

تصميم واختبار خزان حراري يعمل على مبدأ السوائل غير المختلطة (ماء/زيت)

أ.د. عدنان عمران *

د. فادي علي **

م. راما نبيل عقباتي ***

(تاريخ الإيداع 2021/ 8/ 2 . قُبِلَ للنشر في 2022/ 1/ 10)

□ ملخص □

تقدم هذه الورقة البحثية تصميم واختبار خزان حراري يعمل على مبدأ السوائل غير المختلطة (ماء/زيت). إن نموذج الخزان الحراري المقترح يحتوي الماء بنسبة 66.7% والزيت 33.3%، ويتم الفصل بين المائعين باستخدام صفيحة سماكتها 2mm. تم استخدام الماء في دارة الشحن بينما الزيت في دارة التفريغ، أيضاً تم وضع زعانف على الصفيحة الفاصلة لزيادة التبادل الحراري بين دارتي الشحن والتفريغ، وعزلنا الخزان بعازل سماكته 1cm وذلك لتقليل الضياعات الحرارية إلى الوسط الخارجي، كما تم إجراء محاكاة حاسوبية للنموذج المقترح باستخدام الحزمة البرمجية ANSYS.

أظهرت النتائج أنه يمكن استخدام النموذج المقترح بفعالية مع السخانات الشمسية المنزلية، وأن استخدام المواع بشكل منفصل في الخزان الحراري يعتبر طريقة ذات كفاءة عالية لتخزين ونقل الطاقة الحرارية.

كلمات مفتاحية: خزان حراري، انتقال الحرارة، سوائل غير مختلطة

* أستاذ في كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس، طرطوس-سوريا.

** مدرس في كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس، طرطوس-سوريا.

*** طالبة دراسات عليا في كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس، طرطوس-سوريا.

Designing and testing a thermal storage tank working on the principle of unmixed liquids (water / oil)

Pro.Dr. Adnan Imran*

Dr. Fadi Ali**

Eng. Rama Nabil Akbati***

(Received 2 / 8/ 2021 . Accepted 10 / 1/ 2022)

□ ABSTRACT □

This paper presents a designing and testing of a thermal tank that works on the principle of unmixed liquids (water / oil). The proposed thermal tank model contains water at 66.7% and oil at 33.3%, and the two fluids are separated using a plate thickness of 2 mm. Water was used in the charging circuit while oil was in the discharging circuit, fins were also placed on the separating plate to increase the heat exchange between the charging and discharging circuits, and the tank was insulated with a thickness of 1cm to reduce the heat losses to the outer medium. A computer simulation of the proposed model was also carried out using the ANSYS software package.

The results show that the proposed model can be used effectively with household solar heaters. In general, the use of separated unmixed fluids in a thermal tank is a highly efficient method of storing and transfer thermal energy.

Keywords: thermal tank, Heat Transfer, unmixed liquids

* Professor, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria.

**Lecturer, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria.

***Postgraduate Student, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria.

1- المقدمة:

في ضوء زيادة الوعي بدور انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في ظاهرة الاحتباس الحراري والعواقب السيئة التي قد تترتب على المجتمع البشري، تحظى مصادر الطاقة المتجددة باهتمام متزايد بما في ذلك الرياح والمد والجزر والطاقة الشمسية والكتلة الحيوية وطاقة الأمواج والطاقة الحرارية الأرضية [1,2]. هناك اعتقاد متزايد بأن استخدام مصادر الطاقة المتجددة، والطاقة الشمسية على وجه الخصوص، سيكون العامل الرئيس لاستمرار التنمية البشرية المستدامة [3]. تنتج الشمس كميات هائلة من طاقة الإشعاع، يتم تخفيف هذه الطاقة مرتين قبل الوصول إلى السطح بواسطة الغلاف الجوي، حيث يتم فقد 6% بالانعكاس و 16% عن طريق الامتصاص، وبالغيوم التي تعكس 20% وتمتص 3% [4]. في النهاية، تتلقى الأرض والمحيطات 51% من الإشعاع الوارد إليها [5]. وبالتالي، فإن كمية الطاقة الشمسية المتاحة للاستخدام لدينا لا تزال مرتفعة للغاية. ومع ذلك، يعد التخزين الفعال ضرورياً لاستخدام هذا المصدر المنقطع وذو الكثافة المنخفضة للطاقة [6]. أحد أهم طرق تخزين الطاقة الشمسية هو التخزين الحراري. يتطلب التخزين الحراري المثالي الاستقرار على المدى الطويل، وانخفاض تكاليف التأسيس، وكثافة التخزين العالية، والقدرة على نقل الحرارة بكفاءة من خلال الامتصاص السريع والإطلاق [7,8].

نظراً لأن مدخلات الطاقة الشمسية ليست ثابتة، يجب استخدام مواد تخزين الطاقة الحرارية الفعالة لتخزين أي طاقة زائدة يتم جمعها للاستخدام في الليل [9,10]. تتطلب التطبيقات المختلفة درجات حرارة مختلفة للتشغيل، مثل توليد الطاقة الكهربائية الذي يتطلب نظام تخزين الطاقة الحرارية (TES) (Thermal Energy Storage) ذي درجة حرارة عالية (175°C)، في حين أن التدفئة المنزلية تتطلب نظام ذو درجة حرارة منخفضة (50°C) [11]. تشكل خصائص مواد التخزين عموماً تأثيراً كبيراً على أداء TES. يجب مراعاة العديد من العوامل عند تصميم نظام TES الشمسي، والذي يندرج معظمه في موضوعات الفعالية من حيث التكلفة، والأثر البيئي والخصائص التقنية.

يمكن تصنيف أنظمة تخزين الطاقة الحرارية (TES) الشمسية إلى ثلاثة أنواع رئيسية: التخزين الحراري الكيميائي (TCS) (thermochemical storage) وتخزين الحرارة الكامنة (LHS) (latent heat storage) وتخزين الحرارة المحسوسة (SHS) (sensible heat storage). نظراً لأن SHS هي أكثر التقنيات تطوراً، فإنها تتمتع بميزة توفر العديد من المواد منخفضة التكلفة [12]، ولكن لديها أيضاً سعة تخزينية أقل، مما يزيد من أبعاد النظام. بالمقارنة مع أنظمة تخزين الطاقة الأخرى، يتم تسويق SHS إلى حد كبير، في حين أن LHS و TCS لا تزالان في مرحلة التطوير [13]. بالإضافة إلى ذلك، يبلغ عمر نظام SHS حوالي عشرين عاماً، في حين أن التخزين الحراري الكامن والتخزين الحراري الكيميائي ذو عمر منخفض نسبياً مقارنة مع التخزين الحراري المحسوس (LHS) ربع (SHS) و (TCS عشر SHS) [14]. وعلى العكس، فإن سعة تخزين الحرارة الكامنة LHS أعلى بكثير، ولكن هذا يقترن عادةً بنقل سيء للحرارة ما لم يتم تعديل النظام.

