

Research Article

An Experimental and Theoretical Study of the Performance of the Thermal Storage Using Phase Change Materials

Ali Ramadan Alkhazmi ^{1*}, Mohammed Hamdan ².¹ Mechanical & Renewable Energy Engineering, Wadi Alshatti University, Brack-Libya² Mechanical Engineering Department, Technical College: KUTC, Khawarizmi University, Amman - Jordan*Corresponding author: al.alkhazmi@wau.edu.ly

Received: May 20, 2023

Accepted: July 10, 2023

Published: July 18, 2023

This is an open access article under the BY-CC license

المخلص: تم في هذا البحث دراسة أداء خزان ماء يحتوي على مواد متغيرة الطور في منظومة تسخين مياه منزلية شمسية. تم إجراء المحاكاة الديناميكية تجريبياً ونظرياً عن طريق برنامج بلغة الفورتران كتب خصيصاً للحصول على درجات الحرارة وكمية الطاقة المخزونة على مدار 24 ساعة في الخزان الحراري وباستخدام مادة شمع البرافين والتي تعد من المواد المتغيرة الطور (PCM). حيث وضعت كبسولات ملينة بشمع البرافين كوحدة تخزين في داخل الخزان. بينت الدراسة التجريبية بوضوح كافة المراحل التي تمر بها المادة المتغيرة الطور، كما بينت نجاعة استخدام المواد المتغيرة الطور في كبح سرعة كسب وفقد الحرارة من خزانات المياه. أما الدراسة النظرية فقد بينت ان افضل اداء للخزان الحراري عندما تشكل نسبة المواد المتغيرة الطور 25% من حجم الخزان الحراري.

الكلمات الاستفتاحية: منظومة تسخين المياه بالطاقة الشمسية، المواد المتغيرة الطور، الحرارة الكامنة، الحرارة المحسوسة، الخزان الحراري.

Abstract: In this research, the performance of a water tank containing phase change materials in a solar domestic water heating system was studied. The dynamic simulations were carried out experimentally and theoretically by means of a FORTRAN program written specifically to obtain the temperatures and the amount of energy stored over 24 hours in the thermal reservoir, using paraffin wax, which is a phase change material (PCM). Where capsules filled with paraffin wax were placed as a storage unit inside the tank. The experimental study clearly showed all the phases that the metaphase material goes through, as well as the effectiveness of using phase-changing materials in curbing the speed of heat gain and loss from water tanks. As for the theoretical study, it showed that the best performance of the thermal reservoir when the proportion of phase changing materials constitutes 25% of the volume of the thermal reservoir.

Keywords: Solar Water Heating System; Phase Change Materials; Latent Heat; Sensible Heat; Thermal Storage.

1. المقدمة

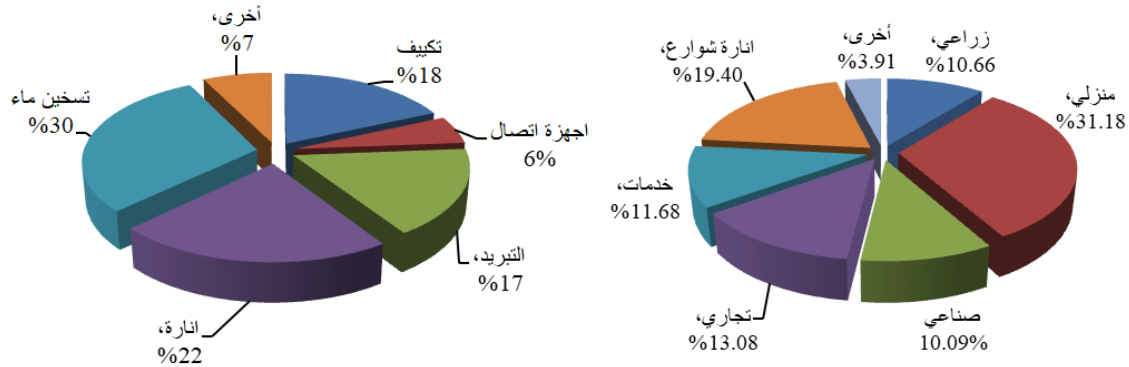
يواجه العالم تحدياً كبيراً على مستويين: فمن جهة مواجهة الظواهر المناخية التي تعصف بالكرة الأرضية، نتيجة لارتفاع معدلات تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون الناجم عن حرق الوقود الأحفوري المستخدم في إنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية. حيث يعتبر قطاع صناعة الطاقة من أكبر مصادر التلوث بنسبة 35% من إجمالي انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون [1-4]. ومن جهة أخرى ضمان امداد الطاقة الآمن للبشرية والتي تعتبر المحرك الأساسي لكافة القطاعات الصناعية والزراعية والتجارية. وتعتبر الطاقات المتجددة الصديقة للبيئة مخرجاً مقبولاً تقنياً واقتصادياً من هذا المأزق [5-7].

يتزايد الاهتمام بالطاقة المتجددة في العالم، وذلك بسبب العديد من الفوائد التي تقدمها، بما في ذلك تقليل الانبعاثات الضارة والحفاظ على البيئة، والحد من استنزاف الموارد الطبيعية المحلية، وتحسين جودة الحياة. ولقد شهدت العديد من الدول تطوراً كبيراً في دمج الطاقة المتجددة في نظم توليد الطاقة التقليدية، ويتوقع أن يستمر هذا التطور في المستقبل وصولاً إلى الاعتماد الكلي على الطاقات المتجددة في تزويد المجتمعات بالطاقة بكافة أشكالها [8,9]. في الحقيقة أظهرت الأزمات الروسية-

الأوكرانية هشاشة نظم الطاقة التقليدية العالمية من حيث اعتمادها على مصدر وحيد وعدم التنوع في مصادر الطاقة، فاعتماد أوروبا على الغاز الروسي وضعها في موقف محرج من حيث التزاماتها في امداد مواطنيها بالطاقة من ناحية وبالموقف السياسي من القضية. وكان الرد سريعاً، حيث اتفق المفاوضون في البرلمان الأوروبي والمجلس الأوروبي المكون من 27 دولة على أنه بحلول عام 2030 سيلتزم الاتحاد الأوروبي بتأمين 42.5% من طاقته من مصادر متجددة مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية، مع إمكان زيادة تصل إلى 45%. يأتي الاتفاق على زيادة مساهمة الطاقة المتجددة ركيزة مهمة في خطط دول الاتحاد لمكافحة تغير المناخ والتوقف عن استعمال الوقود الأحفوري الروسي [10-12].

وبالمجمل بلغت نسبة مساهمة الطاقات المتجددة في مزيج الطاقة الأوروبية حوالي 22% في عام 2021، وبنسب متفاوتة بين دول الاتحاد الأوروبي، حيث تنصّر السويد بحصة 63% من الطاقة المتجددة، بينما تشكل المصادر المتجددة أقل من 13% من إجمالي الطاقة في كلا من لوكسمبورغ ومالطا وهولندا وأيرلندا. من الجانب الليبي، أطلقت الحكومة الليبية الخطة الاستراتيجية للطاقة المتجددة للأعوام الثلاثين القادمة، والتي تهدف إلى تحقيق مساهمة من الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة الكهربائية بنسبة 25% بحلول عام 2025 و 30% بحلول عام 2030 [13,14]. وبحلول عام 2050، سيتجاوز نسبة مساهمة الطاقات المتجددة في مزيج الطاقة أكثر من 50%. وستأتي هذه الطاقة من طاقة الرياح، والطاقة الشمسية المركزة، والطاقة الشمسية الكهروضوئية، وتطبيقات الطاقة الشمسية الحرارية [15,16].

