

تقييم التبريد الهوائي للمجمعات الشمسية لحل مشكلة الركود تجريبياً

الدكتورة: أمينة فارس¹

كلية: الهمك جامعة: دمشق

الملخص:

بسبب الطلب المتزايد على الطاقة واستخدام الوقود الأحفوري وصلت نسبة تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون إلى أعلى مستوياتها، مما أسفر عن تغير مناخي حاد ألقى بظلاله السلبية على العديد من المناطق حول العالم. تستخدم أنظمة الطاقة الشمسية لتأمين التدفئة والتكييف والمياه الساخنة وتطبيقات أخرى ويمكن أن تصل مجمعات الطاقة الشمسية لدرجات حرارة عالية عند توقف مضخة النظام عن العمل وعدم جريان الوسيط الناقل للحرارة مع استمرار ورود الإشعاع الشمسي وهذا ما يعرف بظاهرة الركود تؤدي لحدوث أعطال داخل دارة المجمع لذلك بدأت عملية البحث في سبل خفض درجات الحرارة وإزالة الحرارة الزائدة. تم في هذا البحث إيجاد حل تجريبي لمعالجة الركود في مجمع شمسي مسطح بحيث يتم خفض درجات الحرارة لتحت درجة حرارة الركود عن طريق تركيب قنوات للتبريد أسفل السطح الماص توصل هذه القنوات مع مروحة تبريد لدخول هواء التبريد وإزالة الحرارة. تم إجراء عدة تجارب مختلفة خلال أيام من شهر تشرين الثاني وثبت في هذه التجارب أن المبادل الحراري المتعاكس هو الأفضل حيث أن الزمن اللازم للتبريد بحدود 4:50 min وهو أقل تكلفة اقتصادية، بينما الزمن اللازم للتبريد في حالة المبادل الحراري الموازي بحدود 7min أما في حالة المبادل المتعاكس مع خفض غزارة المروحة فإنه يحتاج زمن أطول مقارنةً بالحالات السابقة يصل إلى 15min.

كلمات مفتاحية: المجمعات الشمسية-نظام تسخين شمسي-ركود المجمعات-التبريد.

¹ أستاذ مساعد في قسم الميكانيك العام - كلية الهمك - جامعة دمشق

EXPERIMENTAL EVALUATION OF AIR COOLING FOR SOLAR COLLECTORS TO SOLVE THE STAGNATION PROBLEM

Amina Fares¹

Abstract:

Due to the increasing demand for energy and the use of fossil fuels, the concentration of carbon dioxide has reached its highest levels, resulting in severe climate change that has cast negative shadows on many regions around the world. Solar energy systems are used to provide heating, air conditioning, hot water and other applications. Solar collectors can reach high temperatures when a system pump stops working and the heat carrier does not flow with the continued arrival of solar radiation. The process of searching for ways to reduce temperatures and remove excess heat. In this paper, an experimental solution was found to treat stagnation in a flat solar collector so that the temperatures are lowered to below the stagnation temperature by installing cooling channels under the absorbing surface. These channels connect with a cooling fan to enter the cooling air and remove heat. Several different experiments were conducted during the days of November, and it was proved in these experiments that the opposite heat exchanger is the best, as the time required for cooling is about 4:50 min, which is the least economical cost, while the time required for cooling in the case of the parallel heat exchanger is about 7 min. The inverted exchanger, while reducing the fan intensity, needs a longer time compared to the previous cases, up to 15min.

Key words: solar collectors, solar heating system, stagnation of collectors, cooling.

¹ Ass. Prof. General Mechanics , Damascus University

1. مقدمة

تمثل الطاقة شريان الحياة لاقتصاديات الدول في جميع أنحاء العالم، ويزداد الطلب عليها كل يوم نظراً لتزايد النشاط الصناعي والاقتصادي والنمو السكاني. يعد الوقود الأحفوري من بترول ومشتقاته وفحم وغاز طبيعي، المصدر الأساسي للطاقة، ونتيجة للاعتماد المكثف عليه في مختلف الصناعات، برز الاختلال في مكونات الغلاف الجوي حيث وصلت نسبة تركيز غاز ثاني أكسيد الكربون إلى أعلى مستوياتها، مما أسفر عن تغير مناخي حاد ألقى بظلاله السلبية على العديد من المناطق حول العالم مثل موجات الحرارة العالية وحرائق الغابات والعواصف والفيضانات التي خلفت كما كبيراً من الدمار. برز استخدام المجمعات الشمسية للتدفئة وتسخين المياه وتطبيقات أخرى للطاقة الشمسية، وأخذ مكانه، ولكن في جميع الأنظمة الشمسية هناك إمكانية أن تصل درجات حرارة المجمعات الشمسية إلى قيم عالية خصوصاً عند حالات انقطاع التيار الكهربائي أو في الحالات التي تكون عندها الحاجة إلى الطاقة أقل ما يمكن أو عندما ينعدم الاستهلاك الحراري كما في فصل الصيف.

تتعرض المجمعات لفترات ركود عندما تتوقف مضخة المجمع عن العمل والسبب في ذلك أن الخزان يكون قد شحن بشكل تام. وهذا يحدث في الأنظمة المركبة أكثر مما يحدث في أنظمة تسخين الماء المنزلي بالطاقة الشمسية فقط [1]. يبقى الضغط في حالة الركود في دارة المجمع تحت ضغط 3 bar في العديد من الأنظمة و يتبخّر الوسيط الناقل للحرارة ويتحرك باتجاه خزان التمدد. يحدث الركود في المجمعات لعدة أسباب منها:

- تم تأمين الحرارة المطلوبة من الدارة بشكل كافٍ.
- انقطاع التيار الكهربائي مع استمرار وجود الأشعاع الشمسي.
- دارات بعض المجمعات أنابيبها مربوطة على التفرع لا تعمل بسبب الهواء العائق.
- متابعة حالات الصيانة وإصلاح النظام بشكل دوري.

- تجمد المياه داخل الأنابيب في المناطق الباردة وتوقف السائل عن الدوران في الدارة الشمسية.
 - عدم تصريف الحمل الحراري المطلوب في أيام العطل والاجازات الصيفية.
- تحت هذه الظروف فإن المجمعات الشمسية (ومنها المسطحة) قد تصل إلى درجات حرارة تزيد عن 170°C ، وإذا تعرضت المجمعات إلى هذه الحرارة العالية فإنه من المحتمل أن ينقص السائل الناقل للحرارة بسرعة و تزداد وبشكل كبير الضغوط في دارة نقل حرارة المجمع الشمسي مما دفع الباحثين للبحث في سبل لخفض درجات الحرارة العالية داخل المجمع للمحافظة على كفاءة أداء المجمع.
- قام Pedro وآخرون (2013) [4] في إسبانيا بدراسة تحليلية عن ارتفاع درجة الحرارة ومشكلة الركود على المجمعات الشمسية الحرارية مخبرياً وأثبتت صحة هذه البيانات تجريبياً على نظام شمسي مصمم لتسخين المياه في مستشفى تقع جنوب إسبانيا. وتبين مخبرياً أن درجة حرارة السائل الناقل للحرارة أثناء الركود في شهر نيسان يمكن أن تصل إلى ما بعد 180°C .
- عند توقف المضخة عن العمل، تزداد درجة حرارة الماء في الجزء العلوي من المجمعات بحوالي (4°C - 6°C) في الدقيقة. لذلك في جميع الانظمة الشمسية يصل الجزء العلوي من المجمعات إلى 180°C في غضون 10-15 min وتظهر فقاعات البخار في المجمع. عندما تكون المضخة في وضع التشغيل، تكون درجة الحرارة في خزان الطاقة الشمسية 60°C ، ودرجة حرارة خط التغذية عند 64°C ودرجة حرارة خط الراجع عند 70°C .
- عندما تكون المضخة في وضع التوقف، يكون الإشعاع الشمسي الوارد على المجمع بحدود 970 W/m^2 ، وبعد 10 min يزداد الضغط ويبلغ متوسط درجة الحرارة في قمة المجمعات 110°C وعند مرور 30 min يصل الضغط 4.2 bar ودرجة الحرارة 144°C . خلال فترة الركود، تكون درجة الحرارة في الأنبوب بين المجمعات والخزان التي تحتوي على البخار هي 150°C ، يدفع البخار في المجمعات الماء خلال أنبوب الماء البارد، في نهاية حالة الركود يتحول تقريباً 85-90% من السائل الناقل للحرارة إلى بخار ويتبقى 10-15% من السائل.

