والنسبة الحجمية له.

قمنا على وجه الخصوص بدراسة الهيكل المعدني الذي له بنية على شكل خلية نحل مصنوعة من الألمنيوم.

**الكلمات المفتاحية:** PCM، تكييف هواء الأبنية، <sup>®</sup> COMSOL، خلايا النحل، أبعاد الخلية، النسبة الحجمية.

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

## Optimization of a wall containing a Phase Change Material included in a metal matrix.

Dr. Maha Ahmad\*

(Received 26 / 7 / 2016. Accepted 3 / 1 / 2017)

### □ ABSTRACT □

The walls containing phase change materials (PCM) play a significant role in the air conditioning of buildings. However, one of the characteristics which limits the use of PCMs is their low conductivity. It is possible to solve this problem by coupling a metal matrix with the PCM. The aim of this study is to determine the optimal size of a wall which allows a complete change of state, and a homogenization of the temperature without a too fast change-of-state rate. To study the thermal behavior of the wall, we have carried out a numerical simulation using the COMSOL<sup>®</sup> software in considering a unit cell. To describe the change of state, the method of the equivalent heat capacity has been used. Paraffin has been chosen as PCM (melting temperature 24.5 °C). The influence of the nature and the volume fraction of the metal were determined. The case of honeycombs made of aluminum has been specifically treated.

**Keywords:** PCM, air conditioning of buildings, COMSOL<sup>®</sup>, honeycombs, size of cell, volume fraction.

---

\* Assistant professor, Department of Mechanical power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

## مقدمة

أظهرت الجدران الحاوية على مواد متغيرة الطور (PCM) أهمية استخدامها في تكييف الأبنية [1]. إلا أنّ مشكلتها الأساسية تكمن في الإيصالية الحرارية الضعيفة للمواد متغيرة الطور. لذلك فإنّه من الهام زيادة إيصاليته بما يسمح بتغير كامل في الطور خلال فترة زمنية توافق نهار. لقد تبين؛ من خلال محاولة أولى من أجل اختيار مواد قادرة على تحسين هذه الإيصالية؛ بأنّ المزوجة بين المادة متغيرة الطور مع مادة ذات إيصالية حرارية كبيرة والحصول على بنية مركبة مثل PCM/ رغوة معدنية أو PCM/ ألواح على شكل خلايا نحل مصنوعة من الألمنيوم تقدم أفضل الحلول [3] [2]. لكن هذا الحلّ يدرس المركب بالمجمل ولا يأخذ بعين الاعتبار الظواهر التي تحدث داخل الخلايا العنصرية (خلايا النحل).

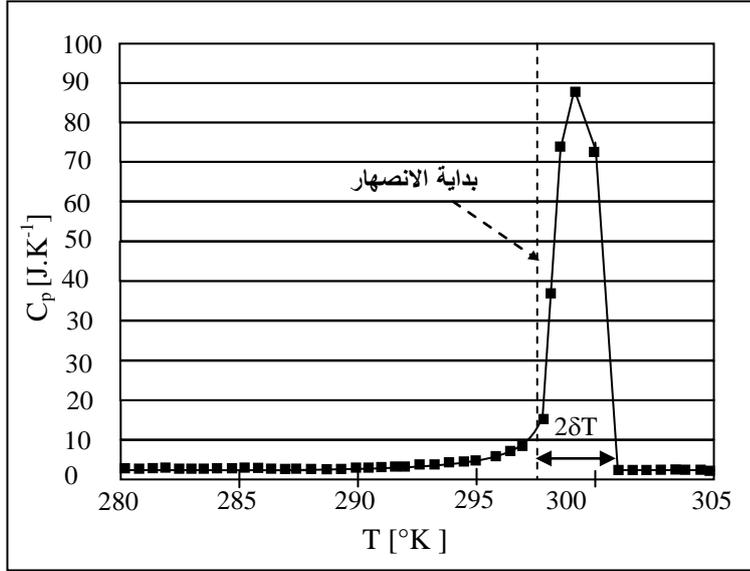
## أهمية البحث وأهدافه

إنّ عملية المزوجة بين هيكل معدني والمادة متغيرة الطور تُمكن من تحسين الإيصالية الحرارية، لكن تكمن المشكلة في تحديد الأبعاد المثالية للوح التي تسمح بانصهار كامل للمادة متغيرة الطور. إنّ الهدف من هذا البحث هو تعيين تأثير أبعاد الخلايا العنصرية التي سيتم احتواء المواد متغيرة الطور ضمنها وذلك من خلال محاكاة رقمية. سنهتم في بحثنا بالبنية المكوّنة من هيكل على شكل خلايا النحل يحوي المادة متغيرة الطور. وعلى الرّغم من أنّه يوجد العديد من الأبحاث التي أنجزت لدراسة سلوك المادة متغيرة الطور ضمن هذه البنية [4-6] إلاّ أنّه لا يوجد حتى الآن دراسة منشورة حول كيفية الحصول على أفضل أداء لها.