من أكبر الصعوبات التي تواجه استخدامات الطاقة الشمسية هي كونها مصدر غير منتظم من حيث المقدار والاستمرارية، بحيث يوجد فائض منها في فترات زمنية معينة (نهاراً، صيفاً) ونقص في فترات أخرى (ليلاً، شتاءً)، مما يسبب في قلة اعتماديتها كمصدر للطاقة. فالحاجة إلى الطاقة للعديد من التطبيقات تتراوح مع الزمن من أقصى إلى أدنى مستوياتها، وكذلك الحال بالنسبة للطاقة الشمسية. لكنه لا يوجد أية ضمانات للتقابل الزمني بين العرض (الطاقة الشمسية) والطلب (الحمل). على سبيل المثال نحتاج إلى الماء الساخن ليلاً، ولا وجود للطاقة الشمسية ليلاً [17-20]. كما إننا بحاجة إلى كمية كبيرة من الطاقة الحرارية لتدفئة منازلنا شتاءً، في الوقت الذي لا تتوفر الطاقة الشمسية بتلك الكمية شتاءً، كما أنه ليس من الملائم تصميم منظومة تدفئة كبيرة الحجم لتغطية الحمل الشتوي بالكامل فقط. إن أهمية هذا الموضوع تكمن في ضرورة تخزين الطاقة الشمسية في خزانات لاستخدامها حين الطلب عند عدم وجود أو عجز العرض، وذلك لتلبية متطلبات الحمل [21-24]. وبالنظر إلى توزيع استهلاك الكهرباء والطاقة في ليبيا كما هو موضح بالشكل (1)، نجد أن حوالي 30% من الطاقة تستهلك في تسخين المياه وبالتالي بحيث تتوجه الجهود إلى خفض هذه النسبة وذلك باستخدام المنظومات الشمسية لتسخين المياه كما وأن ليبيا تقع ضمن نطاق الحزام الشمسي والتي يفضل فيها الاستخدامات الحرارية للطاقة الشمسية حيث يصل المجموع اليومي للإشعاع الشمسي حوالي $7.1 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ على الساحل وحوالي $8.1 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ على الجنوب [25-29].



الشكل 1: يوضح توزيع استهلاك الكهرباء في ليبيا.

بذلت العديد من الجهود في سبيل تحسين الأداء الحراري لمنظومات التسخين الحرارية الشمسية، على سبيل المثال برنامج التسخين والتبريد بالطاقة الشمسية الممول من قبل الوكالة الدولية للطاقة والتحليل الحراري لمثل هذه المنظومات مدرج في معظم الكتب الخاصة بالطاقة الشمسية [30-32]. غير أن استخدام PCM في الخزانات الحرارية ظل مقتصرًا على الخزانات الكبيرة والتي تستخدم في توليد الطاقة الكهربائية في محطات حقول المرايا الشمسية (Heliostat) ومحطات المجمعات ذات القطع المكافئ (Trough) والأبراج الشمسية (solar tower). وكذلك في المنازل للتقليل من احمال التبريد، ولتبريد الخلايا الشمسية [33-34]. يهدف هذا البحث إلى دراسة تقنية تخزين الطاقة الحرارية بإضافة مواد متغيرة الطور التي يمكن أن تساعد على الحفاظ وزيادة كفاءة استخدام الطاقة عند استخدامها في درجات الحرارة المناسبة وكما يمكن أن تساعد في الحفاظ على مستوى درجة الحرارة في خزان المياه عند نقطة معينة وعند تفرغها للطاقة المخزونة. بالتالي تم تحديد الغرض من الدراسة:

1. دراسة التحليل الحراري للخزان الحراري.
2. تحديد حجم (PCM) اللازم للمنظومة.
3. تعيين درجات حرارة الخزان في فترتي الشحن والتفريغ.

2. المواد وطرق العمل

يمكن تخزين الطاقة الشمسية على أي شكل من أشكال الطاقة:

- الطاقة الحرارية: الطاقة الحرارية المحسوسة أو الطاقة الحرارية الكامنة.
- الطاقة الكيميائية: البطاريات، خلايا الهيدروجين.
- الطاقة الميكانيكية: الحداقة .
- الطاقة الكهربائية: المكثفات الفائقة القدرة .
- طاقة الوضع: خزان الطاقة الهيدروليكية HPS .

الخزن الحراري يتمثل عن طريق نقل الطاقة المفيدة المكتسبة من المجمعات الشمسية إلى وسط التخزين، حيث تقوم بزيادة الطاقة الداخلية للوسط. قد يحدث هذا بتغير في الطور أو بدونه . ويعتمد اختيار طريقة التخزين على طبيعة العملية. فمثلا لعملية تسخين المياه، فان خزن الطاقة كحرارة محسوسة في الماء المخزن تكون عملية منطقية. فإذا كانت مجمعات تسخين الهواء هي المستعملة، فإنه يمكن استخدام طرق تخزين الحرارة على صورتها المحسوسة أو الكامنة. وفي التسخين الغير فعال (السليبي)، يكون التخزين على صورة حرارة محسوسة مباشرة في جسم عناصر المبني [35-38] . إن الخصائص الأساسية لأنظمة خزن الطاقة الحرارية هي:

- السعة على وحدة حجم الخزان.
- مدى درجة حرارة التشغيل وهي درجة الحرارة التي عندها تضاف أو تسحب الحرارة إلى أو من الخزان.
- فرق درجات حرارة الإضافة والسحب المرافقة لظروف التشغيل.
- تدرج درجات الحرارة في الخزان.
- الطاقة اللازمة لإضافة أو سحب الحرارة إلى ومن الخزان.
- طرق التحكم في الفقد الحراري من الخزان.
- التكلفة.

1.2 الخزن الحراري المحسوس:

في الحرارة المحسوسة يتم تخزين الطاقة الحرارية من خلال رفع درجة حرارة المادة، سائلة أو صلبة. تعتمد عملية خزن الطاقة الحرارية المحسوسة على خواص الوسط المستخدم للخزن، وكثيرا ما يستخدم في خزن الحرارة المحسوسة المواد الصلبة مثل الحجر أو الطوب وغيرها. وتوجد كمية الطاقة الحرارية المخزنة على هيئة حرارة محسوسة من المعادلة الآتية [39-42]:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} m \cdot cp \cdot dT \quad (1)$$

$$Q = mCp(T_f - T_i) \quad (2)$$

حيث: T_i - تمثل درجة الحرارة الأولية (°C)، T_f - درجة الحرارة النهائية (°C)، m - كتلة المادة (kg)، C_p - السعة الحرارية للمادة (J/kg.K).

2.2 الخزن الحراري الكامن:

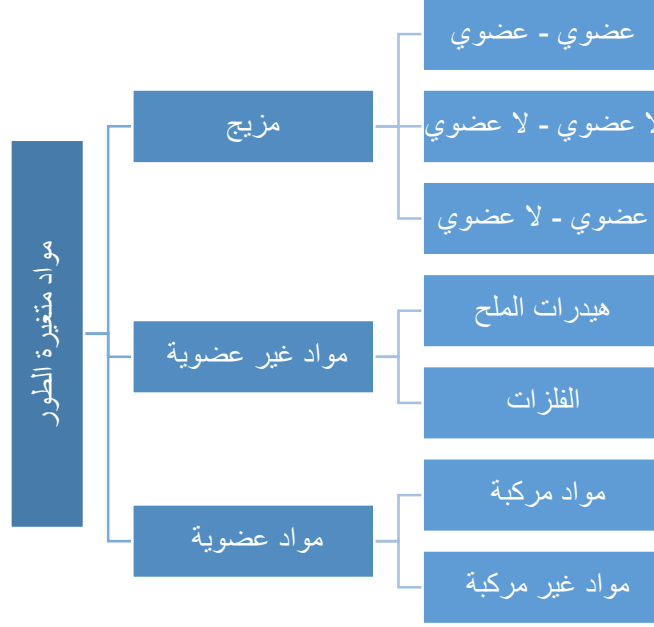
تعرف الحرارة الكامنة بأنها كمية من الحرارة اللازمة لتحويل وحدة الكتل من المادة الصلبة الى نفس الكتلة من نفس المادة السائلة عند نفس درجة الحرارة (درجة الانصهار) وحدة قياسها في الجملة الدولية هي الجول (جول/كيلو جرام) . ان الطاقة المجهزة لتحويل المادة الصلبة الى سائلة تسمى الحرارة الكامنة للانصهار وهي طاقة مخفية بحيث لا تظهر على مقياس الحرارة عند التحول الطوري فهي تعتمد على امتصاصية الحرارة , فهي طاقة مخزونة يمكن التحكم بها واستخدامها لاحقا , كما ان تغير الطور الفيزيائي للمادة يصحبها عند انتقالها من طور الى اخر. ان الحرارة المتحررة من انصهار مادة متغيرة الطور ترفع درجة حرارة الماء مرة أخرى في حين استنزاف الطاقة الحرارية من الخزان او غياب الطاقة الشمسية التي تزود في الخزان عن طريق المجمعات الشمسية , ولأن درجة حرارة المادة عند تغير الطور لا تتغير تسمى هذه الطريقة بالخزن الحراري الكامن . وتوجد كمية الطاقة الحرارية المخزنة على صورة حرارة كامنة من المعادلة الآتية [43-46]:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} (m \cdot cp) s \cdot dT + m \cdot L_m + \int_{T_m}^{T_f} (m \cdot cp) L \cdot dT \quad (3)$$

$$Q = (m \cdot Cp)_s \cdot (T_m - T_i) + m \cdot L_m + (m \cdot Cp)_L \cdot (T_f - T_m) \quad (4)$$

