مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (33) العدد (3) 2011
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (33) No. (3) 2011

تأثير استخدام المواد متغيرة الطور(PCM) في الجدران والسقف في الأحمال الحرارية ودرجة الحرارة الداخلية في الأبنية

الدكتور رامي جورج*
محمد ياسين**

(تاريخ الإيداع 22 / 2 / 2011. قُبِل للنشر في 31/ 5 / 2011)

□ملخّص □

يهدف البحث إلى دراسة تأثير استخدام المواد متغيرة الطور (PCM) في الجدران والسقف في السلوك الحراري للبناء باستخدام برنامج المحاكاة TRNSYS عند الشروط المناخية لمدينة اللاذقية.

أظهر البحث عند استخدام المادة متغيرة الطور على الجدران والسقف الخارجي معاً انخفاض الحمل الحراري السنوي مع زيادة سماكة المادة متغيرة الطور، ومقدار الانخفاض يتعلق بنوع المادة، حيث يكون مقدار الانخفاض 31.75[%] باستخدام المادة C16، بينما يكون مقدار الانخفاض [%] 37.35 باستخدام المادة RT27 عند السماكة نفسها وهي 3[cm].

أظهر البحث حدوث انخفاض إضافي في الحمل السنوي عند تزويد السقف بالمادة متغيرة الطور، بالإضافة إلى الجدران، ويتعلق ذلك بوضعية السقف، فعند استخدام المادة RT27 بسماكة 3[cm] يكون مقدار الفرق في انخفاض الحمل السنوي عند استخدامها على الجدران فقط أو على الجدران والسقف معاً حوالي 9[%] من أجل سقف خارجي، بينما يكون مقدار الانخفاض حوالي 12[%] عندما يكون السقفُ داخليّاً. وهذا يؤدي بدوره إلى تقليل استهلاك الطاقة التقليدية المستخدمة في تغطية الأحمال الحرارية.

إن استخدام المواد متغيرة الطور أدى إلى انخفاض درجة حرارة الهواء الداخلية نهاراً وارتفاعها ليلاً، وهذا أدى إلى تقليل التأرجح في درجات الحرارة بين النهار والليل، مما حسّن الشعور بالراحة الحرارية لسكان البناء.

الكلمات المفتاحية: مواد متغيرة الطور، تخزين الطاقة الحرارية، برنامج محاكاة TRNSYS.

* أستاذ مساعد – قسم هندسة القوى الميكانيكية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة تشرين– اللاذقية– سورية.
** قائم بالأعمال – قسم هندسة القوى الميكانيكية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة تشرين– اللاذقية– سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (33) العدد (3) 2011
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (33) No. (3) 2011

Influence of Using Phase Change Materials (PCM) in Walls and Ceiling on Thermal Loads and Interior Temperature of Buildings

Dr. Rami George*
Mohammed Yaseen**

(Received 22 / 2 / 2011. Accepted 31 / 5 / 2011)

□ ABSTRACT □

The objective of this investigation is to study the influence of application of phase change materials (PCM) on the thermal behavior of the building using TRNSYS simulation program for the weather conditions of Lattakia.

This investigation shows that the yearly heat load decreases with increasing the phase change material thickness and depends on the type of phase change material. Using 3[cm] thickness of C16 phase change material results in the reduction of yearly heat load about 31.75[%], whereas using RT27 results in a reduction of about 37.35[%].

This investigation shows the addition reduction in yearly heat load with adding the phase change material to ceiling depending on ceiling type: for external ceiling the addition reduction is about 9[%], whereas for internal ceiling it is about 12[%], which in return reduces the consumption of conventional energy required to cover this load.

Using phase change material results in decreasing daytime temperature and increasing night temperature. These reduce the indoor temperatures fluctuations in the daytime and at night and improve the thermal comfort for residences.

Key words: Phase change material (PCM), Thermal energy storage, TRNSYS program

***Assistant Professor, Mechanical Power Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**
****Academic Assistant, Mechanical Power Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.**

مقدمة:

إن تغير المناخ وزيادة الأحمال الحرارية في الأبنية أدى إلى الطلب المتزايد في استهلاك الطاقة، لذلك يعدّ استخدام المواد متغيرة الطور في مكونات البناء واحداً من الاستخدامات المهمّة للمواد متغيرة الطور، من أجل تخفيض الأحمال الحرارية في الأبنية، حيث يتم استخدامها لغرضين: الأول لتخزين الطاقة الشمسية المتقطعة لاستخدامها في تدفئة الأبنية في أوقات الحاجة إليها، والثاني لتقليل أحمال تبريد المبنى، والتقليل من أحمال الذروة، وبالتالي التقليل من استطاعة التجهيزات الميكانيكية اللازمة. بالإضافة لتأمينها الارتياح الحراري في الأبنية، الذي يعدّ أهم الأهداف التي يسعى إليها التصميم الحراري للبناء.

أجريت الكثير من الأبحاث بهدف تحسين الشعور بالراحة الحرارية ضمن الأبنية باستخدام المواد متغيرة الطور. فقد تمّ استخدام مواد متغيرة في مجاري نظام التهوية الميكانيكي [1] و[2] و[3] و[4] أو في المبادلات الحرارية [5] من أجل تأمين التبريد للبناء عن طريق تخزين البرودة ليلاً من الوسط الخارجي، وتحريرها نهاراً ضمن البناء. وهناك من استخدم المواد متغيرة الطور في اسطوانات موضوعة ضمن جدار البناء المصنوع من الآجر [6] و[7]، كما أجريت أبحاث لاستخدام مواد متغيرة الطور من أجل تخفيض أحمال التدفئة بأساليب مختلفة [8] و[9] و[10] و[11] و[12]. كما تم دراسة استخدام مواد متغيرة الطور موضوعة بكبسولات وممزوجة مع الإسمنت [13] و[14].

