

تصنيع مجمع شمسي تركيزي ذو قطع مكافئ مركب واختبار أدائه تحت الظروف المناخية لمدينة مصراتة

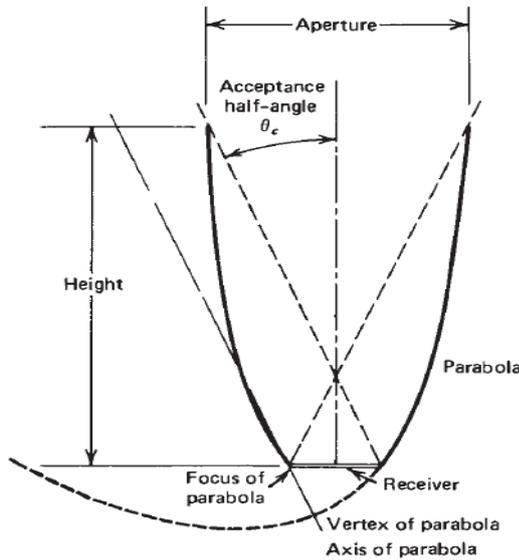
د. خالد الصادق البهلول
قسم الهندسة الميكانيكية - جامعة مصراتة
Khaled.elsadeg@eng.misuratau.edu.ly

محمد الريح علي
قسم الهندسة الميكانيكية - جامعة مصراتة
moe.alraih@eng.misuratau.edu.ly

محمد بلعيد الشاوش
قسم الهندسة الميكانيكية - جامعة مصراتة
m.shawesh@eng.misuratau.edu.ly

2. المجمع الشمسي التركيزي ذو القطع المكافئ المركب

هذا النوع من المركبات أستخدم وطور أولاً بواسطة هنتربرجر وونستون [15] في معامل العلوم الفيزيائية. بعدها اقترح ونستون استخدام هذه المركبات كمجمعات تركيزية للطاقة الشمسية. هذا النوع من المركبات له تطبيقات كثيرة لأنه يعطي أكبر تركيز ممكن لأي زاوية استقبال [3]، حيث يتمتع بقدرة كبيرة على عكس كل الأشعة الشمسية الساقطة عليه وتوجيهها على عناصر الاستقبال. لذا يمكن الاستغناء عن الحاجة إلى استخدام مجمعات دوارة تعمل على تتبع الشمس بغرض استيعاب التغير في اتجاه أشعة الشمس. يتم ذلك باستخدام حوض له وجهان على شكل قطع مكافئ يواجه كلاً منها الوجه الآخر، كما بالشكل 1. باستخدام أسطح داخلية عاكسة يمكن لأي شعاع ساقط مار من خلال فتحة الحوض (الغطاء الشفاف) أن يسقط مباشرة أو بعد عدة انعكاسات على سطح المستقبل (الصفحة الماصة) الموجود في قاع المجمع الشمسي [16]، بعدها يعمل المستقبل على نقل الحرارة إلى مائع التشغيل.



شكل 1: المفهوم الأساسي للمركز الشمسي ذو القطع المكافئ المركب [16].

توجد تصاميم مختلفة للمجمعات الشمسية التركيزية، تختلف بصورة عامة من ناحية التثبيت وحرية الحركة، وشكل المستقبل والسطوح العاكسة المستخدمة. لذا يمكن تصنيفها حسب شكل المستقبل إلى مجمع شمسي بمستقبل مسطح أفقي، ومستقبل الأشعة من جهة واحدة فقط (الجهة العلوية)، أو لوح ذي وجهين يوضع عمودياً لاستقبال الأشعة من الجهتين، أو شكل أسطوانتي، أو وتدي، وغيرها. في حالة المجمعات الشمسية ذات المستقبلات المسطحة ينبغي أن تكون هناك فجوة بين المستقبل والعاكس لتجنب أن يعمل العاكس بمثابة زعنفة تنقل الحرارة من المستقبل إلى العاكس. يؤدي وجود الفجوة إلى خسائر بصرية ناتجة من فقدان بعض الأشعة الساقطة وعدم انعكاسها على المستقبل وبالتالي التأثير على الأداء، ولذلك ينبغي أن تكون هذه الفجوة صغيرة نسبياً [16, 17]. هناك عدة

المخلص- العمل لفترات طويلة دون الحاجة إلى تتبع دائم لحركة الشمس على طول اليوم هو من الصفات المرغوبة في المركبات الشمسية وذلك للتعقيدات التي تصيبها أنظمة التتبع ومن ثم التكلفة العالية في تصنيعها. في هذا البحث تم تصميم وتصنيع مجمع شمسي تركيزي ذو قطع مكافئ مركب بمستقبل مسطح يمكنه الاستفادة من الإشعاعات الشمسية الساقطة عليه دون الحاجة لنظام تتبع شمسي. تم التصنيع حسب الإمكانيات والمواد المتوفرة في السوق المحلي، كما تم التحقق من أداء المجمع الشمسي تحت الظروف المناخية لمدينة مصراتة - ليبيا. النتائج أظهرت أنه بالإمكان الحصول على كفاءة جيدة قد تصل إلى 60%. واستناداً إلى كلفة التصنيع لهذا المجمع وإلى بساطة تركيبه، فإن تصنيع مثل هذه المجمعات محلياً واستخدامها في التطبيقات المتعددة للتحويل الحراري يعد أمراً مشجعاً.

الكلمات المفتاحية: مجمع شمسي تركيزي، قطع مكافئ مركب، زاوية الاستقبال، الكفاءة الحرارية.

