

دراسة تجريبية لتحسين التدرج الحراري ضمن تصميمين مختلفين لخزان حراري شمسي

الدكتورة لانا حسن كنجو*
الدكتور أيوب عيسى حسن**
جوكاستا مزيد بدور***

تاريخ الإيداع 12 / 4 / 2011. قُبل للنشر في 30 / 5 / 2011

□ ملخص □

يُعدّ تحسين تدرج درجات حرارة الماء في الخزانات الحرارية من الأمور المهمة التي تؤثر في الأداء الحراري للسخانات الشمسية، نظراً لإسهام التدرج الحراري الجيد في زيادة مردود المجمّع الشمسي، نتيجة إمداده بالمائع الأكثر برودة، الذي ينعكس بدوره على أداء النظام بأكمله. كما أن للتدرج الحراري الجيد في هذه الخزانات أهميته بإنقاص الحاجة إلى مصادر الطاقة التقليدية المستخدمة في السخانات الشمسية في ظروف معينة (الطقس الماطر أو الغائم، زيادة الطلب على الماء الساخن غير المتوافر بشكل كافٍ في الخزان لسد حاجة المستهلك). من هنا أتت فكرة هذا البحث بدراسة هذه الظاهرة تجريبياً، وذلك من خلال تصميم لخزان حراري ذي مبادل حراري خارجي، على شكل قميص ذي مداخل متعددة لمائع الدارة الرئيسية إليه، مزودة بصمامات كهربائية. كما قمنا بتصميم خزان حراري تقليدي ذي مبادل حراري أنبوبي داخلي، من أجل مقارنة التدرج الحراري من خلال دراسة تجريبية على كلا الخزانين في ظروف عمل مختلفة. تضمن البحث أيضاً تصميم معالج معطيات (Data Logger) للتحكم في بعض أجزاء دارة السخان الشمسي، ولقراءة بعض المعطيات ومعالجتها وتخزينها (درجات الحرارة في مواقع مختلفة من الدارة، حالة مضخة تدوير الدارة الرئيسية، حالة الصمامات الكهربائية،....الخ). أظهرت النتائج التجريبية المنجزة فعالية الخزان الحراري ذي المبادل الخارجي من نوع القميص في تحقيق التدرج الحراري في ظروف الطقس الغائم جزئياً، بينما كانت الفعالية أكبر للخزان الحراري ذي المبادل الأنبوبي الداخلي في ظروف الطقس المشمس.

الكلمات المفتاحية: التدرج الحراري، الخزانات الحرارية، سخانات الماء الشمسية، الدراسة التصميمية، الدراسة التجريبية.

* مدرسة - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** أستاذ مساعد - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
*** طالبة دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

An Experimental Study for Improving The Thermal Stratification in two Different Solar Storage Tank Designs.

Dr. Lana Kenjo*
Dr. Ayuob Hasan**
Jokasta Maziad Badour***

(Received 12 / 4 / 2011. Accepted 30 / 5 / 2011)

□ ABSTRACT □

Improving the temperature stratification in thermal storage tanks is considered so important in affecting thermal performance in solar water heating, because good thermal stratification contributes to increasing the efficiency of the solar collector (by supplying the collector with colder water). This, in turn, will lead to improve the work of the whole system. Thermal stratification phenomenon is also important in its ability to lessen the need for the traditional sources of energy which are used in the traditional solar tanks, as in special circumstances such as on rainy or cloudy day, when the necessity for hot water, insufficient to meet this need, increases.

The idea of this research emerged from the previous study: studying this phenomenon experimentally in a thermal storage tank that will be designed, the thermal storage tank of the kind mantle tank with three-way electric valves that can be associated to a mantle heat exchanger into which the fluid is injected at the correct level. We also designed a traditional solar storage tank with internal thermal coil exchanger to compare the thermal stratification through experimental study on both of them in different circumstances. The research includes designing a (Data Logger) to control some parts of a solar water heating, to read, process, and store data (temperature in different parts of the system, the condition of the pump that circulates water in the main circuit, the condition of the three electric valves, etc). The achieved, experimental results showed the efficiency of the thermal storage tank of the kind mantle tank in realizing the thermal stratification, in partly cloudy weather, while the efficiency was higher for the traditional solar storage tank in the sunny weather.

key words: Thermal stratification, Storage Tank, Solar Water Heating System, Experimental Study, Design Study

* Assistant professor, Department of the Mechanical forces Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria

** Associate professor, Department of the Mechanical forces Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria

*** Postgraduate Student, Department of the Mechanical forces Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

يعدّ الخزان الحراري أحد الأجزاء المهمة في سخان الماء الشمسي التي تؤثر في أدائه الحراري، حيث يلعب التدرج الجيد لدرجات حرارة الماء ضمن الخزان الحراري دوراً مهماً في زيادة مردود المجمع الشمسي، نتيجة إمداده بالمائع الأكثر برودة، والذي ينعكس بدوره على أداء النظام بأكمله. كما أن للتدرج الحراري الجيد في هذه الخزانات أهميته بإنقاص الحاجة إلى مصادر الطاقة التقليدية المستخدمة في السخانات الشمسية في ظروف معينة (الطقس الماطر أو الغائم، زيادة الطلب على الماء الساخن غير المتوفر بشكل كافٍ في الخزان لسد حاجة المستهلك) [1, 2].

أظهر العديد من الأبحاث العالمية، التي ركزت على تحسين التدرج الحراري ضمن الخزانات الحرارية، بأن هناك تصاميم ذات تقنيات مختلفة لهذه الخزانات، تساعد على تحقيق هذه الظاهرة بشكل جيد. ويمكن لهذه التقنيات التي تنتشر في الأسواق العالمية أن تكون متوضّعة داخل الخزان أو خارجه، كما يمكن أن تكون خاصة بفتحات تزويد الماء البارد أو الساخن إلى الخزان. ففي التقنيات المستخدمة داخل الخزان يمكن تزويد الخزان من الداخل بأنبوب يمر فيه الماء القادم من المجمع الشمسي، الذي يمكن أن يكون صلباً أو مرناً [2, 3, 4, 5]، حيث يتميز هذا الأنبوب بوجود ثقب متعدد على مستويات مختلفة ضمن الخزان مزودة بأغشية رقيقة تفتح باتجاه داخل الخزان تبعاً للفرق في ضغط الماء ضمن الخزان وضمن الأنبوب، وبالتالي يفتح الغشاء بحيث يخرج الماء من الثقب الواقع على مستوى درجة حرارة موافقة لدرجة حرارة الماء القادم من المجمع. كما يمكن استخدام تقنيات مستخدمة خارج الخزان، حيث تعتمد على مداخل متعددة لمائع اللاقط الشمسي إلى مبادل حراري خارجي من نوع القميص يحيط بالخزان الحراري [2, 6, 7] أو إلى مبادلات حرارية داخلية ضمن الخزان الحراري، وتكون هذه المداخل مزودة بصمامات كهربائية [8] بحيث يفتح الصمام الواقع على مستوى درجة حرارة موافقة لدرجة حرارة مائع اللاقط الشمسي. أما التقنيات الخاصة بفتحات التزويد فهي متعددة، ويمكن أن تخص فتحات تزويد الماء البارد إلى الخزان الحراري [9, 10, 11, 12, 13] أو فتحات تزويد الماء الساخن [11, 14]. كما يمكن وضع حواجز بأشكال مختلفة ضمن الخزان الحراري [15]، وقد أظهرت دراسات أخرى تأثير استخدام عدة خزانات حرارية [16]، أو تأثير عملية ربط خزائين حراريين في سخان ماء شمسي في التدرج الحراري [17]. وتم أيضاً دراسة تأثير شكل الخزان الحراري في التدرج الحراري [18].

نظراً لما ذكرنا من أهمية التدرج الحراري ضمن الخزانات الحرارية في سخانات الماء الشمسية، فقد أتت فكرة هذا البحث بالدراسة التجريبية لهذه الظاهرة في تصميمين مختلفين لخزائين حراريين شمسيين، وقد تمت الدراسة في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة تشرين، حيث وضعت التجهيزات على سطح الكلية.