## طرائق البحث ومواده

من أجل تحديد الحجم المثالي لخلية تجريبية معدنية تحوي المادة متغيرة الطور بحيث تنصهر كامل الـ PCM، سنقوم بإجراء محاكاة رقمية لدراسة السلوك الحراري للخلية باستخدام البرنامج COMSOL<sup>®</sup> (وهو عبارة عن برنامج محاكاة رقمية يعتمد طريقة العناصر المنتهية، ويسمح بمحاكاة العديد من التطبيقات الفيزيائية والهندسية). تقوم المادة متغيرة الطور أثناء تغير الطور صلب/سائل بامتصاص الطاقة الحرارية وتقوم بتحريرها أثناء تغير الطور سائل/صلب. لذلك من أجل وصف تغير الطور، سنقوم باستخدام طريقة السعة الحرارية المكافئة. كما سنقوم بتعيين تأثير النسبة الحجمية لمعدن الخلية وتأثير نوع معدن الخلية على زمن انصهار المادة متغيرة الطور.

المادة متغيرة الطور المستخدمة هي البارافين الذي درجة حرارة انصهاره تساوي  $24,5^{\circ}\text{C}$  وقد تمّ قياس سعتها الحرارية بواسطة (DSC Differential Scanning Calorimetry) وهو عبارة عن جهاز موجود في المركز العلمي والتقني للأبنية في مدينة غرونوبل في فرنسا حيث تمّ التعاون مع هذا المركز لإنجاز بحثنا). يوضح الشكل 1 تغير السعة الحرارية المقاسة للمادة متغيرة الطور (البارافين)، حيث نلاحظ وجود ذروة حادة لحظة تغير الطور. وتمثل المساحة المحصورة ضمن الشكل الحرارة الكامنة  $L_m$ .



الشكل 1: تغيّر السعة الحرارية للمادة متغيرة الطور (البارافين) كتابع لدرجة الحرارة وحدث تغيّر الطور.

يمكن نمذجة منحنى السعة الحرارية الموضح على الشكل 1 بمساعدة العلاقة التالية:

$$C_p = C_{p_{solid}} + (C_{p_{liquid}} - C_{p_{solid}}) \cdot H \cdot D \cdot L_m \quad (1)$$

حيث النفاذية الحرارية  $D$  تساوي:

$$D = \frac{1}{\sqrt{\pi} \cdot dT} \exp\left(-\frac{(T - T_{trans})^2}{\Delta T^2}\right) \quad (2)$$

والحرارة الكامنة للبارافين تساوي وفق معطيات المصنّع:  $L_m = 2000 \text{ kJ/kg}$ .

$H$ : تابع يتعلق بدرجة الحرارة. إنّ خواص المادة تتغيّر بشكل فجائي عند السطح الفاصل سائل/صلب ممّا يسبب مشكلة عند المعالجة الرقمية بواسطة COMSOL. لكن يمكن أن نعيّر عن التغيّر الفجائي بواسطة تابع Heaviside  $h(x)$  والذي يُعرّف كما يلي (الشكل 2-a):

$$\left. \begin{array}{l} x < 0 \quad \text{من أجل} \quad h(x) = 0 \\ x \geq 0 \quad \text{من أجل} \quad h(x) = 1 \end{array} \right\} \quad (3)$$

بأخذ  $x = T - T_{trans}$  كمتحول، يصبح المنحني كما هو موضح على الشكل 2-b. أو، كتابع لـ  $T$  (الشكل 2-c). حيث أنّه بأخذ  $T - T_{trans}$  كمتحول يكون لدينا:

$$\left. \begin{array}{l} T - T_{trans} < 0 \quad \text{من أجل} \quad h_{T-T_{trans}} = 0 \\ T - T_{trans} \geq 0 \quad \text{من أجل} \quad h_{T-T_{trans}} = 1 \end{array} \right\} \quad (4)$$

بما أنّ التغيّر المفاجئ  $T - T_{trans} = 0$  يسبب مشكلة في البرنامج الرياضي، فإنّه من أجل هذه المشكلة يمكن استخدام تابع معدّل (smoothed function) ضمن المجال  $[T_{trans} - \delta T, T_{trans} + \delta T]$ ، يُسمى هذا التابع في COMSOL بـ  $H$  (الشكلين 2-d و 2-e)، ومن أجل استخدامه من خلال COMSOL، فإنّه يتمّ استخدام التابع:

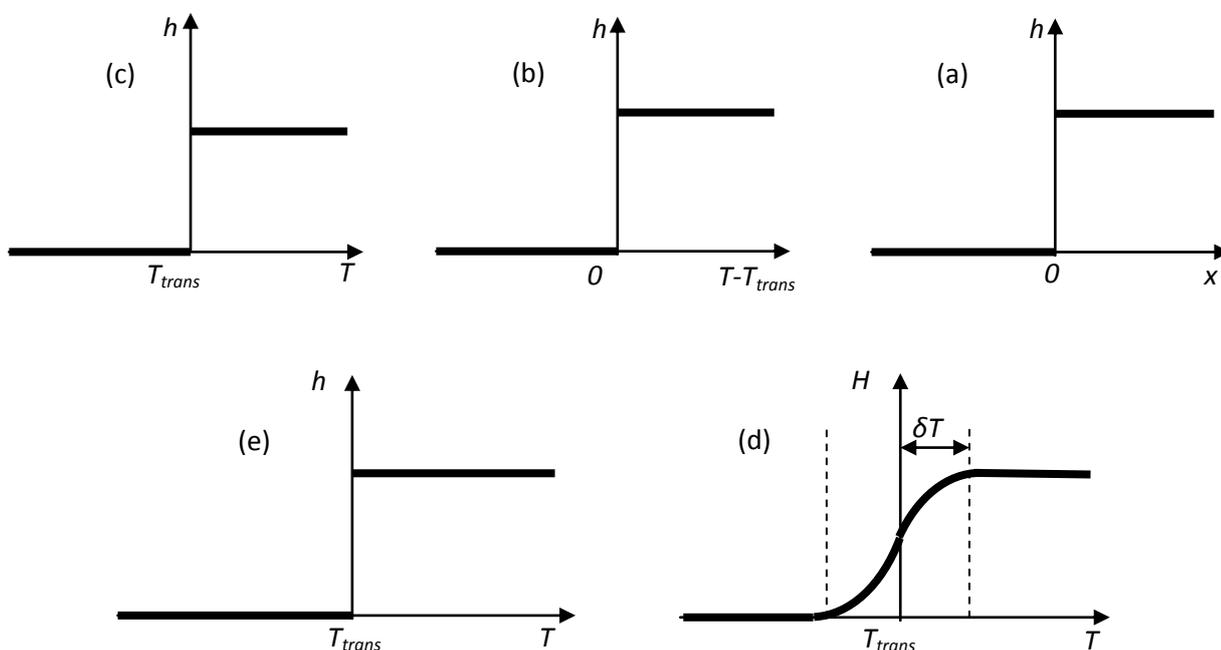
$$H = flc1 hs (x, SCALE) \quad (5)$$

حيث يسمح هذا التابع بالانتقال بشكل تدريجي من القيمة الموافقة لـ  $x = 0$  إلى القيمة الموافقة لـ  $x \geq 0$  ضمن المجال:

$$-SCALE < x < +SCALE \quad (6)$$

إذاً  $hs$  تعني:  $h$  smoothed. وهذا التابع محتوى ضمن أساس البرنامج واستخدامه يتطلب فقط تعيين القيم عند  $x$  وعند  $SCALE$ .

في حالتنا  $x = T - T_{trans}$ ، و  $\delta T$  يتم استخراجها من منحني  $C_p$  حيث تكون معطاة  $2\delta T$  كما هو موضح على مخطط ( $C_p$  الشكل 1).



الشكل 2: مقارنة بين التابع Heaviside والتابع  $H = flc1 hs$  المعرف من قبل البرنامج COMSOL (حيث  $flc1 hs$  is a smoothed Heaviside function).

يُكتب التابع  $H$  في حالتنا كما يلي:

$$H = flc1 hs (T - T_{trans}, \delta T) \quad (7)$$

حيث  $T$  هي درجة حرارة العينة، و  $T_{trans}$  هي درجة حرارة تغير الطور صلب/سائل، و  $\delta T$  تحدد مجال تغير الطور بين صلب وسائل. حيث تتغير الخواص الفيزيائية ضمن مجال تغير الطور (صلب - سائل) للكتلة الحجمية  $\rho$  والسعة الحرارية  $C_p$  والإيصالية الحرارية  $\lambda$  بشكل تدريجي من القيمة الموافقة للطور الصلب إلى القيمة الموافقة للطور السائل وبالعكس عندما تتغير درجة الحرارة. لذلك نقوم بتعيينهم كما يلي:

$$\rho = \rho_{solide} + (\rho_{liquide} + \rho_{solide}) \cdot H \quad (8)$$

$$\lambda = \lambda_{solide} + (\lambda_{liquide} - \lambda_{solide}) \cdot H \quad (9)$$