1. المقدمة

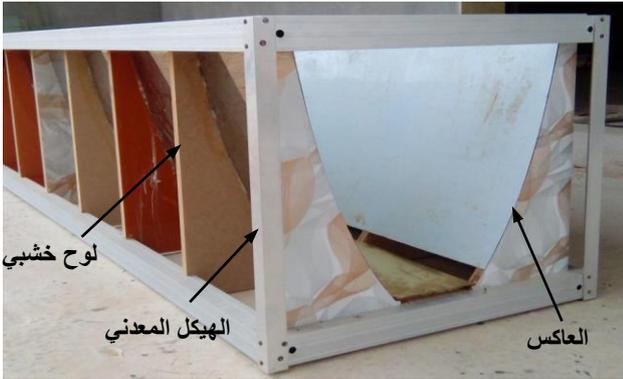
المركبات الشمسية هي نوع من أنواع المجمعات الشمسية، والتي تختلف عن المجمعات المسطحة في كونها تعمل على تركيز الأشعة الشمسية الساقطة عليها (من خلال مساحة كبيرة تسمى مساحة غطاء المجمع) على مساحة أقل تسمى المستقبل (الماس) بواسطة عدسات أو مرايا (العاكس). النسبة بين المساحتين تسمى نسبة التركيز النظرية. إن استخدام العواكس بدلاً من العدسات يفضل في الكثير من التطبيقات وذلك لتجنب المفاويد البصرية في الفواصل والانكسارات [2, 1]. كما أنه يمكن في هذه الأنواع من المجمعات تقليل المفقودات الحرارية وذلك بتقليل المساحة، بالإضافة إلى إمكانية إنتاج مدى أعلى من درجات الحرارة لمائع التشغيل والتي لا يمكن للمجمعات المسطحة توفيرها بكفاءة جيدة. المجمع الشمسي التركيزي قيد الدراسة هو مجمع شمسي ذو قطع مكافئ مركب (Compound Parabolic Concentrator)، والذي يختصر إلى (CPC). هذا النوع له ميزتين مهمتين مقارنةً ببقية أنواع المركبات، أولاً أنه لا يحتاج إلى تتبع دائم لحركة الشمس، حيث له القدرة على عكس جميع الأشعة الساقطة على فتحة الدخول بزوايا مختلفة إلى المستقبل [3-5] وثانياً قدرته على استقبال الأشعة المنتشرة علاوة على الأشعة الشمسية المباشرة [4].

العديد من الدراسات النظرية والتجريبية [3-14] تمت على هذا النوع من المجمعات الشمسية ولتصاميم مختلفة للمستقبل، حيث ركزت هذه الدراسات على التحليل الحراري للمجمع وتأثير بعض البارامترات المهمة على أدائه، مثل التوجيه، والفراغ بين المستقبل والعاكس، ومعدل التدفق. المجمع قيد الدراسة ذو مستقبل مسطح ويستقبل الأشعة الشمسية من جهة واحدة، وقد تمت الدراسة تحت الظروف المناخية لمدينة مصراتة - ليبيا الواقعة على خط عرض 32.15° وخط طول 15.3°. وتكمن أهمية هذا البحث في إمكانية الاستفادة من الإشعاع الشمسي الساقط على المدينة بتصنيع مجمع شمسي تركيزي لا يحتاج لنظام تتبع شمسي وبكفاءة مقبولة والتأكد من أدائه تحت الظروف المناخية لمدينة مصراتة.

استلمت الورقة بالكامل في 30 نوفمبر 2017 وروجعت في 25 ديسمبر 2017 وقبلت للنشر في 28 ديسمبر 2017

ونشرت ومتاحة على الشبكة الإلكترونية في 2 يناير 2018

مسافة 28.5cm عن بعضها البعض. تم تثبيت سطح العاكس على قطع الألواح الثمانية باستعمال مادة لاصقة قوية، وتم دعمها بمسامير ربط. روعي أثناء التثبيت أن لا يكون هناك فراغات بين سطح العاكس والألواح، حيث أن ذلك سوف يؤثر على مدى قدرة العاكس على عكس الأشعة على المستقبل بدون حدوث تشتت لها. شكل السطح العاكس المستخدم في هذا البحث وتثبيته على الألواح موضح في الشكل 3. من الملاحظ أن سطح العاكس الأصلي كان بارتفاع يصل إلى 1.45 m ، مع عرض لفتحة غطاء بقيمة 0.6 m ، حيث كانت نسبة التركيز الذي صمم عليها المجمع تساوي 4. ولكن لتقليل الكلفة مع التضحية بخفض نسبة التركيز، تم قطع السطح العاكس إلى ارتفاع يصل إلى 0.5 m . هذا القطع أدى إلى تخفيض عرض فتحة الغطاء لتصبح 0.485 m ، وبالتالي انخفضت نسبة التركيز إلى 3.24.



شكل 3. السطح العاكس وهيكله المستخدمان في المجمع الشمسي.

الماص (المستقبل): يعمل المستقبل على استقبال الأشعة الساقطة عليه والموجهة من العاكس وتسليمها لمائع التشغيل كحرارة مفيدة. يجب أن تكون امتصاصية المستقبل للأشعة الشمسية في المجمعات الشمسية عالية. كما يجب أن يكون فقد الطاقة بالأليات المتعددة لانتقال الحرارة، والمتضمنة الإشعاع، منخفضاً. لذا تم العمل على أن تكون انبعاثية سطح الصفيحة الماصة أقل ما يمكن. في هذا البحث تم استخدام مستقبل مستطيل الشكل من النحاس بسبك 0.7mm وبطول 2 m ، وبعرض 0.15 m . ولزيادة قدرته على امتصاص الأشعة الشمسية الساقطة عليه، فقد تم طلاؤه بطلاء ذو لون أسود غير لماع. تم الإبقاء على فجوة بين العاكس وسطح المستقبل والتي تمنع من أن يعمل المستقبل كزعنفة ويبدد الحرارة من خلال نقلها باتجاه العاكس. أيضاً تم تثبيت ثلاثة أنابيب نحاسية في الجهة السفلية للماص بقطر داخلي 0.012 m ومتباعدة عن بعضهم البعض بمسافة 0.04 m ، وتُثبت بمادة لاصقة ذات موصلية حرارية عالية، والتي تعمل على نقل مائع التشغيل وامتصاص الطاقة الحرارية من سطح الماص.