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية هذا البحث بأنه استمرار للأبحاث المختلفة على صعيد العالم، التي أجريت على خزانات حرارية ذات تقنيات مختلفة من أجل تحسين التدرج الحراري ضمنها. أما الأهمية الأخرى فتأتي من كون أنظمة الطاقة الشمسية الحرارية التقليدية المنتشرة في أسواقنا المحلية تعاني من قلة الكفاءة الحرارية لها لأسباب عديدة؛ منها عدم تحقيق ظاهرة التدرج الجيد لدرجات حرارة المائع ضمن خزاناتها الحرارية، الأمر الذي يؤدي إلى مشاكل تقنية واستثمارية لهذه الأنظمة، وقلة ثقة المستهلك بأدائها والتردد في شرائها. وبالتالي يمكن لهذا البحث أن يسهم في التوصل إلى نتائج جيدة؛ تتشكل حلاً لبعض هذه المشاكل.

أما الهدف الآخر للبحث فهو الدراسة التجريبية لظاهرة التدرج الحراري في هذين الخزائين الحراريين، ومن ثم إجراء المقارنة بينهما من حيث تحقيق التدرج الحراري الأفضل في ظروف عمل مختلفة تتمثل بتجارب متعددة عليهما.

طرائق البحث ومواده:

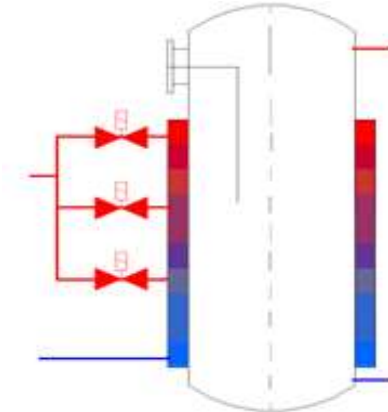
لإنجاز هذا البحث تمّ اعتماد الدراسة التصميمية لخزائين حراريين مختلفين، الأول: ذو مبادل حراري خارجي من نموذج القميص ذي مداخل متعددة لمائع اللاقط، وهذه المداخل مزوّدة بصمامات كهربائية تسمح بفتح الصمام الواقع على المستوى الذي درجة حرارته موافقة لدرجة حرارة المائع القادم من اللاقط، بينما يتجسّد التصميم الثاني للخزان الحراري بوجود مبادل حراري أنبوبي داخلي، وبعد ذلك تمّت الدراسة التجريبية، كما يأتي:

1. الدراسة التصميمية:

تمتّت هذه الدراسة بمرحلتين هما:

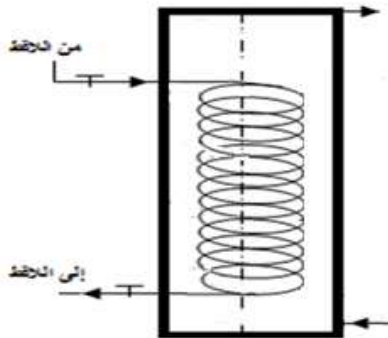
1.1. اختيار أشكال الخزانات:

قادتنا الدراسات المرجعية المتعددة، حول التقنيات المختلفة المستخدمة لتحسين التدرج الحراري في الخزان الحراري لسخان الماء الشمسي، إلى اختيار الخزان الحراري ذي المبادل الحراري الخارجي من نموذج القميص ذي مداخل متعددة مزوّدة بصمامات كهربائية كما في الشكل (1)، وذلك من أجل تصميمه، ومن ثم إجراء التجارب عليه.



الشكل (1) خزان حراري شمسي بمبادل خارجي من نوع قميص ذي مداخل متعددة مزوّدة بصمامات كهربائية.

بغرض مقارنة نتائج التجارب المنجزة على هذا التصميم، كان لا بد من اختيار تصميم تقليدي للخزان الحراري يتمثل بوجود مبادل حراري أنبوبي نحاسي داخلي كما في الشكل (2).

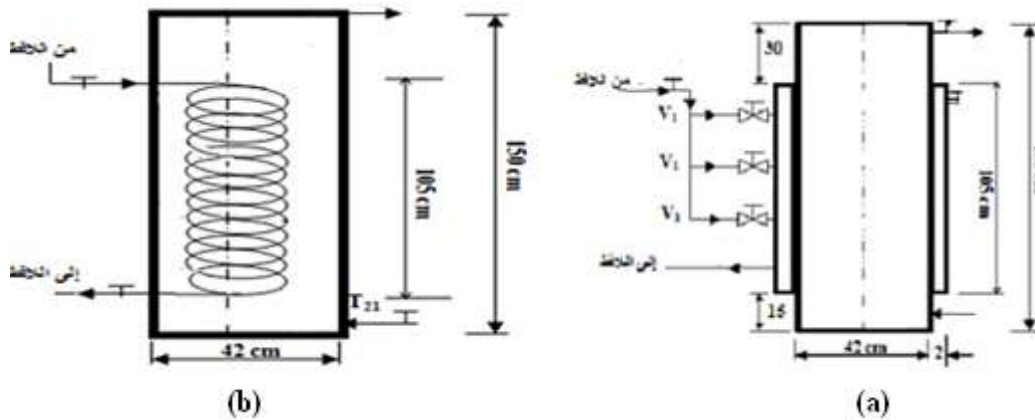


الشكل (2) خزان حراري شمسي تقليدي بمبادل أنبوبي نحاسي داخلي.

2.1. دراسة أبعاد الخزانات:

تُعدّ ظاهرة تدرج درجات الحرارة ضمن الخزان الحراري ظاهرة حمل حر، تتعلق بالحالة الحرارية للمائع الحراري ضمن الخزان وبأبعاد الخزان، لذلك كان لابد من دراسة هذه الأمور.

أظهرت الدراسات المرجعية المتعددة أن نسبة ارتفاع الخزان الحراري إلى قطره (H/D) تلعب دوراً مهماً في تحقيق التدرج الحراري الجيد. فالنسبة التي تحقق توازناً مقبولاً بين السعر والأداء تقع ضمن المجال (3-4) [2, 12, 13] النسبة الأقل من (3) تؤدي إلى انخفاض الأداء الحراري للنظام، بينما تؤدي النسبة الأكبر من (4) إلى الزيادة في سعره. من هنا كان خيارنا لنسبة قدرها (3.57 = 150/42) لكل من الخزائين كما يظهر الشكل (3).
بينما أظهرت الدراسة المرجعية [2] أن نسبة ارتفاع المبادل الحراري إلى ارتفاع الخزان الحراري، التي تحقق توازناً مقبولاً بين الأداء وتقليل الحاجة إلى مصدر الطاقة المساعدة، بتقليل الحجم المسخّن بهذه الطاقة هو (0.7). لذلك تم اختيار ارتفاع المبادل الحراري لكل خزان (105 cm)، وهذا ما يظهره الشكل (3).



الشكل (3) أبعاد الخزائين الحراريين: ذو المبادل الخارجي من نوع القميص (a)، وذو المبادل الأنبوبي الداخلي (b).

تتعلق الحالة الحرارية للمائع ضمن الخزان الحراري، في حالة وجود أو عدم وجود طبقات حدية حرارية مفصولة ضمن الخزان، بالنسبة (H/D) كما هو موضّح في العلاقة (1)، فإذا تحققت هذه العلاقة يكون نظام الطبقات الحدية الحرارية السائدة ضمن الخزان الحراري هو نظام طبقات حدية حرارية مفصولة.

$$\frac{H}{D} < (Ra_H)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

$$Ra_H = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot H^3}{a \cdot \nu} \quad (2)$$

حيث:

Ra_H : رقم ريليه بالنسبة للارتفاع.

g : تسارع الجاذبية الأرضية

β : عامل التمدد الحراري

ΔT : فارق درجات الحرارة بين المائع والجدار

H : ارتفاع الخزان

[m/s²]

[1/K]

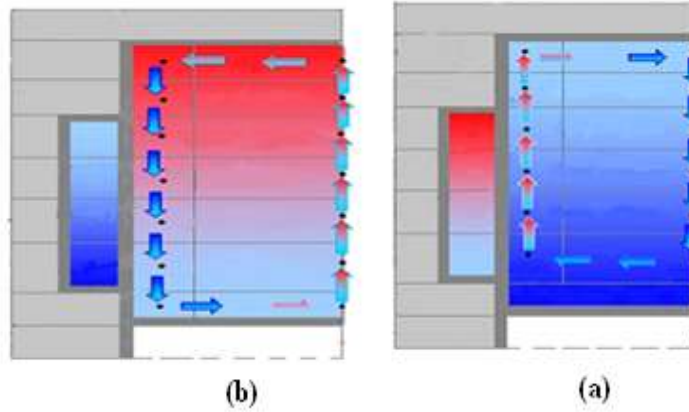
[K]

[m]

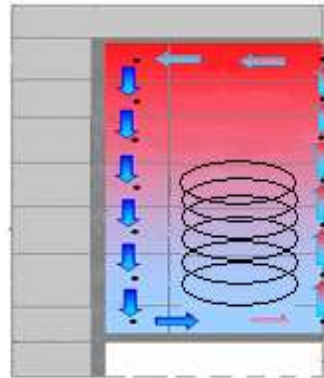
[m]	D: قطر الخزان
[m ² /s]	a: الانتشارية الحرارية
[m ² /s]	v: اللزوجة التحريكية

بحساب رقم ريليه من العلاقة (2) باستخدام أبعاد الخزان الحراري المستخدم في تجربتنا، وحتى من أجل فرق في درجات الحرارة قدره ($\Delta T = 1^\circ\text{C}$)، تكون العلاقة (1) محققة، وبالتالي يكون نظام الحمل الحراري السائد في الخزان هو حمل حر مع طبقات حدية حرارية مفصولة، ويمكن التمييز بين نوعين من الطبقات الحدية الحرارية وهي: أ- طبقة حدية حرارية صاعدة، ويمكن مصادفتها عند التسخين الشمسي للخزان بمبادل حراري خارجي كما في الشكل (4 - a).

