

## دراسة لتحسين مردود نظام تدفئة أرضية بإضافة

### مواد متغيرة الطور

\* د. جهاد بدور

\*\* د. هيثم حسن

\*\*\* م. علاء أديب الغدا

#### الملخص

يهدف البحث على تحسين عمل نظام تدفئة ارضي باستخدام مواد متغيرة الطور وذلك بإضافة المواد المتغيرة الطور تحت أنابيب التدفئة حيث تعمل على زيادة العطالة الحرارية للمبنى عن طريق حفظ الطاقة بشكل كامنة ضمن المواد المتغيرة الطور وإعادة طرحها ضمن الحيز عند توقف النظام عن العمل ونتج لدينا وجود تحسين حقيقي للراحة الحرارية معبرا عنه بعدد الساعات التي لا يصل عندها النظام لدرجة الحرارة المعيارية بنسب أعظمها 41.36% وتقليل لاستهلاك الطاقة اللازمة لتشغيل النظام وصل إلى 18.45%

الكلمات المفتاحية: المواد المتغيرة الطور، التدفئة الأرضية، الراحة الحرارية، توفير الطاقة

\*أستاذ في قسم هندسة القوى الميكانيكية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين. اللاذقية، سورية.

\*\* أستاذ في قسم هندسة القوى الميكانيكية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين. اللاذقية، سورية.

\*\*\*طالب ماجستير في قسم هندسة القوى الميكانيكية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين. اللاذقية، سورية.

# A Study to Improve the Performance of a Floor Heating System Using Phase Change Materials

**Jihad Baddour\***

**Haitham Hasan\*\***

**Alaa Adeeb Alghada\*\*\***

## Abstract

This paper aims to improve the performance of a floor heating system by using phase change material placed under the heating pipes, which can improve the thermal mass of the building by storing energy as latent energy in these phase change materials which would be again sent into the space when the heating system stops working, the research resulted in real improvement to thermal comfort presented as number of hours where the set temperature is not reached by the system with the maximum improvement being 41.36%, and also resulting in lowering the fuel consumption by a maximum of 18.45%.

Keywords: Phase change material (PCM), Floor heating, Thermal comfort, Energy Savings

---

\*Professor, Department of Mechanical Power - Faculty of Mechanical Engineering - Tishreen University. Lattakia, Syria.

\*\*Professor, Department of Mechanical Power - Faculty of Mechanical Engineering - Tishreen University. Lattakia, Syria.

\*\*\*Master's student, Department of Mechanical Power - Faculty of Mechanical Engineering - Tishreen University. Lattakia, Syria

## مقدمة:

يعتبر استهلاك الطاقة من أهم المشاكل التي يواجهها العالم في عصرنا هذا ولا شك أن التدفئة والتكييف تحتل قسماً لا بأس به من استهلاك الطاقة الكلي في المباني، ومن هذا المنطلق قمنا بهذا البحث لتقييم إحدى الطرق الحيادية (Passive) لتقليل استهلاك الطاقة وفي ذات الوقت تحسين الراحة الحرارية للسكان، وقد اعتمدنا في هذا البحث على بعض الدراسات المرجعية

قامت *Lindsay Fialkov* بنمذجة طابق سكني كندي تقليدي ضمن برنامج *DesignBuilder* مؤلف من شقتين في كل من جهتي الشرق والغرب حيث تم وضع *PCM* تحت أرضية شقة واحدة من كل جهة ودراسة تأثير إضافة هذه المواد تحت الظروف الخارجية الموافقة لمطقة تورونتو، تم استخدام ثلاثة أنواع من مواد *PCM* التجارية (*M91/Q21, M51/Q21, M27/Q21*)

كما وجد كل من *JinChul Park & TaeWon Kim* أن ولكل  $70\text{mm}$  من سماكة الأرضية نحتاج لـ  $10\text{mm}$  من *PCM* تقريبا وتكون درجة الانصهار المثالية له بين  $5^{\circ}\text{C}$  –  $35^{\circ}\text{C}$  على اعتبار أن درجة حرارة الماء الخارج من المرجل  $5^{\circ}\text{C}$  حيث قام بوضع مادة الـ *PCM* تحت الأنابيب وبالتالي قلل من ضياعات الحرارة باتجاه الأرض.

بينما قام الدكتور رامي جورج وآخرون بدراسة تأثير المواد المتغيرة الطور *RT27 & C16* بسماكات مختلفة وقام باعتماد  $3\text{cm}$  وتشمل الدراسة استخدام المواد بالجدران فقط أو بالجدران والأسقف معا وتأخذ بعين الاعتبار كون السقف داخلياً أو خارجياً.

حيث أثبتت الدراسات المرجعية السابقة إمكانية تقليل الحمل الحراري للتدفئة في الأبنية عند استخدام المواد المتغيرة الطور، وبالتالي تقليل استهلاك الطاقة اللازمة للتدفئة كما حقق استخدام المواد المتغيرة الطور فعالية كبيرة في تحسين ظروف الراحة الحرارية الداخلية وإمكانية استخدامها للتحكم بها.

### أهمية البحث وأهدافه:

يعتبر نظام التدفئة الأرضية من أفضل أنظمة التدفئة من حيث جودة التدفئة فهو يوزع التدفئة بشكل متساوي في كل الغرفة، ويقوم بالتدفئة بشكل متدرج، وبدون ان يسبب تيارات هوائية قوية مزعجة أو ضجيج، ولكن عيبه يتمثل في كلفته التشغيلية العالية، ومنه تكمن أهمية البحث في الوصول إلى نظام تدفئة حديث قادر على العمل وتأمين الراحة الحرارية وبأقل كلفة تشغيل ممكنة وذلك ليكون بديلاً حقيقياً عن التدفئة التقليدية المستخدمة حالياً، لتحقيق هذا الهدف ناقش في هذا البحث تأثير عدة أنواع من الـ *PCM* على عمل هذا النظام من ناحيتي الراحة الحرارية والكلفة التشغيلية.

### طرائق البحث ومواده:

أثبتت الدراسات المرجعية السابقة امكانية تقليل الحمل الحراري للتدفئة في الأبنية عند استخدام المواد المتغيرة الطور وبالتالي تقليل استهلاك الطاقة اللازمة للتدفئة، كما بينت أيضاً أن استخدام المواد المتغيرة الطور حقق فعالية كبيرة في تحسين ظروف الراحة الحرارية.

ناقشت الدراسات أيضاً توفر مجموعة من المواد المتغيرة الطور المختلفة المؤهلة للاستخدام في مجال تدفئة الأبنية والملائمة لخصوصية البناء بسماكات مختلفة وذات درجات حرارة انصهار مناسبة حيث تم استخدام ثلاثة أنواع من مواد *PCM* التجارية (*M91/Q21, M51/Q21, M27/Q21*)، ومواد طبيعية كالبرافين (*C16 - C18 ...*)

كما أخذت بعين الاعتبار مكان توضع هذه المواد وطريقة إدخالها في بنية الأرضية حيث تبين ان أفضل مكان لتوضعها هو بين الأنابيب والعاكس الحراري.

بناءً على ما سبق اعتمدنا في بحثنا دراسة تأثير عمل بعض هذه المواد على نظام تدفئة أرضي من حيث تحقيق شروط الراحة الحرارية وتوفير استهلاك الطاقة.

سيتم العمل باستخدام برنامج *Designbuilder* لإنشاء نموذج متكامل للبناء وإجراء المحاكاة وهو برنامج يحتوي على عدة أدوات لمحاكاة وتقييم أداء الأبنية وأنظمتها

المختلفة ويشمل أنظمة التدفئة والتكييف، انبعاثات الكربون، الإشعاع الشمسي، وكلفة التشغيل.

سندرس حالة العمل لنظام التدفئة مع وبدون PCM بإجراء النمذجة للأشهر (كانون الثاني، كانون الأول، شباط) وستستخدم المواد التالي في الدراسة:

- M27/Q21
- M51/Q21 وهي تملك خواص مطابقة للمادة الأولى ولكنها تختلف بالسماكة والاسم التجاري.
- Paraffin C16 بسماكة 100 mm & 200 mm

الجدول (1): مواصفات المواد المتغيرة الطور المستخدمة في البحث

Paraffin C16 200 mm	Paraffin C16 100 mm	M51/Q21 208 mm	M27/Q21 112 mm	PCM
17-19	17-19	21	21	درجة الانصهار(°C)
236	236	210	210	الحرارة الكامنة (kJ/kg)
780	780	2300	2300	كثافة الطور الصلب (kg/m <sup>3</sup> )
780	780	2200	2200	كثافة الطور السائل (kg/m <sup>3</sup> )
0.17	0.17	1.8	1.8	معامل التوصيل الحراري للطور الصلب (W/m. K)
0.17	0.17	1.5	1.5	معامل التوصيل الحراري للطور السائل (W/m. K)
1.65	1.65	2	2	السعة الحرارية للطور الصلب (kJ/kg. K)
2.1	2.1	2	2	السعة الحرارية للطور السائل (kJ/kg. K)

سنقوم بحساب التوفير في استهلاك الطاقة لكل من المواد في أشهر الدراسة الثلاثة، كما سنقيم أثر المواد المتغيرة الطور على تحقيق شروط الراحة الحرارية. نظام التدفئة المستخدم:

يقسم النظام إلى: دائرة تغذية ودائرة حمل

1. دائرة التغذية تشمل المرجل المضخة والترموستات

2. دائرة الحمل تشمل: الغرف المدفأة والعناصر الطرفية (في حالتنا هي شبكة

الأنابيب)

وفصل بين الدائرتين المجمع الذي تتوزع منه الأنابيب إلى الغرف

بينما حساب الأحمال فيقوم به البرنامج تلقائياً فور تحديد الحمل وبارامترات العمل.