قام (MARTINEZ - 2013) [5] بتقديم دراسة نظام تبريد ذاتي حراري كهربائي مصمم لتبديد الحرارة الزائدة من نظام تجميع شمسي ومنع ارتفاع درجة حرارة السائل الداخلي. التبريد الذاتي الكهروحراري Thermoelectric self-cooling (TSC) هو تطبيق حراري كهربائي جديد، ثبت أنه يعزز تبريد أي جهاز لتوليد الحرارة دون استهلاك الكهرباء. قدم هذا البحث تصميم ودراسة حسابية لنظام TSC، مشيرة إلى أن أهم البارامترات هي المقاومة الحرارية للمبادلات الحرارية، وأن تخفيضها يحسن بشكل كبير من أداء النظام الكهروحراري. يتفوق التصميم النهائي على المبددات الثابتة والديناميكية المستخدمة حالياً، مما يزيد من معامل انتقال الحرارة بأكثر من 50% ولا يتطلب أي كهرباء، مما يمثل بديلاً واعداً لمنع ارتفاع درجة حرارة المجمعات الشمسية.

يتكون نظام TSC المقترح من: مصدر الحرارة ومائع حراري، يعمل عند 90°C ، والذي يبرد حتى 78.3°C حيث تتم إزالة 2760 W من معدل تدفق الحرارة، عندما تصل درجة حرارة السوائل عند مخرج المجمعات إلى 90°C ، يضطر السائل إلى التدفق عبر القنوات، مما يؤدي إلى فرق في درجة الحرارة بين نهاية الوحدات الكهروحرارية، والتي توفر الطاقة الكهربائية للمراوح. وبالتالي يتم الحصول على الحمل الحراري القسري للمبددات، مما يعزز نقل الحرارة دون استهلاك إضافي للكهرباء. يزيد هذا التصميم لنظام التبريد الذاتي الكهروحراري من معامل انتقال الحرارة العام أكثر من 50% مقارنة بأجهزة تبديد الحرارة المستخدمة حالياً في أنظمة مجمعات الطاقة الشمسية والذي يصل إلى $9\text{W}/\text{m}^2.\text{k}$. تشير جميع هذه العوامل إلى أن استخدام أنظمة التبريد الذاتي الكهروحرارية يبرز كبديل واعد لمنع ارتفاع درجة حرارة المجمعات الشمسية.

قام Frank وآخرون (2015) [6] في وكالة الطاقة العالمية بدراسة الحد من ارتفاع درجات الحرارة ومعالجة الركود في تطبيقات الأنظمة الحرارية الشمسية وتم حساب درجة حرارة الركود لبعض أنواع المجمعات الشمسية باستخدام معادلة الكفاءة للمجمع. ويظهر من الدراسة أن المجمعات الشمسية من النوع المسطح والمزود بعازل شفاف تصل لنقطة الركود بشكل أسرع من غيرها وعند فرق درجات الحرارة أقل بين مائع التسخين والمحيط. وأن المجمعات الشمسية ذات الأنابيب المفرغة تصل لنقطة الركود عند درجات تسخين

مرتفعة بدون أن يحصل لها ضرر. وعليه فإن درجات الحرارة القصوى للمجمع الشمسي تعتمد بشكل كبير على تقنية المجمع الحراري الشمسي المستخدمة. حتى بالنسبة إلى المجمعات غير المركزة قد تصل درجات حرارة الركود إلى قيم حوالي 300°C . قام Kizildag وآخرون (2017) [7] من تونس بدراسة تطوير وتحسين واختبار أداء مجمع شمسي مسطح ذو كفاءة عالية مع العزل الشفاف والحماية من فرط التسخين. تناول البحث مجمعاً شمسياً ذو لوح مسطح مزود بمواد عازلة شفافة (TIM) ونظام حماية من فرط التسخين. يتم اختبار ثلاثة أنواع من التصميمات أولاً تحت ظروف المختبر، ثم بعد ذلك تركيب هذه المجمعات على سطح مبنى مستشفى. تم استخدام مواد العزل الشفاف (TIM) بين غطاءين شفافين أو بين السطح الماص والزجاج الخارجي، العيب الرئيسي هو ضعفها تحت ظروف الركود. وللتغلب على هذه المشكلة، تم اقتراح حلول مختلفة. منها نظام تبريد ذاتي حراري مصمم لتبديد الحرارة الزائدة، مما يعطي أداءً حرارياً جيداً.

2. هدف البحث

تقييم التبريد الهوائي للمجمعات الشمسية المسطحة تجريبياً للتغلب على مشكلة الركود في المجمعات الشمسية. حيث تم تركيب قنوات تبريد تكون على تلامس مباشر مع السطح الماص تعمل على تبريد السطح الماص عند ارتفاع درجة حرارته فوق درجة حرارة التشغيل وبالتالي خفض درجات الحرارة تحت درجة حرارة الركود، للمحافظة على المجمع الشمسي وتجهيزات النظام من الأعطال الناتجة من ارتفاع الضغط الشديد نتيجة ارتفاع درجات الحرارة مما يؤدي لانفجار الأنابيب أو التسرب أو نقص في كمية السائل الناقل للحرارة نتيجة التبخر أو التآكل.

3 - مواد وطرق البحث

3.1. تقدير درجة حرارة الركود

في الوقت الذي يسعى إليه المصنعون لزيادة الكفاءة الحرارية للمجمع عن طريق تقليل الفقد الحراري من المجمعات الشمسية فإن النتيجة المعاكسة هي زيادة درجة حرارة

الركود. تعتمد درجة حرارة الركود على تصميم وبناء المجمع الشمسي. فالمجمعات الشمسية المفرغة يكون فيها معامل الفقد الحراري منخفضاً وبالتالي تكون درجة حرارة الركود عالية، بينما للمجمعات الشمسية المصممة بمعامل فقد حراري عالي تكون درجة حرارة الركود لها منخفضة مثل أحواض السباحة غير المغطاة بالزجاج.