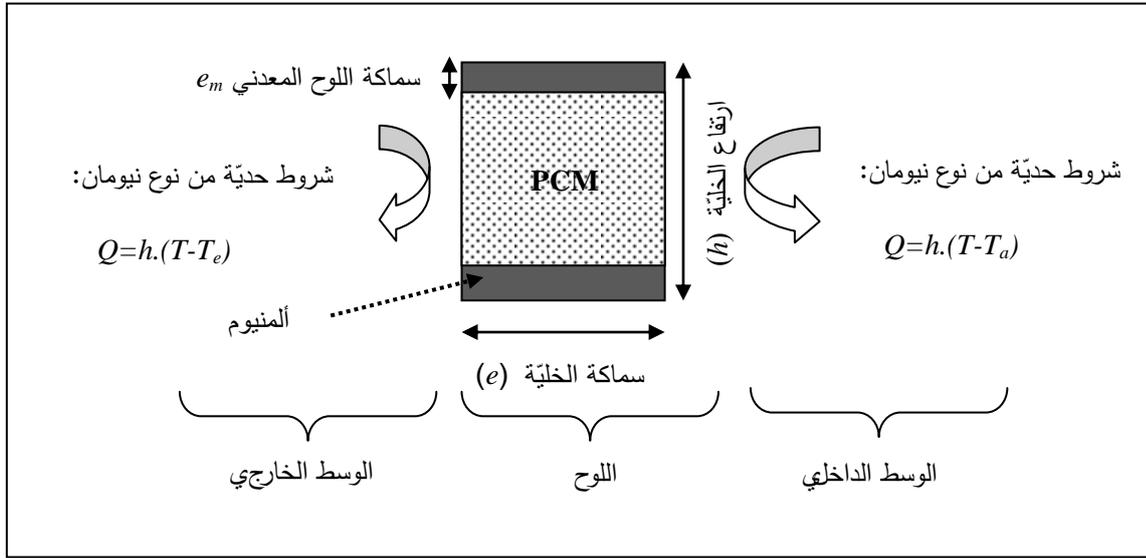
$$C_p = C_{p\ solide} + (C_{p\ liquide} - C_{p\ solide}) \cdot H \cdot D \cdot L_m \quad (10)$$

يعطي الجدول 1 الخواص الفيزيائية للمادة متغيرة الطور وللألومنيوم والفلواذ والبيتون.

الجدول 1: الخواص الفيزيائية لكل من المادة متغيرة الطور المستخدمة في الدراسة ولألومنيوم والفولاذ والبيتون.

بارافين صلب	بارافين سائل	ألومنيوم	فولاذ	بيتون
2600	2300	900	440	1050
789	763	2700	7850	2400
0,193	0,150	200	26	1,75
[J.kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]				
[kg.m <sup>-3</sup> ]				
[W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]				

من أجل الدراسة، قمنا بنمذجة خلية عنصرية ثنائية البعد 2D موضحة على الشكل 3. الخلية موجودة ضمن لوح سماكته  $e$  وسماكة الهيكل المعدني (لخلية النحل) تساوي  $e_m$ . كما نوضح على الشكل 3 الشروط الحدية للمشكلة. اعتبرنا بداية أن معدن الخلية عبارة عن الألمنيوم الذي خواصه موضحة في الجدول 1.



إنّ الشروط الحدية على السطح الفاصل للـ PCM عبارة عن شروط حدية نوع نيومان حيث كثافة التدفق الحراري المتبادل عند السطح تُعطى بالعلاقة:

$$Q = h(T - T_e) \quad (11)$$

حيث  $T_e$  هي درجة الحرارة الخارجية ولقد اعتبرناها تساوي 305K من الجهة الداخلية:

$$Q = h(T - T_a) \quad (12)$$

حيث  $T_a$  هي درجة حرارة الوسط الداخلي وقد اعتبرناها 293K.

إنّ التدفقات الحرارية على جوانب الخلية العنصرية تكون معدومة كون هذه الخلية تجاور خلايا أخرى لها نفس الشروط (حيث تكون التدفقات الحرارية التي تتبادلها الخلية مع الخلايا المجاورة لها متعكسة بالإشارة وبالتالي يكون مجموعها يساوي الصفر).

## النتائج والمناقشة

قمنا بإجراء المحاكاة الرقمية على الخلية المُعتَبَرة باعتبار أنّ درجة الحرارة الخارجية ثابتة وذلك بهدف الحصول على قيمة تقريبية للزمن اللازم لانصهار كامل لل PCM المحتواة ضمن الخلية كتابع لحجمها. بداية، فرضنا أنّ درجة حرارة كلّ من المادة متغيّرة الطور والألمنيوم مساوية لـ 293K. زمن الانصهار النهائي يأخذ بعين الاعتبار الزمن اللازم لزيادة درجة حرارة ال PCM من 293K إلى 297,5K ومن ثمّ الزمن اللازم لانصهار كامل المادة متغيّرة الطور.

إنّ زمن الانصهار الفعلي هو عبارة عن فرق الزمن بين نهاية الانصهار وبداية الانصهار، حيث أنّه لا يأخذ بعين الاعتبار إلاّ الفترة الزمنية اللازمة لل PCM حتى تغيّر من طورها.