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في تخزين الطاقة الحرارية الكامنة باستخدام المواد متغيرة الطور(PCM) والتي تُعَدُّ من الطرق المهمة لتخزين الطاقة، مقارنة بالتخزين الحراري المحسوس عبر مكونات البناء. حيث تقوم المواد متغيرة الطور بتخزين كميات كبيرة من الحرارة بواحدة الحجم بالإضافة إلى أن تخزين وطرحها الحرارة من المواد متغيرة الطور تتم ضمن مجال درجات حرارة صغير، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في تدفئة الأبنية وتبريدها.

يكمن الهدف من هذا البحث في تخزين الطاقة الحرارية عن طريق زيادة السعة الحرارية للبناء، باستخدام المواد متغيرة الطور ضمن مكونات البناء، من أجل تخفيض التقلبات المستمرة في درجة الحرارة الداخلية، وبالتالي تحسين الشعور بالراحة الحرارية للقاطنين في البناء. بالإضافة إلى تخفيض أحمال التدفئة والتبريد والذي يؤدي بدوره إلى تقليل استهلاك الطاقة التقليدية المستخدمة في تغطية هذه الأحمال.

طرائق البحث ومواده:

تم استخدام برنامج المحاكاة TRNSYS [15] الذي يعدّ أكثر برامج المحاكاة استخداماً وشيوعاً، لتقييم السلوك الحراري للأبنية، حيث يأخذ بالحسبان تأثير متغيرات متعددة كالمعطيات المناخية ومكونات البناء واتجاهه، بالإضافة إلى كمية المادة متغيرة الطور المستخدمة ونوعها، حيث يقوم البرنامج بإجراء محاكاة للسلوك الحراري للبناء خلال فترة زمنية محددة وفقاً للمتغيرات السابقة، وفي نهاية المحاكاة نستطيع معرفة مقدار الانخفاض في الأحمال الحرارية للبناء، وأيضاً معرفة مقدار تقليل التقلبات في درجة الحرارة الداخلية.

تم إجراء المحاكاة على ثلاث غرف متشابهة، أبعاد كل منها [m](3×4×5)، وتحتوي كل منها على نافذة أبعادها [m](2×1) على الجدار الجنوبي، كما تحتوي كل منها على باب أبعاده [m](2×1) على الجدار الشرقي كما

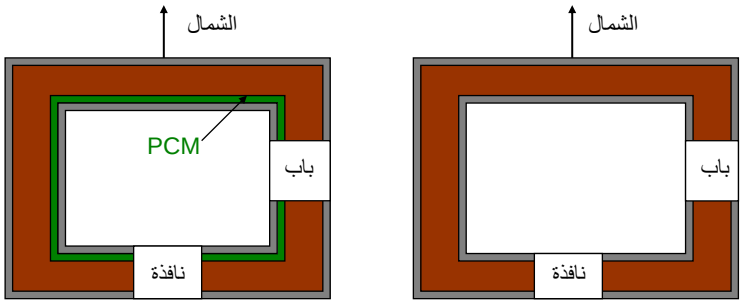
هو موضح بالشكل (1)، حيث يتكون الجدار من توريقة إسمنتية من الخارج والداخل سماكتها 1.5[cm] ومن بلوك مفرغ سماكته 15[cm]. (درجة الحرارة الداخلية التصميمية 24°C صيفاً و20°C شتاء).

- الغرفة الأولى (المرجعية) جدرانها والسقف غير مزودة بمادة متغيرة الطور.
- الغرفة الثانية مزودة بمادة متغيرة الطور على السطوح الداخلية للجدران فقط.
- الغرفة الثالثة مزودة بمادة متغيرة الطور على السطوح الداخلية للجدران والسقف معاً.

لقد تم إجراء مقارنة نتائج المحاكاة بين الحالات الثلاث، حيث تم استخدام مدة زمنية مقدارها 10 دقائق خطوةً للمحاكاة. لقد تم إجراء المحاكاة من أجل مادتين متغيرتي الطور (PCM) من البارافينات RT27 و C16 خواصها الفيزيائية الحرارية موضحة في الجدول (1) [16].

الجدول (1) الخواص الفيزيائية الحرارية للمواد متغيرة الطور المستخدمة في البحث

	C16	RT27
درجة حرارة الانصهار	(17–19) [°C]	(25–28) [°C]
الحرارة الكامنة للانصهار	236 [kJ/kg]	180 [kJ/kg]
عامل الإيصالية	λ= 0.17[W/m°C]	λ= 0.2 [W/m°C]
السعة الحرارية	$C_{p,solid}$=1.65 [kJ/kg°C] $C_{p,liquid}$=2.1 [kJ/kg°C]	$C_{p,\ solid}$=1.8 [kJ/kg°C] $C_{p,\ liquid}$=2.4 [kJ/kg°C]