في حالات التشغيل الطبيعية. إن قيمة الطاقة الفعالة المستفاد منها بالنظام Q_{del} هي عبارة عن الفرق بين نسبة الطاقة الشمسية الممتصة في المجمع الشمسي Q_{abs} و نسبة

كمية الحرارة الضائعة عن طريق غلاف المجمع الشمسي Q_{loss}

$$Q_{del} = Q_{abs} - Q_{loss} \quad [W] \quad (1)$$

حيث Q_{abs} : تحدد من حاصل جداء مساحة المجمع الشمسي A_c بمعامل النفوذية الغطاء الزجاجي (τ) بمعامل امتصاص اللوح الماص (α) والاشعاع الشمسي (G).

$$Q_{abs} = A_c (\tau \alpha) G \quad [W] \quad (2)$$

Q_{loss} : تحدد الضياعات الحرارية من المجمع الشمسي بالحمل والاشعاع والانعكاس والتوصيل من حاصل جداء معامل فقد الحرارة (U_L) الكلي بالفرق بين درجة حرارة السطح الماص للمجمع الشمسي و درجة حرارة الجو المحيط .

$$Q_{loss} = U_L A_c (T_p - T_a) \quad [W] \quad (3)$$

لا يوجد أي حرارة مستفاد منها ومعهما للحمل في حالات الركود لذلك $Q_{del} = 0$. ومن أجل التحكم بدرجة حرارة المجمع "في حالة الركود" فيجب على المجمع أن يكون قادراً على تبديد كل الطاقة الممتصة. وفي الواقع ستزداد درجة الحرارة السطح الماص في المجمع الشمسي حتى:

$$Q_{loss} = Q_{abs} \quad [W] \quad (4)$$

$$U_L (T_p - T_a) = (\tau \alpha) G \quad [W/m^2] \quad (5) \quad \text{أو}$$

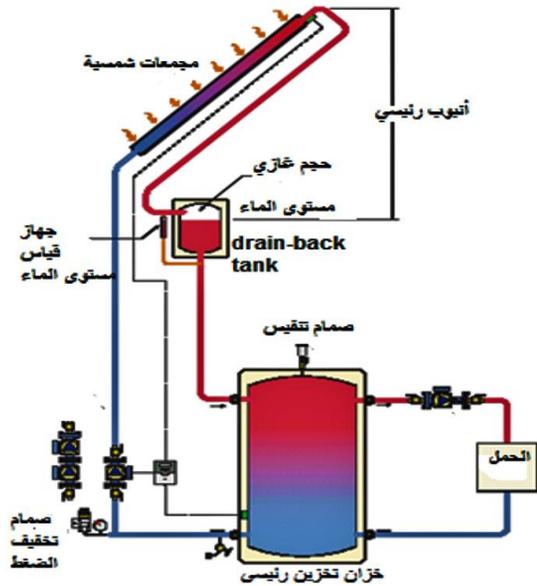
يمكن استنتاج درجة حرارة السطح الماص خلال الركود عن طريق حل المعادلة بدلالة T_p :

$$T_p = T_a + \frac{(\tau \alpha)G}{U_L} \quad [^{\circ}C] \quad (6)$$

3. 2. طرق لمعالجة ظاهرة الركود [1]

1. أنظمة التصريف الخلفي لدارة مغلقة (Drain back system)

يحلّ نظام التصريف الخلفي من المجمع مشكلة التوقف التام لاحتواء الدارة من المجمع إلى الخزان على حجم غازي (نتروجين أو هواء) إمّا في الخزان نفسه أو في خزان مدمج وسيط. يبين الشكل (1) رسم تخطيطي لدارة تعمل بنظام تصريف خلفي.



الشكل (1) دارة تعمل بنظام التصريف الخلفي [1]

عند توقف المجمع بشكل تام، يتحرك الحجم الغازي إلى المجمع ويملاً سائل المجمع الفراغ المملوء بالحجم الغازي سابقاً في الخزان. هذه العملية لا تحتاج إلى طاقة إضافية، بل تحتاج إلى قابلية من المجمع لإفراغ نفسه. يستطيع الغاز في المجمع أن يسخن نفسه إلى درجة حرارة التوقف التام دون أن يتبخّر السائل الناقل للحرارة. عندما يتحرّك ثانية،

تضغط مضخة التوزيع الحجم الغازي من المجمع إلى الخزان المقصود ثانيةً. وهكذا تحتاج المضخة أن يكون عندها قيم ضغط أكبر من مضخات التوزيع العادية. إذا صمّم الحجم الغازي بطريقة ما بحيث تكون كل مكونات النظام المعرّضة لدرجة حرارة الوسط المحيط مملوءة بالغاز عند التوقف التام، فإنّ دارة المجمع تعمل بدون إضافة مانع تجمد.

2. التبريد ليلاً [1]

يمكن استخدام دارة المجمع أيضاً لتبريد الخزان بتشغيل مضخة الدوران خلال الليل. بما أن الضياعات الحرارية من دارة المجمع هي أعلى بكثير من الخزان، تنخفض درجة حرارة الخزان إلى حد أخفض من الدرجة المقرّرة خلال الليل. درجة الحرارة هذه ستكون عند المستوى الذي يمنع المجمع من رفع درجة حرارة الخزان فوق الدرجة المحددة العظمى إذا كان اليوم التالي دافئاً ومشمساً. سيئات هذا النوع من التبريد أنه يعتمد على استعمال الطاقة الإضافية. بالإضافة لذلك، فإن كمية التبريد اللازمة في الخزان خلال الليل تعتمد على معلومات الطقس لليوم التالي.

3. إزالة الحرارة [1]

يكون النظام الشمسي له نظام خاص لإزالة الحرارة مندمج معه والذي يعمل بإشارة من جهاز التحكم حسب الطلب (مثلاً، برك السباحة، مبادل حراري على السقف، مرجل إضافي)، لكن المشكلة هي الحاجة لاستخدام طاقة إضافية ثانيةً.

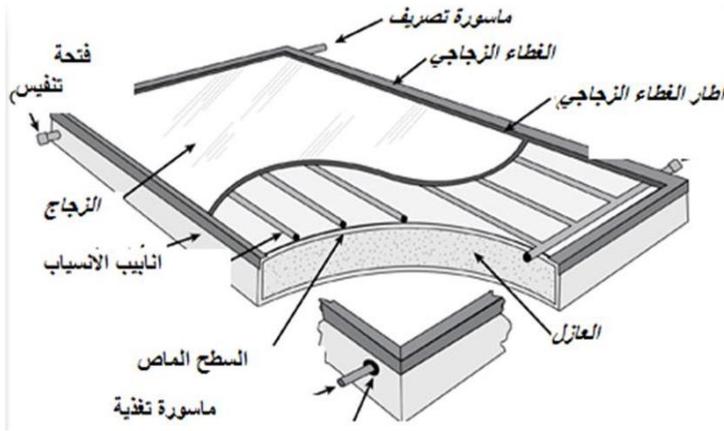
4. التبريد [8]

توضع قنوات التبريد تحت صفيحة السطح الماص، تستعمل هذه القنوات لإدخال الهواء الجوي بين صفيحة السطح الماص والعازل الخلفي وبذلك نسمح بالتبريد لصفائح السطح الماص للمجمع عن طريق التبادل الحراري الطبيعي. يوضع صمام عامل على الحرارة في الطرف الأعلى للمجمع يفتح في حالات الركود سامحاً بانطلاق الهواء الساخن من أعلى المجمع ودخول الهواء الجوي البارد من أسفل المجمع. إنّ الهواء المسخن ضمن قنوات التصريف الموجودة خلف السطح الماص للمجمع بهذه الطريقة سوف يزيل الحرارة الزائدة من خلف ألواح السطح الماص. يتم التحكم بحركة الهواء هذه بشكل مباشر عن طريق تدرج كثافة الحرارة المنتجة في الهواء الموجود ضمن قنوات التصريف. ويُغلق

الصمام العامل بالحرارة عندما تصبح درجات حرارة المجمع تحت درجة نقطة التحكم المحددة مُقيداً بذلك دوران الهواء ضمن المجمع الشمسي فقط. وتحت هذه الشروط فإنّ الهواء في أنبوب التصريف سوف ينضد حرارياً في طبقات (من الساخن إلى البارد) و يبقى ثابتاً فيصبح بذلك كطبقة عازلة للمجمع الشمسي من الخلف لمنع الضياع الحراري.