### 1. تأثير النسبة الحجمية للمعدن:

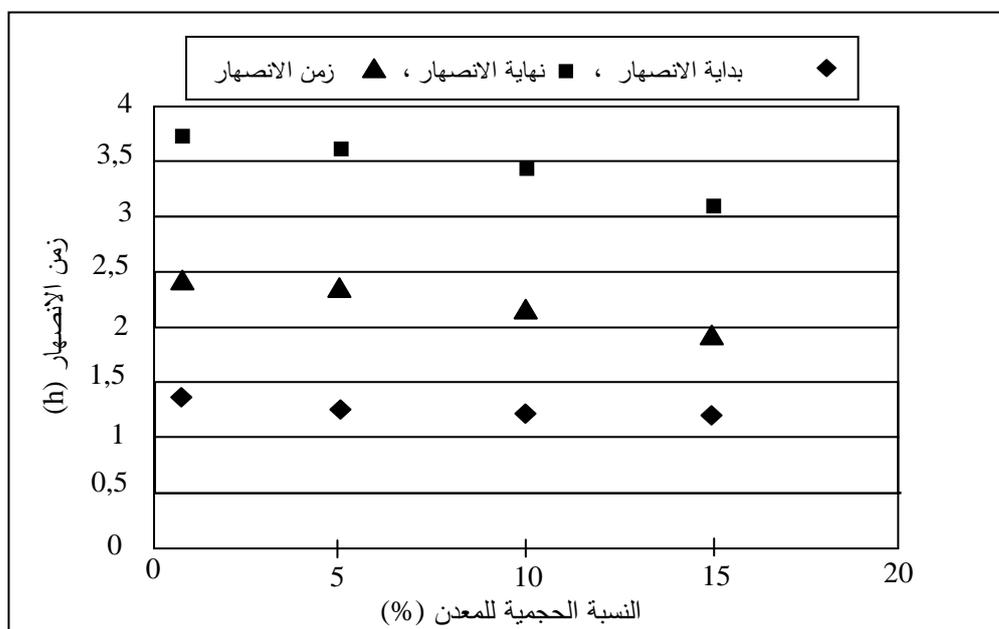
النسبة الحجمية للمعدن  $f$  هي نسبة حجم المعدن على الحجم الكلي، ويمكن أن نحسبها من أجل الخلية من

العلاقة:

$$f = \frac{e_m}{h - e_m} \quad (13)$$

فمثلاً من أجل  $h=5\text{mm}$  يكون  $f=0,01\%=1\%$  من أجل لوح سماكته حوالي  $0,05\text{mm}$ .

من أجل تحديد تأثير النسبة الحجمية للمعدن على زمن انصهار المادة متغيّرة الطور، قمنا بأخذ قيم مختلفة لسماكة اللوح المعدني  $e_m$  (الشكل 3) مع المحافظة على الأبعاد الأخرى للخلية ثابتة. تمّ تلخيص نتائج المحاكاة على الشكل 4 من أجل خلايا سماكتها  $e=5\text{mm}$  وارتفاعها  $h=5\text{mm}$ .



الشكل 4: تأثير النسبة الحجمية للمعدن على زمن انصهار ال PCM من أجل خلايا سماكتها  $5\text{mm}$  وارتفاعها  $5\text{mm}$ .

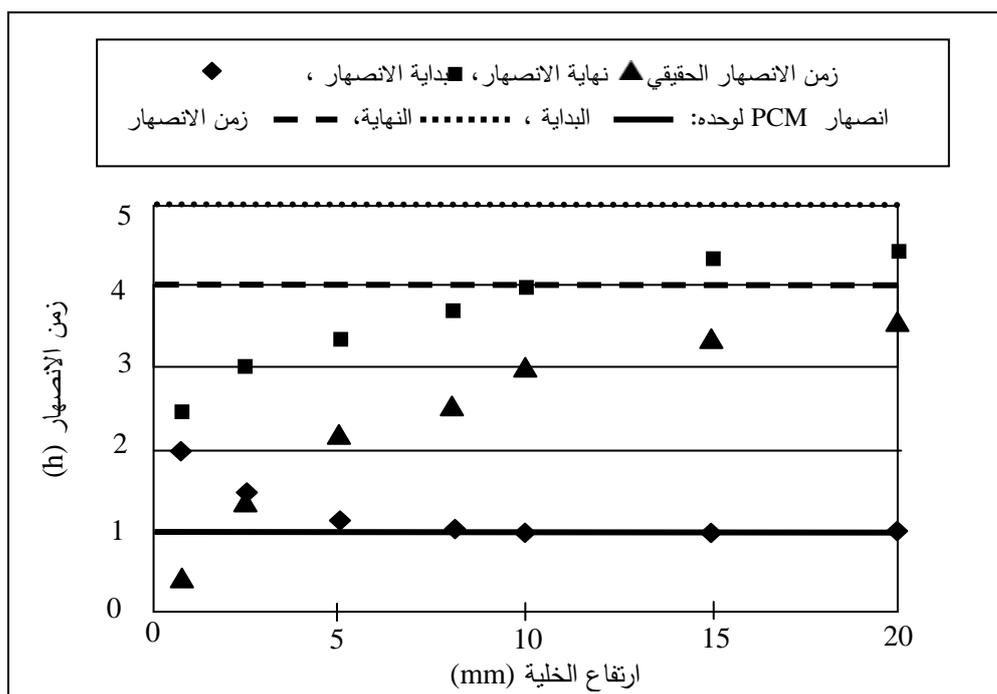
نلاحظ من الشكل 4 أنه من أجل نسب حجمية تتراوح بين 1% حتى 15% يتغير الزمن الفعلي لانصهار الـ PCM من 2,4h إلى 1,9h، وبما أن النسبة الحجمية للخلية التي على شكل خلية نحل هي من مرتبة 5%، فإنه يمكننا اعتبار أنه ليس للنسبة الحجمية أي تأثير ذي أهمية على زمن انصهار الـ PCM.