ب- طبقة حدية حرارية هابطة، ويمكن مصادفتها عند التسخين بمصدر طاقة مساعدة، واقع داخل الخزان الحراري كما في الشكل (4 - b)، كما يمكن مصادفتها عند تسخين الخزان الحراري بواسطة مبادل حراري داخلي كما في الشكل (5).



الشكل (4) الطبقات الحدية الحرارية التي يمكن مصادفتها في الخزان الحراري (a طبقة حدية حرارية صاعدة)، (b طبقة حدية حرارية هابطة).



الشكل (5) الطبقة الحدية الحرارية الهابطة في خزان حراري ذي تسخين شمسي بمبادل حراري داخلي.

2. الدراسة التجريبية:

تضمنت هذه الدراسة مراحل عدة كالآتي:

2.1 تركيب التجهيزات:

تمثلت هذه المرحلة بتركيب جميع التجهيزات المكوّنة لنظام تسخين الماء الشمسي وأجهزة القياس اللازمة في التجارب. شملت هذه التجهيزات ما يأتي:

(a) التجهيزات الميكانيكية:

وهي عبارة عن الخزانات الحرارية التي تمّ تصميمها، إضافةً إلى الأجزاء الأخرى الموضحة على الشكل (6)، وسوف نستعرضها جميعها كما يأتي:

1. الخزان الحراري ذو المبادل الحراري الخارجي من نوع القميص، مع مداخل متعددة مزودة بصمامات كهربائية. تبلغ سعة الخزان (200 liters)، أما ارتفاع المبادل الخارجي المحيط بالخزان الرئيسي فهو (105 Cm)، بينما تبلغ سماكة العازل الحراري للخزان ومبادلته وهو من نوع الصوف الزجاجي (5 Cm).
2. الخزان الحراري ذو المبادل الحراري الأنبوبي الداخلي. تبلغ سعته (200 liters)، أما ارتفاع المبادل الأنبوبي الداخلي -وهو مصنوع من النحاس- فهو نفس ارتفاع المبادل الخارجي للخزان الأول أي (105 Cm). كما تم عزل الخزان أيضاً بمادة الصوف الزجاجي بسماكة قدرها (5 Cm).
3. خزان التعويض اللازم لإمداد الخزان الحراري بالماء البارد وتبلغ سعته (1000 liters).
4. المجمعات الشمسية وعددها (2)، تبلغ مساحة كلٍ منهما (2 m²).
5. مضخات التدوير وعددها (2)، حيث استخدمت الأولى في دارة المجمع الشمسي لتدوير المائع فيها، أما الثانية فاستخدمت في الدارة الثانوية (دارة الخزان الحراري) لإمداد الخزان الحراري بالماء البارد. المضخات المستعملة هي من نوع (Wstn) استطاعة كل منهما [W] 90.
6. الأنابيب الموجودة في أجزاء مختلفة من دارة النظام قطرها (1.25Cm)، إضافةً إلى الأجزاء الأخرى اللازمة لعمل الدارة بشكل جيد وآمن مثل: صمامات تنفيس، صمامات عدم رجوع،... الخ. لقد تم عزل جميع الأنابيب مع الأجزاء المتممة بمادة الصوف الزجاجي أيضاً.



الشكل (6) نظام سخان الماء الشمسي مع كافة أجزائه مركب على سطح كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة تشرين.

(b) التجهيزات الإلكترونية:

تضمنت هذه التجهيزات الأجزاء الآتية:

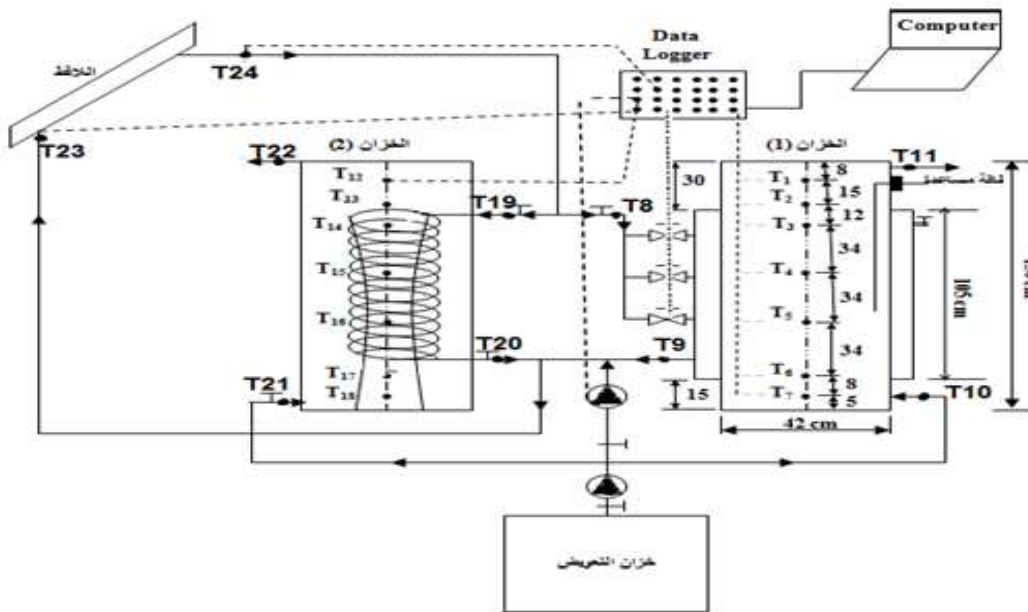
- 1) الصمامات الكهربائية اللازمة للتحكم بضخ مائع الدارة الرئيسية (دارة المجمع الشمسي) في المبادل الحراري الخارجي من نوع القميص، عند المستوى الذي درجة حرارته موافقة لدرجة حرارة المائع القادم من المجمع، حيث تم ربط هذه الصمامات بمعالج معطيات تمّ تصميمه، وسوف نتحدث عنه لاحقاً. يبلغ عدد الصمامات ثلاثة، وهي من نوع

(on/off)، حيث يتم دائماً الفتح الأوتوماتيكي لصمام واحد فقط وفقاً للآلية المذكورة. يظهر الشكل (7) الصمّامات وكيفية تركيبها على مداخل الخزان ذي المبادل الخارجي.

(2) الحساسات الإلكترونية (Sensor): استخدمت لقياس درجات الحرارة في نقاط مختلفة من دائرة النظام بدقة قياس قدرها ($\pm 0.5^\circ\text{C}$)، وعددها (25) حساساً، وُزعت كما يلي: عند سبع مستويات داخل كل خزان حراري، عند مدخل المجمّع الشمسي ومخرجه، عند مداخل الخزانات الحرارية ومخارجها، عند مداخل المبادلات الحرارية ومخارجها، ولقياس درجة حرارة الوسط المحيط. يظهر الشكل (8) توزع هذه الحساسات.



الشكل (7) الصمّامات الكهربائية المركّبة على المداخل المتعددة إلى المبادل الحراري الخارجي من نوع القميص.



الشكل (8) مخطط نظام سخان الماء الشمسي، يظهر كافة الأبعاد وتوزع الحساسات في مختلف النقاط المراد قياس درجة حرارتها من الدارة.