3.3. المجمع الشمسي المسطح نوع سائل [1]

يبين الشكل (2) المكونات الرئيسية للمجمع المسطح من النوع السائل. يتألف المجمع من السطح الماص والغطاء الشفاف والإطار والعازل الحراري بالإضافة لمدخل المائع الناقل للحرارة ومخرجه مضافاً إليها طرق التثبيت. يتضمن السطح الماص خطوط الأنابيب المناسبة للمائع الناقل للحرارة وهو جزء أساسي في معظم التصميمات.



الشكل (2) المكونات الرئيسية والمواد التي تكون لاقط شمسي مسطح نوع سائل

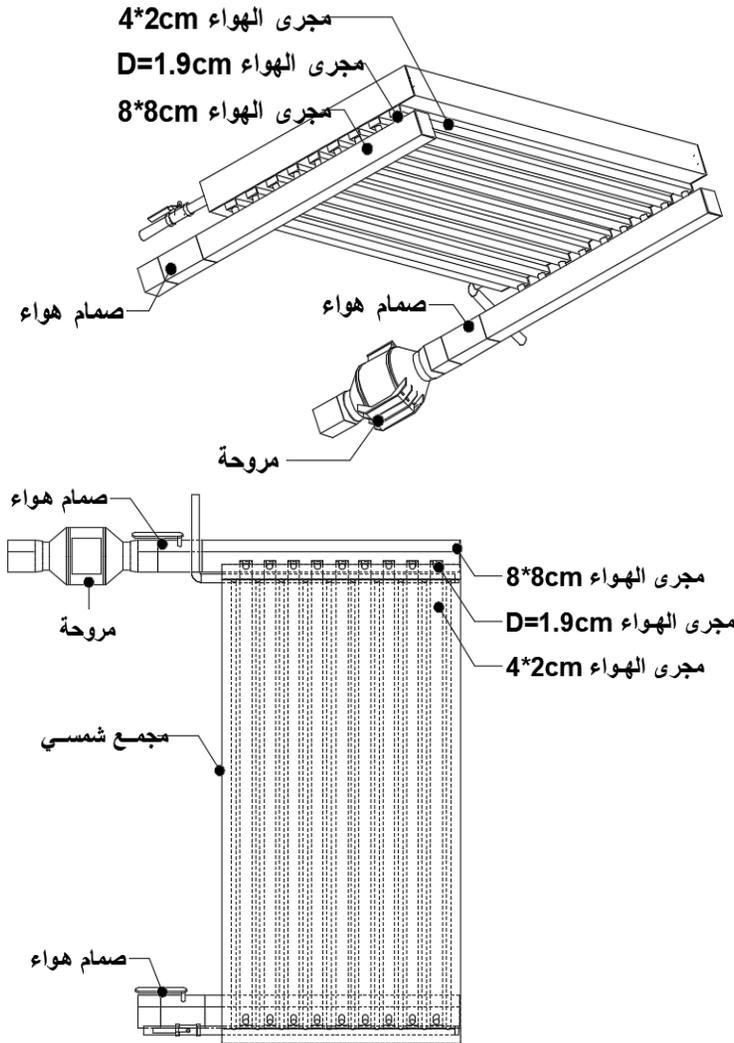
3.4. الدراسة التحليلية لمعالجة الركود في المجمع الشمسي المدروس

عندما يرد الإشعاع الشمسي قصير الموجه G على سطح المجمع فإن جزء قليل من هذا الإشعاع ينعكس عن الغلاف الشفاف وجزء قليل أيضاً يمتص من قبل الغلاف الشفاف والجزء المتبقي ينفذ منه ليصل الى السطح الماص حيث يقوم السطح الماص بتحويل الإشعاع الشمسي قصير الموجه الى حرارة يمتص جزء كبير منها وجزء من هذه الحرارة تضيع الى الوسط المحيط بالحمل والإشعاع والانعكاس. يقوم السطح الماص بنقل هذه الحرارة الممتصة الى الوسيط الناقل للحرارة الموجود ضمن الأنابيب المتضمنة في السطح

الماس. وفي حالة الركود يكون هذا الوسيط الناقل للحرارة متوقفاً في هذه الأنابيب توقف تام ومع وجود الاشعاع الشمسي فإن درجة حرارة هذا الوسيط تستمر بالازدياد لتصل الى حالة الغليان فالتبخر ولتفادي هذه المشكلة تم إضافة قنوات تبريد تحت السطح الماس لمنع الوصول لحالة الغليان والمحافظة على المجمع الشمسي.

وصف المجمع المدروس :

يبين الشكل (3) المجمع المسطح المدروس والذي يتألف من :

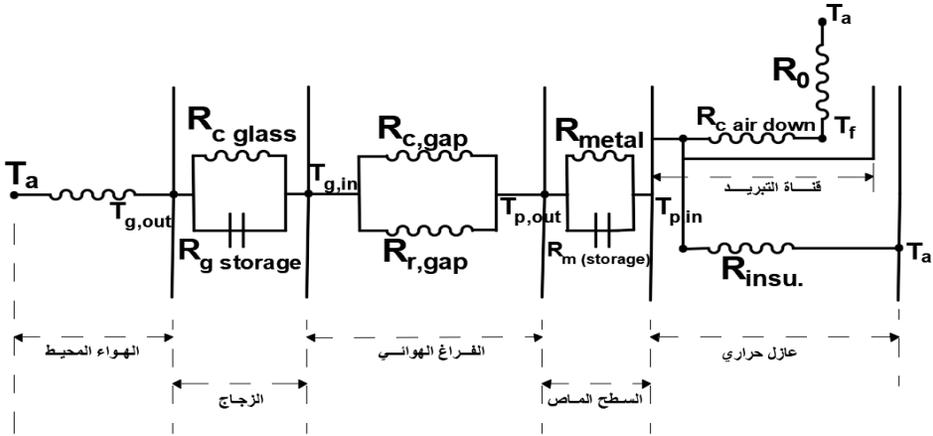


الشكل (3) نموذج المجمع المسطح المدروس مع قنوات التبريد

هيكل معدني حامل، لوح زجاجي عادي أبعاده (2m*1m) سماكته (5mm)، فراغ هوائي بين اللوح الزجاجي والسطح الماص (8 cm)، سطح ماص من النحاس بسماكة (0.5 mm)، يحتوي عشرة أنابيب للماء الناقل للحرارة قطر كل منها (0.5 in) ، وأنبوب موزع للماء أسفل السطح الماص وآخر مجمع أعلى السطح الماص قطر كل منهم (0.75 in)، وعازل حراري من الصوف الزجاجي (5 cm)، سعته الحجمية (3.4 L).

3.4. التوازنات الحرارية ضمن طبقات المجمع المدروس:

يبين الشكل (4) التوازنات الحرارية ضمن طبقات المجمع الشمسي مع قنوات التبريد.