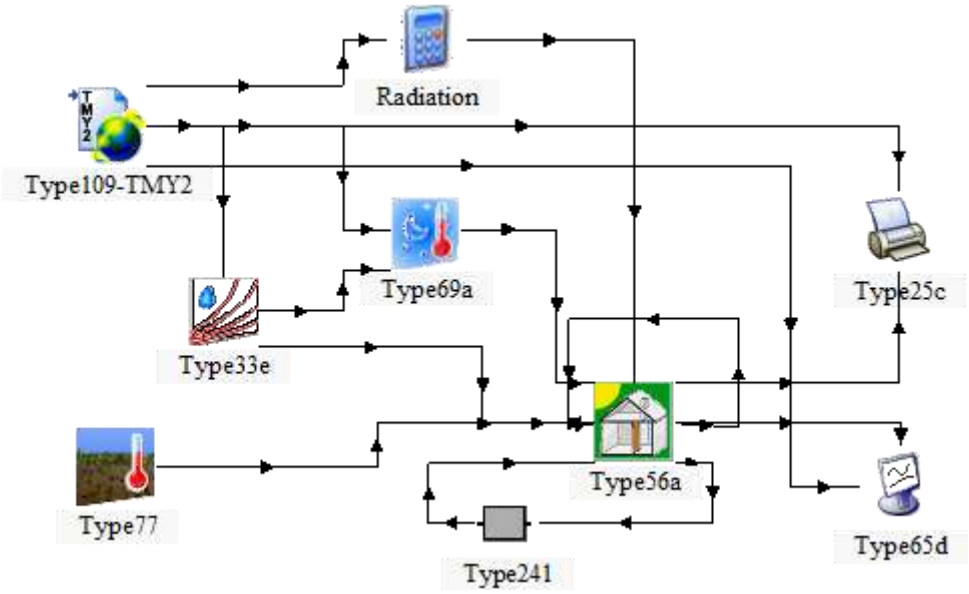


الشكل (1) مخطط الغرفتين الأولى دون PCM (غرفة مقارنة) والثانية مع PCM

يبين الشكل (2) مخططاً لمكونات النظام وفق برنامج المحاكاة TRNSYS الخاص بالبناء المدروس، ورقم كل مكون، وعملية ربط هذه المكونات مع بعضها ببعض، من أجل محاكاة السلوك الحراري للبناء. إن كل مكون هو عبارة عن برنامج جزئي يدعى عادة Type، ويعرّف كل Type برقم مميز يرمز إلى وظيفة المكون. إن المكون الرئيسي في نظام المحاكاة TRNSYS الخاص بالبناء هو Type56a، ويرمز إلى البناء متعدد المناطق الحرارية (Multi–Zone building)، ويتم فيه إنشاء البناء المدروس وإدخال أبعاد وخواص مكوناته، والمكون Type241 يرمز إلى المادة متغيرة الطور، حيث يتم فيه تغيير الخواص الحرارية للمادة متغيرة الطور المدروسة، والمكون Type69a يرمز إلى حساب درجة حرارة السماء، والمكون Type33e يرمز إلى حساب الرطوبة، والمكون Type25c

يرمز إلى الطابعة، والمكون Type65d يرمز إلى الراسم لإظهار النتائج التي يتم الحصول عليها من البرنامج بعد إدخال الثوابت والمتغيرات المتعلقة بكل مكون.

تم الحصول على قيم الإشعاع الشمسي اللحظي الساقط على سطح أفقي، والمعطيات المناخية للمنطقة المدروسة، باستخدام برنامج Meteonorm [17]. حيث يتم الحصول على ملف المعطيات المناخية بالتنسيق المعياري TMY الذي تتم قراءته من قبل برنامج TRNSYS ، باستخدام مكون (Type109-TMY2)، الذي يقوم بحساب شدة الإشعاع الشمسي الساقط على جدران البناء.

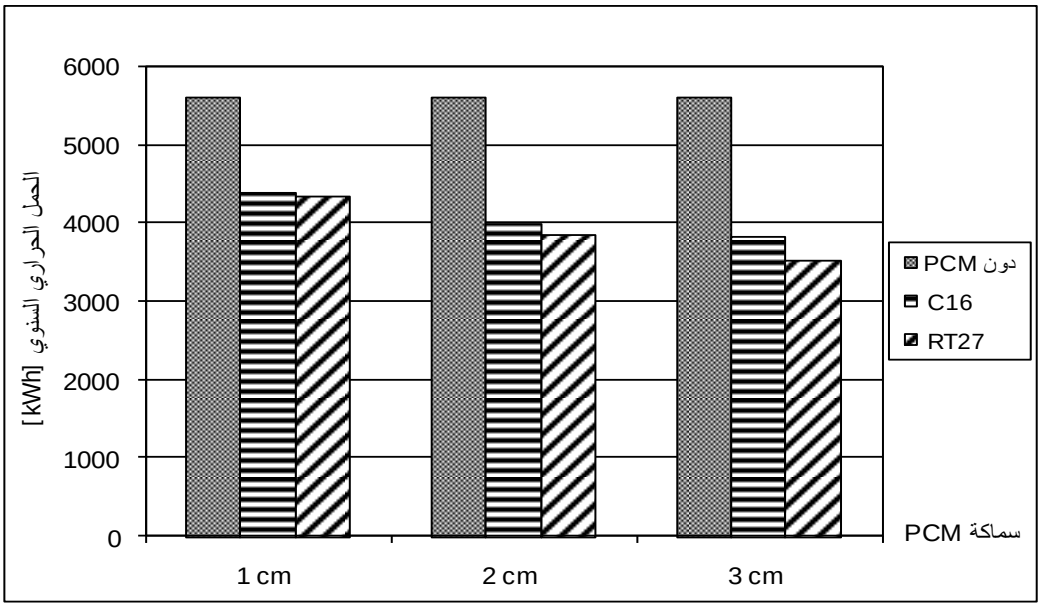


الشكل (2) لوحة محاكاة البناء وفق برنامج TRNSYS

النتائج والمناقشة:

تأثير سماكة المادة متغيرة الطور ونوعها في الحمل الحراري السنوي

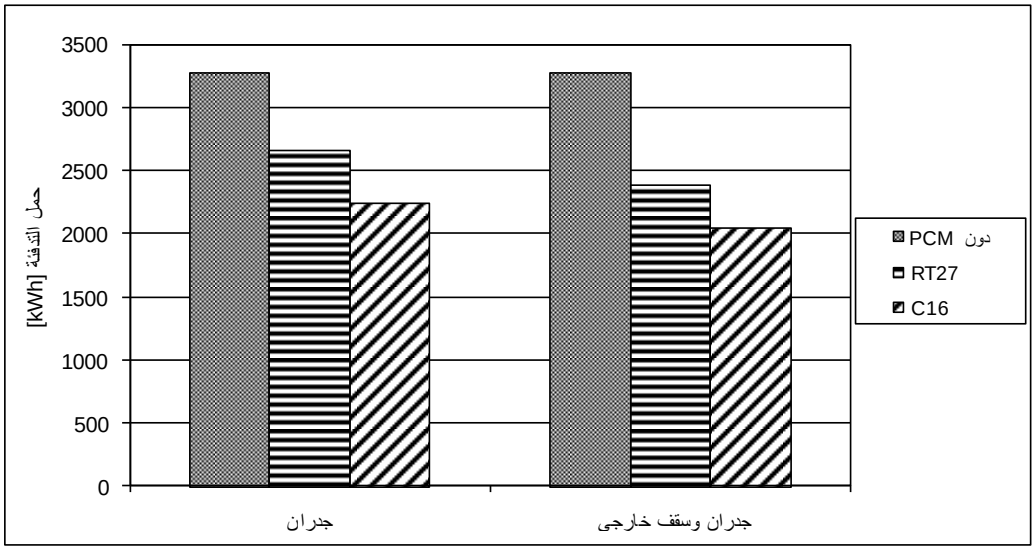
يبين الشكل (3) تأثير سماكة المادة متغيرة الطور في الحمل الحراري الكلي للغرفة المزودة بالمادة متغيرة الطور على الجدران والسقف معاً (الغرفة الثالثة)، ومقارنتها بالغرفة المرجعية (الغرفة الأولى) غير المزودة بالمادة متغيرة الطور. لقد أجريت المحاكاة اللحظية باستخدام برنامج TRNSYS على كلا الغرفتين، حيث تم استخدام مادتين متغيرتي الطور RT27 و C16 على جميع جدران الغرفة الأولى وسقفها. نلاحظ من الشكل (3) أنه بزيادة السماكة لكلا المادتين ينخفض الحمل الحراري الكلي، حيث تكون نسبة الانخفاض في الحمل الكلي عند استخدام المادة متغيرة الطور RT27 بسماكة 3[cm] حوالي 37.35[%] بينما تكون نسبة الانخفاض في الحمل الكلي عند استخدام المادة متغيرة الطور C16 عند السماكة نفسها حوالي 31.75[%] ، وبالتالي أفضل مادة هي RT27، وبسماكة 3[cm] ، وهذا ناتج عن زيادة السعة الحرارية لمكونات البناء (الجدران والسقف) الغرفة مع زيادة كمية المادة متغيرة الطور (نتيجة زيادة سماكة المادة متغيرة الطور) وبالتالي يؤدي بدوره إلى زيادة في كمية الحرارة المخزنة خلال النهار.



الشكل (3) تأثير سماكة ونوع المادة متغيرة الطور على الحمل الحراري السنوي

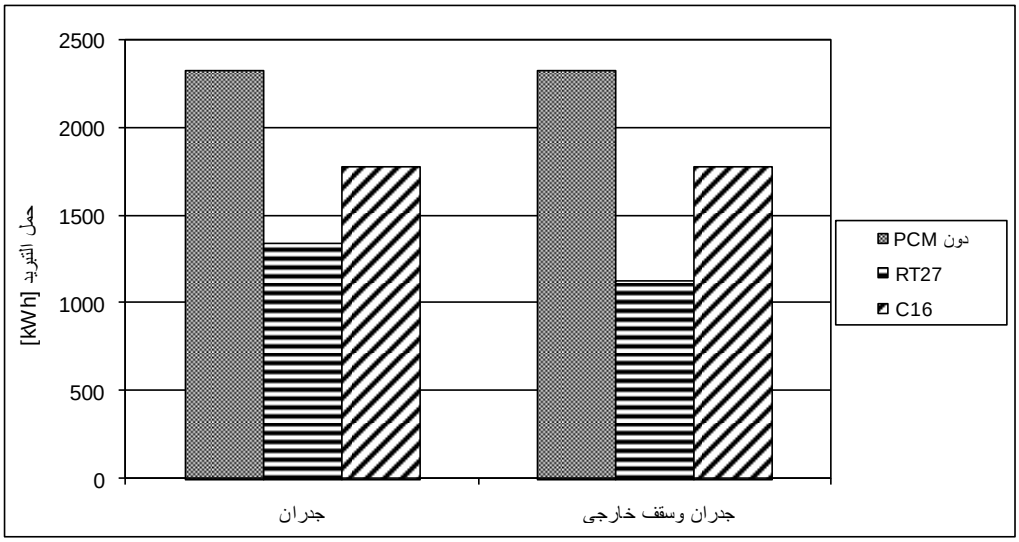
تأثير نوع المادة متغيرة الطور في أحمال التدفئة والتبريد

يبين الشكل (4) تأثير نوع المادة متغيرة الطور المستخدمة في الجدران، أو في الجدران والسقف (خارجي) معاً في حمل التدفئة للغرفة. نلاحظ من الشكل أنه عند استخدام المادة متغيرة الطور C16 على الجدران فقط ينخفض حمل التدفئة بمقدار [%]31.44، بينما عند استخدامها على الجدران والسقف ينخفض بمقدار[%]37.37. كما نلاحظ من الشكل أنه عند استخدام المادة متغيرة الطور RT27 على الجدران فقط ينخفض حمل التدفئة بمقدار [%]18.7 ، بينما عند استخدامها على الجدران والسقف ينخفض بمقدار [%]27. نستنتج من ذلك أن إضافة المادة متغيرة الطور إلى السقف أدى إلى انخفاض إضافي في حمل التدفئة. كما نلاحظ من القيم السابقة ومن الشكل أن المادة متغيرة الطور C16 هي المادة الأفضل استخداماً في فصل الشتاء، حيث كان مقدار الانخفاض في حمل التدفئة أكبر بحوالي [%]10، مقارنة بالمادة متغيرة الطور RT27 ، وهذا يعود إلى أن درجة حرارة انصهار المادة C16 المنخفضة [°C](17–19) قريبة لدرجة حرارة هواء الغرفة في فصل الشتاء، وبالتالي تم الاستفادة من الحرارة الكامنة لهذه المادة، بينما درجة انصهار المادة RT27 المرتفعة [°C](25–28) لا يمكن لدرجة حرارة هواء الغرفة الوصول إليها شتاء، لذلك لم يتم الانصهار لهذه المادة وبالتالي عدم الاستفادة من حرارتها الكامنة.