نحدد درجة حرارة الماء عند  $45C^{\circ}$

توصيف البناء المدروس:

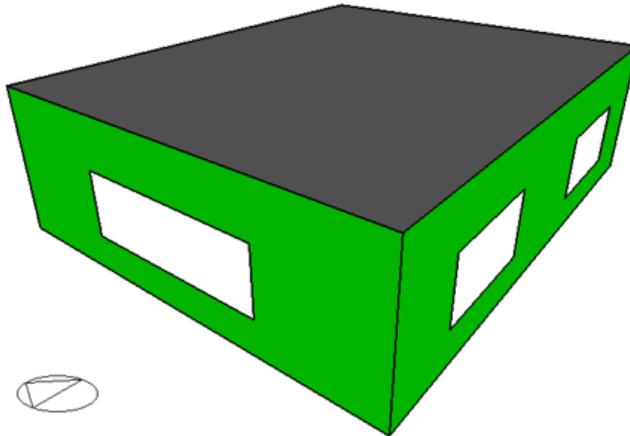
البناء عبارة عن غرفة واحدة مساحتها  $100 m^2$  كما هو موضح بالشكل.

تم ادخال بيانات الموقع (اللادقية) إلى البرنامج.

حيث اخترنا درجة حرارة معيارية للتدفئة  $20C^{\circ}$  وتم اعتبار جميع السطوح الخارجية

معزولة بفراغ هوائي وتم وضع مادة الـ *PCM* تحت الأنابيب.

GROUND FLOOR (PARAFFIN C 16) 200mm  
Project flat roof  
Medium weight WITH AIR GAP  
Project external glazing

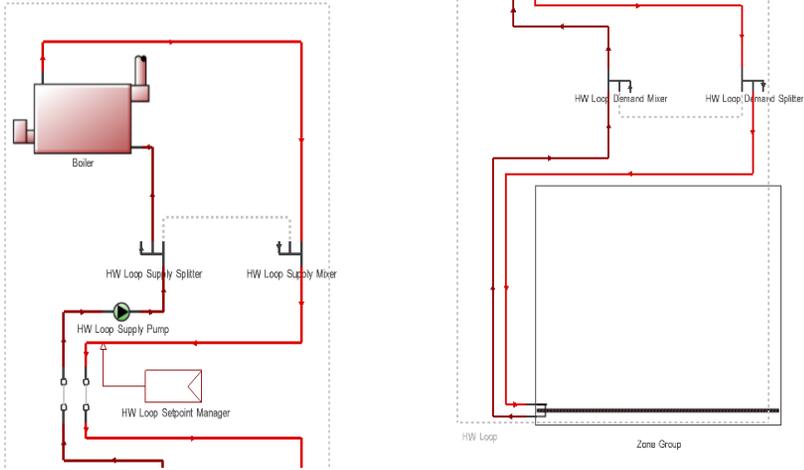


الشكل (1): تفصيل الغرفة كما يظهر ضمن البرنامج

قيم معامل انتقال الحرارة كما هو مبين في الجدول (2):

الجدول (2): معاملات انتقال الحرارة لعناصر البناء المختلفة

الأبواب	النوافذ	السقف	الأرضيات	الجدران الخارجية	معامل انتقال الحرارة ( $W/m^2 \cdot K$ )
2.823	5.894	0.25	No PCM	1.509	
			M27-Q21	0.529	
			M51-Q21	0.514	
			C 16 100 mm	0.501	
			C 16 200 mm	0.513	
			C 16 200 mm	0.498	



الشكل (2): دارتي التغذية والحمل كما تم تعريفهما في البرنامج

المعادلات المستخدمة ونمذجة تخزين الطاقة الكامنة في المواد المتغيرة الطور:

يستخدم البرنامج محرك (ENERGYPLUS) المطور من وزارة الطاقة الأمريكية لمحاكاة الأعمال الميكانيكية وانتقال الحرارة.

وضمن هذا المحرك يوجد عدة خيارات للطرق التي من الممكن استخدامها لمحاكاة انتقال الحرارة.

لنمذجة انتقال الحرارة ضمن الأرضية للنظام المدروس فإننا نحتاج لمعادلة يمكنها أن تعبر عن الخواص المميزة للمواد المتغيرة الطور ولذلك نقوم باختيار طريقة الفروق المنتهية أو

(*Finite Difference method*) حيث تعمل هذه الطريقة على تقسيم المجال المستمر إلى عقد نقطية وبالتالي تحوّل المعادلة التفاضلية لانتقال الحرارة إلى مجموعة معادلات خطية كما وردت في المرجع الهندسي للبرنامج [9]:

$$C_p \rho \Delta x \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = \left( k_W \frac{T_{i+1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} + k_E \frac{T_{i-1}^{j+1} - T_i^{j+1}}{\Delta x} \right)$$

$i$ : رقم العقدة الحالية  $\Delta t$ : زمن الخطوة  $\rho$ : كثافة المادة للطبقة بين العقتين

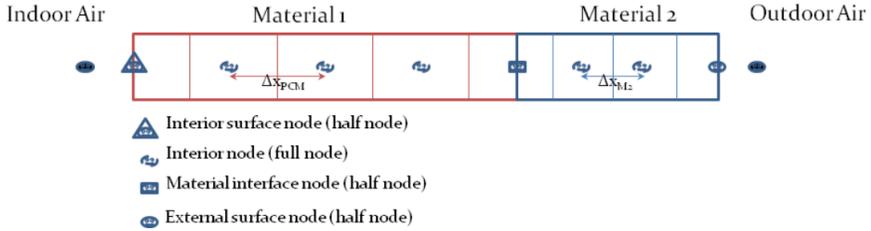
$j$ : الخطوة الزمنية السابقة  $T$ : درجة حرارة العقدة  $k_W$ : الناقلية الحرارية للمادة بين العقدة الحالية والعقدة التالية

$\Delta x$ : سماكة الطبقة بين العقتين  $C_p$ : السعة الحرارية للمادة  $k_E$ : الناقلية الحرارية للمادة بين العقدة الحالية والعقدة السابقة

والذي يسمح لهذه الطريقة محاكاة تغير الطور هو ارفاق تابع بين درجة الحرارة والإنتالبي يستخدم قيم ثابتة يدخلها المستخدم تم الحصول عليها تجريبياً وذلك حسب نوع المادة المتغيرة الطور (تم أخذ هذه القيم من الشركة المصنعة للمواد المدروسة) [9]:

$$h_i = HTF(T_i)$$

مما يسمح بمعرفة إنتالبي العقد المختلفة وبالتالي حساب قيمة السعة الحرارية  $C_p$  لكل خطوة وإعادة تعويضها في العلاقة الأساسية.



الشكل (3): أنواع العقد المختلفة ضمن مقطع في سطح يحوي عدة مواد

يتم تحديد عدد العقد في كل مقطع حسب المعطيات التالية وذلك حسب الناقلية الحرارية  $\alpha$  والخطوة الزمنية  $\Delta t$  والثابت  $C$ : [9]

$$\Delta x = \sqrt{C\alpha\Delta t}$$

حيث تعتبر قيمة الثابت  $C = 3$  افتراضياً ويمكن بواسطته التحكم بعدد النقاط.

ينتج عدد العقد من قسمة سماكة الطبقة على السماكة الناتجة في العلاقة السابقة والتقريب لأقرب عدد طبيعي (التقريب للأعلى).

بعد تحويل المعادلة التفاضلية لانتقال الحرارة إلى مجموعة معادلات جبرية، ولأن الحل ضمنى نقوم بحل هذه المعادلات باستخدام طريقة غاوص - سايدل وذلك بحيث يتم

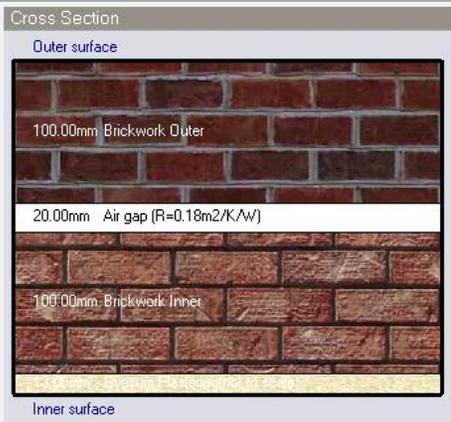
تحديث درجات الحرارة بشكل متتابع وتنتهي الحلقة بعد 30 دورة أو عندما يكون الفرق بين القيمة الأخيرة والقيمة التالية أقل من  $0.000001^{\circ}\text{C}$

ويظهر الجدول (3) جميع البارامترات المستخدمة في النمذجة والتي تؤثر على عمل النظام.

