

Research Article

Thermal Analysis of Air-Heating Flat-Plate Thermal
Solar CollectorsYasser F. Nassar^{1,2*}, Rahma S. Elzer³, Ali R. Alkhazmi¹, Hala J. El-Khozondar^{4,5}, Mohamed Essid⁶,
Abaubakry M'Baye⁷¹ Mechanical & Renewable energy Eng, Wadi Alshatti University, Brack – Libya² Center for Research and Studies of Renewable Energies and Sustain. Development, Wadi Alshatti Uni., Brack – Libya³ Physics Department, Faculty of Science, Derna University, Derna-Libya⁴ Dept. of Electrical Eng. and Smart Systems, Islamic Univ. of Gaza, Gaza Strip, Palestine⁵ Department of Materials and London Centre for Nanotechnology, Imperial College London, UK⁶ Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Sfax, Route de Mahdia Km 2.5, BP 88 A, 3099, El Bustan Sfax, Tunisia⁷ University of Bourgogne, France*Corresponding author: y.nassar@wau.edu.ly

Received: June 01, 2023

Accepted: August 05, 2023

Published: August 10, 2023

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

Abstract: All energy systems include heat transfer processes. Convection and radiation heat transfer play an important role in flat-plate solar thermal collectors. Where the solar collector can be considered as a heat exchanger, the absorber plate of the solar collector absorbs solar radiation and transfers this heat to the working fluid in the collector (water or air). The radiative and convective heat transfer processes inside the collectors depend on the temperatures of the components of the collector and on the hydrodynamic properties of the working fluid. Solar energy systems have proven their economic feasibility in most thermal applications, especially in the "sun belt" region. In order to fully exploit the potential of solar energy, it will be necessary to combine design with maximum performance and environmental considerations. This paper describes the thermal behavior of several types of air-heating flat-plate solar collectors, by knowing the field temperature distribution of solar collector's components. The simulation results showed that the solar collector of the double pass (fourth type) has the best thermal characteristics, but the solar collector of the single pass (second type) is almost similar to the double pass type in thermal characteristics and is distinguished from it by simplicity in design, more flexibility in work, and has less hydraulic losses, and therefore it is preferred in the global energy market.

Keywords: Air-Heating Flat-Plate Solar Collector, Thermal Analysis, Efficiency, Optimization.

التحليل الحراري لمجمعات الطاقة الشمسية الحرارية المسطحة لتسخين الهواء

ياسر نصار^{1,2*}، رحمة الزير³، علي الخازمي¹، هالة الخزندار^{4,5}، محمد الصيد^{6,7}، ابوبكري مباي⁸¹ قسم هندسة الطاقة الميكانيكية والمتجددة، جامعة وادي الشطي، براك - ليبيا² مركز أبحاث ودراسات الطاقات المتجددة واستدامته والتنمية، جامعة وادي الشاطئ، براك - ليبيا³ قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة درنة، درنة - ليبيا⁴ قسم الهندسة الكهربائية والأنظمة الذكية، الجامعة الإسلامية، غزة، قطاع غزة، فلسطين⁵ قسم المواد ومركز لندن لتقنية النانو، إمبريال كوليدج لندن، المملكة المتحدة⁶ المعهد العالي للدراسات التكنولوجية بصفافس، طريق المهديّة 2.5، ص ب 88 أ، 3099، البستان صفافس، تونس⁷ جامعة بورجون، فرنسا

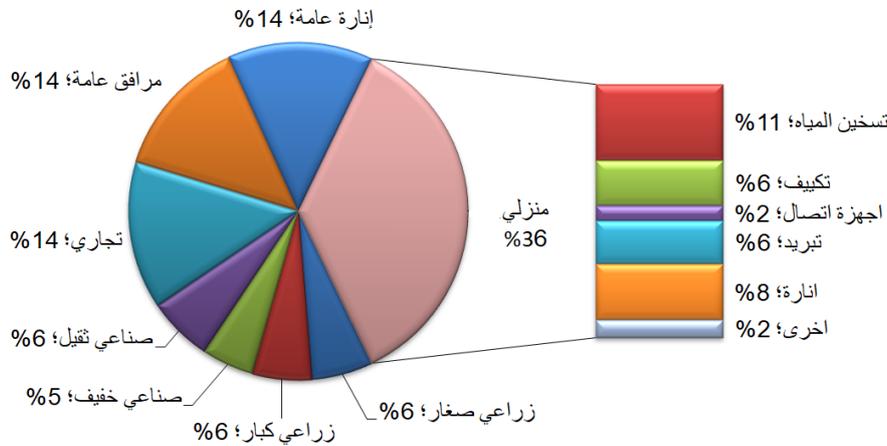
المخلص: تتضمن جميع أنظمة الطاقة عمليات نقل الحرارة، ويلعب نقل الحرارة بالحمل والإشعاع دوراً مهماً في مجمعات الطاقة الشمسية الحرارية المستوية. حيث يمكن اعتبار المجمع الشمسي مبادلاً حرارياً، يمتص الإشعاع الشمسي، وينقل هذه الحرارة إلى المائع العامل في المجمع (ماء أو هواء). تعتمد عمليات نقل الحرارة