الشكل (4) حمل التدفئة لغرفتين الأولى دون مادة متغيرة الطور والثانية مع مادة متغيرة الطور سماكتها 3[cm]

يبين الشكل (5) تأثير نوع المادة متغيرة الطور المستخدمة على الجدران أو على الجدران والسقف (خارجي) معاً في حمل التبريد للغرفة. نلاحظ من الشكل أنه عند استخدام المادة متغيرة الطور C16 على الجدران فقط ينخفض حمل التبريد بمقدار 23.62[%] ، بينما عند استخدامها على الجدران والسقف ينخفض الحمل بمقدار 23.84[%]. كما نلاحظ من الشكل أنه عند استخدام المادة متغيرة الطور RT27 على الجدران فقط ينخفض حمل التبريد بمقدار 42.63[%]، بينما عند استخدامها على الجدران والسقف ينخفض الحمل بمقدار 51.85[%]. نستنتج من ذلك أن وضع المادة متغيرة الطور C16 في السقف بالإضافة إلى الجدران لم يؤثر في حمل التبريد، بينما إضافة المادة RT27 أدى إلى انخفاض إضافي بمقدار حوالي {%] 9. نستنتج من ذلك أن المادة متغيرة الطور RT27 هي المادة الأفضل استخداماً في فصل الصيف، وهذا يعود إلى أن المادة C16 تبقى في حالة الانصهار الدائم بسبب درجة حرارة انصهارها المنخفضة، مقارنة بدرجة حرارة هواء الغرفة في فصل الصيف، وبالتالي عدم الاستفادة من حرارتها الكامنة، بينما درجة انصهار المادة RT27 المرتفعة والقريبة من درجة حرارة هواء الغرفة أدى إلى الاستفادة من حرارتها الكامنة.

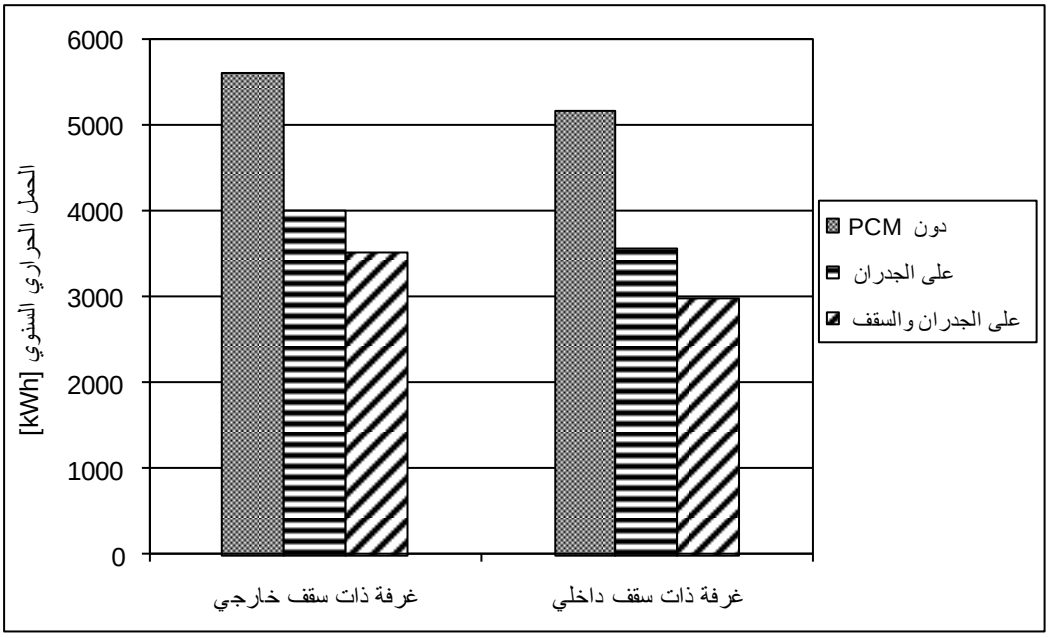


الشكل (5) حمل التبريد لغرفتين الأولى دون مادة متغيرة الطور والثانية مع مادة متغيرة الطور سماكتها 3[cm]

تأثير إضافة المادة متغيرة الطور إلى السقف في الحمل الحراري السنوي

يبين الشكل (6) نتائج المحاكاة لغرفتين الأولى جدرانها مزودة بالمادة متغيرة الطور RT27 بسماكة 3[cm]، والثانية مزودة جدرانها وسقفها بالمادة نفسها. نلاحظ من الشكل أنه من أجل غرفة سقفها خارجي (لا يوجد غرفة فوقها أي أن السطح الخارجي للسقف معرض للشروط المناخية الخارجية) عند استخدام المادة متغيرة الطور على الجدران فقط ينخفض الحمل الحراري السنوي للغرفة بمقدار 28.64[%] ، بينما عند استخدامها على الجدران والسقف معاً ينخفض الحمل بمقدار 37.35[%]. بينما من أجل غرفة سقفها داخلي (يوجد غرفة فوقها أي أن السطح الخارجي للسقف معرض للشروط التصميمية للغرفة نفسها) فعند استخدام المادة متغيرة الطور RT27 على الجدران فقط ينخفض الحمل الحراري السنوي بمقدار 30.8[%]، وعند استخدامها على الجدران والسقف معاً ينخفض الحمل بمقدار 42[%]. نستنتج من ذلك أن تأثير إضافة المادة متغيرة الطور إلى السقف إلى جانب إضافتها إلى الجدران يكون أكبر من أجل غرفة سقفها داخلي، مقارنة بالغرفة ذات السقف الخارجي. وهذا يعود إلى أن الغرفة ذات السقف الخارجي، تبقى المادة متغيرة الطور المزودة إلى السقف في حالة الانصهار لفترة أطول مقارنة بالغرفة ذات السقف الداخلي، نتيجة تعرضها للإشعاع الشمسي، وبالتالي عدم الاستفادة من حرارتها الكامنة (أي أنها في هذه الحالة لا تلعب دور مادة متغيرة الطور).