الجدول (3): بارامترات العمل المدخلة إلى البرنامج

### بارامترات العمل (المعلومات المدخلة في كل قائمة من قوائم البرنامج)

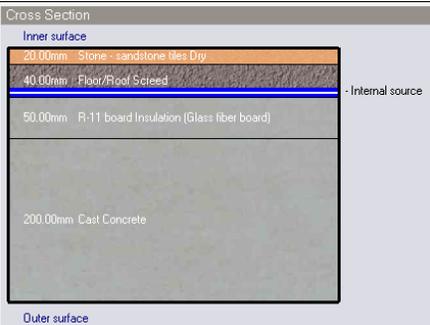
نافذة Construction		نافذة Activity	
Construction	ندخل هنا بنية الجدران الخارجية والأسقف	Template	إدخال اعدادات محفوظة سابقاً لجميع البيانات في النافذة ويوجد مثلها لجميع النوافذ
Floors	ندخل هنا بنية الأرضيات	Occupancy	عدد الأشخاص في المتر المربع $0.215/\text{m}^2$ ومواعيد وجودهم ضمن الغرفة حيث يتراوح بين 100% الى 50% أثناء النهار
Sub-Surfaces	ندخل هنا نوع الأبواب الخارجية والداخلية	Heating Setpoint	قمنا باختيار $20^{\circ}\text{C}$ كدرجة حرارة تصميمية للغرفة وسماحية عمل بمقدار $2^{\circ}\text{C}$
نافذة HVAC		نافذة Openings	
Mechanical Ventilation	لم نعتبر وجود أي تهوية قسرية للمبنى	Glazing Type	نوع الشبابيك المستخدمة من طبقة واحدة سماكتها 3mm وتسمح بمرور 84% من الأشعاع الشمسي
Heating	اعتبرنا المبنى مدفئاً وأدخلنا جدول عمل نظام التدفئة من هنا حيث يعمل النظام بكامل استطاعته من الـ 6 صباحاً حتى 6 مساءً وفي بقية النهار يعمل بنصف استطاعته فقط لدراسة أثر الـ PCM	Layout	ارتفاع الشبابيك 1.5 m ومساحتها كنسبة من السطح الخارجي للجدران 20%
Natural Ventilation	نعتبر التهوية طبيعية وتعمل كامل النهار وتتناسب التهوية مع الإشغال حيث نعطيها نفس جدول العمل		
* جميع القيم التي لم يتم ذكرها تركت بقيمتها الافتراضية			



مقطع في جدار خارجي كما يظهر في البرنامج



مقطع في السقف كما يظهر في البرنامج



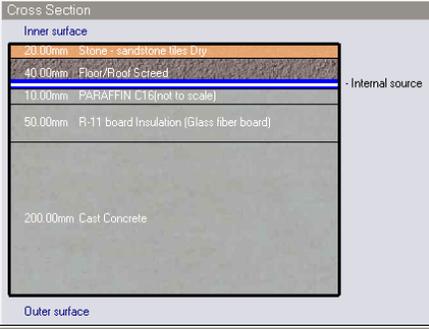
مقطع في الأرضية كما يظهر في البرنامج  
No PCM



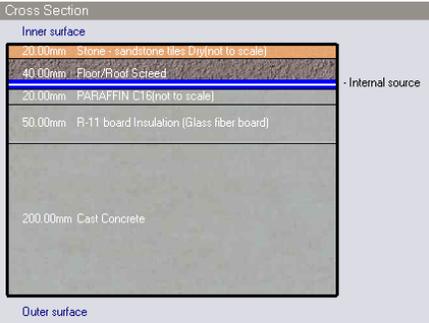
مقطع في الأرضية كما يظهر في البرنامج  
M27/Q21



مقطع في الأرضية كما يظهر في البرنامج  
M51/Q21



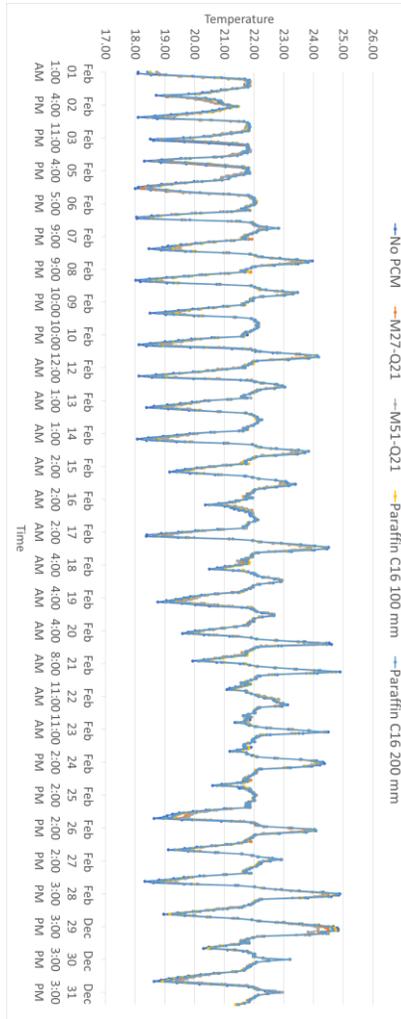
مقطع في الأرضية كما يظهر في البرنامج  
Paraffin C16 100 mm



مقطع في الأرضية كما يظهر في البرنامج  
Paraffin C16 200 mm

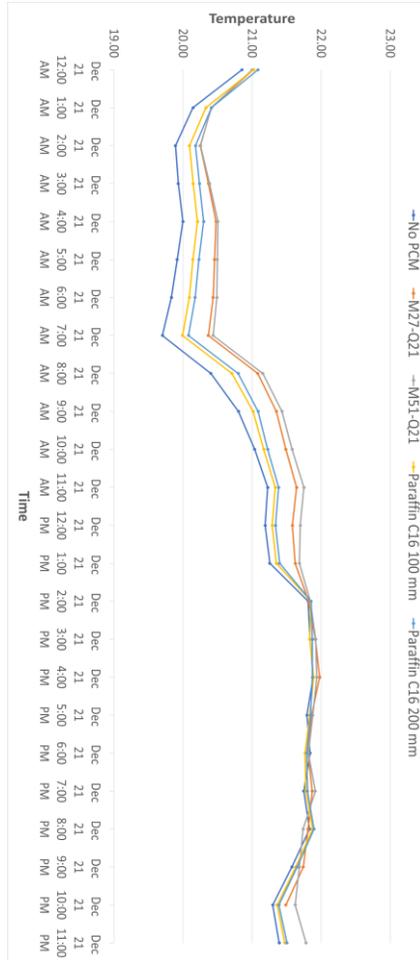
## مناقشة النتائج:

يوضح الشكل (4) مقارنة درجة حرارة الهواء الداخلية في حالة بدون PCM وأربع حالات باستخدام PCM لكامل شهر كانون الأول ويلاحظ من المخطط أن وجود المواد المتغيرة الطور أسهم بشكل كبير في تقليل التفاوت الحراري أثناء اليوم وبالتالي تحسين الراحة الحرارية كون قيم درجات الحرارة باتت تقع ضمن مجال الراحة الحرارية:



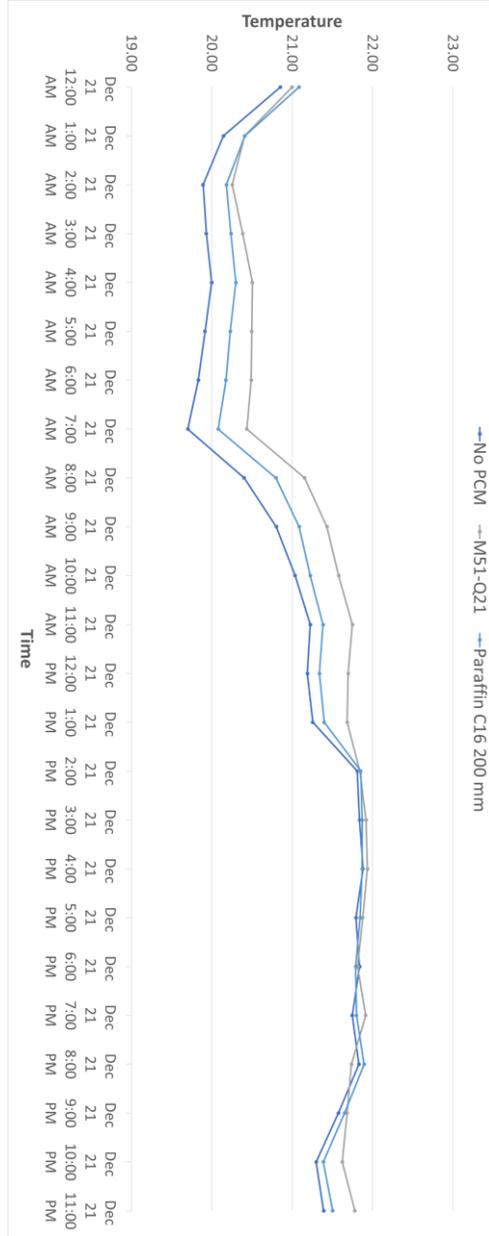
الشكل (4) مخطط درجات حرارة الهواء لكل ساعة من شهر كانون الأول

يوضح الشكل (5) مقارنة درجة حرارة الهواء الداخلية في حالة بدون PCM وأربع حالات باستخدام PCM لأسوأ يوم من شهر كانون الأول ويلاحظ من المخطط أن مواد PCM أسهمت في رفع درجات الحرارة أثناء اليوم حيث تقوم بالشحن أثناء النصف الثاني من وقت عمل النظام من الساعة 2:00 لـ 6:00 مساءً وذلك بسبب بطيء إقلاع النظام (من مساوي التدفئة الأرضية) ليقوم بالتفريغ بعدها حتى الساعة 2:00 ظهراً لليوم التالي ويلاحظ اسهامها أيضاً في التخفيف من أثر الإقلاع البطيء. وكان أداء الـ PCM من نوع **M51/Q21** الأفضل حيث رفعت بقيمة تبلغ 1 درجة مئوية وذلك عند الساعة السابعة صباحاً.