تخزين الحرارة المحسوسة :

يتم تخزين الحرارة المحسوسة عن طريق رفع درجة حرارة وسيط التخزين. وبالتالي، من المستحسن أن يتمتع وسيط التخزين بسعة حرارية عالية، واستقرار طويل الأمد في ظل الدورة الحرارية، والتوافق مع المحتويات، والأهم من ذلك، التكلفة المنخفضة. يمكن تصنيف التخزين الحراري المحسوس على أساس وسائط تخزين الحرارة كتخزين بالوسائط السائلة (مثل الماء، والسوائل التي تحتوي على الزيت، والأملاح المنصهرة، إلخ) وتخزين بالوسائط الصلبة (مثل

الصخور والمعادن وغيرها). إن سوائل تخزين الحرارة وفيرة وتنافسية من الناحية الاقتصادية حيث تعتبر المياه من أفضل وسائط التخزين في مجال درجات الحرارة المنخفضة فهو ذو حرارة نوعية أعلى من المواد الأخرى، وأيضاً رخيص ومتوفر على نطاق واسع. ومع ذلك، نظراً لارتفاع ضغط البخار، فإنه يتطلب عزلاً مكلفاً وضغطاً مقاوماً للاحتواء لتطبيقات درجات الحرارة العالية [15]. يمكن استخدام المياه كوسيلة تخزين وكوسيلة نقل للطاقة، على سبيل المثال، في نظام الطاقة الشمسية. وبالتالي فهي وسيلة التخزين الأكثر استخداماً على نطاق واسع اليوم لتسخين المياه بالطاقة الشمسية والتدفئة [16,17].

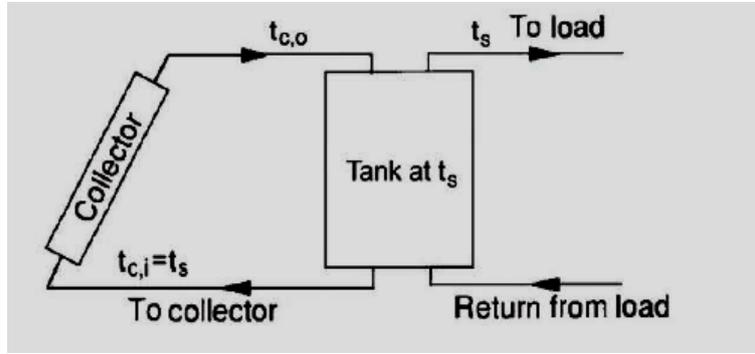
أكثر بدائل المياه المقترحة شيوعاً هي الزيوت القائمة على النفط والأملاح المنصهرة. تبلغ السعة الحرارية 25 ± 40% من الماء على أساس الوزن. ومع ذلك، فإن هذه البدائل لديها ضغط بخار أقل من الماء وقادرة على العمل في درجات حرارة عالية تتجاوز 300 °C. تقتصر الزيوت على درجات حرارة أقل من 350 °C نظراً لأسباب الاستقرار والسلامة ويمكن أن تكون مكلفة للغاية.

المعادلات الرياضية التي تصف التخزين الحراري:

يستخدم نظام SHS السعة الحرارية والتغير في درجة حرارة وسط التخزين أثناء عملية الشحن والتفريغ. تعتمد كمية الحرارة المخزنة على الحرارة النوعية للوسيط، وتغير درجة الحرارة، وكمية مواد التخزين [18].

$$Q_s = \int_{t_i}^{t_f} m c_p dt = m c_p (t_f - t_i) \quad (1)$$

حيث: Q_s : كمية الحرارة المخزنة [J]. m : كتلة وسيط تخزين الحرارة [kg]. c_p : الحرارة النوعية [J/kg.K]. t_i : درجة الحرارة الأولية [°C]. t_f : درجة الحرارة النهائية [°C]. ويوضح الشكل (1) نظاماً نموذجياً يستخدم فيه خزان المياه.



الشكل (1) نظام نموذجي باستخدام خزان تخزين المياه [19].

يتم إعادة تعيين سعة تخزين الطاقة لوحدة التخزين بالماء (أو سائل آخر) في درجة حرارة موحدة (أي، مختلطة بالكامل أو لا طبقية) تعمل على اختلاف درجة الحرارة المحددة بواسطة المعادلة:

$$Q_s = m c_p \Delta t_s \quad (2)$$

حيث: Q_s : إجمالي السعة الحرارية لدورة تعمل في نطاق درجة الحرارة Δt_s . m و c_p : هما على التوالي الكتلة والحرارة النوعية للماء في الوحدة.

توازن الطاقة لخزانات غير طبقية هو:

$$m c_p \frac{dt_s}{d\tau} = Q_u - Q_L - U_s A_s (t_f - t_a) \quad (3)$$

حيث: Q_u و Q_L : هي معدلات إضافة أو إزالة الطاقة من المجمع وإلى الحمل. U_s : معامل فقدان الحرارة من خزان التخزين. A_s : مساحة سطح خزان التخزين. t_f : هي درجة الحرارة النهائية. t_a : هي درجة الحرارة المحيطة للخزان. τ : الزمن.

يعطي تكامل المعادلة (3) ما يأتي:

$$t_s = t_i + \frac{\Delta\tau}{m c_p} [Q_u - Q_L - U_s A_s (t_f - t_a)] \quad (4)$$

يمكن استخدام المعادلة (4) للتنبؤ بدرجة حرارة تخزين المياه كدالة للزمن. بمجرد معرفة درجة حرارة الخزان، يمكن تقدير الكميات الأخرى المعتمدة على درجة الحرارة.

نظراً لأهمية التخزين الحراري من أجل الأنظمة الشمسية، سيتم اقتراح نموذج لخزان حراري يعتمد على سوائل غير مختلطة، وسيتم تصميمه وتصنيعه وإجراء التجارب عليه لاختباره.

2- أهمية البحث، وأهدافه:

العديد من أنظمة التخزين الحراري سواء الكامنة أو المحسوسة تعمل عند درجات حرارة عالية نسبياً (أكثر من 250°C) لكن السخانات الشمسية المنزلية تحتاج لنظام تخزين طاقة حرارية يعمل عند درجات حرارة منخفضة نسبياً ($60-80^\circ\text{C}$)، وأيضاً لا يمكن أن تتم عملية شحن وتفريغ خزانات تخزين الحرارة التقليدية المعتمدة على المواد المتغيرة الطور بسرعة كافية، بالإضافة إلى أن هناك حاجة دائمة لتخزين الحرارة بسبب اختلاف التوقيت بين ذروة إنتاج الطاقة الحرارية من المجمعات الشمسية وذروة الاستهلاك المنزلي للطاقة.