الغطاء الزجاجي: الوظيفة الأساسية للغطاء الشفاف هي الحفاظ على نظافة سطح المستقبل والعاكس من الاتربة والغبار والتي يمكن أن تقلل من نسبة الأشعة الشمسية الواصلة للمستقبل، بالإضافة إلى تقليل المفقودات الحرارية من الجزء العلوي للمجمع وذلك بتقليل الحرارة المنتقلة بالحمل، وتقليل تأثير الرياح المباشر على سطح المستقبل. في نفس الوقت يجب أن يكون الغطاء له القدرة على تمرير أكبر قدر من الأشعة الشمسية ووصولها إلى المستقبل. يعتبر الغطاء البلاستيكي الشفاف أكثر فاعلية لقدرته على تمرير الأشعة الشمسية (لارتفاع معامل نفاذيته)، ولمقاومته للكسر. في هذا البحث تم استخدام غطاء شفاف أبعاده $2\text{m} \times 0.49\text{m}$ وبسبك 3mm لتغطية سطح المجمع.

صندوق المجمع: عند تصميم الصندوق الخارجي للمجمع الشمسي والذي يعمل على حفظ المجمع الشمسي ومكوناته من التأثيرات الخارجية، تم مراعاة سهولة الحركة للمجمع الشمسي في اتجاه الشمس وذلك ليكون من الممكن ضبط المجمع على زوايا ميل مختلفة وحسب الظروف والموقع والتوقيت السنوي. لذا تم تصميم الصندوق مع حرية حركة زاوية تتراوح بين 0 إلى 45 درجة وذلك باعتبار أن المجمع لا يحتاج لتتبع دائم للشمس، وتم التحكم في حركته بواسطة قواعد خاصة للتثبيت.

عوامل تؤثر على نسبة التركيز الفعلية، منها مواصفات التصميم مثل منطقة الفتحة، ومنطقة الاستقبال، والكفاءة البصرية للسطح العاكس. بالرغم من أن زيادة مساحة فتحة الغطاء هو أمر مرغوب فيه من الناحية النظرية وذلك لوصول أكبر للأشعة الشمسية إلى المستقبل، إلا أن ذلك يتطلب مساحة عاكس كبيرة لتحقيقه. لذا، وبسبب أن النهايات العليا لسطح العاكس تكون فيه نسبة زيادة الفتحة صغير، فإنه قد يتم استخدام الاقتطاع لتقليل مساحة العاكس مع التضحية بتقليل بسيط في مساحة الغطاء وبالتالي تقليل بسيط في نسبة الإشعاع الواصل إلى الماص. يؤثر الاقتطاع أيضاً على متوسط عدد الانعكاسات، حيث يقلل عددها، وبالتالي يحسن الكفاءة البصرية [16, 18].

3. مراحل تصنيع المجمع التركيزي

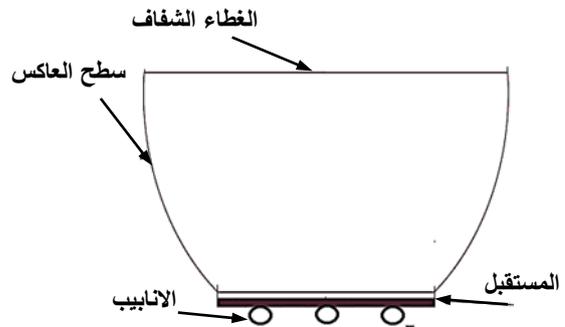
في هذه الفقرة تم توضيح الطريقة التي تم تبنيتها في تصميم وتصنيع مجمع شمسي قطع مكافئ مركب (CPC) ذو مستقبل أفقي مسطح، حيث تم التركيز على بعض الاعتبارات الهامة عند التصنيع، منها: (1) تحقيق الكفاءة الجيدة للمجمع الشمسي، (2) توفر المواد المستخدمة في التصنيع، (3) بساطة التصنيع وسهولة الصيانة، (4) تكلفة التصنيع والتشغيل والصيانة للمجمع، (5) تقليل الفقد الحراري من المجمع. الشكل 2 يوضح الأجزاء الرئيسية للمجمع قيد الدراسة وهي العاكس، والصفيحة الماصة، والغطاء الشفاف، وأنابيب نقل مائع التشغيل.

العاكس: السطح العاكس يعمل على عكس الأشعة الساقطة على المجمع وتجميعها على سطح المستقبل. يعتبر العاكس من أهم الأجزاء في المجمع الشمسي ولضمان أكبر تجميع وتوزيع للأشعة يجب أن يتوفر في سطح العاكس بعض الشروط منها: القدرة العالية على استقبال الأشعة الشمسية الساقطة وعكسها على سطح المستقبل (الماص)، مقاومه جيدة للصدمات، وسهولة طيه وتشكيله، وإمكانية تصميمه بطريقة يسهل الوصول إليه لصيانته وتنظيفه. لذا تم اختيار الصلب المقاوم للصدأ بسبك 2mm كمادة للعاكس بسبب انعكاسيتها العالية بالإضافة إلى توفرها بالسوق المحلي وكلفتها المنخفضة نسبياً. العاكس له شكل قطع مكافئ مركب يتبع العلاقة:

$$y = \frac{x^2}{4f} - f \quad (1)$$

حيث f هي البعد البؤري للقطع المكافئ، وتعطى بـ

$$f = \frac{W_p}{2} [(1 + \sin \theta_c)] \quad (2)$$



شكل 2. الأجزاء الرئيسية المكونة للمجمع.