2.2. تصميم معالج المعطيات (Data Logger):

يبين الشكل (9) معالج معطيات (Data Logger)، الذي تمّ تصميمه، من أجل قراءة المعطيات ومعالجتها وتخزينها، والتي تتمثل بدرجات الحرارة في نقاط مختلفة من دائرة النظام ($T_1, T_2, T_3, \dots, T_{25}$) التي يظهرها الشكل (8). كما تظهر أهمية معالج المعطيات من خلال التحكم في بعض أجزاء الدارة كالصمّامات الكهربائية على

مداخل المبادل الخارجي من نوع القميص، ومضخة تدوير مائع الدارة الرئيسية. تكون مضخة التدوير للدارة الرئيسية، والتي يظهر الشكل (10) مبدأ التحكم بعملها، في حالة عمل إذا تحقق الشرطين الآتيين:

$$T_{24} - T_7 \geq \Delta T_{P2} \quad (3)$$

$$T_{24} - T_{18} \geq \Delta T_{P2} \quad (4)$$

T_{24} : درجة حرارة المائع عند مخرج المجمّع الشمسي.

T_7 : درجة حرارة الماء في أسفل الخزان الحراري ذي المبادل الخارجي من نوع القميص.

T_{18} : درجة حرارة الماء في أسفل الخزان الحراري ذي المبادل الداخلي الأنبوبي.

ΔT_{P2} : الفرق الأعظمي لدرجات الحرارة الذي يسمح بعمل المضخة واختارنا له القيمة (7°C) في بحثنا.

أما شروط توقف المضخة عن العمل فهي:

$$T_{24} - T_7 \leq \Delta T_{P1} \quad (5)$$

$$T_{24} - T_{18} \leq \Delta T_{P1} \quad (6)$$

ΔT_{P1} : الفرق الأصغري لدرجات الحرارة الذي يسمح بتوقف المضخة عن العمل، واختارنا له القيمة (4°C)

في بحثنا.

بينما شروط فتح وإغلاق الصمامات المركبة على مداخل المبادل الحراري الخارجي من نوع القميص هي:

$$T_8 > T_3 \Rightarrow V_1 \text{ (ON) AND } V_2, V_3 \text{ (OFF)} \quad (7)$$

$$T_3 > T_8 \geq T_4 \Rightarrow V_2 \text{ (ON) AND } V_1, V_3 \text{ (OFF)} \quad (8)$$

$$T_8 < T_4 \Rightarrow V_3 \text{ (ON) AND } V_2, V_1 \text{ (OFF)} \quad (9)$$

V_1 : الصمام العلوي لمدخل مائع الدارة الرئيسية إلى المبادل الخارجي المحيط بالخزان الأول.

V_2 : الصمام الوسطي لمدخل مائع الدارة الرئيسية إلى المبادل الخارجي المحيط بالخزان الأول.

V_3 : الصمام السفلي لمدخل مائع الدارة الرئيسية إلى المبادل الخارجي المحيط بالخزان الأول.

T_8 : درجة حرارة المائع عند مدخل المبادل الخارجي للخزان الأول.

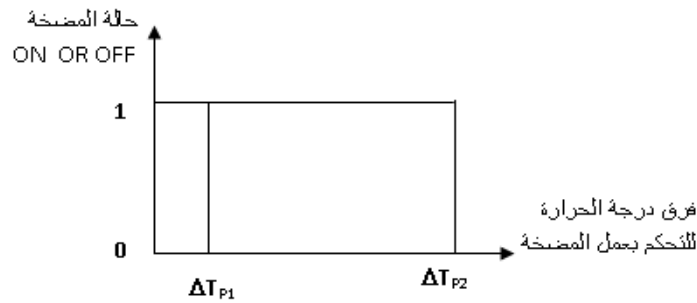
T_3 : درجة حرارة الماء ضمن الخزان الأول عند مستوى مدخل الصمام الأول V_1 .

T_4 : درجة حرارة الماء ضمن الخزان الأول عند مستوى مدخل الصمام الثاني V_2 .

يتألف معالج المعطيات من مجموعة من المداخل (25 مدخل)، تتلقى إشارات دخل من الحساسات الموزعة في مختلف نقاط الدارة، التي أشرنا إليها سابقاً، عبر جيكات كما في الشكل (9). يقوم معالج المعطيات بعد تلقي الإشارات بمعالجة هذه المعطيات عن طريق برنامج مكتوب بلغة (C⁺). يقوم معالج المعطيات بعدها من جهة بالتحكم بتشغيل الصمامات الكهربائية ومضخة الدارة الرئيسية عن طريق مخارج يتم توصيلها إلى هذه الأجزاء، ومن جهة أخرى بالتخزين الذاتي للمعطيات (درجات الحرارة في مواقع توزع الحساسات، حالة الصمامات الكهربائية من حيث الفتح أو الإغلاق، حالة مضخة الدارة الرئيسية من حيث الفتح أو الإغلاق). يتم ربط معالج المعطيات بجهاز الحاسب، بحيث يمكن من تحميل المعطيات المخزنة فيه لاحقاً على الحاسب، كما يمكن إظهارها بشكل مباشر على الحاسب وذلك عن طريق برنامج مكتوب بلغة (Chart).



الشكل (9) واجهات مختلفة لمعالج المعطيات (Data Logger) المُصمم.



الشكل (10) مبدأ التحكم بعمل مضخة التدوير للدارة الرئيسية.

2.3. إجراء التجارب:

أُجريت اختبارات متعددة على نظام سخان الماء الشمسي بعد تركيب مختلف تجهيزاته (التجهيزات الميكانيكية متضمنة الخزانات الحرارية المصممة، التجهيزات الالكترونية، معالج المعطيات المصمم) وذلك بغية التأكد من دقة القياسات المراد الحصول عليها من النظام.

تضمنت المرحلة اللاحقة، دراسة توصيفيه للتجارب المختلفة المراد إجراؤها على النظام عند استخدام الخزان الحراري ذي المبادل الخارجي من نوع القميص، وعند استخدام الخزان الحراري ذي المبادل الأنبوبي الداخلي وذلك في ظروف عمل مختلفة. كانت شروط التجارب متماثلة على كل من الخزائين بهدف المقارنة بينهما، ولكن بعض التجارب كانت خاصة بالخزان ذي المبادل الخارجي. أُجريت المجموعات من التجارب نفسها خلال فترتين زمنيتين مختلفتين. الأولى: تمثلت بفترة كان يسود فيها الطقس المشمس، أما الثانية: فتمثلت بفترة كان يسود فيها الطقس الغائم جزئياً. والغاية من ذلك هو التوصل إلى معرفة أي من الخزائين هو الأفضل من ناحية التدرج الحراري في كل من الحالتين الطقس المشمس والطقس الغائم جزئياً.

استخدمت عدة معايير لتقييم تدرج درجات الحرارة في الخزانات الحرارية في مختلف التجارب التي أُجريت،

وهي:

أ- الفرق في درجات الحرارة بين أعلى الخزائين الحراريين وأسفلهما أي $(T_1 - T_7)$ للخزان الأول ذي المبادل الخارجي من نوع القميص و $(T_{12} - T_{18})$ للخزان الثاني ذي المبادل الأنبوبي الداخلي، حيث يكون التدرج الحراري أفضل بقدر ما يكون هذا الفرق أكبر.

ب-درجة حرارة الماء الداخل إلى المجمع الحراري الشمسي (T_{23})، حيث يكون التدرج الحراري أفضل بقدر ما يكون الماء الداخل إلى المجمع الحراري الشمسي أبرد.

ت-المردود الحراري للمجمع الشمسي (η_c) المعطى بالعلاقة (10)، حيث إن تحسين التدرج الحراري ضمن الخزان الحراري يحسّن مردود المجمع والذي بدوره يحسّن مردود النظام بأكمله كما ذكرنا سابقاً.

$$\eta_c = \frac{Q_u}{A_c \cdot H_t} \quad (10)$$

حيث:

Q_u : الاستطاعة المفيدة المقدمة من اللاقط الشمسي [W].

H_t : شدة الإشعاع الشمسي الساقط الإجمالي على المجمع الحراري الشمسي كل ساعة [W/m^2].

A_c : مساحة المجمع الشمسي [m^2].