الشكل (4) التوازنات الحرارية ضمن طبقات المجمع الشمسي مع قنوات التبريد

تعطى كمية الحرارة الواصلة للسطح الماص بالعلاقة (7): [2]

$$G \cdot A_{ap} \cdot \tau_{cov} \cdot \alpha_{abs} = G \cdot A_{ap} - Q_{loss} \quad (7)$$

$$q_{useful} = q_{in} - q_{loss} \quad [W / m^2] \quad (8)$$

تعطى كمية الحرارة الضائعة بالعلاقة [3]: (9)

$$q_{Loss} = h_{conv,gap} (t_p - t_{g_{in}}) + h_{rad,gap} (T_p^4 - T_{g_{in}}^4)$$

$$= h_{cond,g} (t_{g_{in}} - t_{g_{out}}) = h_{conv,rad,w} (t_{g_{out}} - t_a) \quad [W / m^2] \quad (9)$$

تعطى كمية الحرارة المفيدة الداخلة للنظام (الرياح) بالعلاقة (10): [3]

$$q_{useful} = h_{cond,p} (t_{p_{in}} - t_{p_{out}})$$

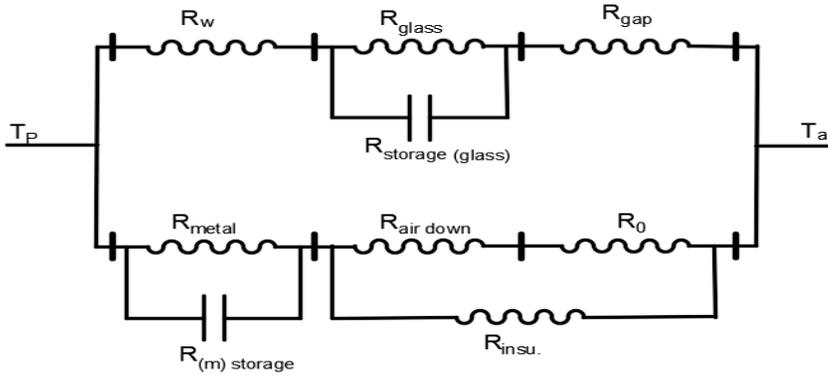
$$= h_{c,airdown} (t_p - t_{fluid})$$

$$= h_{cond,insu} (t_{fluid} - t_a) \quad [W / m^2] \quad (10)$$

حساب المقاومات الحرارية

نظراً لصعوبة الدراسة في الحالة المتعددة الأبعاد. يمكننا حل هذا النوع من مسائل انتقال الحرارة من خلال استخدام الدارات الحرارية المكافئة، والتي تشبه إلى حد كبير الدارات الكهربائية. حيث أن المقاومة الحرارية للنظام تقابل المقاومة الكهربائية، وفرق درجات الحرارة يقابل فرق الكمون، ومعدل انتقال الحرارة يقابل التيار الكهربائي كما هو مبين بالشكل (5).

$$I = \frac{\Delta V}{R} \quad (11)$$



الشكل (5) المقاومات الحرارية بالمجمع المدروس

الدراسة التجريبية للمجمع المدروس:

يبين الشكل (6) المجمع الذي أجريت عليه التجارب.



الشكل (6) المجمع الشمسي المسطح المختبر

مراحل العمل

انطلاقاً من الحسابات النظرية التصميمية للمجمع المعدل مع وضع قنوات التبريد كانت أول مرحلة في العمل هي تحديد أبعاد قنوات التبريد وحسب المواد والأبعاد المتوفرة بالسوق المحلية تم استخدام الألمنيوم للتبريد نظراً لناقليته الحرارية العالية وقدرته على التبريد.



الشكل (7) قنوات الألمنيوم ذات الأبعاد (2cm*4cm)

تم استخدام قنوات من الالمنيوم ذات الأبعاد (2cm*4cm) كما هو موضح بالشكل (7) لتتوضع بين أنابيب الماء الساخن وعلى تماس مباشر بالسطح الماص ودكت مجمع وآخر موزع لهواء التبريد ذات الأبعاد (8cm*8cm) كما موضح بالشكل (8) وتم توصيل القنوات مع الدكتات باستخدام أنابيب بلاستيكية مدعمة بالألمنيوم قطرها 19 mm حيث أنها مصنعة لتتحمل درجات حرارة أعلى من 90°C.



الشكل (8) دكت ذات الابعاد (8cm*8cm) مع أنابيب بيكس



الشكل (9) تثبيت قنوات التبريد خلف السطح الماص

بعد اختيار قنوات التبريد بدأت عملية فك وتركيب القنوات ضمن المجمع تم تنقيب قنوات الألمنيوم بقطر (20 cm) من الأعلى والأسفل. تم تثبيت القنوات على السطح الماص من الخلف على بعد ثلثي الطول من الثقوب باستخدام البراغي والرنديلات لضمان تماس مباشر مع السطح الماص كما هو موضح بالشكل (9)

تم دهان السطح الماص من الأمام باللون الأسود لضمان الامتصاصية العالية، وتثبيت أنابيب البلاستيك (البكس) مع القنوات من الأعلى والأسفل باستخدام معجونة بولاد كما بالشكل (10)



الشكل (10) تثبيت انابيب البلاستيك مع القنوات

وتم توصيل الأنابيب بالقنوات باستخدام معجونة البولاد أيضاً وتثبيت الدكاتات الخارجية بجسم الهيكل المعدني باستخدام مسامير الربط كما هو موضح بالشكل (11).



الشكل (11) الدكاتات الموصولة مع جسم الهيكل المعدني و قنوات التبريد

وتم عزل المجمع من الخلف والجوانب باستخدام عازل من الصوف الزجاجي بسماكة 10 cm وإغلاقه بسطح من الألمنيوم وتثبيته باستخدام لاصق ألومنيوم، وأخيراً تم تركيب اللوح

الزجاجي وتثبيتته من الأمام وتوجيه المجمع للجنوب بزاوية ميل 45° ليصبح المجمع جاهزاً للتجريب كما هو موضح بالشكل (12).



الشكل (12) المجمع جاهزاً للتجريب

أجهزة القياس المستخدمة

حساسات الحرارة:

تم استخدام 6 حساسات حرارة (ثيرموكبل) تتوضع كالتالي:

- حساس لقياس درجة الحرارة أعلى السطح الماص

- حساس لقياس درجة الحرارة أسفل السطح الماص

- حساس لقياس درجة حرارة الماء عند نقطة التوزيع

- حساس لقياس درجة حرارة السطح الزجاجي

- حساس لقياس درجة حرارة خروج الهواء

- حساس لقياس درجة حرارة دخول الهواء (الهواء المحيط)

توصل الحساسات المبيّنة بالشكل (13) مع جهاز الثيرمو متر الرياعي المبيّن بالشكل

(14) لقراءة درجات الحرارة من الحساسات لبيان قيمتها.

مقياس سرعة الهواء:

يستخدم مقياس سرعة الهواء الموضح بالشكل (15) ذات درجة دقة (0.1).

مقياس شدة الاشعاع الشمسي:

تم استخدام جهاز لقياس شدة الاشعاع الشمسي المبين في الشكل (16)، لكل ساعة من ساعات إجراء التجربة.



الشكل (14) جهاز الثيرمو متر الرباعي لقراءة درجات الحرارة من الحساسات



الشكل (13) نوع الحساس المستخدم في قياس درجات الحرارة (ثيرموكبل نوع k)



الشكل (16) جهاز قياس شدة الاشعاع الشمسي



الشكل (15) مقياس سرعة الهواء

مروحة التبريد:

تم دراسة الفوائد الهيدروليكية للمجمع من أجل تأمين تدفق هواء مناسب (جدول 1)

جدول (1) نتائج حسابات فواقد الضغط الهيدروستاتيكية ضمن قنوات التبريد

رقم المجرى	طول المجرى	التدفق	السرعة m	عناصر المقاومة	عامل المقاومة الميكانيكية	Δp	انخفاض الضغط بالاحتكاك $\Delta p1$	انخفاض الضغط المكاني $\Delta p2$	انخفاض الضغط الكلي Δp total
-	(m)	(m ³ /s)	m/s	-	-	(pa/m)	(pa)	(pa)	(pa)
1	0.8	0.042	5.6	كوع 8+تية	4.3	5.4	4.32	74.17	78.4864
2	1.8	0.004	1.6	2تية	1	1	1.8	1.408	3.208
3	1.8	0.004	1.6	2تية	1	1	1.8	1.408	3.208
4	1.8	0.004	1.6	2تية	1	1	1.8	1.408	3.208
5	1.8	0.004	1.6	2تية	1	1	1.8	1.408	3.208
6	1.8	0.004	1.6	2تية	1	1	1.8	1.408	3.208
7	1.8	0.004	1.6	2تية	1	1	1.8	1.408	3.208
8	1.8	0.004	1.6	2تية	1	1	1.8	1.408	3.208
9	1.8	0.004	1.6	2تية	1	1	1.8	1.408	3.208
10	1.8	0.004	1.6	كوع 2	0.8	1	1.8	1.126	2.9264
11	0.8	0.042	5.6	كوع 8+تية	4.3	5.4	4.32	67.42	71.744

طول المجرى الأبعد = 10.44 m
انخفاض الضغط للدائرة الأبعد = 153.2 Pa

المروحة المستخدمة ذات ضاغط 153 pa وتدفق 0.042 m³/s

4- النتائج ومناقشتها .