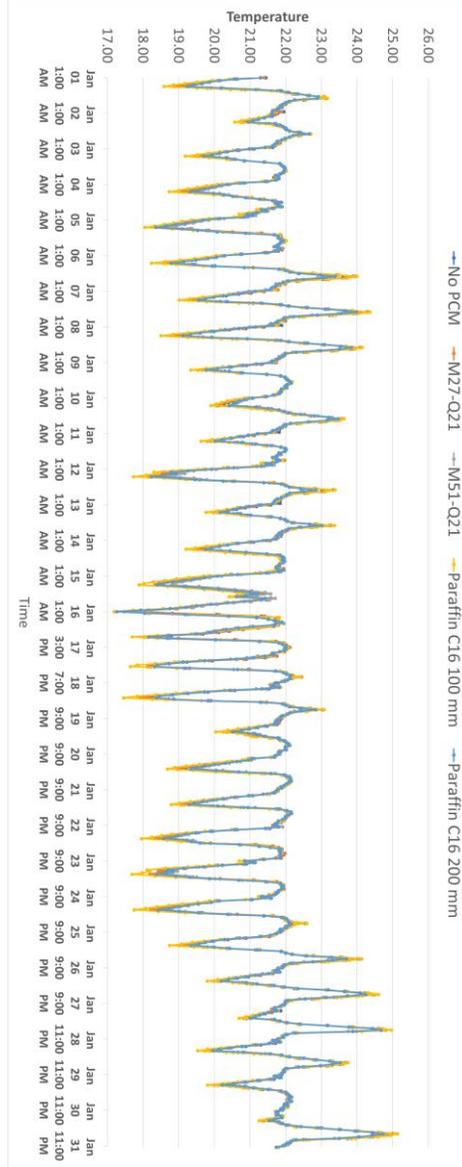
الشكل (5) مخطط درجات حرارة الهواء لكل ساعة من اليوم الأسوأ في كانون الأول

يوضح الشكل (6) مقارنة درجة حرارة الهواء الداخلية في حالة بدون PCM وحالات *No PCM* و *M51/Q21* و *Paraffin C16 200 mm* لأسوأ يوم في شهر كانون الأول:



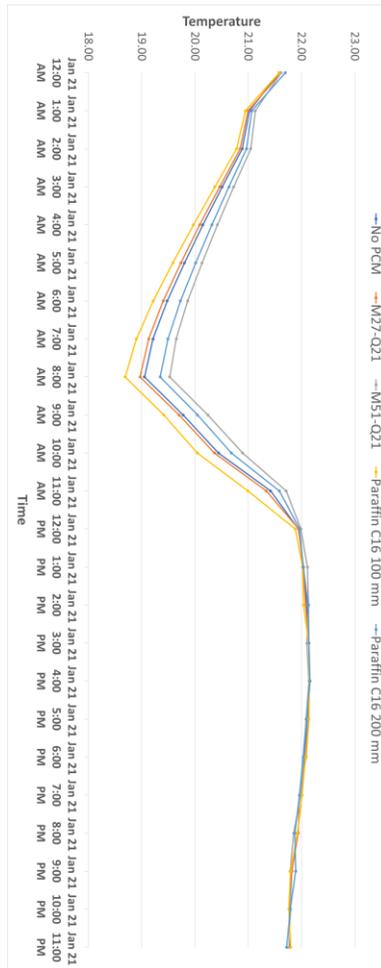
الشكل (6) مخطط درجات حرارة الهواء لكل ساعة من اليوم الأسوأ في كانون الأول لأفضل حالتين

يوضح الشكل (7) مقارنة درجة حرارة الهواء الداخلية في حالة بدون PCM وأربع حالات باستخدام PCM لكامل شهر كانون الثاني ويلاحظ من المخطط أن وجود المواد المتغيرة الطور أسهم بشكل كبير في تقليل التفاوت الحراري أثناء اليوم وبالتالي تحسين الراحة الحرارية كون قيم درجات الحرارة باتت تقع ضمن مجال الراحة الحرارية:



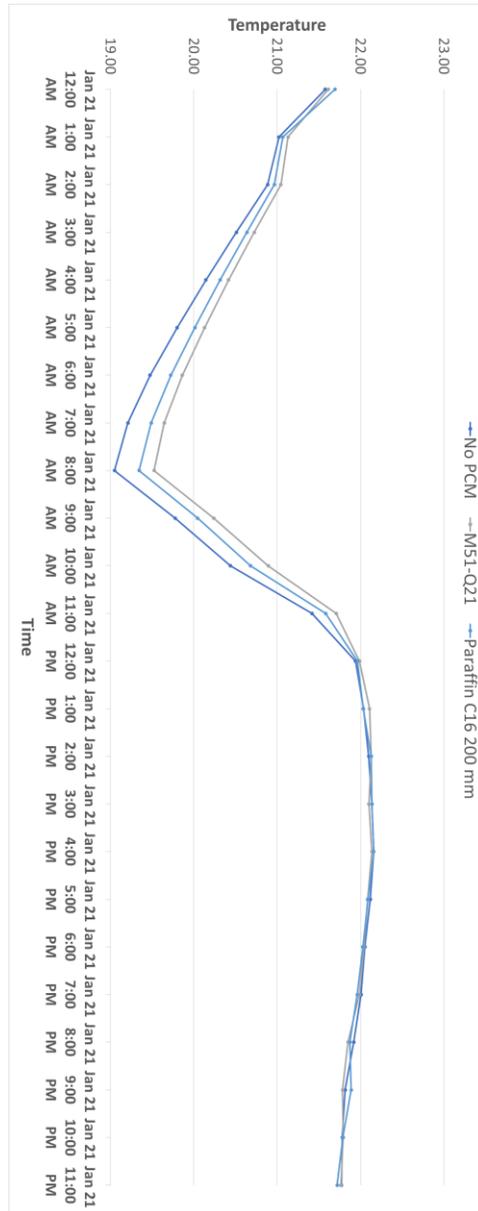
الشكل (7) مخطط درجات حرارة الهواء لكل ساعة من شهر كانون الثاني

يوضح الشكل (8) مقارنة درجة حرارة الهواء الداخلية في حالة بدون PCM وأربع حالات باستخدام PCM لأسوأ يوم من شهر كانون الثاني ويلاحظ من المخطط أن مواد PCM أسهمت في رفع درجات الحرارة أثناء اليوم حيث تقوم بالشحن أثناء النصف الثاني من وقت عمل النظام من الساعة 12:00 لـ 6:00 مساءً وذلك بسبب بطء إقلاع النظام (من مساوي التدفئة الأرضية) ليقوم بالتفريغ بعدها حتى الساعة 12:00 ظهرا لليوم التالي. وكان أداء الـ PCM من نوع  $M51/Q21$  الأفضل حيث رفعت بقيمة تبلغ 1 درجة مئوية وذلك عند الساعة الثامنة صباحاً.



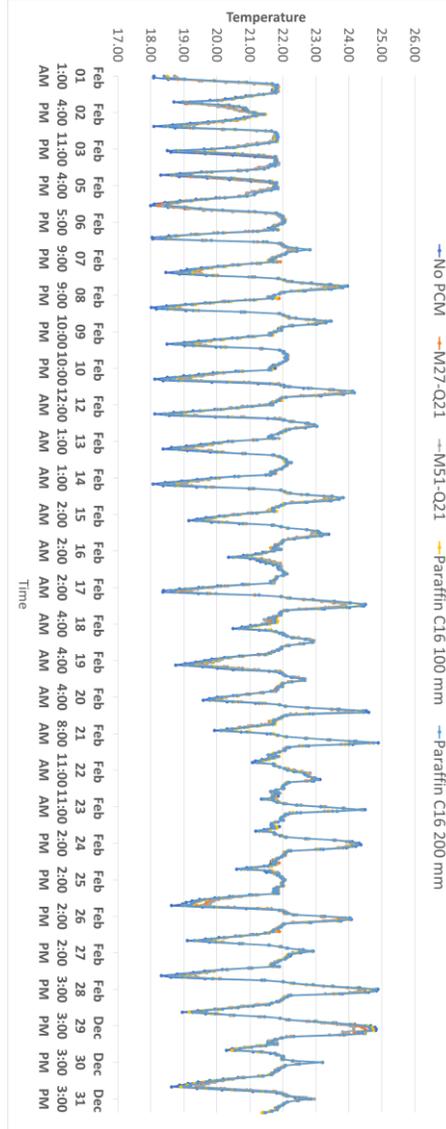
الشكل (8) مخطط درجات حرارة الهواء لكل ساعة من اليوم الأسوأ في كانون الثاني