## 2. تأثير ارتفاع الخلايا المعدنية:

في الخطوة التالية، قمنا بدراسة تأثير ارتفاع الخلية المعدنية على زمن انصهار الـ PCM. توضح الأشكال 5 و6 و7 كيفية تغير زمن انصهار الـ PCM كتابع لارتفاع الخلايا وذلك من أجل سماكات مختلفة للوح. كما نوضح على كل من هذه الأشكال (الخطوط الأفقية المستمرة والمتقطعة والمنقطة) أزمنة الانصهار الموافقة للألواح المملوءة بالمادة متغيرة الطور من دون هيكل معدني.

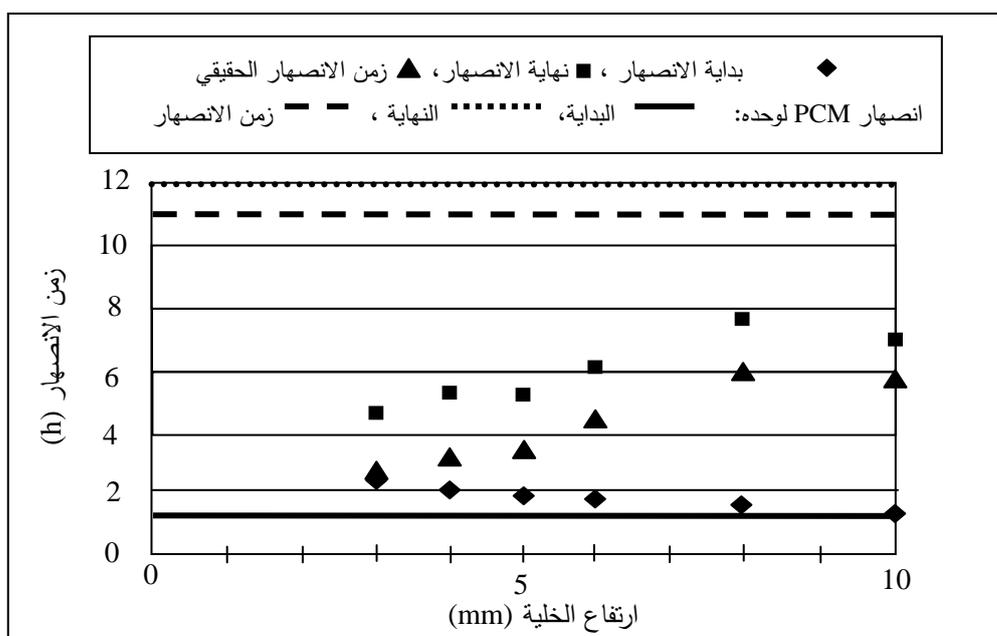
نلاحظ أننا في البداية نحصل على أزمنة انصهار فعلية تبلغ عدة ساعات، ويبدو ذلك واقعياً تماماً. كما نستطيع أن نلاحظ أن زمن الانصهار نفسه يزداد تبعاً لسماكة اللوح. فمثلاً من أجل خلية ارتفاعها 8mm، فإن الـ PCM يحتاج إلى 2h45 حتى ينصهر عندما تكون سماكة اللوح 5mm (الشكل 5)، ويحتاج 6h من أجل ألواح سماكتها 8mm (الشكل 6)، و 8h من أجل ألواح ذات سماكة قدرها 10mm (الشكل 7). إذا تلعب السماكة دوراً رئيسياً في التأثير على زمن انصهار الـ PCM.

نلاحظ أن استعمال خلايا ذات ارتفاع أقل من 5mm يؤخر بشكل ملحوظ بداية زمن انصهار الـ PCM من أجل ألواح سماكتها 5mm (الشكل 5). نلاحظ أيضاً أن زمن بداية الانصهار يتناقص تبعاً لارتفاع الخلايا، حيث ينتج تناقص شديد في زمن بداية الانصهار من أجل خلايا ارتفاعها أقل من 5mm. ضمن نفس الشروط، فإن انصهار الـ PCM لوحده (انصهار فعلي) يتحقق خلال 4h، وخلال 3h30 عند تواجده ضمن خلايا ارتفاعها 20mm، وخلال 2h20 من أجل خلايا 5mm و 30min للخلايا 1mm. عندما يكون ارتفاع الخلية أكبر من 30mm، فإن درجة الحرارة لاتكون متجانسة بالفعل ضمن كامل الـ PCM كما لو أنه لا يوجد هيكل معدني (أي يوجد تشابه كبير مع منحنيات انصهار الـ PCM لوحده عندما لا يوجد هيكل معدني). إذا يبدو أنه يجب استخدام هيكل سماكته حوالي 5mm حتى يتم التمكن من الحصول على توافق جيد بين زمن الانصهار وتجانس درجة الحرارة. حاولنا تعيين ارتفاع الخلايا التي يجب استخدامها من أجل ألواح ذات سماكة أكبر، إن ميزة استخدام ألواح ذات سماكة أكبر من 5mm (وهي السماكة التي سنعتبرها سماكة مرجعية) هي أنها تسمح بتوزيع نفس كمية الـ PCM على مساحات أقل، وبالتالي فإنه من غير المفيد ملء كامل الألواح بالمادة متغيرة الطور وإنما يكفي عدة ألواح.