عند تصنيع سطح العاكس في هذا البحث، كانت الخطوة الأولى هي تصميم هيكل من الخشب على شكل قطع مكافئ (الذي يخضع للمعادلة السابقة) لكي يتم استخدامها لتوجيه سطح العاكس ليأخذ شكل القطع المكافئ المركب. لذا فقد تم استعمال ماكينة قطع مبرمجة (CNC) لقطع عدد ثمانية ألواح من الخشب المقوى. بعد التأكد من مطابقة الشكل المتحصل عليه مع الشكل المصمم، تم تثبيت هذه القطع الثمانية مع بعض ويفصلها

تنفيذ التجارب وتجميع البيانات من المجمع الشمسي: بعد الانتهاء من تجميع كامل مكونات المنظومة، تم توجيه المجمع الشمسي في اتجاه الجنوب، وبزاوية ميل عن الأفقي 32.15° وهي زاوية خط عرض المدينة. بعد التأكد من التوصيلات، تم ضخ المياه من الخزان إلى المجمع بواسطة مضخة وتم ضبط معدل التدفق عند المعدل المطلوب. أخذت قراءات درجات حرارة الماء عند مدخل ومخرج المجمع، كما أخذت بيانات الإشعاع الشمسي والظروف المحيطة مثل درجة حرارة الجو المحيط وسرعة الرياح.

4. حساب الحرارة المفيدة والكفاءة اللحظية للمجمع الشمسي

يعرف متوسط كفاءة المجمع (η) لفترة زمنية معينة (τ)، على أنه نسبة الطاقة المستفادة أو المكتسبة لتلك الفترة الزمنية إلى مقدار الطاقة الإشعاعية الشمسية الساقطة على المجمع لنفس الفترة الزمنية، ويصاغ على الصورة التالية:

$$\eta = \frac{\int_0^\tau \dot{Q}_u dt}{A_c \int_0^\tau I_t dt} \quad (3)$$

I_t = شدة الإشعاع الشمسي الكلي (المباشر والمنتشر) الساقط على سطح المجمع لوحدة مساحة غطاء المجمع، A_c ، بـ (W/m^2).
 \dot{Q}_u = معدل الطاقة المفيدة المكتسبة بـ (W). كما يمكن صياغة الكفاءة اللحظية (η_c) للمجمع الشمسي على الصورة،

$$\eta_c = \frac{\dot{Q}_u}{A_c I_t} \times 100 \quad (4)$$

ويمكن حساب مقدار الطاقة الممتصة والمنتقلة إلى المائع (الماء) كحرارة مفيدة \dot{Q}_u عملياً من العلاقة،

$$\dot{Q}_u = \dot{m} \times C_{p,f} \times (T_{f,out} - T_{f,in}) \quad (5)$$

حيث \dot{m} معدل تدفق المائع في أنابيب المجمع والتي قيست عملياً باستخدام مقياس التدفق، وقيست درجة حرارة دخول وخروج الماء من المجمع ($T_{f,out}$ و $T_{f,in}$) بواسطة المزدوجات الحرارية. الحرارة النوعية للماء $C_{p,f}$ تؤخذ عند درجة الحرارة المتوسطة بين الدخول والخروج للمائع المتدفق.

5. النتائج والمناقشة

في هذا الجزء تم مناقشة النتائج المتحصل عليها من تشغيل واختبار كفاءة مجمع شمسي تركيزي ذو قطع مكافئ مركب (CPC) والذي تم تصنيعه بكلية الهندسة - جامعة مصراتة، تحت الظروف المناخية لمدينة مصراته بليبيا. تم تنفيذ الدراسة لمعدلات تدفق كتلي 0.007 kg/s ، 0.01 kg/s و 0.02 kg/s .

القراءات المبينة في الجدول (2) أخذت عملياً بتاريخ 2017\07\07 لمعدّل تدفق كتلي قدره $\dot{m} = 0.007 \text{ kg/s}$ حيث كانت دائرة المائع المتدفق مغلقة وذلك بالاستعانة بخزان التجميع والمضخة التي تعمل على إعادة تدوير المائع المتدفق. القراءات عبارة عن درجات حرارة دخول وخروج المائع ($T_{f,in}$ ، $T_{f,out}$)، ودرجة حرارة المحيط (T_a)، وسرعة الرياح (V_w)، وشدة الإشعاع الشمسي الساقط (I_t).

العازل الحراري: عندما ترتفع درجة الحرارة داخل المجمع وخاصة المستقبل بالمقارنة بالجو المحيط يصبح هناك إمكانية لفقد هذه الحرارة بالتوصيل وذلك عن طريق جوانب المجمع والجهة السفلية منه، وبالحمل، والإشعاع عن طريق الغلاف الزجاجي. عليه عند التصميم، تم العمل على تقليل هذه المفقودات بإحاطة جوانب العاكس وأسفل الماص وأنابيب النحاس الناقلة لمائع التشغيل بمواد خاصة ذات موصلية حرارية منخفضة مثل الصوف الزجاجي والبولي ستيرين (رغوة عازلة).