حيث، T_m - هي درجة انصهار المادة المتغيرة الطور ($^{\circ}\text{C}$)، T_i - درجة حرارة بداية تحول المادة ($^{\circ}\text{C}$)، L_m : الحرارة الكامنة للانصهار (kJ/kg)، T_f - درجة الحرارة النهائية ($^{\circ}\text{C}$).

3.2. تصنيفات المواد المتغيرة الطور
تصنف المواد المتغيرة الطور الى ثلاثة أصناف: مواد عضوية، ومواد لاعضوية ومواد مختلطة كما هو موضح بالشكل [15]. (2)



الشكل 2: تصنيف المواد المتغيرة الطور.

وتتمتاز البرافينات (المواد الشمعية) بسهولة الاستخدام وهي مواد [47-52]:

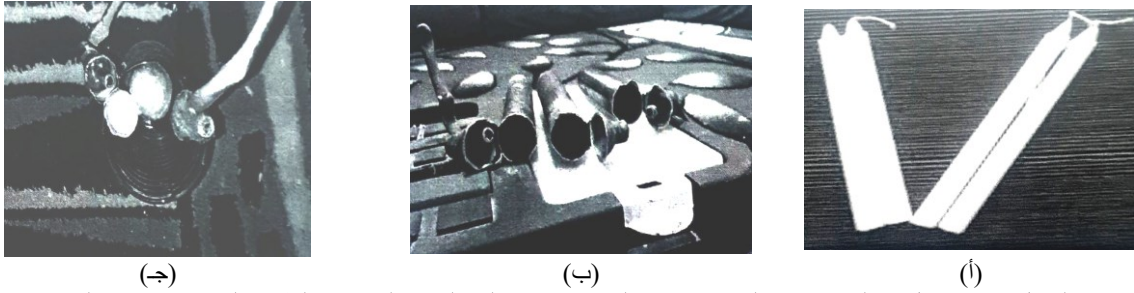
- غير سامة.
- لا تسبب الصدأ.
- معامل توصيل حراري جيد.
- حرارة كامنة كبيرة.
- سعر منخفض.
- ليس له رائحة كريهة.
- نقطة اشتعال مرتفعة .

4.2. الدراسة التجريبية للخرانات الحرارية

أجريت التجربة في معامل مركز بحوث ودراسات الطاقات المتجددة والتنمية المستدامة بجامعة وادي الشاطئ – براك الشاطئ – ليبيا. حيث تم تصميم منظومة صغيرة تحاكي خزان المياه في المنظومة الشمسية، وتكونت المنظومة من الاجزاء التالية:

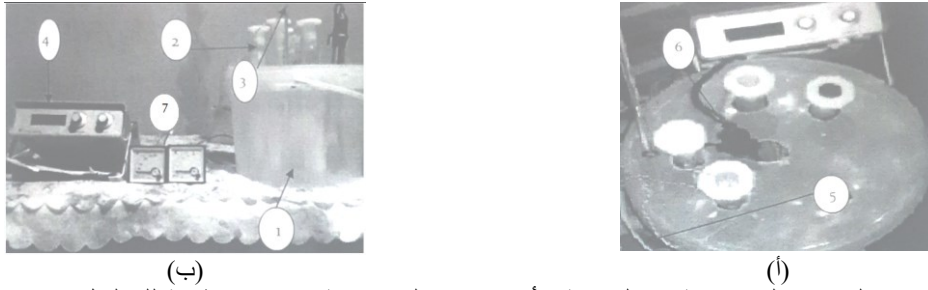
1. وعاء ماء (15 لترا).
2. انابيب نحاسية بقطر 1 cm وبطول 5 cm والتي ستعمل كمستودعات لحفظ مادة الشمع.
3. تيرموتر للمعايرة.
4. جهاز قياس درجات الحرارة الالكتروني.
5. اسلاك الازدواج الحراري (Thermocouples) .
5. سخان كهربائي يحاكي المجمعات الشمسية (W800).
7. جهاز لقياس فرق الجهد وشدة التيار الكهربائي.
8. شمع البرافين (2 kg).
9. محرك كهربائي لتحريك الماء لضمان درجات حرارة متسوية لكل الخزان.

استخدم في الدراسة مادة الشمع الموجودة في السوق كما هو مبين في الشكل (3-أ). تم اذابة الشمع وصبه في المستودعات النحاسية الصغيرة كم هو مبين في الشكل (3-ب) وكانت الحالة النهائية للشمع بعد ان تجمد موضعا بالشكل (3-ج).



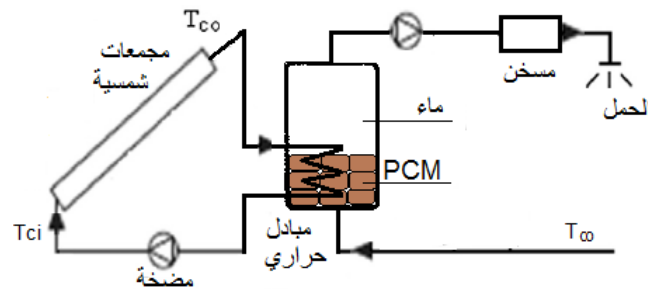
الشكل 3: مراحل عملية تجهيز المستودعات التي تحتوي على المادة المتغيرة الطور المستخدمة في التجربة. (أ) الشمع، (ب) المستودعات النحاسية، (ج) الشمع داخل المستودعات النحاسية

الشكل 4: يبين الاجزاء الرئيسية المستخدمة في التجربة وطريقة وضع اسلاك الازدواج الحراري داخل المستودعات لتسجيل درجات حرارة الشمع داخل المستودعات النحاسية. وتمثلت الشروط الابتدائية للتجربة في درجة حرارة الماء والمادة المتغيرة الطور عند 25°C .



الشكل 4: الاجهزة والمعدات المستخدمة في التجربة. (أ) الاجهزة المستخدمة، الارقام مطابقة للتسلسل في مكونات التجربة، (ب) توصيل اسلاك الازدواج الحراري داخل مستودعات الشمع.

- 5.2. التحليل الرياضي لمنظومات التخزين الحراري الشمسي
- يبين الشكل (5) منظومة الخزان الحراري الشمسي وتتكون المنظومة من الاجزاء التالية:
- أنابيب ناقلة للماء.
 - مجمع شمسي لتسخين الماء عن طريق الطاقة القادمة من الشمس, وتكون أقصى حرارة للماء في المجمع الشمسي عند منتصف النهار.
 - مضخة ساحبة للماء عند الطلب.
 - مبادل حراري يعمل على تسخين الماء في الخزان عن طريق المجمع الشمسي.
 - الخزان الحراري ويعمل على تجميع الماء القادم من المجمعات الشمسية.
 - مصدر حرارة اضافي.
- ويعتبر الخزان من أهم العناصر في المنظومة ذلك لأنه يعمل على تخزين الطاقة عند زيادة العرض أي (عدم استخدام المياه القادمة من المجمع مباشرة) وتزويدها للحمل عند زيادة الطلب.