نظراً لما سبق ذكره تكمن أهمية البحث بإمكانية تخزين الطاقة الحرارية في نظام ذو أبعاد معقولة باستخدام مواد متوفرة ومقبولة من حيث التكلفة (الماء/الزيت) بحيث يكون مناسب لتسخين المياه للاستخدامات المنزلية. هذا البحث يركز على تصميم واختبار خزان لتخزين الطاقة الحرارية يستخدم الماء والزيت كوسائط غير مختلطة للتخزين لدمجه مع السخانات الشمسية المنزلية. تقدم الدراسة تصميماً مبتكراً من أجل عمليتي الشحن والتفريغ بما يحقق الديناميكية والسرعة في انتقال الحرارة وبساطة التصميم.

3- طرائق البحث و مواده:

نفذت التجارب داخل مبنى سكني ريفي في مدينة طرطوس خلال عام 2021 حيث تم اعتبار النموذج indoor يمكن وضعه على سقفة المنزل أو في أي غرفة منه.

وتم في هذا البحث استخدام المواد والأجهزة التالية:

1. الحزمة البرمجية ANSYS لدراسة السلوك الحراري الديناميكي للتصميم المقترح وتعديل الأبعاد للحصول على أبعاد منطقية من ناحية التكلفة والكفاءة والمواد المتوفرة للنموذج المقترح.

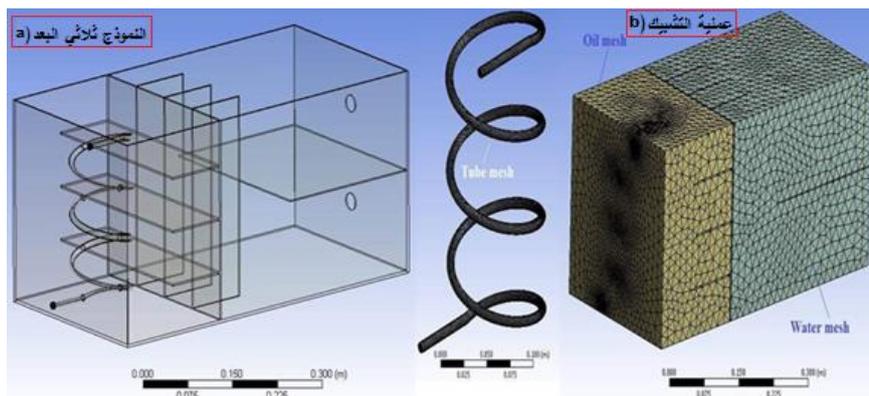
2. الخزان الحراري الذي تم تصميمه وتصنيعه.
3. عازل (صوف زجاجي) بسماكة 1cm لعزل الخزان حرارياً عن الوسط الخارجي.
4. الزيت الذي سيتم وضعه في دارة التفريغ (السعة الحرارية النوعية للزيت المستخدم 1.67 [kJ/kg.K] ، كثافته $833\text{ [kg/m}^3\text{]}$ ، لزوجته الديناميكية $1040 \times 10^{-4}\text{ [kg/m.s]}$).
5. الماء الذي سيوضع في دارة الشحن والتفريغ في التجربة الأولى، والذي سيوضع فقط في دارة الشحن بالتجربة الثانية والثالثة.
6. ثلاث حساسات لدرجة الحرارة (حساس لقياس درجة الحرارة في دارة الشحن، حساس لقياس درجة الحرارة في دارة التفريغ، حساس لقياس درجة حرارة الجو).
7. برنامج MATLAB لإظهار نتائج التجارب كمخططات بيانية.

المحاكاة وتصنيع النموذج وإجراء التجارب:

تم تصنيع الخزان الحراري بحيث يكون أبعاده $(60 \times 30 \times 30)\text{cm}$ ، تم فصل الخزان من الداخل بحاجز كتيم إلى قسمين، الأول يمثل دارة الشحن أبعاده $(40 \times 30 \times 30)\text{cm}$ ، والقسم الثاني يمثل دارة التفريغ أبعاده $(20 \times 30 \times 30)\text{cm}$ ، تحوي دارة الشحن على فتحة علوية تمثل مدخل الماء الساخن (القادم من المجمعات الشمسية مثلاً)، وفتحة سفلية تمثل مخرج الماء بعد أن أعطى حرارته للزيت الموجود في دارة التفريغ، كذلك تحوي دارة التفريغ على فتحة سفلية لدخول الماء البارد المطلوب تسخينه متصل مع أنبوب نحاسي حلزوني يمر داخله هذا الماء ليتم تسخينه وخروجه من فتحة علوية بالخزان.

- تم وضع زعانف طولية على الصفيحة الفاصلة من جهة دارة الشحن، وزعانف عرضية من جهة دارة التفريغ وذلك لزيادة التبادل الحراري بين الماء في دارة الشحن والزيت في دارة التفريغ.
- تم وضع صفيحة توجيه من جهة دارة الشحن بين فتحة الدخول وفتحة الخروج أبعادها $(25 \times 30)\text{cm}$ بسماكة 2mm .
- تم وضع فتحة في أعلى الخزان من جهة دارة التفريغ لتعبئة الزيت، وفتحة تصريف في أسفله لتفريغه.
- تم عزل الخزان الحراري بعازل (صوف زجاجي) حيث اقترحنا سماكته 1cm .

تمت عملية المحاكاة الرقمية للنموذج المقترح باستخدام برنامج ANSYS Fluent، إن النموذج ثلاثي البعد للخزان الحراري المقترح وعملية تشبيكه بالعناصر المنتهية من أجل الحسابات الرقمية موضح بالشكل (2)، ويبين الشكل a-2 مكونات الخزان الحراري وهي: أنبوب نحاسي، مائع الزيت، مائع الماء، صفائح للفصل والتوجيه، الزعانف. من الجدير بالذكر أن تلامس الماء بالزيت غير ممكن في الخزان بفضل وجود صفيحة تفصل بين المائعين. تمت عملية التشبيك بالعناصر المنتهية كما هو مبين بالشكل b-2.



الشكل (2) النموذج ثلاثي البعد للبخزان الحراري المقترح وعملية تشبيكه بالعناصر المنتهية

يبين الشكل (3) مراحل تصنيع النموذج المقترح للبخزان الحراري.