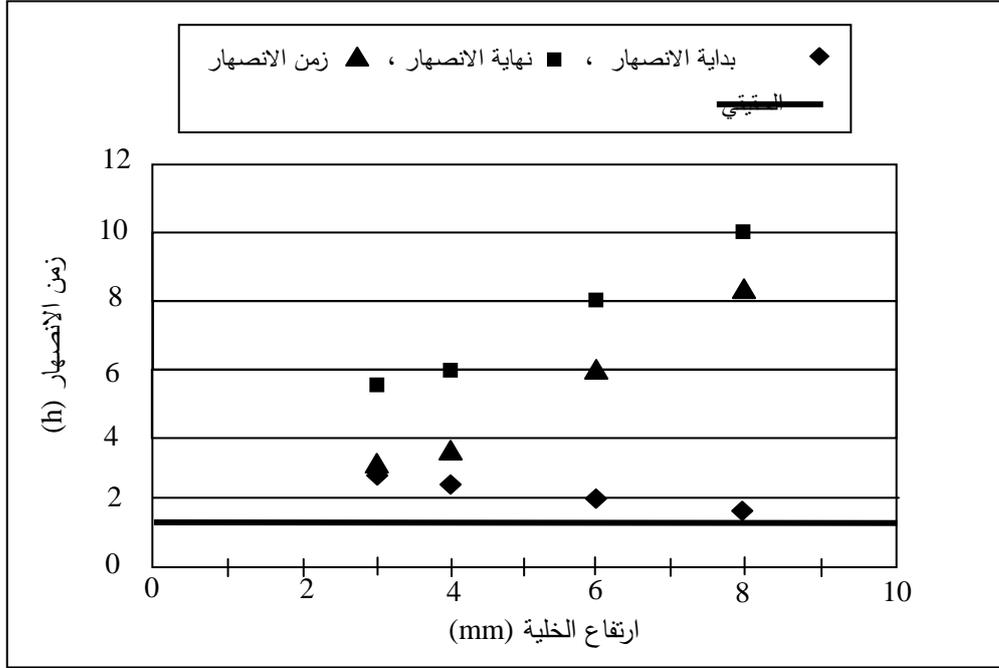
الشكل 5: تأثير ارتفاع الخلية على زمن انصهار الـ PCM من أجل ألواح سماكتها 5 mm.

سنأخذ كقيمة مرجعية زمن الانصهار الفعلي للوح مكون من المادة متغيرة الطور لوحدها (من دون هيكل معدني) سماكته 5mm والذي يساوي 4h (الشكل 5، الخط الأفقي المتقطع). من أجل ألواح سماكتها 8mm وخلايا ارتفاعها من 3mm إلى 5mm فإن زمن الانصهار الفعلي يبلغ حوالي 3h (الشكل 6).



الشكل 6: تأثير ارتفاع الخلايا على زمن انصهار الـ PCM من أجل ألواح سماكتها 8mm.

عندما تكون سماكة اللوح كبيرة جداً فإن الـ PCM لوحدها قد لا تستطيع أن تنصهر بالكامل ضمن شروطنا المعتبرة في المحاكاة، وهذه هي حالة الألواح التي سماكتها 10mm. إن إضافة هيكل معدني يسمح في هذه الحالة بانصهار كامل للمادة متغيرة الطور. فمن أجل الحصول على زمن انصهار قدره حوالي 3h، فإنه يتوجب استخدام خلايا ارتفاعها من 3mm إلى 4mm (الشكل 7).



الشكل 7: تأثير ارتفاع الخلايا على زمن انصهار الـ PCM من أجل ألواح سماكتها 10 mm. لم نضع إشارة على زمن انصهار المادة متغيرة الطور كونها لا تنصهر بالكامل من أجل هذه السماكة.

إن استخدام خلايا ارتفاعها بحدود 5mm يبدو أنه اختيار موفق حيث تكون درجة الحرارة متجانسة داخل المادة متغيرة الطور، كما أن زمن الانصهار حوالي 3h؛ يبقى قريباً من زمن الانصهار المرجعي.

### 3- تأثير نوع مادة بنية الخلية:

قمنا بإجراء النمذجة باستبدال الألمنيوم بالفولاذ. فعلى الرغم من أن الخواص الحرارية للألمنيوم أفضل (وخاصة أن عامل النفاذية الحرارية له أكبر بحوالي 10 مرات مقارنة مع الفولاذ) إلا أننا حصلنا على منحنيات متطابقة في الحالتين، أي أن أزمنة الانصهار متقاربة ودرجة الحرارة متجانسة ضمن المادة متغيرة الطور، مما يدل على أن نوع معدن الخلية لأهمية له.