يوضح الشكل (9) مقارنة درجة حرارة الهواء الداخلية في حالة بدون PCM وحالات *No PCM* و *M51/Q21* و *Paraffin C16 200 mm* لأسوأ يوم في شهر كانون الثاني:



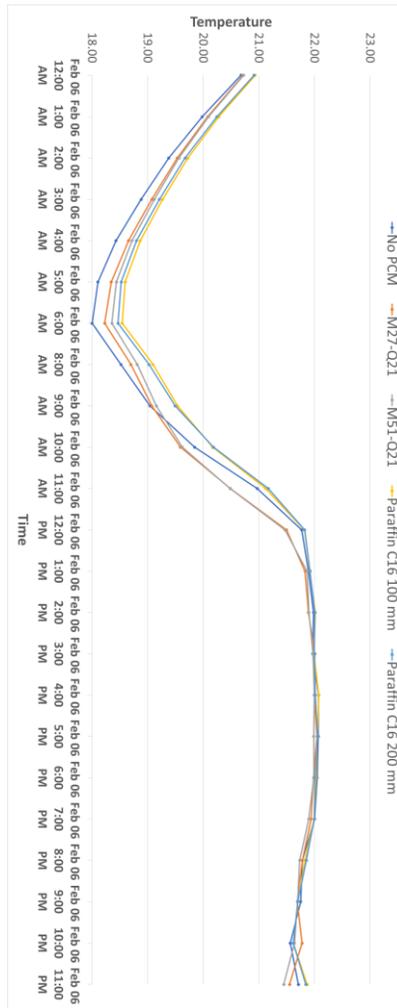
الشكل (9) مخطط درجات حرارة الهواء لكل ساعة من اليوم الأسوأ في كانون الثاني لأفضل حالتين

يوضح الشكل (10) مقارنة درجة حرارة الهواء الداخلية في حالة بدون PCM وأربع حالات باستخدام PCM لكامل شهر شباط ويلاحظ من المخطط أن وجود المواد المتغيرة الطور أسهم بشكل كبير في تقليل التفاوت الحراري أثناء اليوم وبالتالي تحسين الراحة الحرارية كون قيم درجات الحرارة باتت تقع ضمن مجال الراحة الحرارية:



الشكل (10) مخطط درجات حرارة الهواء لكل ساعة من شهر شباط

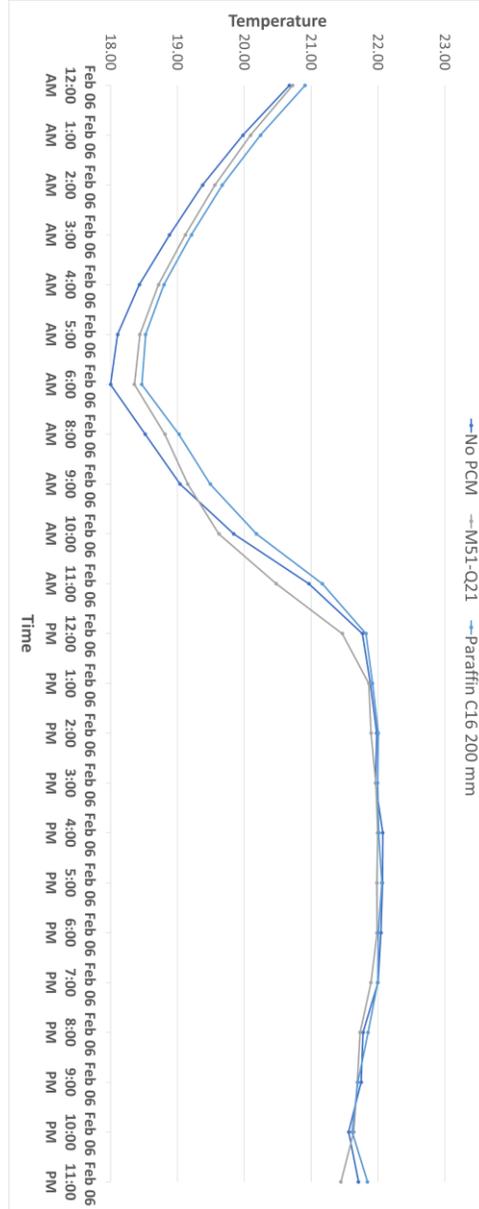
يوضح الشكل (11) مقارنة درجة حرارة الهواء الداخلية في حالة بدون PCM وأربع حالات باستخدام PCM لأسوأ يوم من شهر شباط ويلاحظ من المخطط أن مواد PCM أسهمت في رفع درجات الحرارة أثناء اليوم حيث تقوم بالشحن أثناء النصف الثاني من وقت عمل النظام من الساعة 1:00 لـ 6:00 مساءً وذلك بسبب بطيء إقلاع النظام (من مساوي التدفئة الأرضية) ليقوم بالتفريغ بعدها حتى الساعة 1:00 ظهراً لليوم التالي. وكان أداء الـ PCM من نوع **M51/Q21** الأفضل حيث رفعت بقيمة تبلغ 0.75 درجة مئوية وذلك عند الساعة الثامنة صباحاً.



الشكل (11) مخطط درجات حرارة الهواء لكل ساعة من اليوم الأسوأ في شباط

يوضح الشكل (12) مقارنة درجة حرارة الهواء الداخلية في حالة بدون PCM وحالات *No PCM* و *M51/Q21* و *Paraffin C16 200 mm* لأسوأ يوم في شهر

شباط:



الشكل (12) مخطط درجات حرارة الهواء لكل ساعة من اليوم الأسوأ في شباط لأفضل حالتين

يوضح الجدول (4) مقارنة عدد الساعات التي لا يصل فيها النظام لحالة الراحة الحرارية يبين الجدول في الأشهر الثلاثة (كانون الأول، كانون الثاني، شباط) في حالة عدم وجود المواد المتغيرة الطور وحالة وجود كل من المواد المدروسة التجارية ( M27/Q21 ) (M51/Q21) والبارافينات (Paraffin C16) بسماكتين (100&200 mm). حيث كان عدد الساعات الأقل من أجل المادة **M51/Q21** نلاحظ علاقة مباشرة بين سعة المادة الحرارية (والتي تتعلق بدورها بكمية المادة) وتحسين الراحة الحرارية كون السعة العالية تعطي عتالة حرارية أكبر وبالتالي تقليلاً للفرق الحراري أثناء اليوم.

الجدول (4): عدد الساعات التي لا يصل فيها النظام لحالة الراحة الحرارية

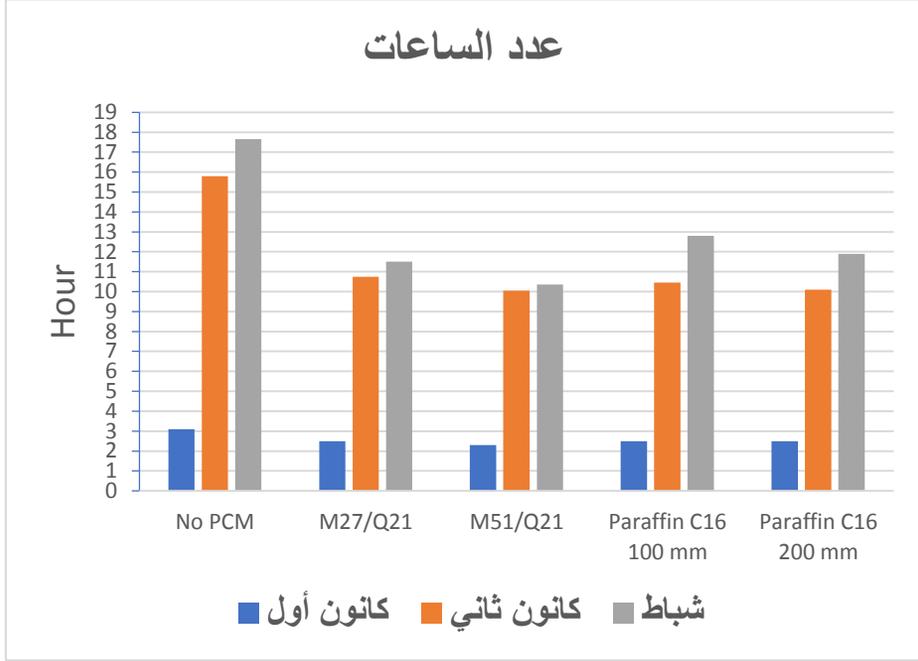
Paraffin C16 200 mm	Paraffin C16 100 mm	M51/Q21	M27/Q21	No PCM	عدد الساعات
2.50	2.50	2.30	2.50	3.1	كانون أول
10.10	10.45	10.05	10.75	15.8	كانون ثاني
11.90	12.80	10.35	11.50	17.65	شباط

ويظهر الجدول (5) أن استعمال المواد المتغيرة الطور أسهم في تحسين ظروف الراحة الحرارية وتقليل عدد الساعات التي لا يصل فيها النظام للراحة الحرارية، بنسب تتراوح بين (19.35% – 41.36%) في الحالات المدروسة جميعاً.