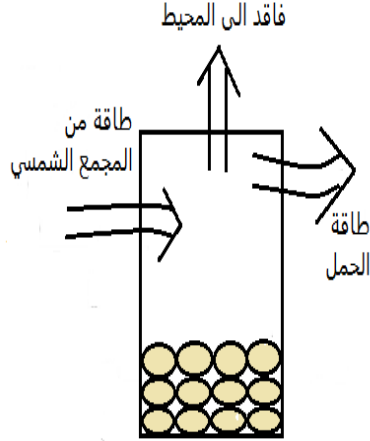
الشكل 5: مكونات منظومة تسخين مياه شمسية.

6.2. الاتزان الحراري للخرزان
يبين الشكل (6) الاتزان الحراري للخرزان وباستخدام القانون الاول لديناميكا الحرارية يمكن صياغة معادلة الاتزان الحراري علي الصورة التالية [17]:

$$\text{الطاقة الداخلة} = \text{الطاقة الخارجة} + \text{معدل التغير في الطاقة الداخلية} \quad (5)$$

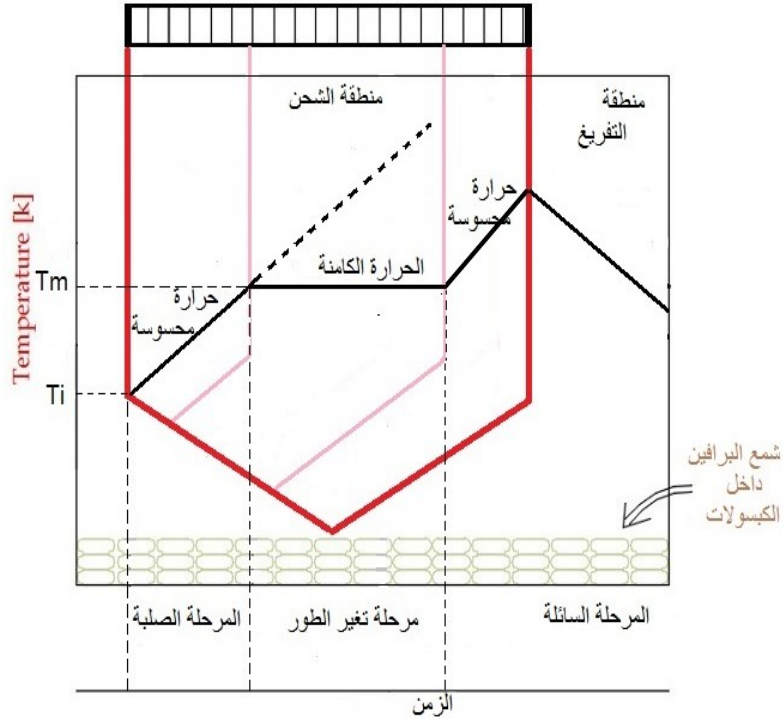
$$Q_{solar} = Q_{loss} + Q_{load} + \Delta E$$

حيث أن: Q_{solar} - الطاقة القادمة من المجمع الشمسي (W)، Q_{loss} - الطاقة المفقودة الى المحيط (W)، Q_{load} - طاقة الحمل (W)، ΔE - معدل التغير في الطاقة الداخلية (W).



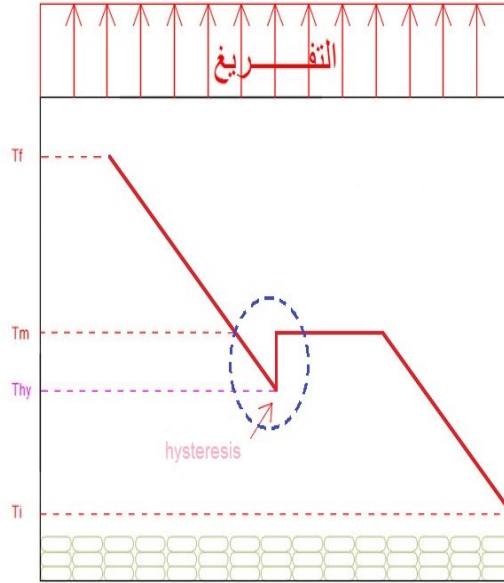
الشكل 6: الاتزان الحراري للخرزان.

7.2. السلوك الحراري للمواد المتغيرة الطور PCM
يمثل الشكل (7) مخططاً توضيحياً لكمية الطاقة الشمسية المضافة الى النظام ومنحنى تغير الطور لمادة PCM في الخزان كدالة في درجة حرار الماء في الخزان.



الشكل 7: مخطط توضيحي لمنحنى الطاقة الشمسية في الخزان وسلوك مادة PCM.

المرحلة الأولى: يوضح الشكل كيفية الطاقة الحرارية في الخزان حيث تزداد درجة الحرارة وتخزن على هيئة حرارة محسوسة الى أن تصل درجة الحرارة الى درجة حرارة انصهار (PCM). عندها تكون المادة بالكامل في طورها الصلب. المرحلة الثانية: وهي مرحلة تغير الطور، ويلاحظ استقرار في درجة الحرارة رغم اضافة طاقة في الخزان يعني ذلك تم الحصول على الخزن الحراري الكامن حيث يمتص ال (PCM) الحرارة في مرحلة ذوبانه ويخزنها ويستمر (PCM) في امتصاص الطاقة حتى نهاية الذوبان . فاذا زادت طاقة الشحن عن ذلك فان النظام سيدخل في المرحلة الثالثة والتي تمثل حرارة محسوسة مرة أخرى وفيها ترتفع درجة حرارة الخزان وتكون (PCM) بالكامل في طوره السائل . وبالتالي تكتمل مرحلة الشحن عند هذه المراحل الثلاثة. وعند استنزاف الطاقة من الخزان تبدأ بذلك مرحلة التفريغ والتي تكون بالمجمل عكس مرحلة الشحن كما هو مبين في الشكل (8). غير أن هناك ظاهرة طبيعية يجب الوقوف عندها وهي ظاهرة اعادة البلورة (hysteresis phenomena) .



شكل 8: ظاهرة التخلف وتحرر الطاقة الكامنة أثناء تصلب PCM.

يحتاج PCM الى نزول درجة الحرارة التي تكون أقل من درجة ذوبانه بدرجة او بدرجتين لإعادة البلورة ثم تنطلق الحرارة الكامنة للتصلب وبالتالي ترتفع درجة حرارة المادة مرة أخرى الى درجة حرارة الانصهار وتستمر العملية حتى تستنزف كل الطاقة الكامنة للتصلب من المادة عندها تصبح كل المادة صلبة وبعدها تنتقل العملية الى الحرارة المحسوسة مرة أخرى. وبالتالي تكون معادلة كمية الطاقة الحرارية في الخزان كالتالي:

$$Q_{in} = Q_{stage1} + Q_{stage2} + Q_{stage3} \quad (6)$$

$$Q_{stage1} = [(\rho \cdot V \cdot Cp)_{water} + (\rho \cdot V \cdot Cp)_{wax}]_{solid\ phase} (T_m - T_i) \quad (7)$$

$$Q_{stage2} = \rho \cdot V \cdot L_m \quad (8)$$

$$Q_{stage3} = [(\rho \cdot V \cdot Cp)_{water} + (\rho \cdot V \cdot Cp)_{wax}]_{liquid\ phase} (T_f - T_m) \quad (9)$$

حيث: $(\rho v)_{water}$ - حجم وكثافة الماء على الترتيب، $(\rho v)_{wax}$ - حجم وكثافة الشمع على الترتيب، $(Cp)_{water}$ - الحرارة النوعية للماء (kJ/kg.K)، $(Cp)_{wax}$ - الحرارة النوعية للشمع (kJ/kg.K)، L_m - الحرارة الكامنة للانصهار (kJ/kg).

8.2. حساب حجم مادة PCM للخزان الحراري

يتم اختيار المادة المتغيرة الطور بناء عن درجات الحرارة المطلوبة في الخزان, كما أن شموع البرافين مناسبة لتسخين المياه المنزلية وذلك لأن درجات انصهاره تتراوح من 50 الى 760 . وبالنظر الى الجدول (1) نجد الخصائص الفيزيائية لأحد مركبات شموع البرافين والتي تكون متاحة أو مناسبة لاستخدامها في الخزان الحراري الشمسي المستخدم للأغراض المنزلية.