بالإشعاع والحمل الحراري داخل المجمعات على درجات حرارة مكونات المجمع وعلى الخصائص الهيدروديناميكية للمائع العامل. أثبتت أنظمة الطاقة الشمسية جدواها الاقتصادية في معظم التطبيقات الحرارية وخاصة في منطقة "الحزام الشمسي". من أجل تحقيق الاستغلال الأمثل لإمكانات الطاقة الشمسية، سيكون من الضروري الجمع بين التصميم والأداء الأفضل والاعتبارات البيئية. يصف هذا البحث السلوك الحراري لعدة أنواع من مجمعات الطاقة الشمسية الحرارية المستوية تسخين الهواء، وذلك لمعرفة مجال توزيع درجات حرارة جميع عناصر المجمع الشمسي. بينت نتائج المحاكاة أن المجمع الشمسي من النوع الرابع له الصفات الحرارية الأفضل غير أن المجمع الشمسي من النوع الثاني مقاربا له في الصفات الحرارية ويتميز عنه ببساطة في التصميم مرونة أكثر في العمل وقيمة فقد الهيدروليكي أقل من الرابع، وبالتالي فإنه المفضل في سوق الطاقة العالمية.

الكلمات المفتاحية: المجمع الشمسي المستوي الهوائي، التحليل الحراري، الكفاءة، الأثمة.

1. المقدمة

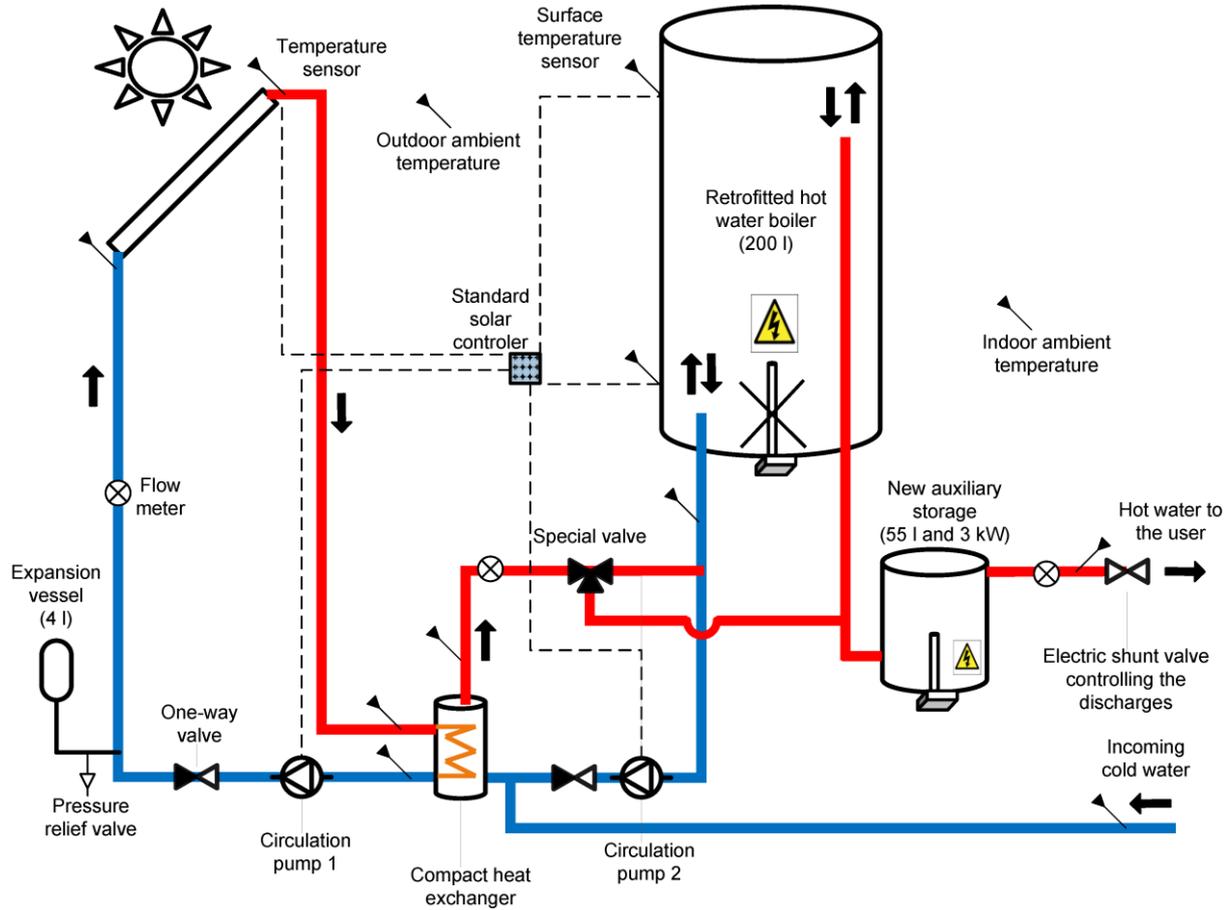
تنفيذا للخطة الاستراتيجية للحكومة الليبية للثلاثين سنة القادمة (2020-2050) والتي تقضي بزيادة مساهمة الطاقات المتجددة والصدقية للبيئة في خليط الطاقة الكهربائية لعام 2030 ليصل إلى 35% وليتجاوز 50% في عام 2050 [1-3]. يأتي ذلك لتحقيق عدة أهداف منها: الوفاء بالتزامات الدولة الليبية نحو المجتمع الدولي وما تم الاتفاق عليه في مؤتمر باريس، والحد من انبعاثات الغازات الدفينة وتلطيف أثارها السلبية على البيئة، المحافظة على الموارد الطبيعية للبلاد وأهما النفط واستغلاله في الصناعات البتر وكيميائية والذي سندر عائدا اقتصاديا واجتماعيا كبيرا عوضا عن حرقه لانتاج الطاقة الكهربائية، وكذلك التغلب على العجز في الطاقة الكهربائية التي تعاني منه البلاد منذ 2011 وإلى حتى الآن [4,5]. ويمكن تحقيق هذه الاستراتيجية عن طريق استغلال الطاقات المتجددة المتوفرة، وتحقيق أعلى كفاءة للطاقة في الإنتاج والاستهلاك. تكمن أهمية الموضوع في أن قطاع صناعة الطاقة الكهربائية في ليبيا، يعتبر القطاع الأكثر استهلاكاً للنفط (71 مليون برميل في العام) والأكثر تلوثاً من باقي القطاعات الأخرى (35.5% من مجموع انبعاثات غاز CO₂ [6-9]). ويستهلك القطاع المنزلي ما يقارب 36% من انتاج الطاقة الكهربائية في البلاد [10-12]، وان ما يقارب من 30% منها تستهلك في تسخين المياه (أي ما يقدر بحوالي 11% من إجمالي الطاقة الكهربائية المنتجة في ليبيا) كما هو موضح بالشكل (1)، وبالتالي فإن استخدام المنظومات الشمسية الحرارية لتسخين المياه ونسبة تغطية 80%، يمكن أن توفر على الشركة العامة للكهرباء ما يقدر بحوالي 511,617 MWh [13-15]، وهذا بدوره سيحول دون اطلاق كمية كبيرة من غاز ثاني اكسيد الكربون CO₂ في الهواء تقدر بحوالي 503.15 طنا من CO₂ في السنة، وسيتم توفير 148.87 طنا من زيت الديزل، وسيتم توفير ما قيمته 37,736 دولارا في السنة كتلفة الضرر البيئي الناجم عن انبعاثات CO₂ [16-17]. كما وأن ليبيا تقع ضمن نطاق "الحزام الشمسي" والتي يفضل فيها الاستخدامات الحرارية للطاقة الشمسية [13]، حيث يصل المجموع اليومي للإشعاع الشمسي حوالي 7.1 kWh/m²/day على الساحل وحوالي 8.1 kWh/m²/day على الجنوب [18-22].