الشكل (3) مراحل تصنيع النموذج المقترح

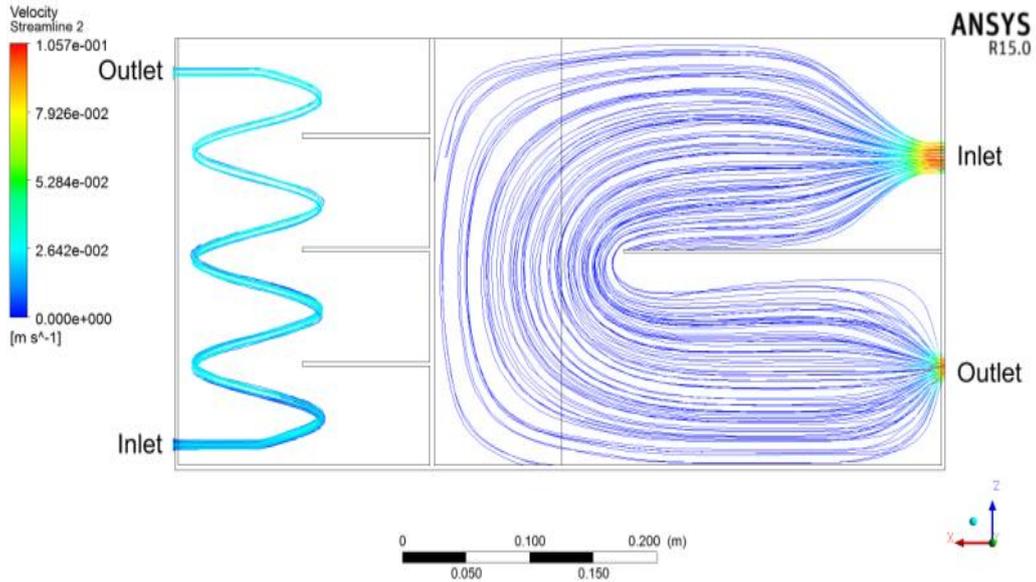
بعد الانتهاء من تصنيع النموذج بدأنا بإجراء التجارب عليه، حيث قمنا بإجراء ثلاث تجارب:

- التجربة الأولى: اختبار عازلية الخزان الحراري
- التجربة الثانية: تجربة ماء-ماء
- التجربة الثالثة: تجربة ماء-زيت

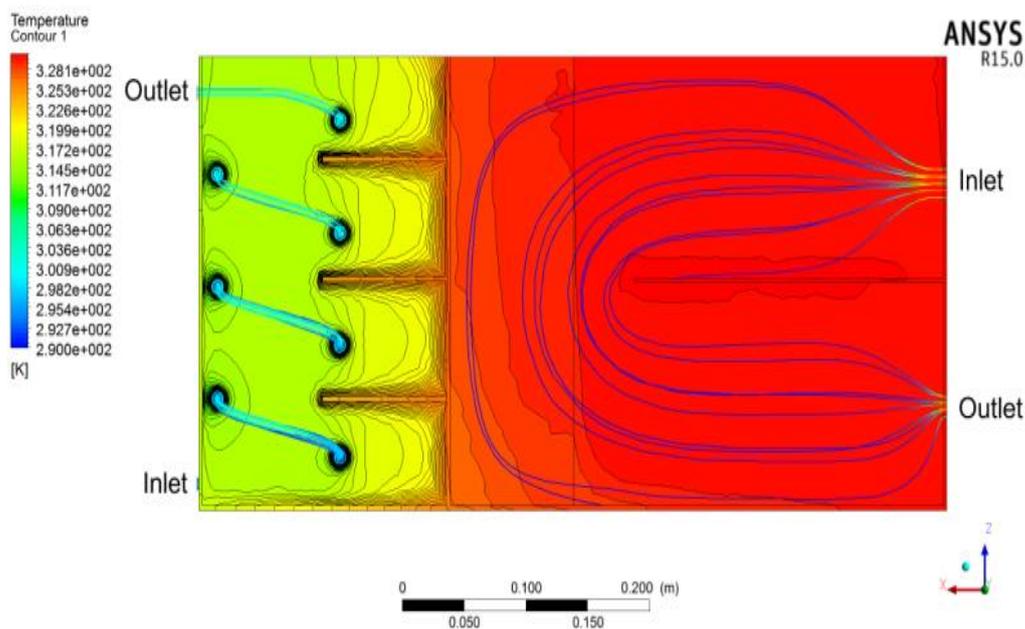
4- النتائج والمناقشة:

4-1- نتائج المحاكاة:

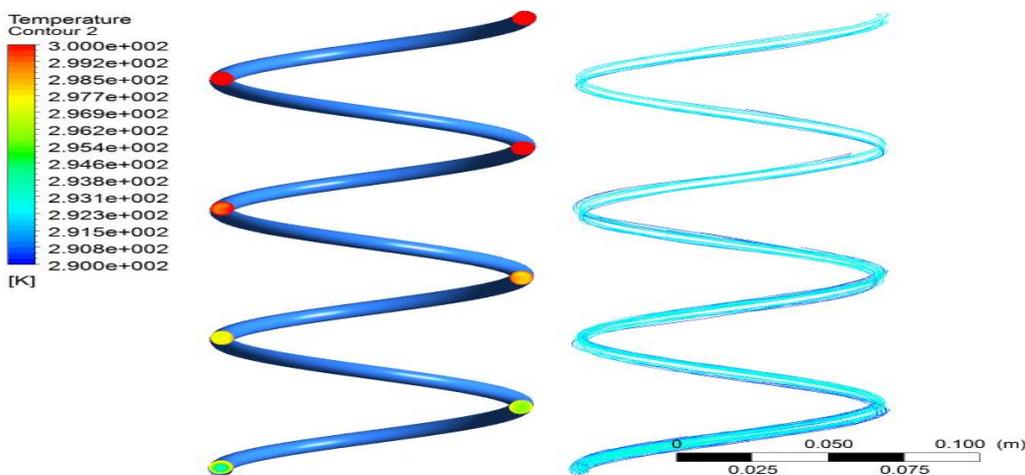
يبين الشكل (4) توزيع السرعات في دارتي الشحن والتفريغ، والشكل (5) يوضح توزيع درجات الحرارة في دارتي الشحن والتفريغ، أما الشكل (6) يبين تغير درجة الحرارة على طول الأنابيب النحاسي.