النتائج والمناقشة:

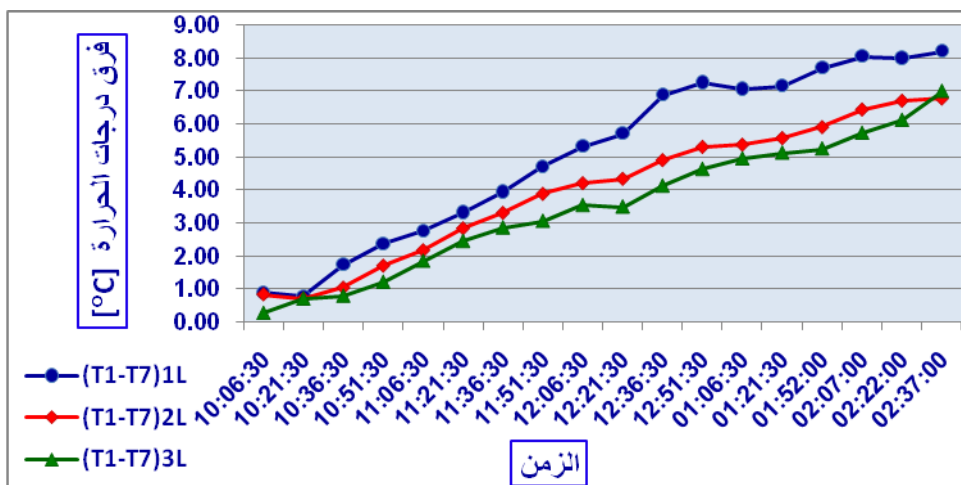
أجريت تجارب متعددة على نظام تسخين الماء الشمسي، مع كل من الخزائين المصممين، شملت مختلف ظروف العمل لهذا النظام، وذلك في ظروف طقس مشمس وأخرى في ظروف طقس غائم جزئياً، والتي يمكن إظهار نتائج بعضها كما يأتي:

1. تجارب الطقس المشمس:

1.1 تجارب التسخين الشمسي بدون سحب وبدون تسخين كهربائي:

A. تجارب اختيار التدفق الأمثل للدائرة الرئيسية:

تم إجراء ثلاث تجارب في حال تسخين شمسي للخزان الأول، بتدفقات مختلفة لمائع الدارة الرئيسية هي (1 L/min)، (2 L/min)، (3 L/min). وكانت الغاية من هذه التجارب هي تحديد التدفق الأمثل في هذه الدارة. يظهر الشكل (11) تغيّر الفرق في درجات الحرارة بين أعلى وأسفل الخزان بدلالة الزمن لهذه التجارب الثلاثة.



الشكل(11) مقارنة تغيرات الفرق في درجتي الحرارة لأعلى وأسفل الخزان الأول بدلالة الزمن من أجل ثلاث تدفقات مختلفة لمائع الدارة الرئيسية.

يبين الشكل (11) أن تغيّر الفرق في درجات الحرارة بين أعلى الخزان وأسفله مع الزمن؛ والموافق للتجربة التي استخدم فيها تدفق لمائع الدارة الرئيسية وقدره (1 L/min)؛ هو الأعلى، وبالتالي نعدّ أن هذا التدفق هو الذي يحقق التدرج الحراري الأفضل، وهذا يتفق مع الدراسات المرجعية [2, 12] لذلك اعتمد هذا التدفق في التجارب اللاحقة كلها.

B. تجربة التسخين الشمسي للخزانين:

بعد تحديد التدفق الأمثل (1 L/min)، تم إجراء هذا النوع من التجارب على السخان الشمسي مع الخزانين الحراريين معاً بهدف المقارنة بينهما. يظهر الشكل (12) تغيّر الفرق في درجات الحرارة بين أعلى وأسفل هذين الخزانين مع الزمن.

يبين الشكل (12) أن الفرق بين درجات الحرارة في أعلى الخزان الثاني ذي المبادل الأنبوبي الداخلي وأسفله، أكبر منه في حالة الخزان الأول ذي المبادل الخارجي، وبالتالي يكون التدرج الحراري في الخزان الثاني أفضل منه في الخزان الأول.



الشكل(12) تغيرات الفرق بين درجات الحرارة لأعلى وأسفل الخزانين بدلالة الزمن في حال تسخين شمسي فقط.

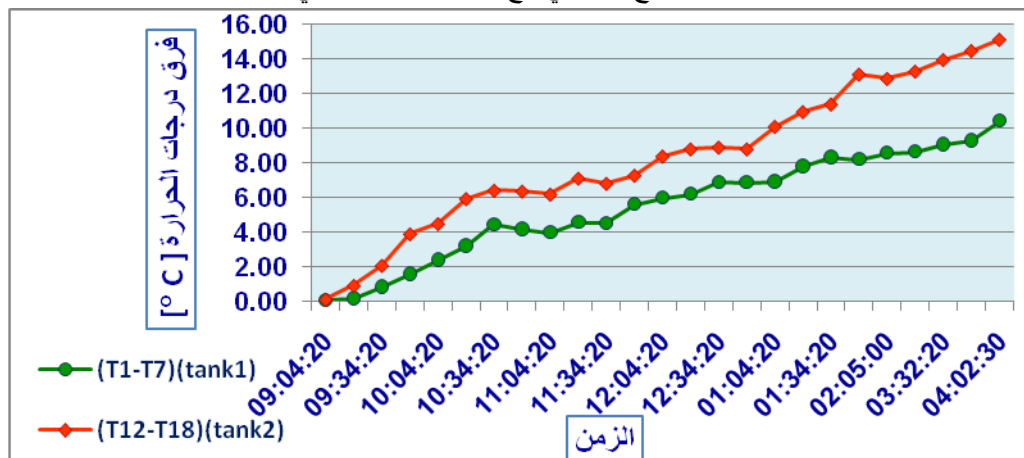
1. 2. تجارب التسخين الشمسي مع سحب للماء الساخن وبدون تسخين كهربائي:

تمّ اختبار السخان الشمسي باستخدام دارة كل من الخزانين في يومين متتاليين، حيث تمّ سحب كمية من الماء الساخن من كل خزان وقدرها 90 ليترًا، التي يظهر الجدول (1) مخطط استهلاكها خلال زمن التجربة.

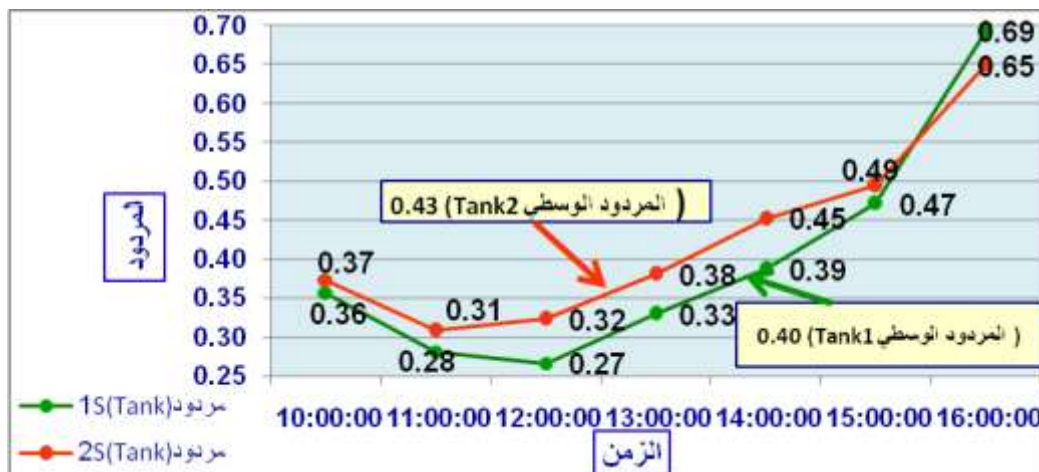
الجدول (1) معدلات استهلاك الماء الساخن.

(جدول سحب 90 ليتر)				
رقم السحب	تدفق السحب (L/min) (\dot{m})	مدة السحب (min)	الكمية (L)	وقت السحب (h)
1	3	4	12	10:30
2	3	8	24	11:00
3	3	7	21	11:30
4	3	3	9	12:00
5	3	2	6	13:30
6	3	4	12	15:00
7	3	2	6	16:00

يظهر الشكل (13) مقارنة تغيّر الفرق في درجات الحرارة بين أعلى الخزائين وأسفلهما بدلالة الزمن، أما الشكل (14) فيظهر المقارنة بين تغيرات مردود المجمع الشمسي مع الزمن لكل من دارتي الخزائين.



الشكل (13) مقارنة تغيرات الفرق بين درجتي حرارة أعلى وأدنى كل من الخزائين بدلالة الزمن في حال تسخين شمسي مع سحب وبدون تسخين كهربائي (طقس مشمس).



الشكل (14) مقارنة تغير مردود المجمع الشمسي لدارة الخزان الأول والثاني بدلالة الزمن في حال تسخين شمسي مع سحب 90 ليتر وبدون تسخين كهربائي (طقس مشمس).