الجدول (5): نسب الساعات التي لا يصل فيها النظام لحالة الراحة الحرارية

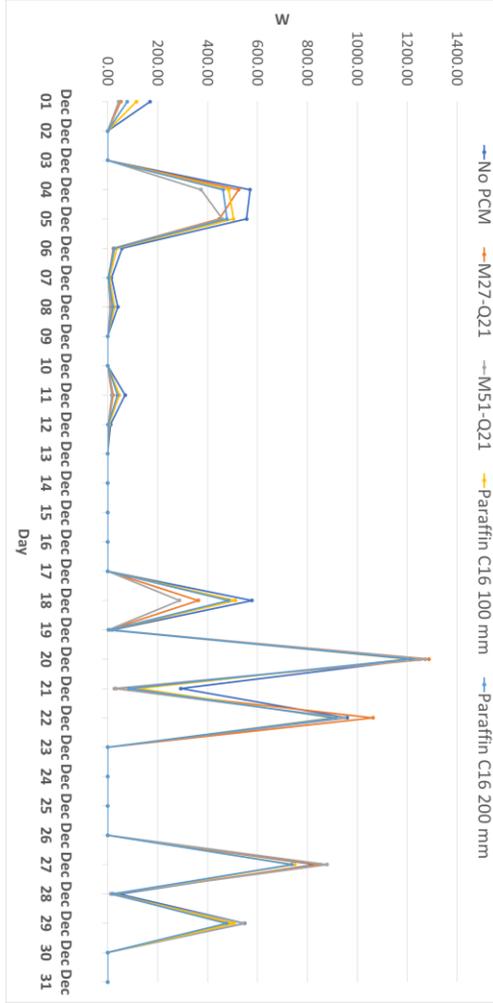
Paraffin C16 200 mm	Paraffin C16 100 mm	M51/Q21	M27/Q21	No PCM	نسبة تحسين الراحة الحرارية %
19.35%	19.35%	25.81%	19.35%	-	كانون أول
36.08%	33.86%	36.39%	31.96%	-	كانون ثاني
32.58%	27.48%	41.36%	34.84%	-	شباط

ويخلص الشكل (13) نتائج تأثير المواد المتغيرة الطور على الراحة الحرارية لأشهر الدراسة الثلاثة (كانون الأول، كانون الثاني، شباط) للمواد التجارية (M51/Q21، M27/Q21، والبرافين (Paraffin C16) عند السماكات 100 & 200 mm:



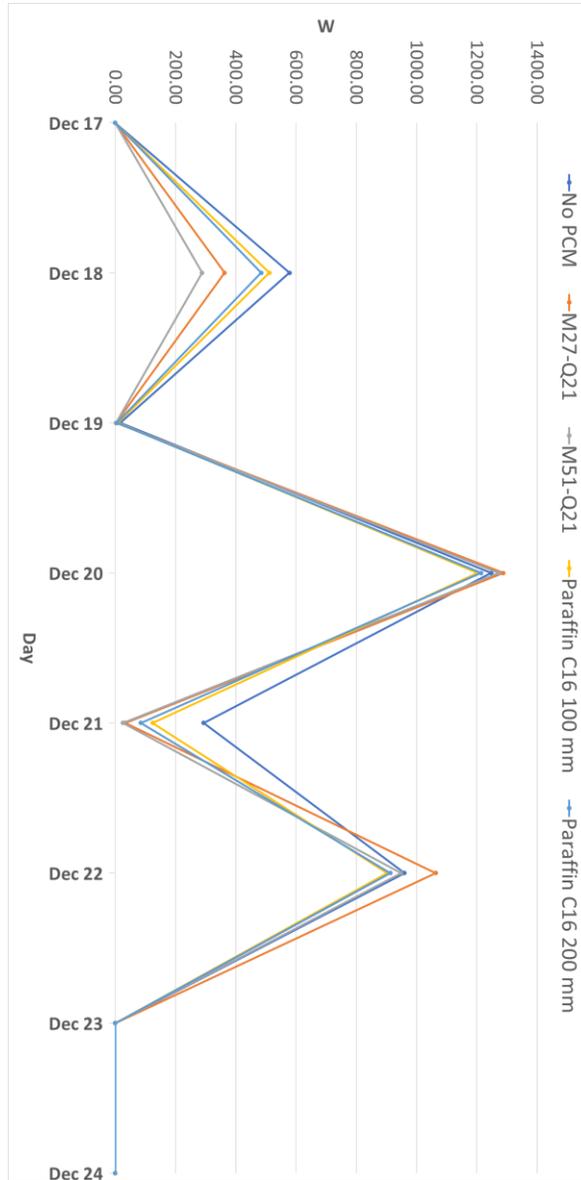
الشكل (13) ملخص نتائج تأثير المواد المتغيرة الطور على الراحة الحرارية

يظهر الشكل (14) مقارنة استهلاك الطاقة في الحالات الخمسة لكامل شهر كانون الأول مع وبدون استخدام المواد المتغيرة الطور حيث نلاحظ انخفاض استهلاك الطاقة مع استعمال الـ PCM حيث تقوم هذه المواد بخزن الحرارة الداخلة مع الاشعاع الشمسي عبر النوافذ وتعيد طرحها أثناء التفريغ مما يقلل الحمل الحراري كما نلاحظ أن المواد M27/Q2 و M51/Q2 كانت الأفضل في الأيام ذات الحمل المنخفض بينما كانت المواد البارافينية (Paraffin C16) عند السماكات 100 & 200 mm أفضل للأيام ذات الحمل المرتفع:



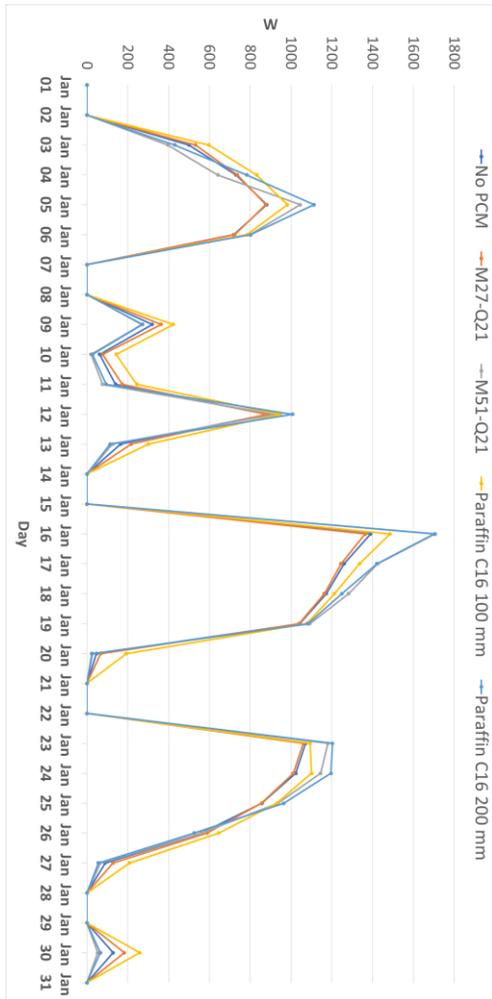
الشكل (14) استهلاك الطاقة من قبل نظام التدفئة لأيام شهر كانون الأول

يوضح الشكل (15) مقارنة استهلاك الطاقة في الحالات الخمسة للأسبوع الأسوأ من شهر كانون الأول مع وبدون استخدام المواد المتغيرة الطور حيث نلاحظ انخفاض استهلاك الطاقة مع استعمال الPCM. ونلاحظ أن  $M51/Q2$  هي الأفضل وتؤمن لأكبر توفير في الطاقة يصل حتى  $350 W/h$  يوم 18 كانون أول:



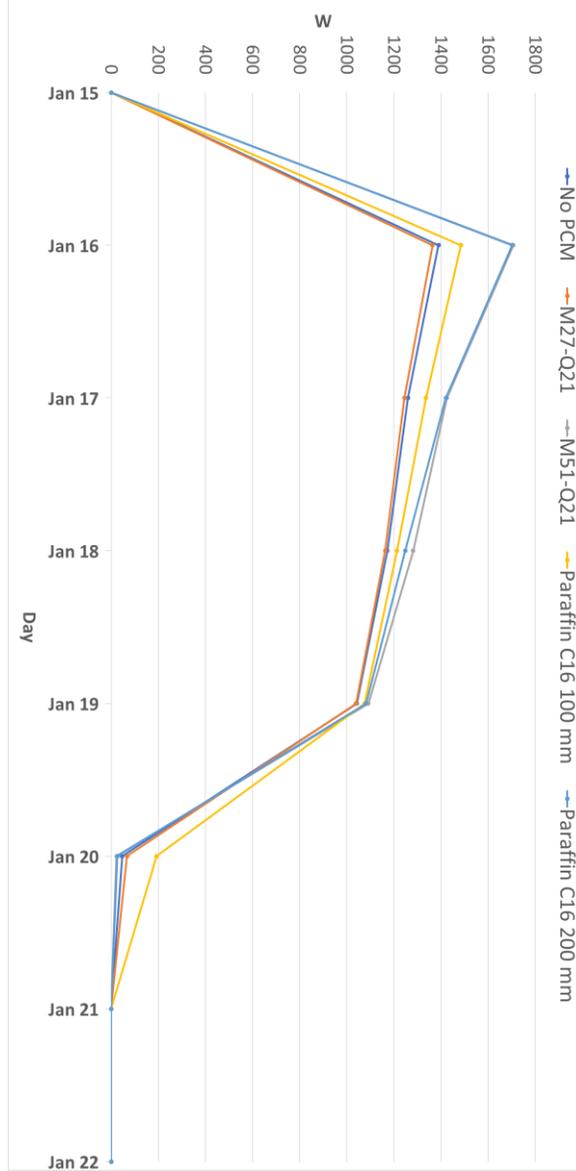
الشكل (15) استهلاك الطاقة من قبل نظام التدفئة لأول أسبوع شهر كانون الأول