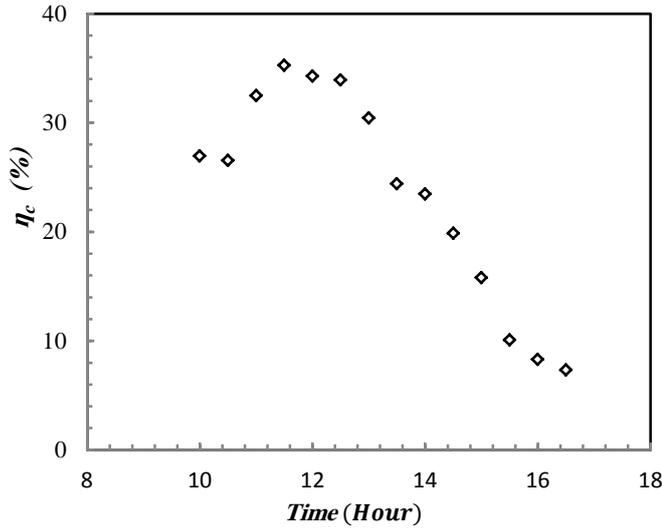
الأجهزة المستخدمة مع منظومة المجمع الشمسي: هناك العديد من أجهزة القياس التي استخدمت عند أخذ القراءات من المجمع الشمسي، ومن أهمها المزدوجات الحرارية، ومقياس معدل التدفق (الروتاميتز)، ومقياس شدة الإشعاع الشمسي ومقياس سرعة الرياح. تم عمل معايرة للأجهزة المستخدمة في القياس قبل الشروع في أخذ البيانات لمعرفة مدى موثوقية قراءاتها. فتمت معايرة المزدوج الحراري بواسطة مانومتر زئبقي، كما جرت معايرة مقياس التدفق بواسطة قياس فعلي لكمية المياه المتدفقة لوحدة الزمن. انتهت نتائج المعايرة بتقرير عدم موثوقية للأجهزة المستخدمة كالتالي، جهاز معدل التدفق له عدم موثوقية ($\pm 9\%$)، ومقياس المزدوج الحراري له عدم موثوقية ($\pm 2\%$). لاكمال منظومة المجمع الشمسي فإنه تم الاستعانة أيضاً بخزان صغير لتجميع المياه، ومضخة لضخها، وتجهيز نقاط على خط مائع التشغيل لأخذ قراءات درجات الحرارة والضغط عند مدخل ومخرج المجمع. أبعاد وخواص المجمع الشمسي قيد الدراسة معطاة في الجدول 1، والشكل النهائي للمجمع المصنّع مبين في الشكل 4.

جدول 1: قيم الأبعاد والخواص الحرارية للمجمع الشمسي.

$C_{p,f} = 4178$ $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$	$C_{p,p} = 500$ $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$	$C_{p,c} = 820$ $\text{kJ/kg} \cdot ^\circ\text{K}$
$d_f = 996$ kg/m^3	$d_p = 8954$ kg/m^3	$d_c = 2515$ kg/m^3
$\alpha_c = 0.05$	$\rho_p = 0.15$	$\alpha_p = 0.95$
$\varepsilon_c = 0.85$	$\theta_a = 2 * 10^{-5}$ m^2/s	$\rho_m = 0.86$
$\tau_c = 0.89$	$L = 2\text{m}$	$W_p = 0.15\text{m}$
$g = 0.02\text{m}$	$t_c = 0.003\text{m}$	$t_p = 0.0007\text{m}$

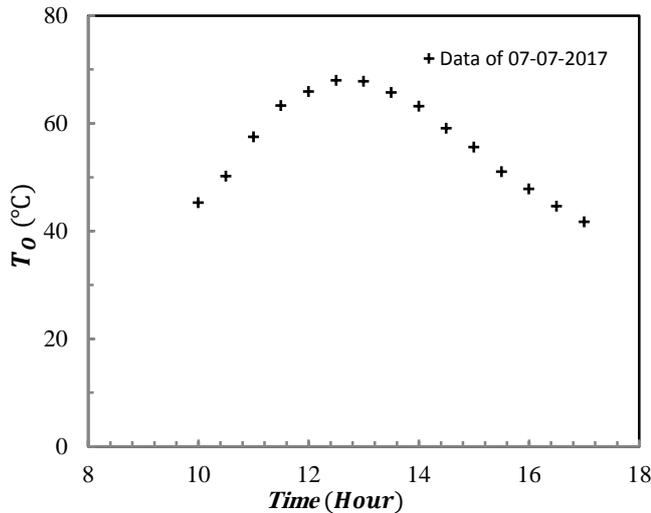


شكل 4. كامل منظومة المجمع الشمسي التركيزي.



شكل 6. تغير الكفاءة على طول اليوم 2017\07\07.

من خلال النتائج المتحصل عليها، فإنه يمكن استنتاج أن عمل المجمع عند درجات دخول عالية ليس ذي جدوى، حيث تتراوح قيم الكفاءة المسجلة من 10% إلى 35%. كما قد يكون لانخفاض الخواص البصرية لمكونات المجمع المصنوع تأثير سلبي على قيم الكفاءة المسجلة. الشكل 7 يوضح قيم درجات حرارة المائع الخارجة من المجمع على طول اليوم، حيث تتخذ شكل منحنى الإشعاع اليومي، حيث تبدأ درجة حرارة الخروج في التزايد بشكل تدريجي في بداية النهار وتكون أقصى قيمة لها عند منتصف النهار (12:30 pm) ثم تبدأ بالتناقص بشكل تدريجي. والسبب أيضاً يرجع في زيادة المفاقيد الحرارية من المجمع بالإضافة إلى انخفاض شدة الإشعاع الشمسي الساقط، وبسبب ارتفاع درجة حرارة دخول المائع. أيضاً يمكننا ملاحظة أن أعلى درجة حرارة خروج سجلت تحت ظروف التشغيل في هذا اليوم هي 68°C تقريباً.