الشكل (4) توزيع السرعات في دارتي الشحن والتفريغ



الشكل (5) توزيع درجات الحرارة في دارتي الشحن والتفريغ



الشكل (6) تغير درجة الحرارة على طول الأنبوب النحاسي

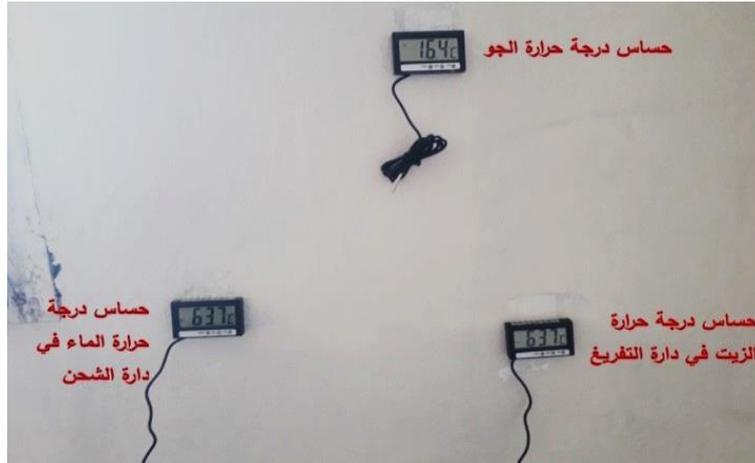
بنتيجة المحاكاة وجدنا أن:

- يحقق التصميم انسيابية في تدفق الماء في دائرة الشحن.
- تساهم الصفائح بشكل كبير بنقل الحرارة من الماء في دائرة الشحن إلى الزيت في دائرة التفريغ.
- حسب المحاكاة ارتفعت درجة حرارة الماء بالأنبوب النحاسي حوالي 15 درجة مئوية.

- تبين المحاكاة أن التصميم المقترح للخزان لديه سلوك حراري ديناميكي يؤدي الوظيفة المطلوبة منه ويمكن التنبؤ بهذا السلوك.

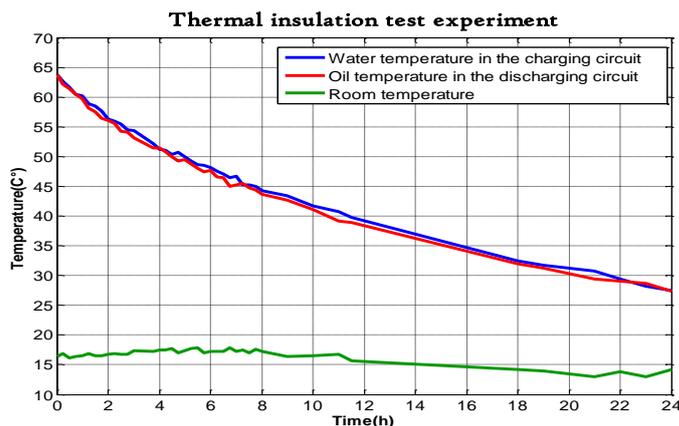
4-2- اختبار عازلية الخزان الحراري:

تم إجراء تجربة لاختبار عازلية الخزان الحراري الذي تم تصميمه حيث قمنا بتسخين 1.5 لتر من الزيت المستخدم في دارة التفريغ لدرجة حرارة الغليان لتصبح درجة حرارة كامل حجم الزيت في دارة التفريغ (69.9°C)، بينما وضعنا في دارة الشحن ماء درجة حرارته (68.3°C)، ثم انتظرنا حتى تساوت درجتي حرارة الماء في دارة الشحن والزيوت في دارة التفريغ (63.7°C)، في هذه اللحظة بدأنا بتسجيل بيانات درجة حرارة الجو ودرجة حرارة الماء في دارة الشحن وكذلك درجة حرارة الزيت في دارة التفريغ لمدة 24 ساعة (من الساعة 12 مساءً بتاريخ 31/3/2021 وحتى الساعة 12 مساءً بتاريخ 1/4/2021) وتم ملاحظة تدرج الحرارة لكل من دارتي الشحن والتفريغ مع تغير درجة حرارة الجو، ويبين الشكل (7) حساسات درجة الحرارة أثناء البدء بالتجربة الثالثة.

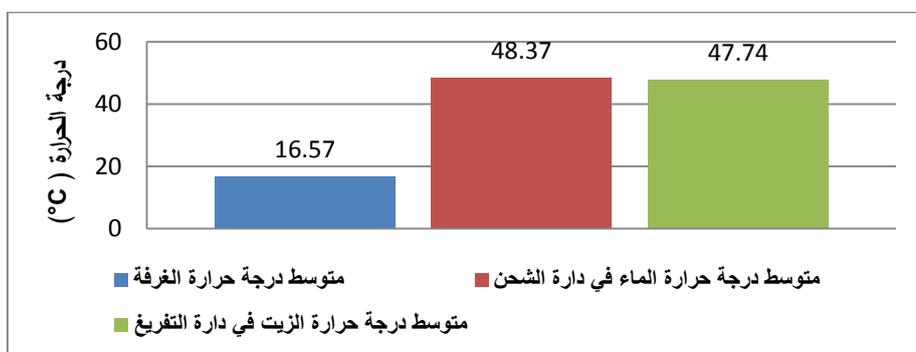


الشكل (7) حساسات درجة الحرارة أثناء البدء بالتجربة الثالثة

يبين الشكل (8) منحنيات درجة حرارة الماء والزيوت في دارتي الشحن والتفريغ ومنحني درجة حرارة الجو، بينما يبين الشكل (9) متوسط درجات حرارة الجو ومتوسط درجات حرارة الماء والزيوت في دارتي الشحن والتفريغ.



الشكل (8) منحنيات درجة حرارة الماء والزيت في دارتي الشحن والتفريغ ومنحني درجة حرارة الجو



الشكل (9) متوسط درجات حرارة الجو ومتوسط درجات حرارة الماء والزيت في دارتي الشحن والتفريغ

حساب معامل انتقال الحرارة الكلي:

1. تجريبياً:

$$Q_1 + Q_2 = Q_{loss}$$

Q_1 : كمية الحرارة المخزنة في حيز الماء [kJ]

Q_2 : كمية الحرارة المخزنة في حيز الزيت [kJ]

Q_{loss} : كمية الحرارة الضائعة [kJ]

$$Q_1 = m_1 c_{p1} \Delta t_1 = \rho V c_{p1} \Delta t_1$$

$$Q_2 = m_2 c_{p2} \Delta t_2$$

m_1 و m_2 : كتلة كل من الماء في دائرة الشحن والزيت في دائرة التفريغ على التوالي [kg]

c_{p1} و c_{p2} : السعة الحرارية النوعية للماء في دارة الشحن والزيت في دارة التفريغ على التوالي [kJ/kg.K]

Δt_1 و Δt_2 : فرق درجات الحرارة من بداية التجربة وحتى 12 ساعة من البدء بالتجربة [K]، ويوضح الشكل (10) مجال درجات الحرارة الذي تمت عنده الحسابات.