يظهر الشكل (16) مقارنة استهلاك الطاقة في الحالات الخمسة لكامل شهر كانون الثاني مع وبدون استخدام المواد المتغيرة الطور حيث نلاحظ انخفاض استهلاك الطاقة مع استعمال الـ PCM حيث تقوم هذه المواد بخزن الحرارة الداخلة مع الاشعاع الشمسي عبر النوافذ وتعيد طرحها أثناء التفريغ مما يقلل الحمل الحراري كما نلاحظ أن المواد  $M51/Q2$  و  $M27/Q2$  تكون الأفضل في الأيام ذات الحمل المنخفض بينما كانت المواد البارافينية (*Paraffin C16*) عند السماكات 100 & 200 mm أفضل للأيام ذات الحمل المرتفع:



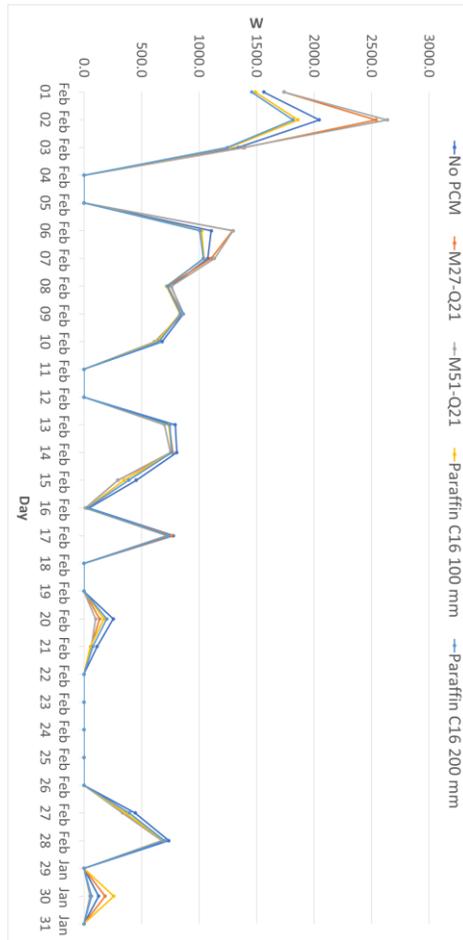
الشكل (16) استهلاك الطاقة من قبل نظام التدفئة لأيام شهر كانون الثاني

يوضح الشكل (17) مقارنة استهلاك الطاقة في الحالات الخمسة للأسبوع للأسوأ من شهر كانون الثاني مع وبدون المواد المتغيرة الطور حيث نلاحظ انخفاض استهلاك الطاقة مع استعمال الPCM ونلاحظ أن *Paraffin C16 200 mm* هي الأفضل وتؤمن لأكبر توفير في الطاقة يصل حتى  $450 \text{ W/h}$  يوم 16 كانون الثاني:



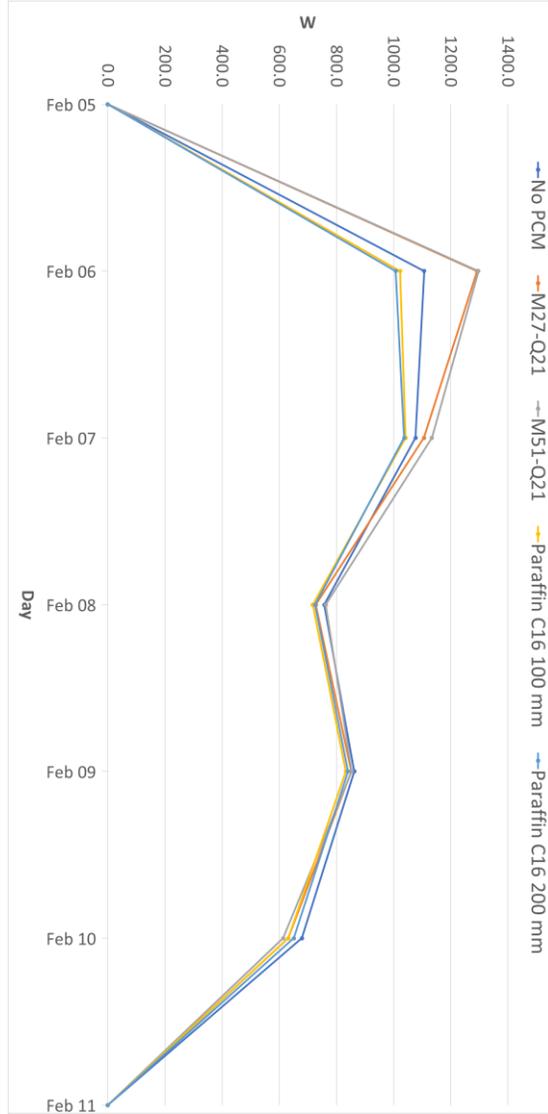
الشكل (17) استهلاك الطاقة من قبل نظام التدفئة لأسوأ أسبوع في شهر كانون الثاني

كذلك يظهر الشكل (18) مقارنة استهلاك الطاقة في الحالات الخمسة لكامل شهر شباط مع وبدون استخدام المواد المتغيرة الطور حيث تقوم هذه المواد بخزن الحرارة الداخلة مع الاشعاع الشمسي عبر النوافذ وتعيد طرحها أثناء التفريغ مما يقلل الحمل الحراري كما نلاحظ أن المواد  $M27/Q2$  و  $M51/Q2$  تكون الأفضل بتوفير الطاقة في الأيام ذات الحمل المنخفض ولكنها تقوم باستهلاك طاقة إضافية خلال الأيام الأسوأ بينما كانت المواد البارافينية ( $Paraffin C16$ ) عند السماكات 100 & 200 mm أفضل للأيام ذات الحمل المرتفع:



الشكل (18) استهلاك الطاقة من قبل نظام التدفئة لأيام شهر شباط

يوضح الشكل (19) مقارنة استهلاك الطاقة في الحالات الخمسة للأسبوع الأسوأ من شهر شباط مع وبدون استخدام المواد المتغيرة الطور حيث نلاحظ انخفاض استهلاك الطاقة مع استعمال الPCM ونلاحظ أن *Paraffin C16 200 mm* هي الأفضل وتؤمن لأكبر توفير في الطاقة يصل حتى  $300 \text{ W/h}$  يوم 6 شباط ، إذ يعود سبب ذلك إلى درجة حرارة الانصهار المنخفضة:



الشكل (19) استهلاك الطاقة من قبل نظام التدفئة لأسوأ أسبوع في شهر شباط

يبين الجدول (6) مقارنة كميات استهلاك الطاقة في الأشهر (كانون الأول، كانون الثاني، شباط) في حالة عدم وجود المواد المتغيرة الطور وحالة وجود كل من المواد المدروسة التجارية (M27/Q21 M51/Q21) والبارافينات (Paraffin C16) بسماكتين (100&200 mm).

حيث كان استهلاك الطاقة الأقل من أجل المادة **Paraffin C16 200 mm** كونها تجمع بين السماكة الجيدة والتي تعني سعة حرارية عالية من جهة ودرجة الانصهار المنخفضة من جهة مما يسمح لها بالشحن أثناء عمل النظام دون كلف إضافية ومن ثم إعادة إرسال الحرارة الضائعة والمخزنة إلى الحيز.

الجدول (6): كميات استهلاك الطاقة في الأشهر الثلاثة في حالة عدم وجود المواد المتغيرة الطور وحالة

وجود كل من المواد المدروسة

Paraffin C16 200 mm	Paraffin C16 100 mm	M51/Q21	M27/Q21	No PCM	استهلاك الطاقة (kW/h)
121.1	126.19	117.81	124.94	144.47	كانون أول
313.08	318.82	330.27	339.17	355.07	كانون ثاني
306.23	307.71	337.7	338.31	332.62	شباط

يظهر الجدول (7) أن المواد المتغيرة الطور أسهمت بتقليل الاستهلاك وينسب تتراوح بين (4.48 – 18.45%) إلا في حالتين هما للمواد التجارية وجدنا عندها زيادة في استهلاك الطاقة **M27/Q21 & M51/Q21** في شهر شباط بنسبة لا تتجاوز 1.71%.