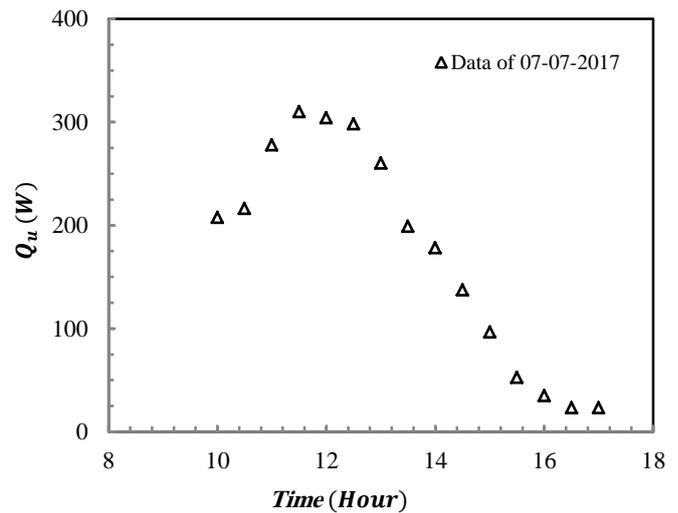
الشكل 7. تغير درجة حرارة خروج المائع على طول اليوم.

ايضا تم اختبار كفاءة المجمع في يومين آخرين وعند معدلي تدفق مختلفين (0.01 kg/s و 0.02 kg/s)، حيث روعي في هذا الجزء تثبيت درجة حرارة دخول المائع. القراءات المبينة في الجدول (3) أخذت عملياً في يوم 2017\07\21 وفي الجدول (4) ليوم 2017\08\08 في مدينة مصراتة.

جدول 2: القراءات العملية المأخوذة في 2017\07\07.

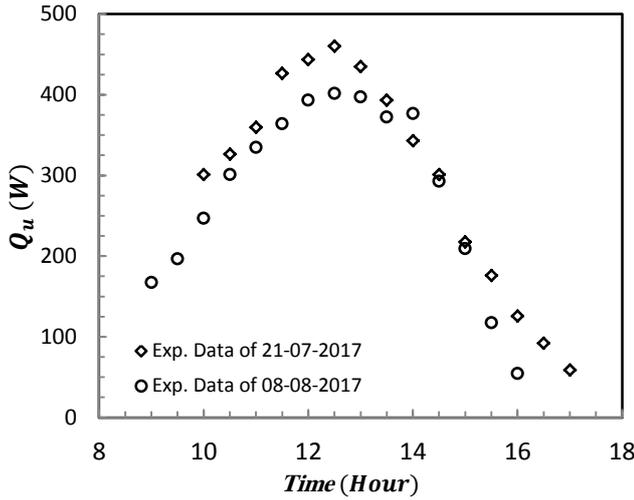
$m = 0.007 \frac{\text{kg}}{\text{s}}, V_w = 2 \text{ m/s}$				التوقيت
I_t (W/m^2)	T_a ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{f,out}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$T_{f,in}$ ($^{\circ}\text{C}$)	
776.5	27.0	45.3	38.2	10:00 am
831.7	27.0	50.2	42.8	10:30 am
871.9	28.0	60.0	49.2	11:00 am
896.3	28.0	63.3	52.7	11:30 am
904.4	28.5	65.9	55.5	12:00 pm
896.2	29.0	68.0	57.8	12:30 pm
871.6	29.5	65.7	58.7	1:00 pm
830.9	29.5	63.2	58.2	1:30 pm
776.5	29.5	63.2	57.1	2:00 pm
706.3	29.9	59.1	54.4	2:30 pm
626.2	29.8	55.6	52.3	3:00 pm
533.0	29.6	51.0	49.2	3:30 pm
435.0	29.2	47.8	46.6	4:00 pm
329.5	28.5	44.6	43.8	4:30 pm
224.2	28.3	41.7	40.9	5:00 pm

الشكل 5 يبين مقدار تغير الحرارة المفيدة على طول اليوم، ونلاحظ أن معدل الطاقة المفيدة للمجمع الشمسي تبدأ في التزايد التدريجي إلى أن تصل الذروة عند الظهيرة حيث كمية الأشعة الساقطة على المجمع أعلى ما يمكن، وبعدها تبدأ في التناقص التدريجي حيث يسلك سلوك الإشعاع الشمسي الساقط على المجمع. ولأن درجة حرارة الدخول تتغير وترتفع على طول اليوم، بالتالي فإن المفاقيد الحرارية المتوقعة من المجمع ستزداد رغم انخفاض شدة الإشعاع الشمسي بعد الظهيرة.



شكل 5. تغير الطاقة المفيدة على طول اليوم 2017\07\07.

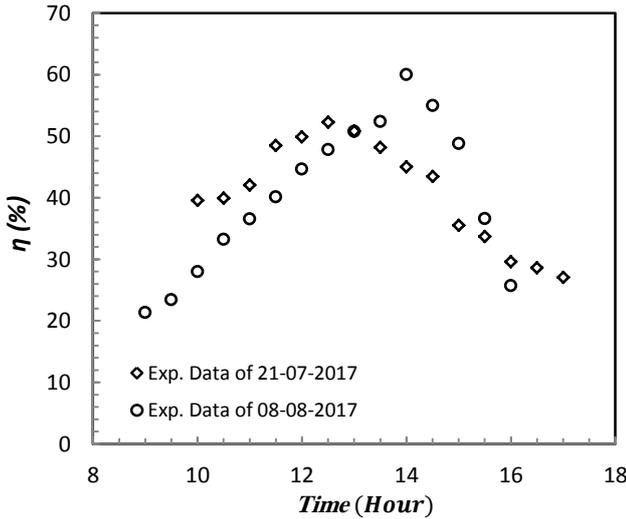
هذا السلوك للطاقة المفيدة يؤثر على كفاءة المجمع الشمسي وينفس النمط، وكما هو ملاحظ في الشكل 6. حيث نرى انخفاض كبير في كفاءة المجمع تصل إلى 10%. سُجلت أفضل كفاءة للمجمع لذلك اليوم عند منتصف النهار ثم تأخذ قيم الكفاءة في التناقص تدريجياً في الفترة المسائية إلى نهاية اليوم نتيجة لانخفاض شدة الأشعة الشمسية الساقطة.