أجريت التجربة على سطح مبنى الإدارة في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية (جامعة دمشق) ونظراً للأجهزة المتوفرة تمت عملية التحكم بشكل يدوي، وتم إجراء عدة تجارب في أيام مشمسة من شهر تشرين الثاني تم اختيار ثلاث تجارب نموذجية منها ويعتمد مبدأ العمل على خفض درجة حرارة الماء من 100°C الى 80°C.

التجربة الأولى:

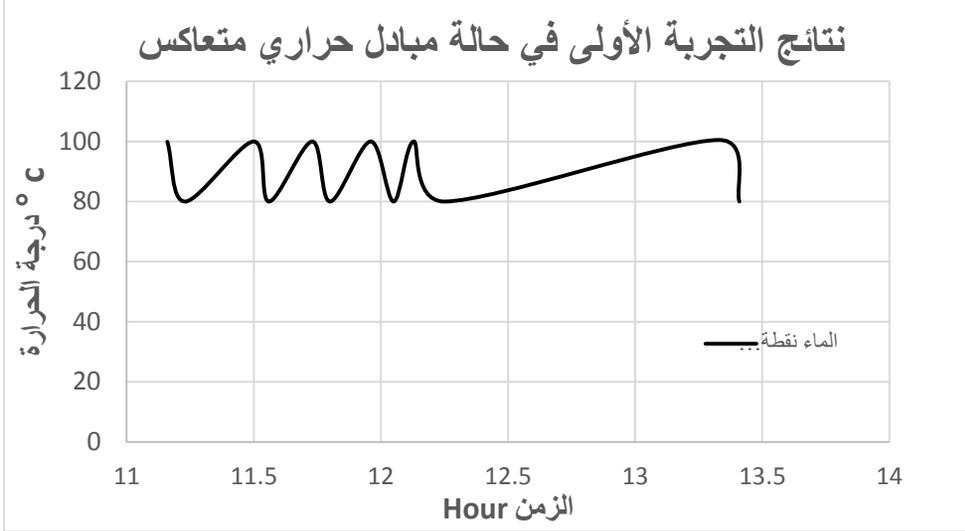
تم وضع مبادل حراري متعاكس (جريان الهواء يعاكس جريان الماء) حيث تم تركيب مروحة التبريد على الدكت أعلى المجمع ليكون دخول الهواء من الأعلى وخروجه من الدكت أسفل المجمع بينما حركة الماء داخل الأنابيب من الأسفل للأعلى بالتناقل (الماء الساخن أعلى المجمع والبارد أسفله)

يبين الجدول التالي (2) نتائج قياس درجات الحرارة: أعلى السطح الماص، أسفل السطح الماص، الماء عند نقطة التوزيع، الزجاج، الهواء المحيط (دخول الهواء)، (خروج الهواء)، قياس شدة الاشعاع الشمسي، زمن اللازم لخفض درجة الحرارة، قياس سرعة دخول الهواء، زمن انخفاض الحرارة بعد اطفاء المروحة.

جدول (2) نتائج التجربة الأولى في حالة مبادل حراري متعاكس في يوم 9/11/2020

الزمن	درجة حرارة أعلى الماص	درجة حرارة اسفل الماص	درجة حرارة الماء	درجة حرارة الزجاج	الاشعاع الشمسي	سرعة دخول الهواء	درجة حرارة دخول الهواء	درجة حرارة خروج الهواء	on/off
Time	$T_{p_{up}}$	$T_{p_{down}}$	T_{H_2O}	T_{glass}	I_{in}	V	T_{in}	T_{out}	-
hour	°C	°C	°C	°C	W/m^2	m/sec	°C	°C	-
11:10	101	75	99.9	56.1	304.3	4	27.6	57.4	on
11:14	82	58	80	54	304.2	4	28.2	53	off
11:30	103	63	100	61	308.8	4	31	54.7	on
11:34	83	43	80	58	308.8	4	30	54	off
11:44	104	66	100	60	310.1	4	29	52	on
11:48	85	48	80	58	310	4	28.5	52	off
11:58	104	69	100	60	341	4	30	57.4	on
12:03	81	49	80	57	343	4	31	59.7	off
12:08	104	68	100	58	363.6	4	29	57.4	on
12:15	82	48	80	56	363.3	4	28	59.7	off
12:19	94	63.5	70	61.4	-	-	-	-	غيوم

1:15	105	66	96	66.2	-	-	-	-	غيوم
13:20	105	66.5	100.5	66.3	310.	4	32	57	on
13:25	85	49	80	63	310	4	31	57	off

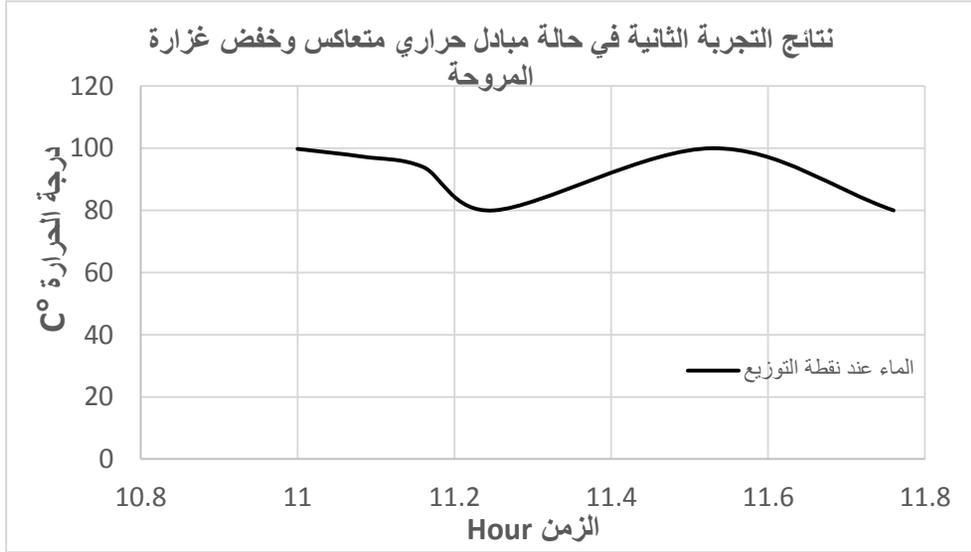


الشكل (18) نتائج التجربة الأولى في حالة مبادل حراري متعاكس في يوم 9/11/2020 نلاحظ من الجدول (2) عندما ترتفع درجة حرارة الماء لـ 100°C تعمل المروحة لخفض درجة حرارة الماء وخلال زمن 4min تنخفض درجات الحرارة بمقدار 20°C لتصل لـ 80°C . تنخفض درجة حرارة السطح الماص بعد إطفاء المروحة لتصل لـ 70°C خلال دقيقتين ونصف نتيجة العطالة الحرارية ومن بعدها تبدأ بالارتفاع حيث تستغرق زمناً يتراوح بين (5-17 min) لتسخن من جديد وذلك حسب شدة الإشعاع الشمسي الوارد على سطح المجمع ودرجة الحرارة الخارجية. عند الساعة 13:25 تنخفض درجات الحرارة لأقل من 69°C بسبب تظليل الشجرة الموجودة قرب التجربة وكذلك بسبب انخفاض شدة الإشعاع الشمسي.