الجدول (7): نسب كميات استهلاك الطاقة في الأشهر الثلاثة وفي حالة عدم وجود المواد المتغيرة الطور

وحالة وجود كل من المواد المدروسة

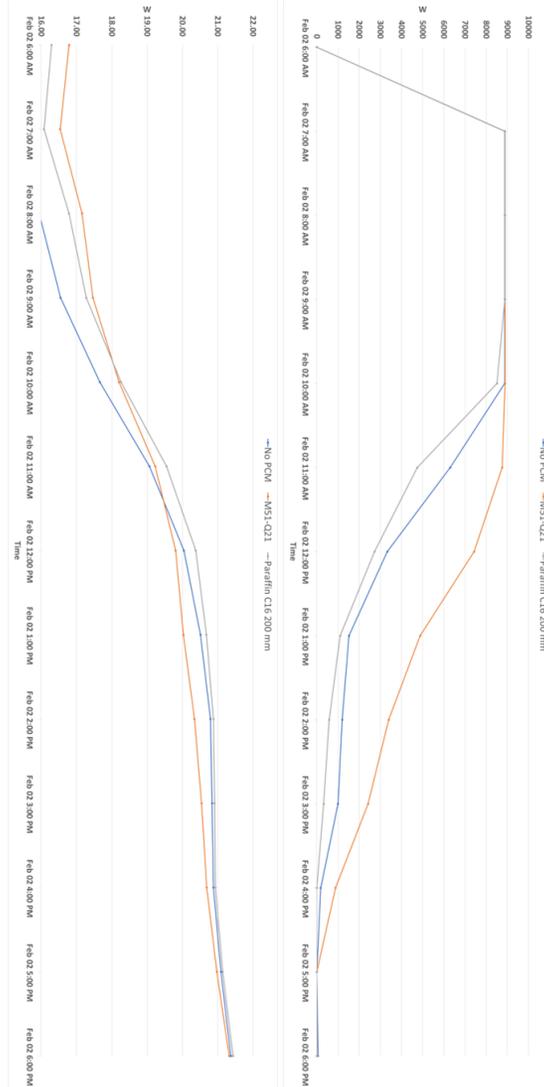
Paraffin C16 200 mm	Paraffin C16 100 mm	M51/Q21	M27/Q21	No PCM	نسبة توفير الطاقة %
16.18%	12.65%	18.45%	13.52%	-	كانون أول
11.83%	10.21%	6.98%	4.48%	-	كانون ثاني
7.93%	7.49%	-1.53%	-1.71%	-	شباط

يوضح الشكل (17-4) مقارنة درجات الحرارة واستهلاك الطاقة لمادة تجارية والبرافين

خلال أسوأ يوم بشهر شباط لتفسير زيادة الحمل:

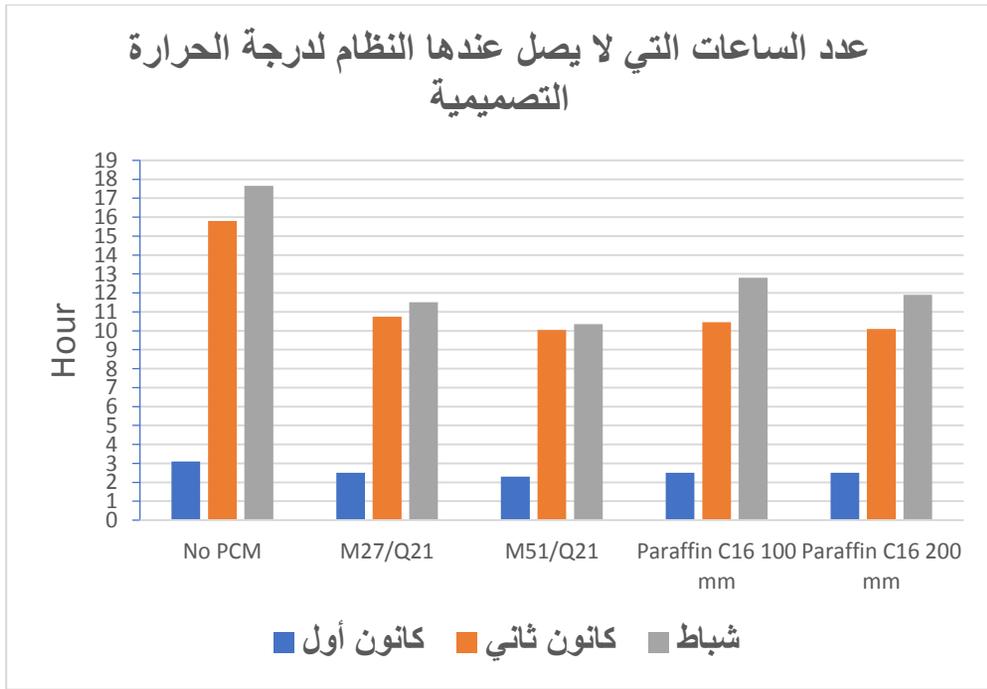
حيث وبسبب زيادة الحمل فإن كمية الحرارة هذه لم تعد كافية لشحن المادة ويضطر النظام للعمل لفترة إضافية لصهر المادة المتغيرة الطور بالكامل كون درجة حرارة انصهار

**M51/Q21 أعلى بدرجتين على الأقل من Paraffin C16:**



الشكل (17-4) مقارنة درجات الحرارة واستهلاك الطاقة لمادة تجارية والبرافين خلال أسوأ يوم بشهر شباط

ويخلص الشكل (4-18) نتائج تأثير المواد المتغيرة الطور على استهلاك الطاقة لأشهر الدراسة الثلاثة (كانون الأول، كانون الثاني، شباط) للمواد التجارية (M27/Q21، M51/Q21)، والبرافين (Paraffin C16) عند السماكات 100 & 200 mm:



الشكل (4-18) ملخص نتائج تأثير المواد المتغيرة الطور على استهلاك الطاقة

## الاستنتاجات:

تبين من خلال دراستنا أنه بالإمكان تحسين مردود نظام التدفئة الأرضية بإضافة مواد متغيرة الطور، حيث وجدنا:

إن استعمال المواد المتغيرة الطور أدى إلى تقليل استهلاك الطاقة بنسب تتراوح بين (4.48 – 18.45%) ونلاحظ أن *Paraffin C16 200 mm* قدمت أعلى نسبة توفير في غالب الأشهر.

أدى استعمال المواد المتغيرة إلى تحسين قدرة النظام على تأمين ظروف الراحة الحرارية وتقليل عدد الساعات التي لا يصل فيها النظام لشروط الراحة الحرارية، بنسب تتراوح بين (19.35 – 41.36%) وكانت النسبة الأفضل للمادة *M51/Q21* تليها بشكل مباشر المادة *Paraffin C16 200 mm*.

نلاحظ أن *Paraffin C16 200 mm* أفضل مادة بشكل عام كونها تجمع ما بين تحسين الراحة الحرارية وتوفير الطاقة وذلك على مدى شهور الدراسة الثلاثة.

تم الحصول على نتائج مشابهة للمواد التجارية باستخدام مواد متوفرة محلياً ك *Paraffin C16*، مما يؤكد واقعية البحث وإمكانية تطبيقه عملياً في سورية.

## التوصيات:

نوصي باستخدام مواد متغيرة الطور عند تنفيذ منظومات التدفئة الأرضية كونها قادرة على تحسين أداء نظام التدفئة من ناحيتي استهلاك الطاقة وتحقيق شروط الراحة الحرارية.

المراجع:

- [1]. JinChul Park and TaeWon Kim, Analysis of the Thermal Storage Performance of a Radiant Floor Heating System with a PCM, Graduate School of Chung-Ang University, Seoul (5 April 2019)
- [2]. Lindsay Fialkov, Reducing the energy consumption by using floor heating with phase change materials In the Toronto climate, Ryerson University, Toronto, Ontario, Canada (2017)
- [3]. Javier Mazo et al, Modeling a radiant floor system with Phase Change Material (PCM) integrated into a building simulation tool: Analysis of a case study of a floor heating system coupled to a heat pump, University of Zaragoza, Zaragoza, Spain (14 December 2011)
- [4]. Jisoo Jeon et al, PCM Application Methods for Residential Building Using Radiant Floor Heating Systems, Soongsil University, Seoul 156-743, Republic of Korea (2019)
- [5]. د. رمي جورج ومحمد ياسين، تأثير استخدام المواد متغيرة الطور (PCM) في الجدران والسقف في الأحمال الحرارية ودرجة الحرارة الداخلية في الأبنية، مجلة جامعة تشرين لمبحوث والدراسات العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (33) العدد (3) 2011
- [6]. د. رمي جورج ومحمد ياسين، مقارنة استخدام كل من مادة متغيرة الطور (PCM) ومادة عازلة لتحسين الأداء الحراري للأبنية، مجلة جامعة تشرين لمبحوث والدراسات العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (34) العدد (4) 2012
- [7]. د. مها أحمد، تأثير استخدام المواد متغيرة الطور PCM على درجات الحرارة الداخلية لخلايا تجريبية. دراسة تجريبية ومحاكاة رقمية، مجلة جامعة تشرين لمبحوث والدراسات العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (33) العدد (2) 2011
- [8]. د. مها أحمد، تعيين الأبعاد المثالية لجدار يحتوي على مواد متغيرة الطور (PCM) ويخضع لدرجات حرارة متغيرة، محاكاة رقمية، مجلة جامعة تشرين لمبحوث والدراسات العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (39) العدد (6) 2017
- [9]. EnergyPlus™ Version 23.1.0 Documentation, Engineering, Reference, U.S. Department of Energy, March 28, 2023