ρ : كثافة الماء [kg/ m³]

V : حجم الحيز الذي يشغله الماء [m³]

$$Q_1 = 1000 \times (0.3 \times 0.3 \times 0.4) \times 4.186 \times (63.7 - 39) = 3722.19 [kJ]$$

$$Q_2 = 15 \times 1.67 \times (63.7 - 38) = 643.79 [kJ]$$

$$Q_{loss} = 3722.19 + 643.79 = 4365.98 [kJ]$$

أي أن الضياعات 43.6% خلال 12 ساعة.

$$Q_{loss} = K . A . \Delta t \Rightarrow K = \frac{Q_{loss}}{A . \Delta t}$$

K : معامل انتقال الحرارة الكلي [W/m².K]

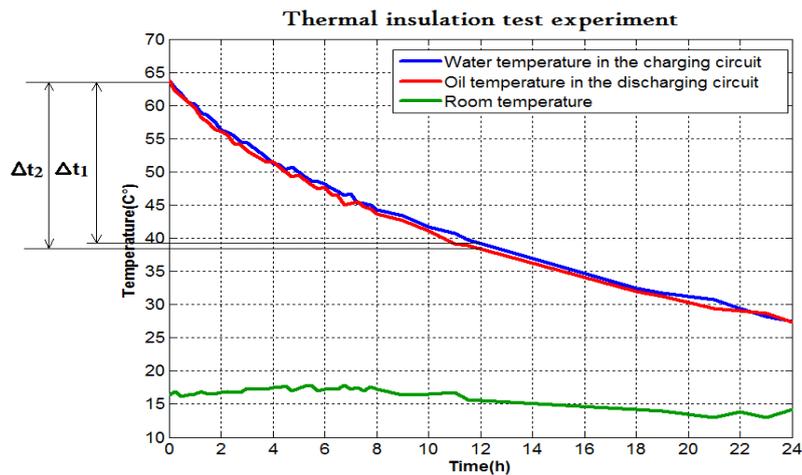
A : المساحة الكلية للخزان الحراري [m²]

Δt : فرق درجات الحرارة بين المائع والجو [K]، حيث: $\Delta t = t_f - t_o$:متوسط درجة حرارة المائع خلال 12

ساعة، بينما t_o : متوسط درجة حرارة الجو خلال 12 ساعة)

$$\Rightarrow K = \frac{4365.98}{[4(0.6 \times 0.3) + 2(0.3 \times 0.3)] \times (50.56 - 16.94)} = 144.29 [kJ/m^2 . K]$$

$$\Rightarrow K = \frac{144.29 \times 10^3}{12 \times 3600} = 3.34 [W/m^2 . K]$$



الشكل (10) مجال درجات الحرارة الذي تمت عنده الحسابات

2. حسابياً:

يتم انتقال الحرارة من الخزان الحراري بالتوصيل عبر جدران الخزان ومن جدار الخزان إلى الوسط الخارجي بالحمل، وبالتالي يكون معامل انتقال الحرارة الكلي:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_o}}$$

δ_i : سماكة الطبقات التي تتكون منها جدران الخزان [m]

λ_i : معامل التوصيل الحراري للمواد التي تتكون منها جدران الخزان [W/m.K]

α_i : معامل انتقال الحرارة للسطح الداخلي [W/m².K]

α_o : معامل انتقال الحرارة للسطح الخارجي [W/m².K]

$\delta_1 = 0.5 [mm]$	$\lambda_1 = 0.19 [W/m.K]$	• الطبقة الأولى: دهان
$\delta_2 = 2 [mm]$	$\lambda_2 = 54 [W/m.K]$	• الطبقة الثانية: صاج
$\delta_3 = 0.5 [mm]$	$\lambda_3 = 0.19 [W/m.K]$	• الطبقة الثالثة: دهان
$\delta_4 = 1 [cm]$	$\lambda_4 = 0.04 [W/m.K]$	• الطبقة الرابعة: صوف زجاجي

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \frac{1}{\alpha_o}}$$

($\frac{1}{\alpha_i} = 0$) لأن الجدار الداخلي للخزان له نفس درجة حرارة المائع داخله)

$$\Rightarrow K = \frac{1}{\frac{0.5 \times 10^{-3}}{0.19} + \frac{2 \times 10^{-3}}{54} + \frac{0.5 \times 10^{-3}}{0.19} + \frac{1 \times 10^{-2}}{0.04} + \frac{1}{34}} = 3.512 [W/m^2.K]$$

وبالتالي يكون الخطأ النسبي:

$$\frac{3.512 - 3.34}{3.512} \times 100 = 4.9\%$$

بنتيجة التجربة لاحظنا:

- انخفاض تدريجي بطيء لكل من درجة حرارة الماء من جهة الشحن ودرجة حرارة الزيت من جهة دارة التفريغ.
- تطابق تقريبي بين منحنى درجة حرارة الماء في دارة الشحن ومنحنى درجة حرارة الزيت في دارة التفريغ.
- عازلية الخزان تعتبر جيدة وخاصة خلال الـ 12 ساعة الأولى مع الأخذ بعين الاعتبار درجة حرارة الجو المنخفضة نسبياً حيث بلغت قيمة معامل انتقال الحرارة الكلي الفعلي $[W/m^2.K]$ 3.34.
- متوسط درجة حرارة الماء في دارة الشحن ($48.37^\circ C$)، بينما متوسط درجة حرارة الزيت في دارة التفريغ ($16.57^\circ C$)، وذلك عند متوسط درجة حرارة الجو ($16.57^\circ C$).

4-3- تجربة ماء-ماء:

تهدف هذه التجربة لدراسة انتقال الحرارة في الخزان من دارة الشحن إلى دارة التفريغ عند استخدام نفس وسيط التخزين (الماء).

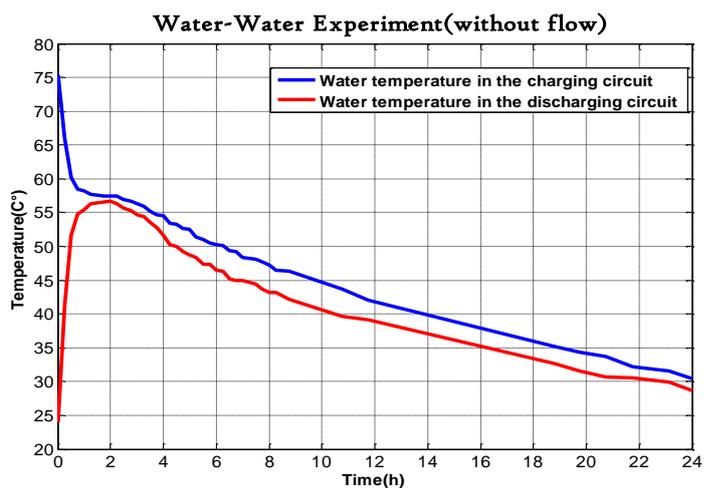
تم إجراء التجربة في تاريخ 5/3/2021 عند درجة حرارة الغرفة ($20^\circ C$)، حيث تم ملء الخزان من جهة دارة الشحن بماء ساخن درجة حرارته ($75.4^\circ C$) وكتلته 36 kg، وبماء بارد درجة حرارته ($24^\circ C$) وكتلته 18 kg من جهة دارة التفريغ.