الجدول (1): يبين الخصائص الحرارية لمادة شمع البرافين [53-60].

القيمة	الخصائص الحرارية
2.95kJ/kg.K	الحرارة النوعية للحالة الصلبة
2.51kJ/kg.K	الحرارة النوعية للحالة السائلة
818kg/m ³	الكثافة للحالة الصلبة
760kg/m ³	الكثافة للحالة السائلة
0.24w/m.K	الموصلية الحرارية للحالة الصلبة
0.24w/m.K	الموصلية الحرارية للحالة السائلة
244kJ/kg	الحرارة الكامنة للانصهار

الخزان الجيد التصميم يجب أن تمتص المادة PCM كل الطاقة الداخلة في الخزان في المرحلة الثانية (مرحلة الذوبان) ولا تنتقل الى المرحلة الثالثة , ولهذا يمكن كتابة المعادلة في الصورة التالية (9):

$$Q_{solar} = [(\rho \cdot V \cdot Cp)_{water} + (\rho \cdot V \cdot Cp)_{wax}] \Delta T + (\rho \cdot V \cdot L_m)_{wax} \quad (9)$$

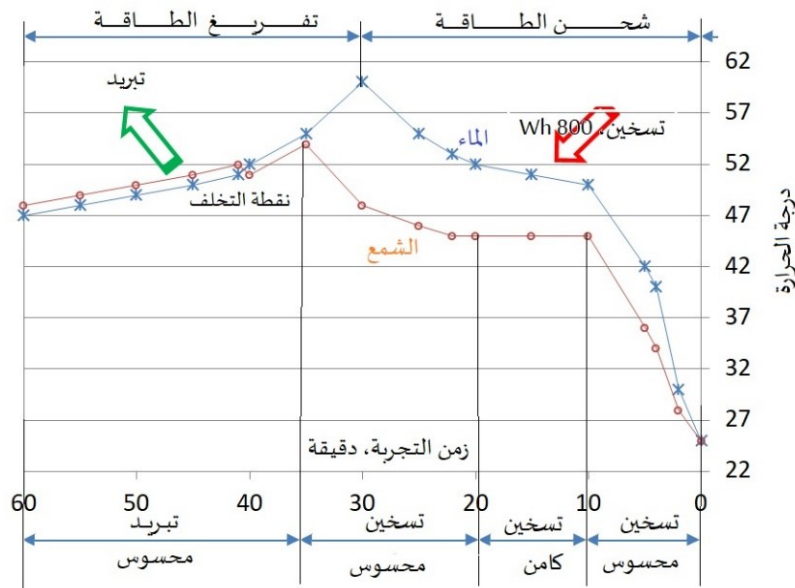
فإذا كان حجم الخزان 0.3m³ و Q_{solar} 35.64 MJ. حيث: Q_{solar} - كمية الطاقة الحرارية المكتسبة من المجموع الشمسي، ΔT - فرق درجات الحرارة وقيمتها 10° C، ونعوض بحجم الماء بالمعادلة (V_{water} = (0.3 - V_{PCM}) سنحصل على حجم مادة PCM V_{PCM} = 0.137m³

3. النتائج والمناقشة

1.3 نتائج التجربة

أجريت التجربة قياس درجة حرارة الماء في الخزان ودرجة حرارة الشمع داخل المستودعات النحاسية، تحت الظروف التالي:

1. درجة الحرارة الابتدائية تساوي درجى حرارة الهواء الجوي حوالي 25°C
 2. تسخين الماء عن طريق سخان كهربائي بقدرة W800 ولمدة 30 دقيقة حتى تم الوصول الى درجة حرارة 60°C
 3. تبريد بتسليط تيار هواء على الخزان.
- مثلت القياسات بيانيا في الشكل (9).



الشكل 9: درجات الحرارة المقاسة للماء وللشمع في التجربة.

تظهر القياسات التجريبية جليا التحسن الملحوظ في أداء الخزان الحراري في حالة وجود مادة متغيرة الطور في كبح الفقد الحراري نتيجة لسحب الداقة في مرحل التفريغ، كما انه يبطن من ارتفاع درجة الحرارة مع الاحتفاظ بالقيمة الحرارية للخزان وهذا بدوره يقلل من الفاقد الحراري للخزان مع المحيط. كما تظهر التجربة بصورة واضحة كافة الخطوات التي مرت بها مادة الشمع من تسخين محسوس حيث ترتفع درجة حرارته تدريجيا الى ان تصل الى درجة حرارة الذوبان وهي حوالي 45°C (الحرارة المحسوسة)، ثم تبدأ مرحلة الانتقال من الحالة الصلبة الى الحالة السائلة (منطقة الحرارة الكامنة)، وعند اتمام ذوبان كل الشمع تنتقل الى مرحلة الحرارة المحسوسة مرة اخرى. عندها تم تحييد الطاقة وتم تسليط تيار هوائي بارد ليقوم بتبريد الخزان، وهو ما يمثل هملية تفريغ الطاقة.

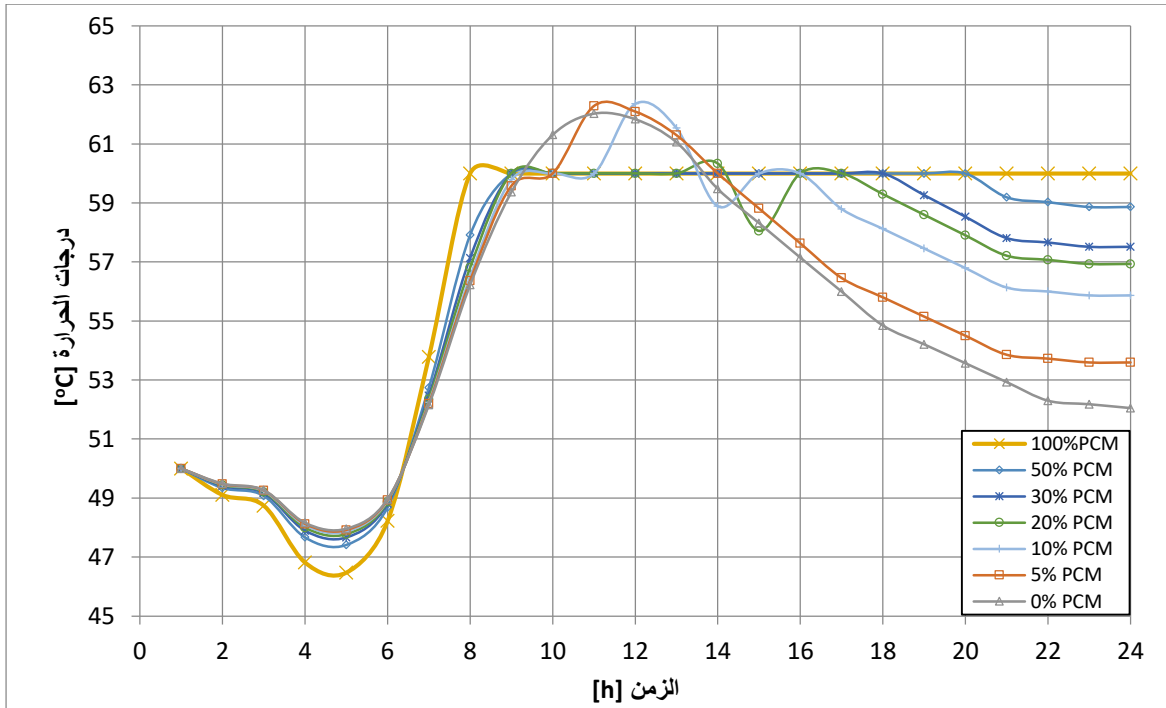
2.3. نتائج التحليل الرياضي

يمكن صياغة الاتزان الحراري للحالة الغير مستقرة الحصول على صورة المعادلة التالية (10):

$$Q_{solar} = Q_{load} + Q_{loss} + [(\rho \cdot V \cdot Cp)_{water} + (\rho \cdot V \cdot Cp)_{wax}] \cdot \left[\frac{T_s^{t+\Delta t} - T_s^t}{\Delta t} \right] \quad (10)$$