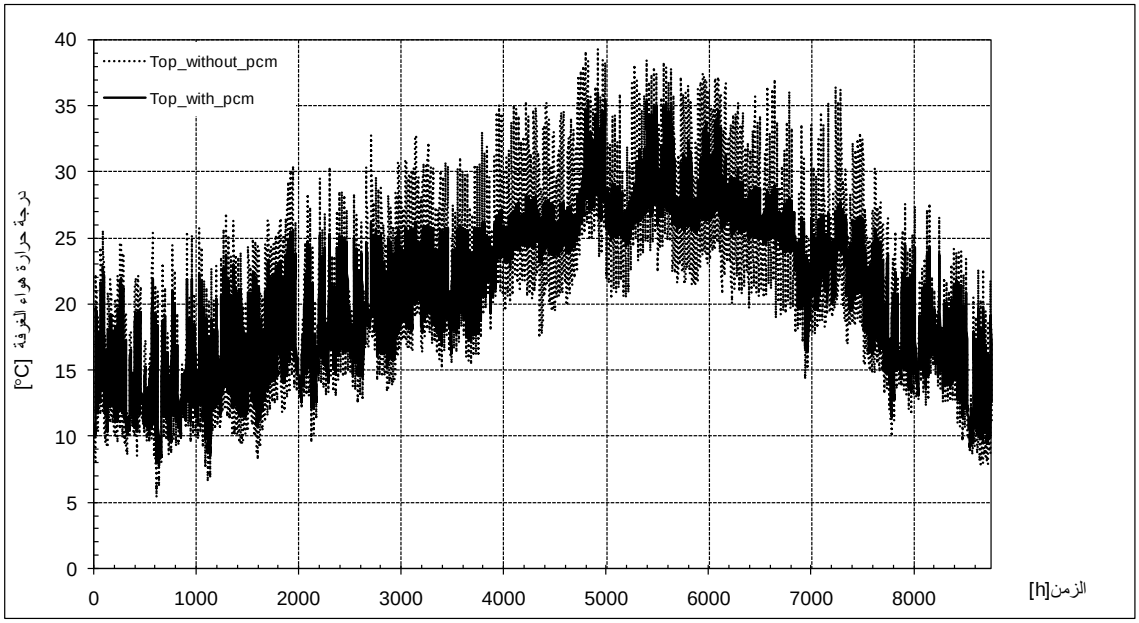
نلاحظ من الشكل (6) أن الحمل الحراري السنوي للغرفة غير المزودة بالمادة متغيرة الطور وذات السقف الخارجي أكبر منها للغرفة ذات السقف الداخلي، نتيجة تعرض السطح الخارجي للغرفة الأولى للشروط المناخية الخارجية، بينما يتعرض السطح الخارجي لسقف الغرفة الثانية للشروط التصميمية الداخلية للغرفة ذاتها.



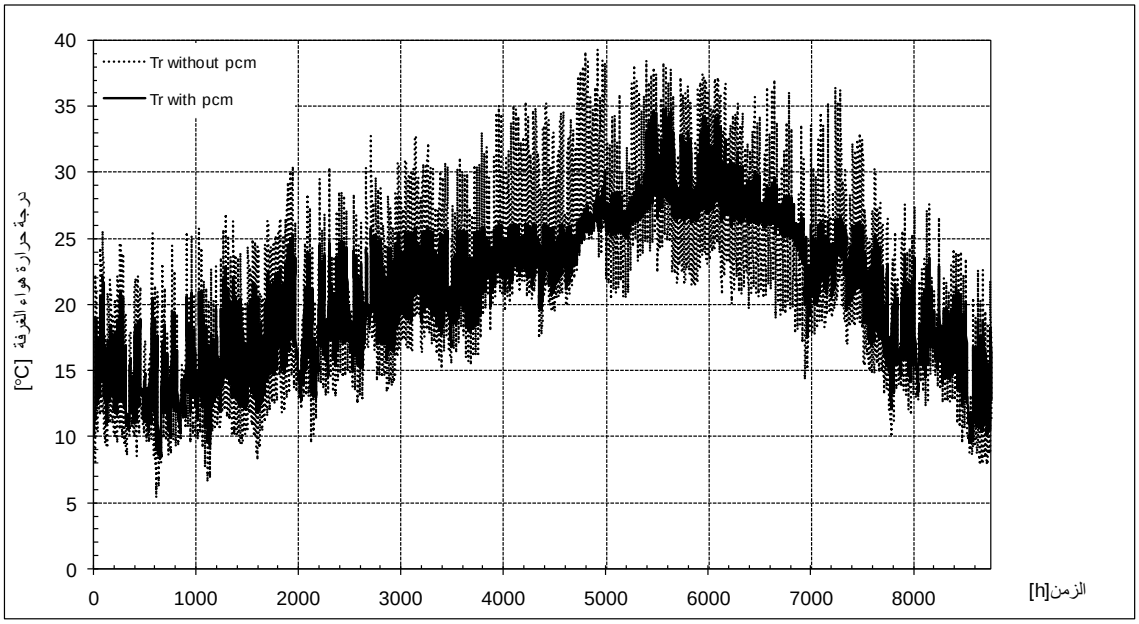
الشكل (6) الحمل السنوي لغرفتين الأولى دون مادة متغيرة الطور والثانية مع مادة متغيرة الطور سماكتها 3[cm]

تأثير إضافة المادة متغيرة الطور إلى السقف في درجة حرارة الهواء الداخلية

يبين الشكلان (7) و(8) نتيجة المحاكاة باستخدام برنامج TRNSYS، لدراسة تأثير إضافة المادة متغيرة الطور RT27 إلى الجدران فقط أو إلى الجدران والسقف الخارجي معاً بسماكة [cm]3 في درجة حرارة هواء الغرفة المدروسة على مدار السنة. نلاحظ من الشكلين السابقين انخفاض درجة حرارة هواء الغرفة المزودة بالمادة متغيرة الطور نهاراً، نتيجة دور المادة متغيرة الطور في امتصاص الحرارة وتخزينها نهاراً حيث تتحول إلى الحالة السائلة، بينما نلاحظ ارتفاع درجة حرارة هواء الغرفة ليلاً، نتيجة طرح المادة متغيرة الطور للحرارة المخزنة فيها ليلاً وبالتالي تتحول إلى الحالة الصلبة. إن انخفاض درجة حرارة الهواء نهاراً وارتفاعها ليلاً، عند استخدام المادة متغيرة الطور يؤدي إلى انخفاض في التأرجح في درجات الحرارة ما بين الليل والنهار، وهذا الانخفاض يكون واضحاً أكثر عند إضافة المادة متغيرة الطور إلى السقف والجدران معاً، كما هو واضح من الشكل (8)، وهذا ما يضمن الشعور بالراحة الحرارية للقاطنين داخل البناء، وهو الدور الأساسي للمادة متغيرة الطور بالإضافة لدورها في تخفيض الأحمال الحرارية للبناء.