تم إجراء التجربة بأخذ قراءة درجات الحرارة خلال 24 ساعة (من الساعة 11 صباحاً بتاريخ 5/3/2021 وحتى الساعة 11 صباحاً بتاريخ 6/3/2021) وتم ملاحظة تدرج الحرارة لكل من دارتي الشحن والتفريغ، ويبين الشكل (11) النموذج المنفذ مع حساسات درجة الحرارة أثناء التجربة الأولى.

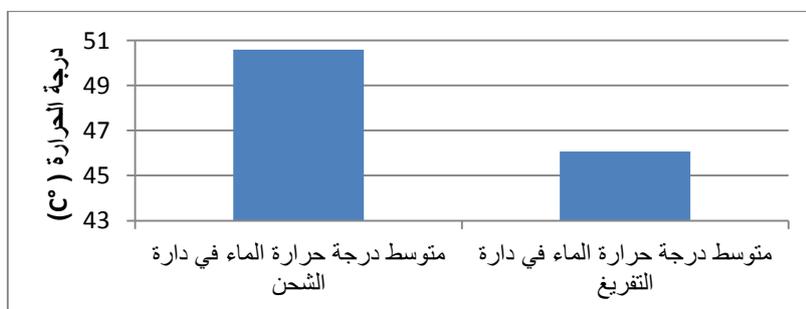


الشكل (11) النموذج المنفذ مع حساسات درجة الحرارة أثناء التجربة الأولى

يوضح الشكل (12) منحنيات درجة حرارة الماء في دارتي الشحن والتفريغ، أما الشكل (13) يبين متوسط درجات حرارة الماء في دارتي الشحن والتفريغ.



الشكل (12) منحنيات درجة حرارة الماء في دارتي الشحن والتفريغ



الشكل (13) متوسط درجات حرارة الماء في دارتي الشحن والتفريغ

بنتيجة التجربة لاحظنا:

- انخفاض درجة حرارة الماء من جهة دارة الشحن (من 75.4 °C إلى 57.5 °C)، بينما ازدادت درجة حرارة الماء من جهة دارة التفريغ (من 24 °C إلى 56.7 °C)، وذلك خلال أول ساعتين من إجراء التجربة.
- بعد ساعتين من أداء التجربة لاحظنا انخفاض تدريجي بدرجة حرارة الماء لكل من دارتي الشحن والتفريغ.
- أقصى درجة حرارة وصل إليها الماء في دارة التفريغ (56.7 °C) وذلك بعد ساعتين من إجراء التجربة.
- تقارب بين منحنى درجة حرارة الماء في دارة الشحن ومنحنى درجة حرارة الماء في دارة التفريغ بعد ساعتين من إجراء التجربة لتصل درجتي الحرارة للماء في دارتي الشحن والتفريغ بعد 24 ساعة إلى (30.4 °C و 28.7 °C) على التوالي.
- متوسط درجات حرارة الماء في دارة الشحن (50.60 °C)، بينما كان في دارة التفريغ (46.07 °C).

4-4- تجربة ماء-زيت:

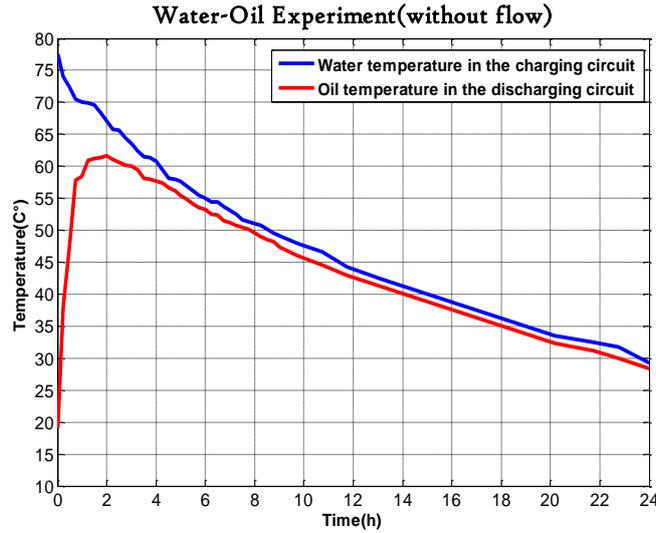
تهدف هذه التجربة لدراسة انتقال الحرارة في الخزان من دارة الشحن إلى دارة التفريغ عند استخدام وسيطين مختلفين للتخزين (الماء في دارة الشحن والزيت في دارة التفريغ).

تم إجراء التجربة في تاريخ 7/3/2021 عند درجة حرارة الغرفة (20 °C)، حيث تم ملء الخزان من جهة دارة الشحن بماء ساخن درجة حرارته (77.5 °C) وكتلته 36 kg، وبزيت محركات درجة حرارته (19.1 °C) وكتلته 15 kg من جهة دارة التفريغ، وذلك بأخذ قراءة درجات الحرارة خلال 24 ساعة (من الساعة 10:15 صباحاً بتاريخ 7/3/2021 وحتى الساعة 10:15 صباحاً بتاريخ 8/3/2021) وملاحظة تدرج الحرارة لكل من دارتي الشحن والتفريغ، ويبين الشكل (14) النموذج المنفذ مع حساسات درجة الحرارة أثناء التجربة الثانية.

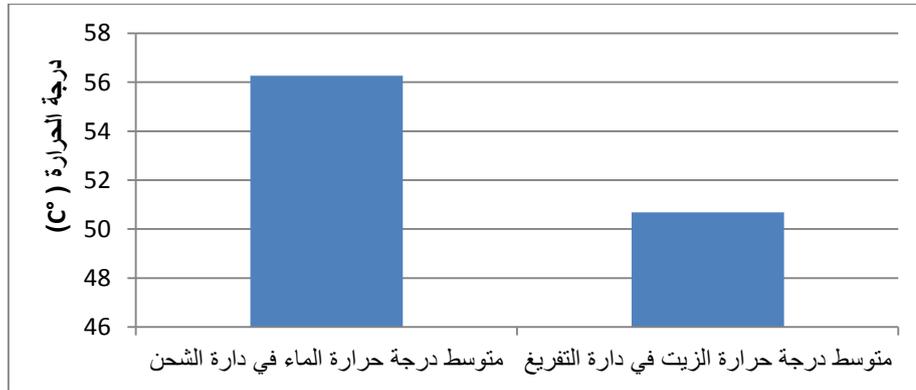


الشكل (14) النموذج المنفذ مع حساسات درجة الحرارة أثناء التجربة الثانية

يبين الشكل (15) منحنيات درجة حرارة الماء والزيت في دارتي الشحن والتفريغ، أما الشكل (16) يبين متوسط درجات حرارة الماء والزيت في دارتي الشحن والتفريغ.