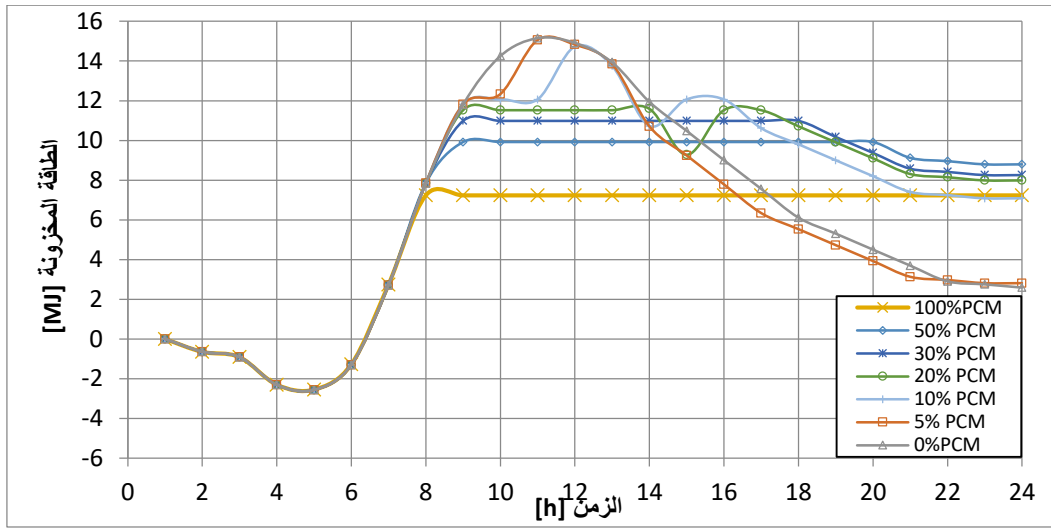
حيث: T_s^t - درجة حرارة الماء والشمع عند البداية، $T_s^{t+\Delta t}$ - درجة حرارة الماء والشمع بعد تغير ΔT من الزمن، V - حجم خزان الماء والذي تم اختياره على اساس بحث سابق بقيمة $(0.3m^3)$. وبالتالي فان نسبة حجم المادة المتغيرة الطور هي نسبة من هذه القيمة اي ان 0%PCM يعني أن حجم الشمع 100% و10%PCM يعني أن حجم الشمع $(0.03m^3)$. وبالتالي فان حجم الماء 90% اي $0.27m^3$ ، ولقد تم حساب درجات الحرارة الغير مستقرة للخزان عن طريق برنامج الفورتران المدرج في الملحق (1).

1.3. العلاقة بين درجة حرارة اللامستقرة للماء في الخزان مع تغير نسبة حجم المادة المتغيرة الطور
يوضح الشكل (10) العلاقة بين درجة حرارة الماء في الخزان بدلالة الزمن مع تغير نسبة حجم المادة المتغيرة الطور. وكما هو واضح من الشكل فان الزيادة في حجم المادة المتغيرة الطور تؤدي إلى الزيادة في فترتي الشحن والتفريغ. ويحدد الحجم المثالي للمادة المتغيرة الطور على اساس أن درجة حرارة الخزان يجب أن لا تزيد عن درجة حرارة الانصهار لها. ويمكن تحديدها مباشرة من الشكل بحيث لا يتجاوز التحميل الحراري على الخزان منطقة الحرارة الكامنة وهي في هذه الحالة أكثر بقليل من 20%. كما أوضح الشكل منطقة التخلف وهي المنطقة الفاصلة بين الشحن والتفريغ والتي سبق وان عرفت سابقا.



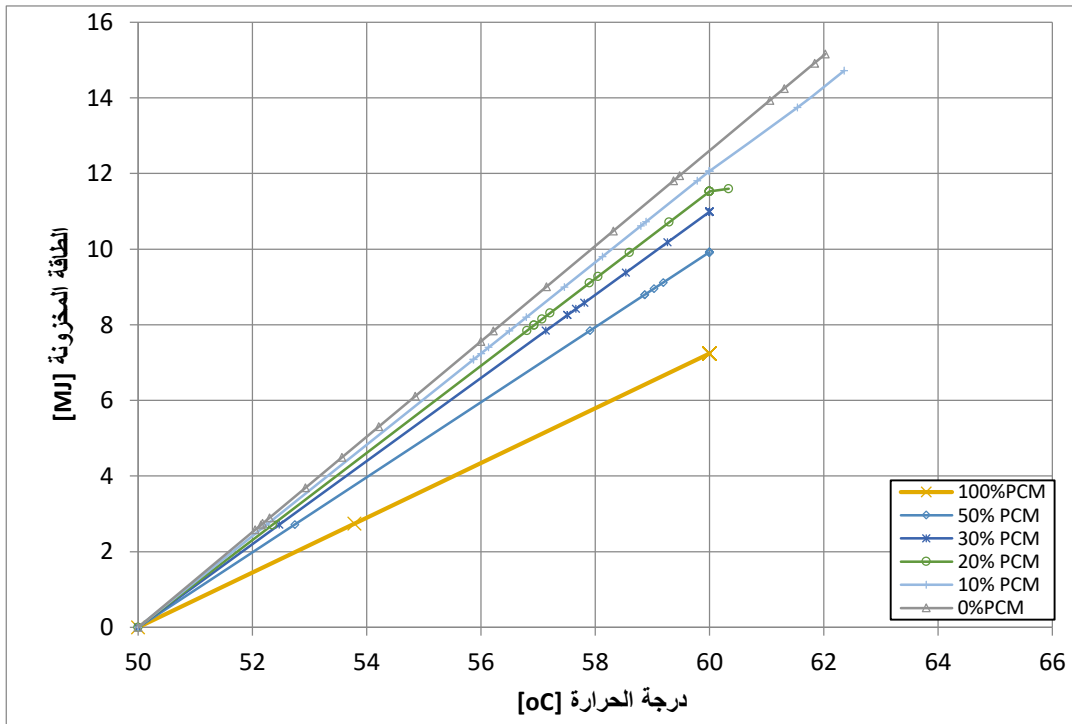
الشكل 10: العلاقة بين درجة حرارة الماء في الخزان بدلالة الزمن مع تغير نسبة حجم المادة المتغيرة الطور.

2.3. العلاقة بين الحرارة المخزونة في الخزان بدلالة الزمن مع تغير نسبة حجم المادة المتغيرة الطور وكذلك الحال بالنسبة للطاقة الحرارية المخزونة في الخزان الحراري فالسلوك العام لمنحنيات الطاقة مناظر لتلك لمنحنيات درجة الحرارة ويظهر في الشكل (11) الحجم المثالي للمادة المتغيرة الطور والتي يمكن تحديدها بالمساحة التي تحت المنحني الخاص بها. ومن الواضح بالنظر أن الأفضلية تقع بين نسبي 20% - 30%.



الشكل 11: العلاقة بين الحرارة المخزونة في الخزان بدلالة الزمن مع تغير نسبة حجم المادة المتغيرة الطور.

3.3. العلاقة بين السعة التخزينية للخزان الحراري ودرجة حرارة الخزان. يوضح الشكل (12) العلاقة بين السعة الحرارية للخزان الحراري كدالة في درجة حرارة مادة الخزان. وكما هو مبين في الشكل فإن للماء عند درجة حرارة معينة سعة خزن أكبر من الجميع، ويرجع السبب في ذلك لأن الكثافة والحرارة النوعية للماء أكبر منه لمادة الشمع البرافين المستخدمة في الخزان. غير أن الشمع يخزن طاقتين الطاقة الأولى "المحسوسة" والطاقة الثانية "الكامنة". ويتميز الشمع عن الماء في منطقة خزن الطاقة الكامنة أي عند فرق درجات حرارة الخزان عند 1 درجة فإن 1 كجم من الماء سيخزن 4200 J/kg.K بينما للشمع فإن الطاقة المخزونة ستكون 244,000 J/kg.K.