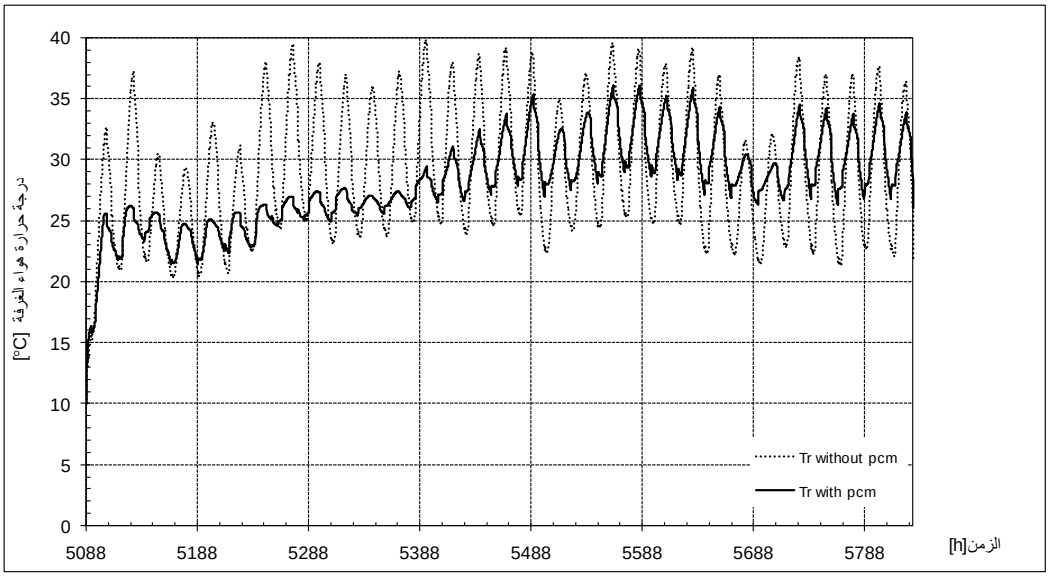


الشكل (7) تغير درجة حرارة هواء الغرفتين دون ومع مادة متغيرة الطور (RT27) سماكتها [cm]3 على الجدران فقط على مدار السنة

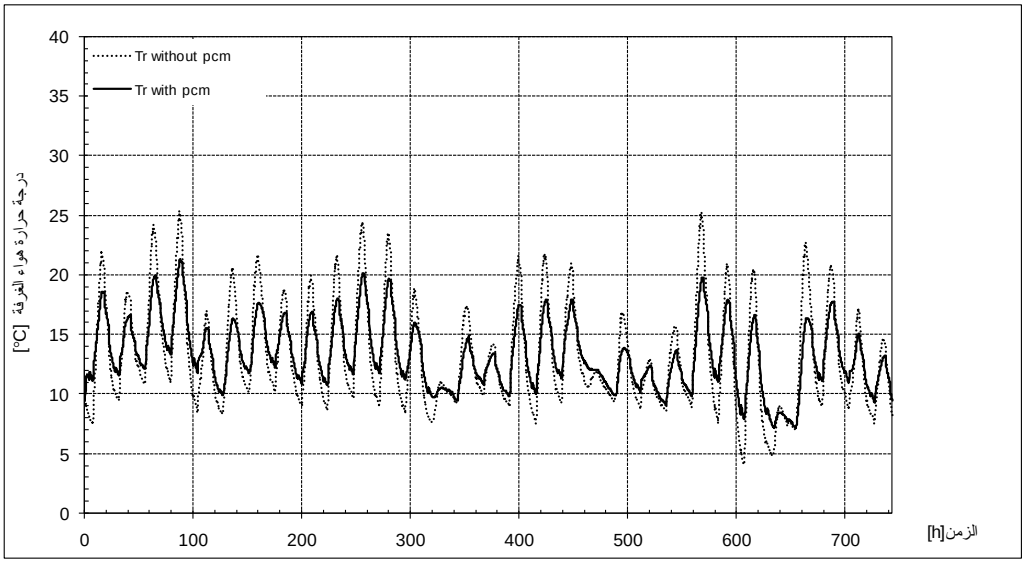


الشكل (8) تغير درجة حرارة هواء الغرفتين دون ومع مادة متغيرة الطور (RT27) سماكتها [3[cm على الجدران والسقف معاً على مدار السنة

يبين الشكلان (9) و(10) تغير درجة الحرارة الداخلية لغرفتين؛ الأولى جدرانها وسقفها الخارجي لا تحتوي مادة متغيرة الطور، والثانية تحتوي مادة متغيرة الطور (RT27) سماكتها [3[cm ،على الجدران والسقف الخارجي معاً، خلال شهر آب وكانون الثاني على الترتيب. نلاحظ من الشكلين الانخفاض في درجة الحرارة الداخلية نهاراً، والارتفاع ليلاً، وهذا ما يقلل من التأرجحات في درجات الحرارة ما بين النهار والليل، وبالتالي الشعور بالراحة الحرارية للقاطنين في البناء، ويكون مقدار الانخفاض في هذا التأرجح أكثر وضوحاً في فصل الصيف منه في فصل الشتاء، وهذا يعود إلى درجة انصهار المادة متغيرة الطور التي يمكن الوصول إليها صيفاً أكثر منها شتاء.