كما أنه باستبدال الألمنيوم بالبيتون (الذي نفاذيته الحرارية قريبة من النفاذية الحرارية للبارافين) وجدنا أن سلوك البيتون مشابه لسلوك المادة متغيرة الطور لوحدها، أي أن البيتون لا يسمح بمجانسة درجة الحرارة ضمن المادة متغيرة الطور وأزمنة الانصهار أطول.

## الاستنتاجات والتوصيات:

قمنا في هذه الدراسة بإجراء محاكاة رقمية من أجل حساب أداء لوح مملوء بالمادة متغيرة الطور. وذلك بهدف الحصول على تصوّر عن تغيّر زمن انصهار الـ PCM كتابع لأبعاد الخلايا، وللنسبة الحجمية للمعدن، ولطبيعة معدن اللوح.

المادة متغيرة الطور التي استخدمناها هي البارافين ذو درجة حرارة انصهار تساوي  $24,5^{\circ}\text{C}$ . قمنا من أجل وصف تغيّر الطور باستخدام طريقة السعة الحرارية المكافئة، حيث تمّ قياس السعة الحرارية للبارافين بواسطة DSC. اللوح الذي يحوي المادة متغيرة الطور له شكل خلية نحل. وافترضنا في المقارنة أنّ درجات الحرارة المحيطة باللوح ثابتة.

إنّ إضافة هيكل معدني يسمح بانصهار كامل للمادة متغيرة الطور وبمجانسة درجة الحرارة داخلها، لكن المساوي التي قد تظهر؛ في بعض الحالات؛ هي حدوث انصهار سريع جداً للمادة متغيرة الطور. لقد وجدنا من الدراسة أنّ:

- الخلايا التي ارتفاعها بحدود 5mm تُمكن من الحصول على توافق جيّد بين زمن الانصهار وتجانس درجة الحرارة، حيث يكون زمن الانصهار حوالي 3h من أجل درجة حرارة خارجية تساوي  $32^{\circ}\text{C}$ .  
- للسماكة دوراً رئيسياً في التأثير على زمن انصهار الـ PCM، حيث يبلغ زمن الانصهار الفعلي للوح سماكته 5mm مكون من المادة متغيرة الطور لوحدها من دون هيكل معدني 4h، أمّا من أجل ألواح سماكته 8mm وخلايا سماكته من 3mm إلى 5mm فإنّه يصبح حوالي 3h.

إنّ استخدام ألواح ذات سماكة أكبر من 8mm يسمح لنا باستخدام عدد أقلّ من الألواح التي ستحوي المادة متغيرة الطور ولكن في هذه الحالة يجب جعل ارتفاع الخلايا أقلّ (3-4) mm وذلك حتى تتمكن المادة متغيرة الطور من أن تنصهر بالكامل. أي أنّه لا يوجد أي ميزة من استعمال ألواح أكثر سماكة لأنّه لدينا نفس مساحة السطح للوح إلا أنّها ستصبح أثقل. لذلك نعتبر أنّ سماكة 5mm حلاً جيّداً.

- ليس للنسبة الحجمية للمعدن المستخدم أي تأثير ذي أهمية على زمن انصهار الـ PCM، وكذلك لأهمية لنوع المعدن.

يجب متابعة البحث وإجراء الدراسة من أجل شروط محيطية أكثر واقعية وذلك من خلال أخذ درجات حرارة متغيرة خلال اليوم.

## المراجع:

- 1 – KHUDAIR. A. M, FARID. M.M, *A review on energy conservation in building applications with thermal storage by latent heat using phase change materials*. Energy conversion and management, Volume 45, 2004, 263 – 275.
- 2 –HONG. S.T, HERLING. D.R, *Effect of surface area density of aluminum foams on thermal conductivity of aluminum-foam-phase change material composites*. Advanced Engineering Materials, Volume 9, 2007, 554-557.
- 3 – HONG. S.T, HERLING. D.R, *Open-cell aluminum foams filled with phase change materials as compact heat sinks*, Scripta Materialia, Volume 55, 2006, 887-890.

4 –HASSE. C, GRENET. M, BONTEMPS. A, DENDIEVEL. R, SALLEE. H, *Realisation, test and modelling of honeycomb wallboards containing a Phase Change Material*. Energy and Buildings, Volume 43, Issue 1, January 2011, Pages 232-238

5 – LAI. C, HOKOI. SM, *Thermal performance of an aluminum honeycomb wallboard incorporating microencapsulated PCM*. Energy and Building. Vol. 73, 2014, Pages 37-47.

6 – BIAO. X, WEN-LONG. C, ZHI-MING. X, *Studies on the effect of shape-stabilized PCM filled aluminum honeycomb composite material on thermal control*, International Journal of Heat and Mass Transfer 91, 2015, 135–143