الشكل (15) منحنيات درجة حرارة الماء والزيت في دارتي الشحن والتفريغ



الشكل (16) يبين متوسط درجات حرارة الماء والزيت في دارتي الشحن والتفريغ

بنتيجة التجربة لاحظنا:

- انخفاض درجة حرارة الماء من جهة دائرة الشحن (من 77.5°C إلى 67.1°C)، بينما ازدادت درجة حرارة الزيت من جهة دائرة التفريغ (من 19.1°C إلى 61.7°C)، وذلك خلال أول ساعتين من إجراء التجربة.
- بعد ساعتين من أداء التجربة لاحظنا انخفاض تدريجي بدرجة حرارة الماء والزيت لكل من دارتي الشحن والتفريغ.
- أقصى درجة حرارة وصل إليها الزيت في دائرة التفريغ (61.7°C) وذلك بعد ساعتين من إجراء التجربة.
- نلاحظ تقارب بين منحنى درجة حرارة الماء في دائرة الشحن ومنحنى درجة حرارة الزيت في دائرة التفريغ بعد ثلاث ساعات من إجراء التجربة لتصل درجتى الحرارة للماء والزيت في دارتي الشحن والتفريغ بعد 24 ساعة إلى (29.2°C و 28.4°C) على التوالي.

- متوسط درجة حرارة الماء في دارة الشحن (56.26°C)، بينما متوسط درجة حرارة الزيت في دارة التفريغ (50.68°C).

5- الاستنتاجات والتوصيات:

لقد قمنا بتصنيع نموذج لخزان حراري يعمل على مبدأ السوائل غير المختلطة (ماء/زيت) واختباره لتقييم أداء هذا الخزان. تم تصميم الخزان الحراري بحيث يكون أبعاده $(60 \times 30 \times 30)\text{cm}$ ، ويحتوي الماء بنسبة 66.7% والزيت 33.3% . يتم الفصل بين المائعين باستخدام صفيحة سماكتها 2mm . تم استخدام الماء في دارة الشحن بينما الزيت في دارة التفريغ. كما تم إجراء محاكاة حاسوبية للنموذج المقترح باستخدام الحزمة البرمجية ANSYS. اعتماداً على المحاكاة والتجارب التي قمنا بها تم التوصل للنتائج التالية:

- أداء الخزان الحراري جيد عند عدم وجود تدفق في دارتي الشحن والتفريغ وذلك في حالتي الماء والزيت في دارة التفريغ، لكن تمت عملية الشحن بشكل أسرع في حالة وجود الزيت في دارة التفريغ (ارتفعت درجة حرارة الزيت خلال أول ساعتين من 19.1°C إلى 61.7°C بينما في حالة وجود الماء في دارة التفريغ كان ارتفاع حرارة الماء خلال أول ساعتين من 24°C إلى 56.7°C)، بالمقابل الطاقة المخزنة في الماء أكبر من الطاقة المخزنة في الزيت.
- النموذج المقترح للخزان الحراري يعمل بكفاءة عالية في تخزين ونقل الحرارة بين دارتي الشحن والتفريغ.
- يمكن استخدام النموذج المقترح بفعالية مع السخانات الشمسية المنزلية، لكن من الأفضل إجراء المزيد من التجارب على أنواع مختلفة من الزيوت لاختيار أفضلها.
- إن وضع الزعانف الطولية والعرضية من جهة دارة الشحن والتفريغ على التوالي أدى إلى زيادة التبادل الحراري بين الماء والزيت وذلك بسبب زيادة سطح التبادل الحراري.
- عازلية نموذج الخزان الحراري المنفذ (بسماعته 1cm للعازل) تعتبر جيدة حيث بلغت قيمة معامل انتقال الحرارة الكلي $3.34 [W/m^2.k]$.
- يجب إجراء المزيد من الدراسات والتجارب على هذا النوع من الخزانات (خاصة في حال وجود تدفق).

المراجع

- [1] Ahmed SF, Khalid M, Rashmi W, et al. (2017) Recent progress in solar thermal energy storage using nanomaterials. *Renewable Sustainable Energy Rev* 67: 450–460.
- [2] Kalogirou SA (2004) Solar thermal collectors and applications. *Prog Energy Combust Sci* 30: 231–295.
- [3] Burke MJ, Stephens JC (2018) Political power and renewable energy futures: A critical review. *Energy Res Soc Sci* 35: 78–93.

- [4] Smil V (1991) *General Energetics: Energy in the Biosphere and Civilization*. 1st Eds., New York: Wiley.
- [5] Tian Y, Zhao CY (2013) A review of solar collectors and thermal energy storage in solar thermal applications. *Appl Energy* 104: 538–553.
- [6] Sarbu I, Dorca A (2019) Review on heat transfer analysis in thermal energy storage using latent heat storage systems and phase change materials. *Int J Energy Res* 43: 29–64.
- [7] Zalba B, Marín JM, Cabeza LF, et al. (2003) Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. *Appl Therm Eng* 23: 251–283.
- [8] Sarbu I, Sebarchievici C (2018) A comprehensive review of thermal energy storage. *Sustainability* 10: 191.
- [9] Hou Y, Vidu R, Stroeve P, et al. (2011) Solar energy storage methods. *Ind Eng Chem Res* 50: 8954–8964.
- [10] Pelaya U, Luoa L, Fana Y, et al. (2017) Thermal energy storage systems for concentrated solar power plants. *Renewable Sustainable Energy Rev* 79: 82–100.
- [11] Chen H, Cong TN, Yang W, et al. (2009). Progress in electrical energy storage system: a critical review. *Prog Nat Sci* 19: 291–312.
- [12] Zhao CY, Wu ZG (2011) Thermal property characterization of a low melting temperature ternary nitrate salt mixture for thermal energy storage systems. *Sol Energy Mater Sol Cells* 95: 3341–3346.
- [13] Nazir H, Batool M, Osorio FJB, et al.(2019) Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. *Int J Heat Mass Transfer* 129: 491–523.
- [14] Abedin AH, Rosen MA (2011) A critical review of thermochemical energy storage systems. *Open Renewable Energy J* 4: 42–46.
- [15] Abhat, A., *Revue Phys. Appl.*, 1980, 15, 477.
- [16] Du • e, J. A. and Beckman, W. A., *Solar Energy Thermal Processes*, John Wiley & Sons, 1989.
- [17] Wyman, C., Cestle, J. and Kreith, F., *Solar Energy*, 1980, 24, 517.
- [18] Kumar, A.; Shukla, S.K. A Review on Thermal Energy Storage Unit for Solar Thermal Power Plant Application. *Energy Procedia* 2015, 74, 462–469. [CrossRef]
- [19] Sarbu, I.; Sebarchievici, C. *Solar Heating and Cooling: Fundamentals, Experiments and Applications*; Elsevier: Oxford, UK, 2016.