يبين الشكل (13)، أن الفرق بين درجات حرارة أعلى الخزان الثاني ذي المبادل الأنبوبي الداخلي وأسفله؛ أكبر منه في الخزان الأول ذي المبادل الخارجي، وبالتالي يكون التدرج الحراري في الخزان الثاني أفضل منه في الخزان الأول. كذلك يظهر الشكل (14)، أن التدرج الحراري في الخزان الثاني أفضل منه في الخزان الأول؛ لأن مردود اللاقط الشمسي عند تشغيل دارة الخزان الثاني ذي المبادل الداخلي هو الأفضل في معظم ساعات النهار وكذلك المرود الوسطي.

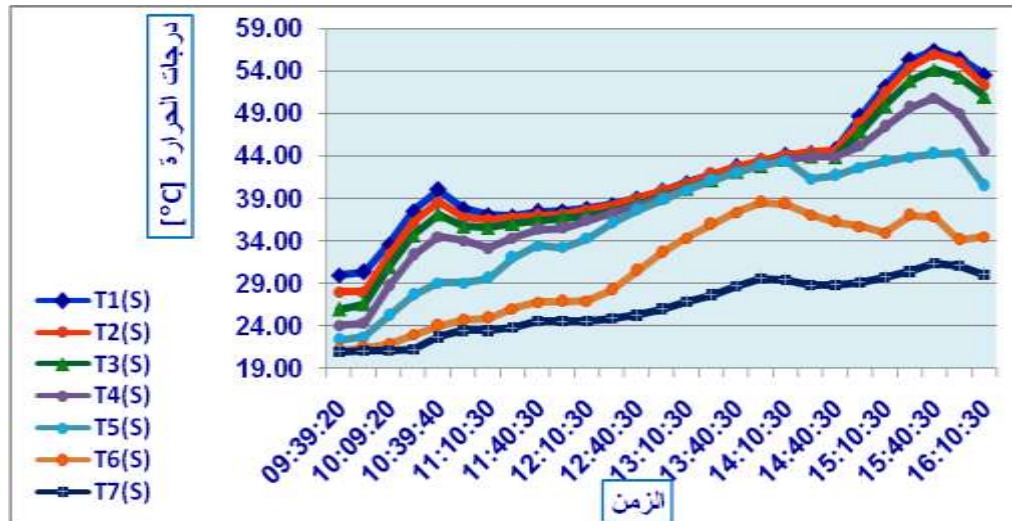
3.1 تجربة التسخين الشمسي مع سحب 180 ليترًا، ومع تسخين كهربائي لدارة الخزان الأول:

أجري هذا النوع من التجارب على السخان الشمسي باستخدام دارة الخزان الأول ذي المبادل الخارجي، حيث تم وضع مسخن كهربائي فيه استطاعته [1000 W]. كانت الغاية اختبار التدرج الحراري عندما يعمل السخان في ظروف

التسخين الشمسي والكهربائي مع سحب للماء الساخن بمقدار 180 ليترًا، والذي يظهر الجدول (2) مخطط استهلاكه خلال زمن التجربة. يظهر الشكل (15) تغيرات درجات الحرارة عند مستويات مختلفة ضمن الخزان مع الزمن.

الجدول (2) معدلات استهلاك الماء الساخن.

(جدول سحب 180 ليترًا)				
رقم السحب	تدفق السحب (l/min) (m)	مدة السحب (min)	الكمية (L)	وقت السحب (h)
1	3	15	45	10:30
2	3	15	45	11:30
3	3	15	45	14:00
4	3	15	45	15:45



الشكل (15) تغيرات درجات الحرارة على مستويات مختلفة ضمن الخزان ذي المبادل الخارجي في ظروف تسخين شمسي وكهربائي مع سحب للماء الساخن بمقدار 180 ليتر (طقس مشمس).

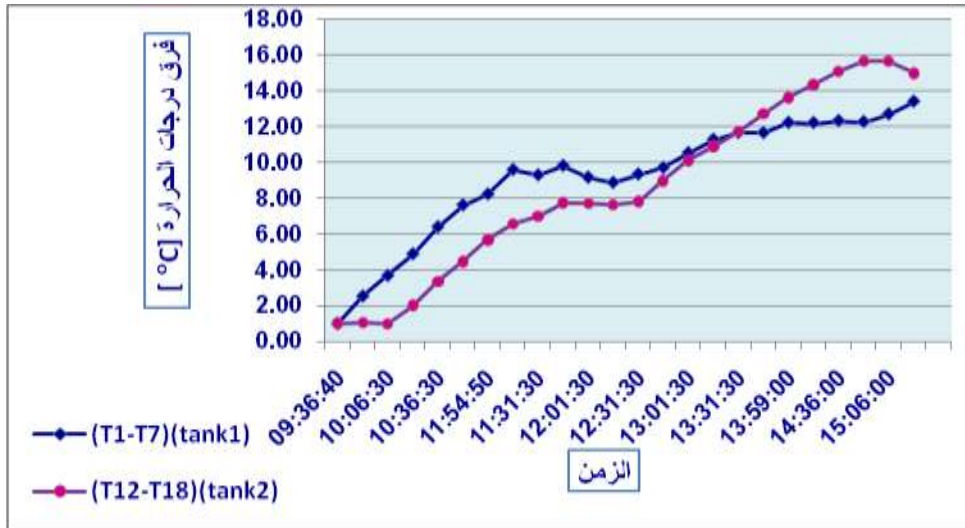
نلاحظ من الشكل (15)، أن ارتفاع درجات الحرارة الموافقة للمستويات التي تم وضع المسخن الكهربائي فيها (من T_1 إلى T_4)؛ وخلال زمن قدره ساعة واحدة من بدء التجربة، وخلال ساعة واحدة قبل نهاية التجربة (زمن تشغيل هذا المسخن)؛ يكون خطياً، بينما تبقى درجات حرارة الماء عند المستويات الدنيا؛ التي لا يصل إليها المسخن الكهربائي؛ منخفضة ومفصولة عن المستويات العليا. كما يمكن القول بأنه على الرغم من سحب كمية كبيرة من الماء الساخن من هذا الخزان خلال زمن التجربة؛ فإنه يوجد تدرج حراري واضح من أعلى الخزان إلى أسفله.

2.4 تجارب الطقس الغائم جزئياً:

2.1 تجارب التسخين الشمسي مع سحب 90 ليترًا، وبدون تسخين كهربائي:

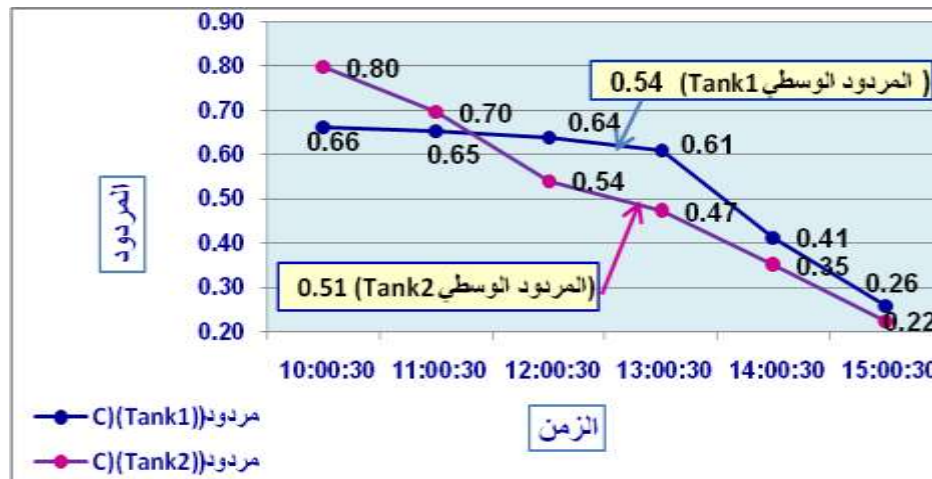
كما هو الحال بالنسبة للتجارب المنجزة خلال الطقس المشمس، فقد أجري هذا النوع من التجارب في حالة الطقس الغائم جزئياً. تم استخدام دارة كل من الخزائين في يومين متتاليين، حيث تم سحب كمية من الماء الساخن من كل خزان وقدرها 90 ليترًا، والتي يظهر الجدول (1) مخطط استهلاكها خلال زمن التجربة.