التجربة الثانية:

حالة مبادل حراري متعاكس مع تغيير غزارة تدفق الهواء حيث أصبحت $0.021\text{m}^3/\text{sec}$ يبين الجدول التالي (3) نتائج قياس درجات الحرارة: أعلى السطح الماص، أسفل السطح الماص، الماء عند نقطة التوزيع، الزجاج، الهواء المحيط (دخول الهواء)، (خروج

الهواء)، قياس شدة الاشعاع الشمسي، الزمن اللازم لخفض درجة الحرارة، قياس سرعة دخول الهواء، زمن انخفاض الحرارة بعد اطفاء المروحة.



الشكل (19) نتائج التجربة الثانية في حالة مبادل حراري متعاكس في يوم 10/11/2020

جدول (3) نتائج التجربة الثانية في حالة مبادل حراري متعاكس وخفض غزارة المروحة

الزمن	درجة حرارة اعلى الماص	درجة حرارة اسفل الماص	درجة حرارة الماء	درجة حرارة الزجاج	الاشعاع الشمسي	سرعة دخول الهواء	درجة حرارة دخول الهواء	درجة حرارة خروج الهواء	on/off
Time	T _{sup}	T _{sdown}	T _{H2o}	T _{glass}	I _{in}	V	T _{in}	T _{out}	-
hour	°C	°C	°C	°C	W/m ²	m/sec	°C	°C	-
11:00	104.4	76.6	99.8	63	503.6	3.4	25		on
11:05	88.7	65	97.3	62	503.6	3.4			
11:10	85.7	63	94	60	503.6	3.4			
11:15	79	58	80	58	510.	3.4		62.8	off
11:19	93.8	56	73	57.8	510	3.4			
11:32	102	80	100	65	545.7	3.4	27		on
11::46	82	49	80	59	545.7	3.4		59	off

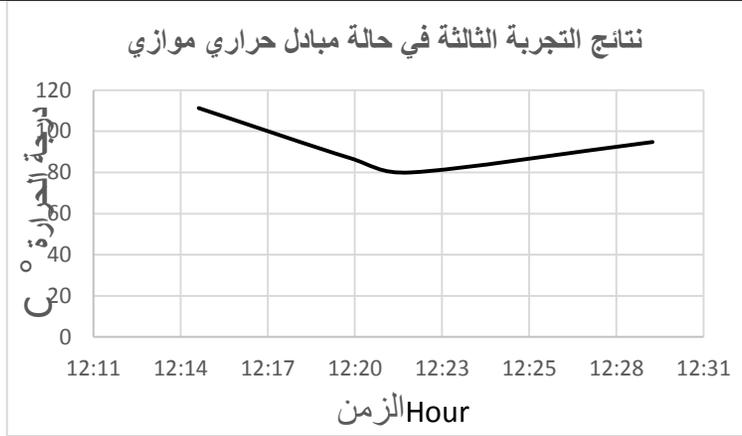
نلاحظ من هذه التجربة عندما تصل درجة حرارة الماء لـ 100°C تعمل المروحة على خفض درجة حرارة الماء لـ 80°C خلال زمن 15 min . وبعد توقف المروحة تستمر درجات الحرارة بالهبوط لتصل لـ 73°C خلال زمن 4 min . تعود بعد ذلك درجات الحرارة للارتفاع بعد 13 min حسب شدة الاشعاع الشمسي ودرجة الحرارة المحيطة.

التجربة الثالثة:

حالة مبادل حراري موازي (جريان الهواء موازي جريان الماء) حيث تم تركيب مروحة التبريد على الدكت أسفل المجمع ليكون دخول الهواء من الاسفل وخروجه من الدكت اعلى المجمع بينما حركة الماء داخل الأنابيب من الاسفل للأعلى بالتناقل (الماء الساخن اعلى المجمع والبارد اسفله)

جدول (4) نتائج التجربة الثالثة في حالة مبادل حراري موازي في يوم 11/11/2020

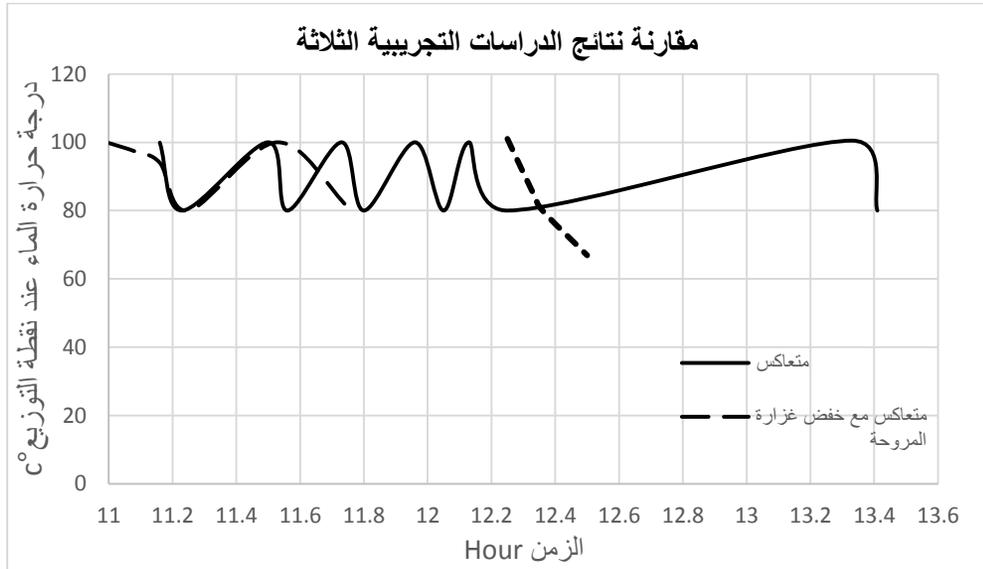
الزمن	درجة حرارة اعلى الماص	حرارة اسفل الماص	حرارة الماء	حرارة الزجاج	الاشعاع الشمسي	سرعة دخول الهواء	حرارة دخول الهواء	حرارة خروج الهواء	on/off
Time	T_{sup}	T_{sdown}	$T_{\text{H}_2\text{o}}$	T_{glass}	I_{in}	V	T_{in}	T_{out}	-
hour	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	W/m^2	m/sec	$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	-
12:15	111.3	66.6	103.8	63.8	364.2	4	27.6	57.4	On
12:20	87	48.5	85.2	61.8	310	4	28	54	
12:22	80	46.8	80	57	293.4	4	28.2	53	Off
12:30	94.8	56.5	66.9	56.8	283	-	-	-	



الشكل (20) نتائج التجربة الثالثة في حالة مبادل حراري موازي في يوم 11/11/2020

يبين الجدول التالي (4) نتائج درجات الحرارة: اعلى السطح الماص، أسفل السطح الماص، الماء عند نقطة التوزيع، الزجاج، الهواء المحيط (دخول الهواء)، (خروج الهواء)، قياس شدة الاشعاع الشمسي، زمن اللازم لخفض درجة الحرارة، قياس سرعة دخول الهواء، زمن انخفاض الحرارة بعد اطفاء المروحة.