الشكل 12: العلاقة بين السعة التخزينية للخزان الحراري ودرجة حرارة الخزان.

4. الاستنتاجات

تشجع النتائج التجريبية والنظرية التي تم الحصول عليها في هذا البحث على استخدام المواد المتغيرة الطور PCMs في المنظومات الشمسية لتسخين المياه المنزلية. استخدام PCM سيؤدي إلى تقليل درجة حرارة الماء في الخزان الحراري التي يتم عندها التبادل الحراري مع منظومة الطاقة الشمسية مع الاحتفاظ بالطاقة الحرارية ثابتة. وهذا بدوره سيؤدي إلى زيادة فاعلية أنظمة الطاقة الشمسية، وكذلك يقلل من الفاقد الحراري من الخزان إلى الوسط المحيط. وتمثل النظام الهجين في وضع كبسولات مليئة بشمع البرافين كوحدة تخزين في داخل خزان الماء. بينت الدراسة التجريبية بوضوح كافة المراحل التي تمر بها المادة المتغيرة الطور، كما بينت نجاعة استخدام المواد المتغيرة الطور في كبح سرعة كسب وفقد الحرارة من خزانات المياه. أما الدراسة النظرية فقد بينت أن أفضل أداء للخزان الحراري عندما تشكل نسبة المواد المتغيرة الطور 25% من حجم الخزان الحراري.

مساهمات المؤلفين: قدم المؤلفون المدرجون مساهمة جوهرية ومباشرة وفكرية في العمل ووافقوا جميعاً على النشر.

التمويل: لم يتلق هذا البحث أي تمويل خارجي.

بيان توفر البيانات: لا ينطبق.

شكر وتقدير: نود أن ننتهز هذه الفرصة للتعبير عن خالص امتناني لقسم هندسة الطاقة الميكانيكية والمتجددة في جامعة وادي الشاطئ وجامعة الخوارزمي على دعمهم التقني الذي لا يقدر بثمن خلال بحثنا.

تضارب المصالح: يعلن المؤلفون عن عدم وجود أي تضارب في المصالح.

References

- [1] S. Tan and X. Zhang, "Progress of research on phase change energy storage materials in their thermal conductivity," *J. Energy Storage*, vol. 61, no. 106772, p. 106772, 2023.
- [2] Z. Zhang, M. Liang, and Z. Ci, "Thermal performance analysis of latent heat thermal energy storage with cascaded phase change materials capsules under varying inlet temperature," *J. Energy Storage*, vol. 62, no. 106893, p. 106893, 2023.
- [3] R. Gad, H. Mahmoud, S. Ookawara, and H. Hassan, "Evaluation of thermal management of photovoltaic solar cell via hybrid cooling system of phase change material inclusion hybrid nanoparticles coupled with flat heat pipe," *J. Energy Storage*, vol. 57, no. 106185, p. 106185, 2023.
- [4] H. M. Maghrabie, A. S. A. Mohamed, A. M. Fahmy, and A. A. Abdel Samee, "Performance enhancement of PV panels using phase change material (PCM): An experimental implementation," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 42, no. 102741, p. 102741, 2023.
- [5] M. Sheikholeslami and H. R. A. Al-Husseini, "Analyzing efficiency of solar heat storage unit within a building including trombe wall equipped with phase change material in existence of fins," *J. Build. Eng.*, vol. 71, no. 106406, p. 106406, 2023.
- [6] N. Yassar, K. Aissa, S. Alsadi, N. Yassar, K. Aissa, and S. Alsadi, "Air Pollution Sources in Libya," *Research & Reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 63–79, 2018.
- [7] M. M. Khaleel, M. R. Adzman, and S. M. Zali, "An integrated of hydrogen fuel cell to distribution network system: Challenging and opportunity for D-STATCOM," *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 7073, 2021.
- [8] M. K. Paliwal, S. Jakhar, and V. Sharma, "Nano-enhanced phase change materials for energy storage in photovoltaic thermal management systems: A bibliometric and thematic analysis," *International Journal of Thermofluids*, vol. 17, no. 100310, p. 100310, 2023.
- [9] A. E. Kabeel, W. M. El-Maghlany, M. Abdelgaied, and M. M. Abdel-Aziz, "Performance enhancement of pyramid-shaped solar stills using hollow circular fins and phase change materials," *J. Energy Storage*, vol. 31, no. 101610, p. 101610, 2020.
- [10] Y. Nassar, K. Aissa, and S. Alsadi, "Estimation of Environmental Damage Costs from CO₂e Emissions in Libya and the Revenue from Carbon Tax Implementation," *Low Carbon Economic*, vol. 8, pp. 118–132, 2018.
- [11] A. S. Abdullah, W. H. Alawee, S. A. Mohammed, A. Majdi, Z. M. Omara, and M. M. Younes, "Utilizing a single slope solar still with copper heating coil, external condenser, phase change material, along with internal and external reflectors — Experimental study," *J. Energy Storage*, vol. 63, no. 106899, p. 106899, 2023.
- [12] M. Ismail, W. K. Zahra, S. Ookawara, and H. Hassan, "Enhancing the air conditioning unit performance via energy storage of different inorganic phase change materials with hybrid nanoparticles," *JOM (1989)*, vol. 75, no. 3, pp. 739–753, 2023.

- [13] M. M. Khaleel, A. Alsharif, and I. I. K. Imbayah, "Renewable energy technologies: Recent advances and future predictions," *African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS)*, pp. 58–64, 2022.
- [14] W. I. A. Aly, M. A. Tolba, and M. Abdelmagied, "Experimental investigation and performance evaluation of an oval tubular solar still with phase change material," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 221, no. 119628, p. 119628, 2023.
- [15] P. Lian *et al.*, "Thermal performance of novel form-stable disodium hydrogen phosphate dodecahydrate-based composite phase change materials for building thermal energy storage," *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, vol. 6, no. 2, 2023.
- [16] A. Makhzom *et al.*, "Estimation of CO₂ emission factor for Power Industry Sector in Libya," in *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023)*, Gaza Strip, Palestine, 2023.
- [17] K. Yu, M. Jia, Y. Yang, and Y. Liu, "A clean strategy of concrete curing in cold climate: Solar thermal energy storage based on phase change material," *Appl. Energy*, vol. 331, no. 120375, p. 120375, 2023.
- [18] M. M. Hathal *et al.*, "Thermal performance characterization of a thermal energy storage tank with various phase change materials," *International Journal of Thermofluids*, vol. 18, no. 100322, p. 100322, 2023.
- [19] M. M. Khaleel, S. A. Abulifa, I. M. Abdaldeam, A. A. Abulifa, M. Amer, and T. M. Ghandoori, "A current assessment of the renewable energy industry," *African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS)*, vol. 2, no. 1, pp. 122–127, 2023.
- [20] M. Eteriki, W. El-Osta, Y. Nassar, and H. El-Khozondar, "Effect of Implementation of Energy Efficiency in Residential Sector in Libya," in *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023)*, Gaza Strip, Palestine, 2023.
- [21] M. Abdunnabi, N. Etiab, F. Yassar, H. El-Khozondar, and R. Khargotra, "Energy savings strategy for the residential sector in Libya and its impacts on the global environment and the nation economy," in *Advances in Building Energy Research*, 2023.
- [22] A. Shukla, D. Buddhi, and R. L. Sawhney, "Solar water heaters with phase change material thermal energy storage medium: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 8, pp. 2119–2125, 2009.
- [23] H. Farzan, E. Hasan Zaim, and T. Amiri, "Performance study on a new solar air heater with integrated phase change materials and external recycle: A numerical and experimental study," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 223, no. 120000, p. 120000, 2023.
- [24] D. Zhou *et al.*, "Experimental and simulative investigation on battery thermal management system with structural optimization of composite phase change material," *J. Energy Storage*, vol. 60, no. 106613, p. 106613, 2023.
- [25] Y. Nassar, "Solar energy engineering-active applications," in *Sebha university*, Sebha, Libya, 2006.
- [26] C. Q. Chen *et al.*, "Optimization of phase change thermal storage units/devices with multichannel flat tubes: A theoretical study," *Renew. Energy*, vol. 167, pp. 700–717, 2021.
- [27] C. Zhang, N. Wang, H. Xu, Y. Fang, Q. Yang, and F. K. Talkhonchek, "Thermal management optimization of the photovoltaic cell by the phase change material combined with metal fins," *Energy (Oxf.)*, vol. 263, no. 125669, p. 125669, 2023.
- [28] B. Palmer, A. Arshad, Y. Yang, and C. Wen, "Energy storage performance improvement of phase change materials-based triplex-tube heat exchanger (TTHX) using liquid–solid interface-informed fin configurations," *Appl. Energy*, vol. 333, no. 120576, p. 120576, 2023.
- [29] H. Kitagawa, T. Asawa, M. A. Del Rio, T. Kubota, and A. R. Trihamdani, "Thermal energy simulation of PCM-based radiant floor cooling systems for naturally ventilated buildings in a hot and humid climate," *Build. Environ.*, vol. 238, no. 110351, p. 110351, 2023.
- [30] Y. F. Nassar *et al.*, "Dynamic analysis and sizing optimization of a pumped hydroelectric storage-integrated hybrid PV/Wind system: A case study," *Energy Convers. Manag.*, vol. 229, no. 113744, p. 113744, 2021.
- [31] M. Khaleel, Z. Yusupov, A. A. Ahmed, A. Alsharif, A. Alarga, and I. Imbayah, "The effect of digital technologies on energy efficiency policy," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2023.
- [32] A. Rezania, E. Yousefi, and A. A. Nejad, "Zero-cooling energy thermoelectric system by phase change material heat sink integrated with porous copper foam," *J. Energy Storage*, vol. 59, no. 106507, p. 106507, 2023.
- [33] C. Li, J. Liao, B. Xie, P. Cao, and Y. Long, "Three dimensional hybrid microcrystalline graphite-silica sol stabilized stearic acid as composite phase change material for thermal energy storage," *J. Energy Storage*, vol. 72, no. 108328, p. 108328, 2023.