شكل 8. تغير الطاقة المفيدة على مدار اليوم، ليومي (2017\07\21) و (2017\08\08)

أقصى قيمة للطاقة المستفاد سجلت في يوم (2017-07-21) هي (450 W) بينما ليوم (2017-08-08) هي (400 W). إختلاف مواضع القيمة القصوى للطاقة المستفاد يرجح أن يكون ناتج عن السلوك المختلف للمفايد الحرارية. سلوك الكفاءة المبين في الشكل 9 للحالتين يؤيد ذلك الاستنتاج.

نلاحظ من المنحنى في شكل 9 أن أعلى كفاءة ممكنة لذلك اليوم تكون عند منتصف النهار (12:30 pm) حيث تصل الكفاءة الى 52.3% وكانت أقل كفاءة لذلك اليوم هي 27%، وأن أعلى كفاءة ليوم (08-08-2017) تكون عند (2:00 pm) وهي (60%). وفي كلا الحالتين فإن قيم الكفاءة المتحصل عليها هي أفضل مقارنة مع تلك المتحصل عليها عندما كانت درجة حرارة الدخول عالية.



شكل 9. تغير الكفاءة على مدار اليوم، ليومي (2017\07\21) و (2017\08\08)

6. الاستنتاجات

من العوامل المهمة عند تصنيع المجمعات الشمسية محاولة الوصول بالتصميم إلى أعلى كفاءة ممكنة والمحافظة على هذه الكفاءة عند مستوى مرض. في هذا البحث تم تصنيع مجمع شمسي تركيزي قطع مكافئ مركب بالإمكانات المتوفرة في السوق المحلي، ومن ثم تمت عملية دراسة أداءه الحراري تحت الظروف المناخية لمدينة مصراتة-ليبيا. من خلال النتائج المتحصل عليها من تشغيل المجمع لثلاثة أيام مختلفة وتحت ظروف تشغيلية مختلفة، أمكن الحصول على الاستنتاجات التالية:

جدول 3: القراءات العملية المأخوذة في حالة ثبات درجة حرارة دخول المائع ليوم 2017\07\21.

$m = 0.02 \frac{kg}{s}, V_w = 2.5 m/s$				التوقيت
I_t (W/m^2)	T_a ($^{\circ}C$)	$T_{f,out}$ ($^{\circ}C$)	$T_{f,in}$ ($^{\circ}C$)	
857.1	28.0	29.4	25.8	10:00 am
904.9	29.5	29.8	25.9	10:30 am
939.7	31.0	30.5	26.2	11:00 am
960.8	31.5	31.5	26.4	11:30 am
967.8	32.0	32.0	26.7	12:00 pm
960.8	32.0	32.2	26.7	12:30 pm
939.7	32.0	31.9	26.7	1:00 pm
904.9	33.0	31.3	26.6	1:30 pm
857.1	33.0	30.9	26.8	2:00 pm
796.9	33.0	30.4	26.8	2:30 pm
725.5	32.0	29.6	27.0	3:00 pm
643.9	31.5	29.0	26.9	3:30 pm
553.4	31.5	28.2	26.7	4:00 pm
455.7	31.0	27.5	26.4	4:30 pm
352.1	30.5	27.1	26.4	5:00 pm

جدول 4: القراءات العملية المأخوذة في حالة ثبات درجة حرارة دخول المائع ليوم 2017\08\08.

$m = 0.01 \frac{kg}{s}, V_w = 2.0 m/s$				التوقيت
I_t (W/m^2)	T_a ($^{\circ}C$)	$T_{f,out}$ ($^{\circ}C$)	$T_{f,in}$ ($^{\circ}C$)	
807.2	33.0	34.3	30.3	9:00 am
864.9	32.0	34.5	29.8	9:30 am
908.1	32.3	36.5	30.6	10:00 am
934.3	32.0	38.1	30.9	10:30 am
942.9	32.8	39.8	31.8	11:00 am
934.3	33.0	40.7	32.0	11:30 am
907.8	33.3	41.8	32.4	12:00 pm
865.3	33.4	42.3	32.7	12:30 pm
806.1	32.9	42.2	32.7	1:00 pm
732.5	32.9	41.6	32.7	1:30 pm
646.6	32.0	41.2	32.2	2:00 pm
548.9	32.0	39.2	31.4	2:30 pm
441.6	31.5	37.2	30.4	3:00 pm
329.8	31.0	35.0	29.6	3:30 pm
218.0	31.0	33.5	28.9	4:00 pm

الشكل 8 يبين مقدار تغير الحرارة المفيدة على طول اليوم لهذه الحالة، وهي تسلك سلوك الاشعاع الساقط على المجمع، حيث تتراوح قيمتها ما بين (50-450). نلاحظ من الشكل أن مقدار الطاقة المستفاد ليوم (21-08-2017) تكون أعلى من تلك المتحصل عليها في يوم (08-08-2017) وخاصة في النصف الأول من اليوم. ويرجع ذلك أساساً إلى أن معدل التدفق في ذلك اليوم كان أكبر.