يمكن مقارنة التدرج الحراري في كل من الخزائين لهذا النوع من التجارب في ظروف الطقس الغائم جزئياً من خلال الشكل (16) الذي يظهر تغيرات فرق درجات حرارة الماء بالنسبة للزمن بين أعلى الخزائين وأسفلهما، ومن خلال الشكل (17) الذي يظهر المقارنة بين تغيرات مردود المجمع الشمسي مع الزمن لكل من دارتي الخزائين.



الشكل (16) مقارنة تغيرات الفرق بين درجتي حرارة أعلى وأسفل كل من الخزائين بدلالة الزمن في حال تسخين شمسي مع سحب 90 ليتر وبدون تسخين كهربائي (طقس غائم جزئياً).

يظهر من الشكل (16) أن: الفرق بين درجات الحرارة في أعلى الخزان الأول ذي المبادل الخارجي وأسفله أكبر منه في الخزان الثاني ذي المبادل الأنبوبي الداخلي خلال معظم زمن التجربة، وبالتالي التدرج الحراري في الخزان الأول أفضل منه في الخزان الثاني.

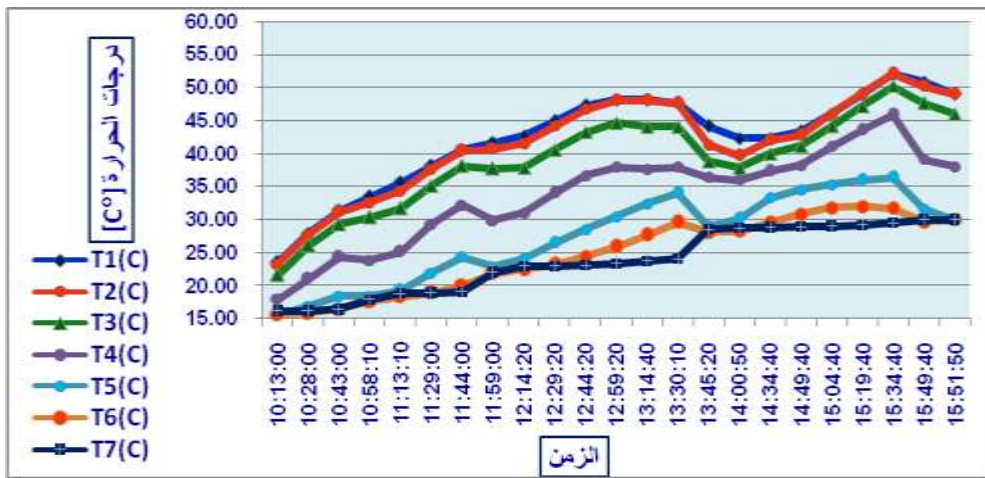


الشكل (17) مقارنة تغير مردود المجمع الشمسي لدارة الخزان الأول والثاني بدلالة الزمن في حال تسخين شمسي مع سحب 90 ليتر وبدون تسخين كهربائي (طقس غائم جزئياً).

كذلك يظهر الشكل (17) أن: التدرج الحراري في الخزان الأول ذي المبادل الخارجي أفضل منه في الخزان الثاني ذي المبادل الأنبوبي الداخلي، لأن مردود اللاقط الشمسي عند تشغيل دارة الخزان الأول هو الأفضل في أثناء معظم ساعات النهار، وكذلك الأمر بالنسبة للمردود الوسطي.

2.2. تجربة التسخين الشمسي مع سحب 180 ليترًا، ومع تسخين كهربائي لدارة الخزان الأول:

كما هو الحال في ظروف الطقس المشمس، فقد تم إجراء التجربة على السخان الشمسي باستخدام دارة الخزان الأول ذي المبادل الخارجي؛ في حال الطقس الغائم جزئياً مع سحب الكمية نفسها من الماء الساخن (180 ليترًا)، و يظهر الجدول (2) مخطط استهلاكه في أثناء التجربة. يظهر الشكل (18)، تغيرات درجات الحرارة على مستويات مختلفة ضمن هذا الخزان مع الزمن في ظروف هذه التجربة.



الشكل (18) تغيرات درجات الحرارة على مستويات مختلفة ضمن الخزان ذي المبادل الخارجي، في ظروف تسخين شمسي، وكهربائي مع سحب للماء الساخن بمقدار 180 ليترًا (طقس غائم جزئياً).

نلاحظ من الشكل (18)، أن هناك تدرجاً واضحاً لدرجات حرارة الماء ضمن الخزان، بدءاً من أعلى مستوى؛ والموافق لدرجة الحرارة (T₁)؛ إلى أخفض مستوى؛ والموافق لدرجة الحرارة (T₇)؛ وذلك على الرغم من ظروف السحب الحاصل في الخزان في أوقات مختلفة من زمن إجراء التجربة والذي يمكن أن يؤدي إلى حدوث خلط، وبالتالي التقليل من التدرج الحراري.

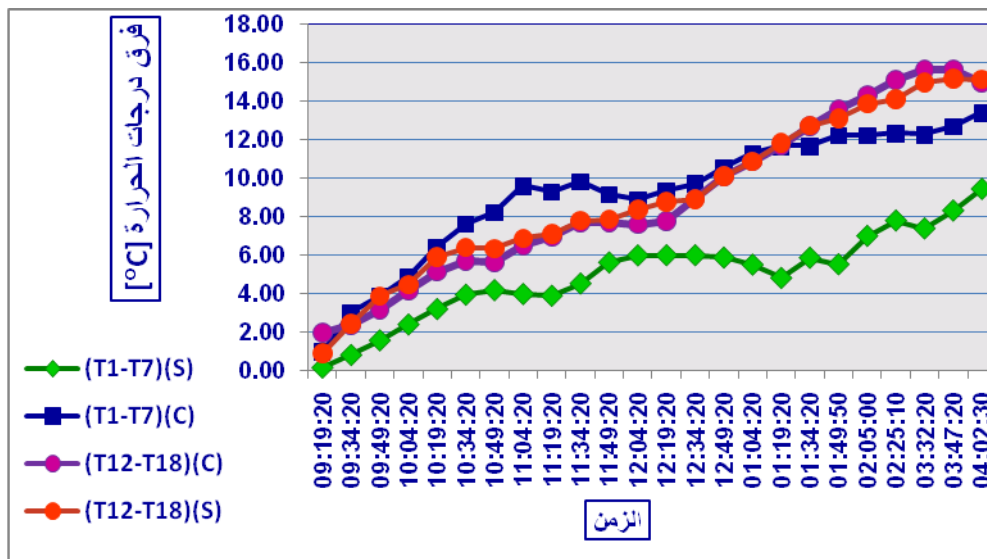
3. المقارنة بين تجارب الطقس المشمس والطقس الغائم جزئياً:

تمت المقارنة بين نتائج النوع نفسه من التجارب في الطقس المشمس والغائم؛ باستخدام دارتي الخزان ذي المبادل الخارجي، والخزان ذي المبادل الداخلي الأنبوبي؛ للتوصل إلى تقييم أفضلية التدرج الحراري؛ في أثناء حالتين من الطقس؛ بين الخزائين الحراريين المصممين. سنستعرض نتائج إحدى هذه المقارنات كما يلي:

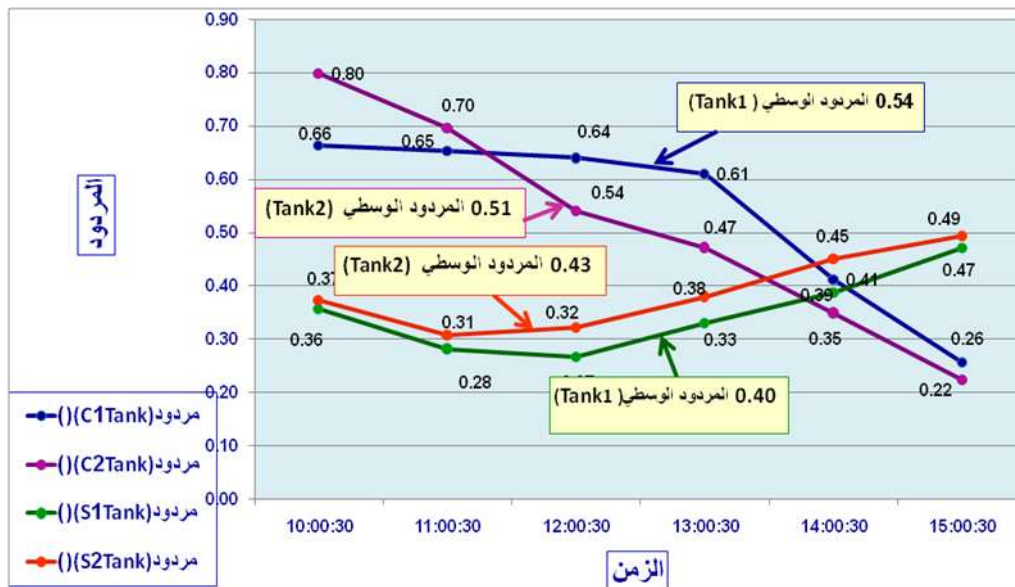
3.1. مقارنة نتائج تجارب التسخين الشمسي مع سحب 90 ليترًا، وبدون تسخين كهربائي في الطقس المشمس والطقس الغائم جزئياً:

يظهر الشكل (19)، مقارنة تغير في درجات الحرارة بين أعلى الخزائين الحراريين وأسفلهما (ذي المبادل الخارجي وذي المبادل الداخلي الأنبوبي) في كل من الطقس المشمس والطقس الغائم جزئياً. كما يظهر الشكل (20)،

مقارنة تغير مردود المجمع الشمسي مع الزمن لكل من دارتي الخزانين في ظروف الطقس المشمس والطقس الغائم جزئياً.