- [34] A. Pasupathy, L. Athanasius, R. Velraj, and R. V. Seeniraj, "Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (PCM) for thermal management," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 28, no. 5–6, pp. 556–565, 2008.
- [35] E. Fleming, S. Wen, L. Shi, and A. K. da Silva, "Experimental and theoretical analysis of an aluminum foam enhanced phase change thermal storage unit," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 82, pp. 273–281, 2015.
- [36] Y. Nassar and E. Sergievsky, "Heat transfer in flat-plate solar air-heating collectors," *WIT Transactions on Engineering Sciences*, vol. 2, no. 7, 2000.
- [37] N. Yasser, "Thermodynamics analysis and optimization procedure for domestic solar water heating system, AASCIT," *AASCIT, American Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 2, no. 6, pp. 92–99, 2015.
- [38] D. Saylam Canım and S. Maçka Kalfa, "Development of a new pumice block with phase change material as a building envelope component," *J. Energy Storage*, vol. 61, no. 106706, p. 106706, 2023.
- [39] M. S. Irshad *et al.*, "Wormlike perovskite oxide coupled with phase-change material for all-weather solar evaporation and thermal storage applications," *Adv. Energy Sustain. Res.*, vol. 4, no. 3, p. 2200158, 2023.
- [40] Y. F. Nassar *et al.*, "Solar and wind atlas for Libya," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 3, pp. 27–34, 2023.
- [41] M. Khaleel, Z. Yusupov, N. Yasser, and H. Elkhazondar, "Enhancing Microgrid performance through hybrid energy storage system integration: ANFIS and GA approaches," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 2, pp. 38–48, 2023.
- [42] A. Yusuf and S. Ballikaya, "Performance analysis of concentrated photovoltaic systems using thermoelectric module with phase change material," *J. Energy Storage*, vol. 59, no. 106544, p. 106544, 2023.
- [43] V. Talele, M. S. Patil, S. Panchal, R. Fraser, M. Fowler, and S. R. Gunti, "Novel metallic separator coupled composite phase change material passive thermal design for large format prismatic battery pack," *J. Energy Storage*, vol. 58, no. 106336, p. 106336, 2023.
- [44] M. Khaleel *et al.*, "Effect of fuel cells on voltage sag mitigation in power grids using advanced equilibrium optimizer and particle swarm optimization," *Jordan Journal of Electrical Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 175–188, 2023.
- [45] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, "Review on thermal energy storage with phase change materials and applications," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, 2009.
- [46] A. Jain and M. Parhizi, "Theoretical analysis of phase change heat transfer and energy storage in a spherical phase change material with encapsulation," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 185, no. 122348, p. 122348, 2022.
- [47] A. Tamraparni *et al.*, "Design and optimization of composite phase change material for cylindrical thermal energy storage," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 208, no. 123995, p. 123995, 2023.
- [48] M. K. A. Ghayth and Z. Yusupov, "Performance enhancement of PV array utilizing Perturb & Observe algorithm," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 2, pp. 29–37, 2023.
- [49] M. Khaleel, Z. Yusupov, N. Yasser, H. Elkhazondar, and A. A. Ahmed, "An integrated PV farm to the unified power flow controller for electrical power system stability," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 1, pp. 18–30, 2023.
- [50] Z. Yu, J. Zhang, and W. Pan, "A review of battery thermal management systems about heat pipe and phase change materials," *J. Energy Storage*, vol. 62, no. 106827, p. 106827, 2023.
- [51] S. Lv, J. Yang, J. Ren, B. Zhang, Y. Lai, and Z. Chang, "Research and numerical analysis on performance optimization of photovoltaic-thermoelectric system incorporated with phase change materials," *Energy (Oxf.)*, vol. 263, no. 125850, p. 125850, 2023.
- [52] N. Nasajpour-Esfahani, H. Garmestani, M. Rozati, and G. F. Smaism, "The role of phase change materials in lithium-ion batteries: A brief review on current materials, thermal management systems, numerical methods, and experimental models," *J. Energy Storage*, vol. 63, no. 107061, p. 107061, 2023.
- [53] M. M. Khaleel, T. Mohamed Ghandoori, A. Ali Ahmed, A. Alsharif, A. J. Ahmed Alnagrati, and A. Ali Abullifa, "Impact of mechanical storage system technologies: A powerful combination to empowered the electrical grids application," in *2022 IEEE 2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, 2022, pp. 628–636.
- [54] H. Gu, Y. Chen, X. Yao, L. Huang, and D. Zou, "Review on heat pump (HP) coupled with phase change material (PCM) for thermal energy storage," *Chem. Eng. J.*, vol. 455, no. 140701, p. 140701, 2023.

- [55] M. Ghalambaz, M. Aljaghtham, M. Fteiti, A. J. Chamkha, A. Abdullah, and M. Ghalambaz, "Thermal energy storage optimization using composite foam-nano enhanced phase change materials," *J. Energy Storage*, vol. 63, no. 107001, p. 107001, 2023.
- [56] V. P. Kalbande, G. Fating, M. Mohan, K. Rambhad, and A. K. Sinha, "Experimental and theoretical study for suitability of hybrid nano enhanced phase change material for thermal energy storage applications," *J. Energy Storage*, vol. 51, no. 104431, p. 104431, 2022.
- [57] Q. Wang *et al.*, "Comprehensive performance of composite phase change materials based on ternary eutectic chloride with CuO nanoparticles for thermal energy storage systems," *Sol. Energy*, vol. 250, pp. 324–334, 2023.
- [58] M. A. Essa, I. Y. Rofaiel, and M. A. Ahmed, "Experimental and theoretical analysis for the performance of evacuated tube collector integrated with helical finned heat pipes using PCM energy storage," *Energy (Oxf.)*, vol. 206, no. 118166, p. 118166, 2020.
- [59] Y. Rabin and E. Korin, "Incorporation of phase-change materials into a ground thermal energy storage system: Theoretical study," *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 118, no. 3, pp. 237–241, 1996.
- [60] S.-H. Lee, J. Li, V. Olevano, and B. Sklénard, "Equivariant graph neural network interatomic potential for Green-Kubo thermal conductivity in phase change materials," *arXiv*, 2023.