المراجع

- [1] Rapp, D. Solar energy. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. USA (1981).
- [2] Anderson, E. E. Fundamentals of solar energy conversion. Addison-Wesley Publishing Company, USA (1983).
- [3] Rabl A. Optical and thermal properties of Compound Parabolic Concentrators. *Solar energy*, 18 (1976), pp. 497-511.
- [4] Chakraverty, S., Bansal, N. K., and Garg, H. P. Transient analysis of a CPC collector with time dependent input function. *Solar energy*, 38 (1987), pp.179-185.
- [5] Zagalei, A. S, Mahgiub, O. M., and Albahloul, K. E. Studying the Feasibility of the Compound Parabolic Concentrator for Solar Cooling. *Al-satit Journal*, (2010), Vol. 4(8), pp.81-93.
- [6] Hsieh, C.K. Thermal analysis of CPC collectors. *Solar Energy*, 27(1981), pp.19-29.
- [7] Goodman, N. B. and Winston, R. Practical design considerations for CPC solar collectors. *Solar energy*, 22 (1979), pp.373-381.
- [8] Bansal, N.K. and Sharma, A.K. Transit theory of a tubular solar energy collector. *Solar energy*, 32 (1984), pp. 67-74.
- [9] Eames, P.C. and Norton, B. Detailed parametric analysis of heat transfer in CPC solar energy collectors. *Solar Energy*, 50 (1993), pp. 321-338.
- [10] Kothdiwala, A. F., Norton, B., and Eames, P.C. The effect of variation of angle of inclination on the performance of low-concentration-ratio Compound Parabolic Concentrating solar collectors. *Solar Energy*, 55 (1995), pp. 301-309.
- [11] Eames, P.C. and Norton, B. Thermal and optical consequences of the introduction of baffles into Compound Parabolic Concentrating solar energy collector cavities. *Solar Energy*, 55 (1995), pp.139-150.
- [12] Eames, P.C. and Norton, B. Validated, unified model for optics and heat transfer in line-axis concentrating solar energy collectors. *Solar Energy*, 50 (1993), pp. 339-355.
- [13] Fraidenraich, N, Lima, R.DEC.F.DE, Tiba C., and Barbosa, E.M. DES. Simulation model of collector with temperature dependent heat loss coefficient. *Solar Energy*, 65(1999), pp. 99-110.
- [14] Tchinda, R. and Ngos, N. A theoretical evaluation of the thermal performance of CPC with flat one-sided absorber. *Heat and Mass transfer*, 33 (2006), pp. 709-718.
- [15] Hinterberger, H. and Winston, R. Review of Scientific Instruments, 37, 1094 (1966).
- [16] Duffie, J.A. and Beckman, W. A. Solar engineering of thermal processes, 4th edition, 2013, John Wiley and Sons Inc., Canada.
- [17] Ronnelid, M., Perers, B., and Karlsson, B. Construction and testing of a large-area CPC collector and comparison with a flat plate collector. *Solar energy*, 57 (1996), pp. 177-184.
- [18] Kreith, F. and Kreider, J.F. Principles of solar engineering. McGraw-Hill, New York (1978).

1. عمل المجمع عند درجات دخول عالية ليس ذي جدوى، حيث تتراوح قيم الكفاءة المسجلة من 10% إلى 35%.
2. لحالة ثبات درجة حرارة الدخول، كفاءة المجمع الشمسي تراوحت من 20 إلى 60%، وهي تعتبر جيدة بالرغم من عدم تتبع الشمس، وخاصة إذا ما تم الأخذ في الاعتبار استخدام مواد ذات خواص حرارية وبصرية متوسطة لعدم توفر المواد ذات الخواص المرتفعة في السوق المحلي.
3. كفاءة المجمع الشمسي تزداد وخاصة عند الظهيرة، ويرجع سبب ذلك لزيادة شدة الإشعاع الشمسي عند الظهيرة وانخفاض الفواقد الحرارية وخاصة الناتجة عن الحمل الحراري بسبب ارتفاع درجة حرارة المحيط ومقاربتها لدرجة حرارة الغطاء الزجاجي.
4. بناءً على النتائج العملية المتحصّل عليها من تشغيل المجمع التركيزي ذو القطع المكافئ المركب، وعلى كلفة تصنيعه والتي قدرت بـ 2400 دينار ليبي (مايعادل 300 دولار أمريكي)، وبساطة تركيبية، وعلى الظروف المناخية للمدينة، فإن تبني تصنيع واستخدام هذا النوع من المجمعات الشمسية محلياً في تطبيقات التحويل الحراري يعتبر أمراً مشجعاً.

الرموز

A_c	= مساحة غطاء المجمع (m^2)
$C_{p,f}$	= الحرارة النوعية للماء ($W/K. m^2$)
$C_{p,p}$	= الحرارة النوعية للماص ($W/K. m^2$)
$C_{p,c}$	= الحرارة النوعية للغطاء ($W/K. m^2$)
d_c	= كثافة الغطاء (kg/m^3)
d_f	= كثافة الماء (kg/m^3)
d_p	= كثافة الماص (kg/m^3)
f	= البعد البؤري (m)
I_t	= شدة الإشعاع الشمسي الكلي (المباشر والمنتشر) الساقط على سطح المجمع بـ (W/m^2)،
g	= الفجوة بين الماص وسطح العاكس (m)
L	= طول المجمع (m)
\dot{m}	= معدل تدفق المائع في أنابيب المجمع (kg/s)
\dot{Q}_u	= معدل الطاقة المفيدة المكتسبة بـ (W)
t_c	= سمك الغطاء (m)
t_p	= سمك الماص (m)
T_a	= درجة حرارة المحيط ($^{\circ}C$)
$T_{f,in}$	= درجة حرارة دخول الماء للمجمع الشمسي ($^{\circ}C$)
$T_{f,out}$	= درجة حرارة خروج الماء من المجمع الشمسي ($^{\circ}C$)
V_w	= سرعة الرياح (m/s)
W_p	= عرض الماص (m)
η	= متوسط كفاءة المجمع خلال فترة زمنية
η_c	= الكفاءة اللحظية للمجمع الشمسي
θ_c	= زاوية القبول للمجمع القطع المكافئ
τ	= فترة زمنية (sec)
τ_c	= نفاذية الغطاء
ε_c	= انبعاثية الغطاء
ρ_p	= انعكاسية الماص
ρ_m	= انعكاسية العاكس
α_p	= امتصاصية الماص
α_c	= امتصاصية الغطاء