الشكل (9) تغير درجة حرارة هواء الغرفتين دون ومع مادة متغيرة الطور (RT27) سماكتها [3[cm على الجدران والسقف الخارجي معاً خلال شهر آب



الشكل (10) تغير درجة حرارة هواء الغرفتين دون ومع مادة متغيرة الطور (RT27) سماكتها [3cm] على الجدران والسقف الخارجي معاً خلال شهر كانون الثاني

الاستنتاجات والتوصيات:

بعد إجراء المحاكاة على غرفتين لدراسة تأثير استخدام المواد متغيرة الطور (PCM) باستخدام برنامج المحاكاة TRNSYS نستنتج ما يلي:

1. ينخفض الحمل الحراري السنوي مع زيادة سماكة المادة متغيرة الطور، ومقدار الانخفاض يتعلق بنوع المادة، حيث عند سماكة 3[cm] يكون مقدار الانخفاض 31.75[%] باستخدام المادة C16، بينما يكون مقدار الانخفاض 37.35[%] باستخدام المادة RT27 على الجدران والسقف الخارجي معاً، وبالتالي هي الأفضل عند الاستخدام السنوي.

2. تنخفض أحمال التدفئة باستخدام مادة PCM حيث انخفضت بمقدار 27 [%] باستخدام المادة RT27على الجدران والسقف الخارجي، بينما تنخفض بمقدار 37.37[%] باستخدام المادة C16 وبسماكة 3[cm] ، وبالتالي هي المادة المناسبة في التدفئة.

3. تنخفض أحمال التبريد باستخدام مادة PCM حيث انخفضت بمقدار 23.84[%] باستخدام المادة C16 على الجدران والسقف الخارجي، بينما تنخفض بمقدار 51.85[%] باستخدام المادة RT27 وبسماكة 3[cm]، وبالتالي هي المادة المناسبة في التبريد.

4. ينخفض الحمل السنوي عند وضع المادة متغيرة الطور في السقف بالإضافة إلى الجدران، ويتعلق ذلك بنوع المادة ووضعية السقف، فعند استخدام المادة RT27 يكون مقدار الانخفاض الإضافي في الحمل السنوي لغرفة سقفها خارجي حوالي 9[%]، بينما يكون مقدار الانخفاض حوالي 12[%] عندما يكون سقف الغرفة داخلي.

5. تنخفض درجة حرارة الهواء الداخلية نهاراً وترتفع ليلاً عند استخدام المواد متغيرة الطور، وهذا ما يؤدي إلى الانخفاض في التأرجح في درجات الحرارة بين النهار والليل مما يحسن الشعور بالراحة الحرارية للقاطنين في البناء. ويكون هذا الانخفاض أكبر عند استخدام المادة متغيرة الطور في الجدران والسقف معاً، وأيضاً يكون هذا الانخفاض أكثر وضوحاً في فصل الصيف منه في فصل الشتاء.

6. متابعة البحث في دراسة تأثير بعض الخواص الفيزيائية الحرارية للمواد متغيرة الطور مثل حرارتها الكامنة وعامل ايصاليتها الحرارية وسعتها الحرارية.

المراجع:

[1]. GHIAUS, C.; ALLARD, F. *Potential for Free cooling by ventilation*. Solar Energy, Vol. 80, 2006, 402-413.

[2]. TAKEDA, S.; NAGANO, K.; MOCHIDA, T., Shimakura, K. *Development of a ventilation system utilizing thermal energy storage for granules containing phase change material.* Solar Energy, Vol. 77, 2004, 329-338.

[3]. BUTALA, V.; STRITIH, U. *Experimental investigation of PCM cold storage.* Energy and Buildings, Vol. 41, 2009, 354-359.

[4]. DARKWA, J. *Mathematical evaluation of a buried phase change concrete cooling system for building.* Applied Energy, Vol. 86, 2009, 706-711.

[5]. LAZARO, A.; DOLADO, P.; MARIN, M. J.; ZALBA, B. *PCM-air heat exchangers for free-cooling applications in buildings: Empirical model and application to design*. Energy Conversion and Management, Vol. 50, 2009, 444-449.

[6]. ALAWADHI, M. E. *Thermal analysis of a building brick containing phase change material*. Energy and Buildings, Vol. 40, 2008, 351-357.

[7]. CASTELL, A.; MARTORELL, I.; MEDRANO, M.; PEREZ, G.; CABEZA, F. L. *Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling.* Energy and Buildings, Vol. 42, 2010, 534-540.

[8]. ZHOU, G.; ZHANG, Y.; LIN, K.; XIAO, W. *Thermal analysis of a direct-gain room with shape-stabilized PCM plates*. Renewable Energy, Vol. 33, 2008, 1228-1236.

[9]. ZHOU, G.; ZHANG, Y.; WANG, X.; LIN, K.; XIAO, K. *An assessment of mixed type PCM-gypsum and shape-stabilized PCM in a building for passive solar heating*. Solar Energy, Vol. 81, 2007, 1351-1360.

[10]. SAMAN, W., BRUNO, F., HALAWA, E. *Thermal performance of PCM thermal storage unit for a roof integrated solar heating system* . Solar Energy, Vol. 78, 2005, 341-349.

[11]. LIN, K.; ZHANG, Y.; DI, H.; YANG, R. *Study of an electrical heating system with ductless air supply and shape-stabilized PCM for thermal storage*. Energy Conversion and Management, Vol. 48, 2007, 2016-2024.

[12]. WEINLADER, H., BECK, A., FRICKE, J. *PCM-façade-panel for daylighting and room heating*. Solar Energy, Vol. 78, 2005, 341-349.

[13]. CABEZA, F. L.; CASTELLON, C.; NOGUES, M.; MEDRANO, M. *Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings*. Energy and Buildings, Vol. 39, 2007, 113-119.

[14]. BENTZ, P. D.; TURPIN, R. *Potential applications phase change materials in concrete technology*. Cement & Concrete Composites, Vol. 29, 2007, 527-532.

[15]. KLEIN, S. A. et al., TRNSYS – a transient simulation program, version 16.1, *User Manual*. University of Wisconsim-Madison, USA. 2006.

[16]. www.rubitherm.de.

[17]. Meteonorm, 4.00, Global Meteorological Database for Solar Energy Applied Meteorology. Nov 1999.