نلاحظ من التجربة في حالة مبادل حراري موازي عند وصول درجة حرارة الماء لـ 100°C تعمل المروحة على خفض درجة حرارة الماء لـ 80°C خلال زمن 7min وبعد توقف المروحة تستمر درجات الحرارة بالهبوط لتصل لـ 66.9°C خلال زمن 7 min.



الشكل (21) مقارنة نتائج الدراسات التجريبية الثلاثة

لوحظ من التجارب السابقة من الشكل (21) أن المبادل الحراري المتعاكس هو الأفضل حيث أن الزمن اللازم للتبريد بحدود 4:50min ، بينما الزمن اللازم للتبريد في حالة المبادل الحراري الموازي بحدود 7 min أما في حالة المبادل المتعاكس مع خفض غزارة المروحة فإنه يحتاج زمن أطول مقارنةً بالحالات السابقة يصل الى 15min

كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة :

تحسب استطاعة المروحة بالعلاقة (12):

$$POWER = \frac{\rho \cdot g \cdot \Delta p \cdot m}{\eta} \quad (12)$$

$$POWER = \frac{1.2 \times 9.81 \times 153 \times 0.042}{0.5} = 151.2 [W]$$

حيث:

ρ : كثافة الهواء $[kg/m^3]$

g : الجاذبية الأرضية $[m/sec^2]$

Δp : ضاغط المروحة $[Pa]$

m : تدفق الهواء $[m^3/sec]$

η : كفاءة المروحة تجريبياً

تجريبياً: احتاجت التجربة الاولى الى 6 مرات تبريد خلال زمن 4min، تعطى الطاقة الكهربائية المستهلكة بالعلاقة (14):

$$P = 151.2 \times 1440 = 217440 [J]$$

$$P = \frac{217440}{1000 \times 3600} = 0.0604 [kWh] \quad (13)$$

التكلفة الاقتصادية لتشغيل المروحة:

$$Cost = 0.072(\$) * 0.06(KWh) = 0.0051 \$$$

تحليلياً:

كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة شهرياً: خلال شهر أب مثلاً تعطى بالعلاقة (14):

$$P = 151.2 \times 223200 = 33737840 [J]$$

$$P = \frac{33737840}{1000 \times 3600} = 9.4 [kWh] \quad (14)$$

التكلفة الاقتصادية شهرياً:

$$Cost = 0.072(\$) * 9.4(kWh) = 0.67 \$$$

كمية الطاقة الكهربائية المستهلكة سنوياً: تعطى بالعلاقة (15):

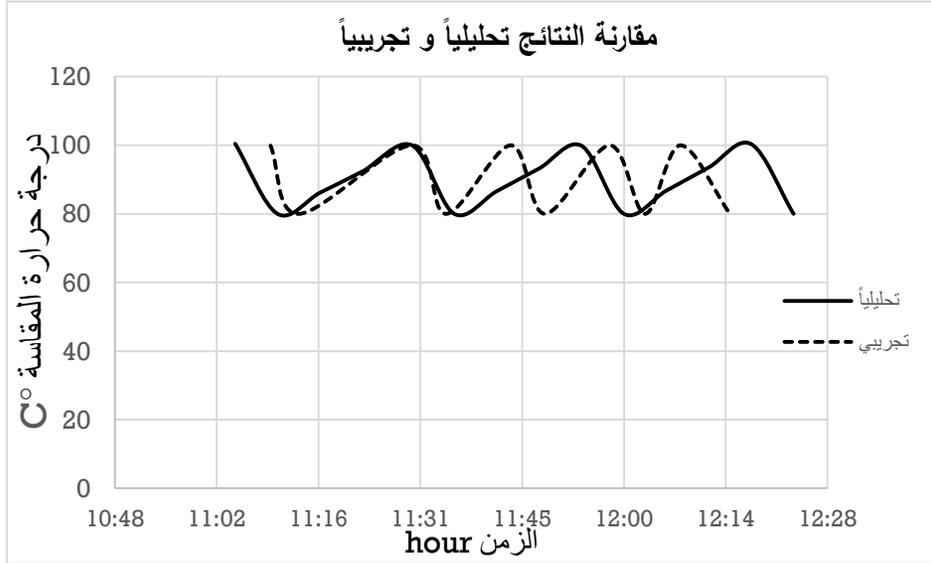
$$P = 151.2 \times 873720 = 132106464 [J]$$

$$P = \frac{132106464}{1000 \times 3600} = 36.7 [kWh] \quad (15)$$

التكلفة الاقتصادية سنوياً:

$$Cost = 0.072(\$) * 36.7(KWh) = 2.64 \$$$

عند حساب تكلفة تركيب قنوات التبريد وجد أنها تقدر $70 \$/m^2$ ، التكلفة التشغيلية للمروحة $1.3 \$/m^2$



الشكل (25) مقارنة النتائج تحليلياً و تجريبياً

5- الاستنتاجات والتوصيات:

يلاحظ ان المبادل الحراري المتعاكس هو الأفضل لأن الزمن اللازم للتبريد كان بحدود $4:50[min]$ ، بينما في حالة المبادل الحراري الموازي كان الزمن اللازم للتبريد بحدود $7 [min]$ ، أما في حالة المبادل المتعاكس مع خفض غزارة المروحة فقد احتاج زمن أطول مقارنةً بالحالات السابقة وصل إلى $15[min]$.

يوصى بالاستفادة من الهواء الساخن الناتج عن التبريد باستخدامه في التطبيقات الشمسية كالمجففات. باعتبار أن الطاقة الكهربائية المستخدمة في تشغيل المراوح منخفضة يوصى باستعمال هذه الطريقة في تبريد الخلايا الشمسية حيث يمكن أن تكون مفيدة بعد دراسة

الأداء على خلية شمسية. يوصى بدراسة هذه الحالة تحكيمياً. يوصى بدراسة الطرق المذكورة في الدراسات المرجعية (التصريف الخلفي، التبريد الكهروحراري) لمعالجة الركود ومقارنة النتائج مع النتائج التي تم التوصل إليها في هذا البحث.

6- المراجع.

- [1]FARES. A, 2016- Solar Heating Systems, university of Damascus, 305P . first edition, In Arabic
- [2] Duffie & Beckman,2013-Solar Engineering Of Thermal Processes, 928P
- [3] G.N.Tiwari,Arvind Tiiwari, Shyam 2016- handbook of solar Energy Bird, John. Engineering mathematics. Routledge,(2003).7][
- [4]Quiles, Pedro V., Francisco J. Aguilar, and Simón Aledo. 2014- "Analysis of the overheating and stagnation problems of solar thermal installations." Energy Procedia 48 ,172-180.
- [5] Martínez, A., D. Astrain, A. Rodríguez, and P. Aranguren. 2014- "Thermoelectric self-cooling system to protect solar collectors from overheating." Journal of electronic materials 43, no. 6
- [6]Frank, E, Franz M, and Stephan F, 2015 "Overheating prevention and stagnation handling in solar process heat applications." International Energy Agency-Solar Heating and Cooling, Task 49 .
- [7] Kizildag, D, Jesús C, González, Hamdi K, Joaquim R, S, and Asensio O. L. "Development, optimization and test performance of highly efficient flat plate solar collector with transparent insulation and low-cost overheating protection." In ISES Solar World Congress , IEA SHC International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry 2017: proceedings, pp. 2031-2042. International Solar Energy Society,
- [8] Botpaev, R, Janybek O, and Klaus Vajen. 2014- "Experimental investigation of the filling and draining processes of the drainback system (Part 1)." Energy Procedia 57 .