الشكل (19) مقارنة تغيرات الفرق بين درجتي حرارة أعلى وأسفل كل من الخزانين بدلالة الزمن، في حال تسخين شمسي مع سحب 90 ليترًا، وبدون تسخين كهربائي (طقس مشمس وطقس غائم جزئياً).



الشكل (20) مقارنة تغير مردود المجمع الشمسي لدارة الخزان الأول والثاني بدلالة الزمن في حال تسخين شمسي، مع سحب 90 ليترًا وبدون تسخين كهربائي (طقس مشمس وطقس غائم جزئياً).

يبين الشكل (19) أن: الفرق في درجات الحرارة، بين أعلى الخزان الحراري ذي المبادل الحراري الخارجي من نوع القميص وأسفله، هو الأكبر في حال الطقس الغائم جزئياً خلال معظم زمن التجربة، يأتي بعده الخزان الحراري ذي المبادل الحراري الداخلي الأنيوبي، في الطقس الغائم جزئياً، ومن ثم يأتي الخزان الحراري ذي المبادل الحراري الداخلي الأنيوبي في الطقس المشمس، وأخيراً يأتي الخزان ذي المبادل الخارجي في الطقس المشمس. هذا يقودنا إلى نتيجة مهمة هي أن الخزان الأول ذا المبادل الحراري الخارجي؛ من نوع القميص، الذي ثبتت فعاليته من ناحية تحقيق التدرج

الحراري الجيد في البلدان ذات المناخ البارد بسبب تصميمه المتميز، هو الأفضل في حالة مناخنا من ناحية تحقيقه للتدرج الحراري في حالة الطقس الغائم جزئياً. بينما الخزان ذي المبادل الحراري الداخلي الأنبوبي هو الأفضل في تحقيق التدرج الحراري في ظروف الطقس المشمس.

أما الشكل (20) فهو يظهر النتائج نفسها المستخلصة من الشكل (19) من ناحية التدرج الحراري الأفضل لكل من الخزائين في ظروف الطقس المشمس والغائم.

الاستنتاجات والتوصيات:

- قادت نتائج هذا البحث إلى التوصل إلى مجموعة من الاستنتاجات المهمة التي يمكن إجمالها كما يلي:
- 1) التدفق الأفضل في الدارة الرئيسية (دارة المجمع الشمسي والمبادلات) هو (1 L/min)، لأنه حقق التدرج الحراري الأفضل ضمن الخزان الحراري، وهذا يتفق مع عدد من الدراسات المرجعية.
 - 2) التدرج الحراري ضمن الخزان الأول ذي المبادل الخارجي من نوع القميص أفضل منه في الخزان الثاني ذي المبادل الأنبوبي الداخلي، وذلك في ظروف الطقس الغائم جزئياً.
 - 3) التدرج الحراري ضمن الخزان الثاني ذي المبادل الأنبوبي النحاسي الداخلي هو أفضل منه في الخزان ذي المبادل الخارجي من نوع القميص، وذلك في ظروف الطقس المشمس.
- أما التوصيات التي يمكن أن ينصح بها في الأعمال القادمة التي يمكن أن تكون متممة لهذا العمل، فيمكن إجمالها بما يلي:

- a) القيام بتجارب على تقنيات أخرى تحقق التدرج الحراري الجيد ضمن الخزانات الحرارية للسخانات الشمسية.
- b) إجراء نمذجة للنظام بأكمله، بحيث يسمح ذلك بتغيير بعض المتغيرات (متغيرات تصميم أبعاد الخزان، متغيرات تصميم المجمع الشمسي، المعطيات المناخية،... الخ) ودراسة تأثير ذلك على أداء هذه النظام.

المراجع:

- [1]. DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W.A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd. Ed., John Wiley & Sons, Inc New York, 1991, 919.
- [2]. KENJO, L. *Étude de Comportement Thermique d'un Chauffe-eau Solaire à Faible Débit*. These Doctorat, Université de Nice-Sophia Antipolis, 2003, 227.
- [3]. FURBO, S.; ANDERSON, E.; THUR, A.; SHAH, L. J., ANDERSON, K. D. *Performance improvement by discharge from different levels in solar storage tanks*. *Solar Energy*, Vol. 79, 2005, 431-439.
- [4]. ADAMS, D. E.; DAVIDSON, J. H. *Tank Stratification With A Flexible Manifold*. *Solar Energy Applications Laboratory Colorado Stat University*, April 1993, 22-28.
- [5]. ANDERSON, E.; FURBO, S. . *Multilayer fabric stratification pipes for solar tanks*. *Solar Energy*, Vol. 81, 2007, 1219-1226.
- [6]. KENJO, L.; INARD, Ch. , CACCAVELLI, D. " *Experimental and numerical study of thermal stratification in a mantle tank of a solar domestic hot water system* " *Applied Thermal Engineering* , Vol. 27, 2007, 1986-1995.
- [7]. KNUDSEN, S.; FURBO, S. *Thermal stratification in vertical mantle heat – exchanger with application to solar domestic hot – water systems*. *Applied Energy*, Vol. 78, Issue 9, July 2004, 257 - 272.

- [8]. SHTRAKOV, S.; STOILOV, A.; MANOLEV, D." *Solar hot water installation with stratified accumulation*". *South-West University „Neofit Rilski”*, Dept of Physics, Blagoevgrad, Bulgaria, 2002.
- [9]. JORDAN, U.; FURBO, S. *Thermal stratification in small solar domestic storage tanks caused by draw-offs*. *Solar Energy*, Vol. 78, N^o, 2005, 291-300.
- [10]. SHAH, L. J.; FURBO, S. *Entrance effects in solar storage tanks*. *Solar Energy*, Vol. 75, 2003, 337-348.
- [11]. ZACHAR, A.; FARKAS, I.; SZLIVKA, F. *Numerical analyses of the impact of plates for thermal stratification inside a storage tank with upper and lower inlet flows*. *Solar Energy*, Vol. 74, 2003, 287-302.
- [12]. BLANDIN, D. , *Thermal Stratification Solar Storage Tanks*, Renewable Energy CSTB– ESE –DE, Route des Lucioles – BP 209.
- [13]. LAVAN, Z.; THOMPSON, J. *Experimental Study of Thermally Stratified Hot Water Storage Tanks*, *Solar Energy*, Vol. 19, 1977, 519-524.
- [14]. SHAH, L. J.; ANDERSEN, E.; FURBO, S. *Theoretical And Experimental Investigations of Inlet Stratifiers for Solar Storage Tanks*. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, Issue 14-15, 2005, 2086 – 2099.
- [15]. ALTUNTOP, S.; ARSLAN, M.; OZCEYHAN, V.; KANOGLU, M. *Effect of obstacles on thermal stratification in hot water storage tank*. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 25, 2005, 2285-2298.
- [16]. MATHE, D. W.; HOLLANDS, K.G.T.; WRIGHT, J.L. *Single-and multi-tank energy storage for solar heating systems: Fundamental*. *Solar Energy*, Vol. 73, 2002, 3-13.
- [17]. MADHLOPA, A.; MGAWI, R.; TAULO, J. *Experimental study of temperature stratification in an integrated collector – storage solar water heater with two horizontal tanks*. *Solar Energy*, Vol. 80, 2006, 989-1002.
- [18]. EAMES, P. C.; NORTON, B. *The effect of tank geometry on thermally stratified sensible heat storage subject to low Reynolds number flows*. *Heat Mass transfer*, Vol. 41, 1998, 2131-2142.