الشكل (1): يوضح توزيع استهلاك الكهرباء في ليبيا

بُذلت العديد من الجهود في سبيل تحسين الأداء الحراري لمنظومات التسخين الحرارية الشمسية [23-32]، والتحليل الحراري لمثل هذه المنظومات مدرج في معظم الكتب الخاصة بالطاقة الشمسية [33,34]. تعتبر المجمعات الشمسية أساس منظومات الطاقة الشمسية الحرارية (الشكل 2). تُصنف المجمعات الشمسية استنادا على نطاق درجة حرارة المائع في المجمع الشمسي الى ثلاث فئات: منخفضة، ومتوسطة، ومرتفعة درجات الحرارة. فيكون مدى درجات الحرارة في المجمعات الشمسية المنخفضة درجات الحرارة يتراوح من بضعة درجات إلى 100 درجة مئوية فوق درجة حرارة الوسط المحيط. وتتميز المجمعات الشمسية المستوية بأفضل أداء في هذا المدى من درجات الحرارة، وتستخدم في تطبيقات التدفئة وتسخين المياه المنزلية والصناعية. بينما يكون مدى درجات الحرارة في فئة المجمعات الشمسية المتوسطة درجة الحرارة أعلى بقليل، حيث تتراوح درجات الحرارة بين 100 - 170 درجة مئوية فوق درجة حرارة الوسط المحيط. وتندرج تحت هذه الفئة، مجمعات التفرغ والمركبات الخفيفة. وتستخدم في تطبيقات التبريد وبعض العمليات الصناعية الحرارية. أما

المجمعات الشمسية التي تعمل في ظروف درجات حرارة أعلى من 170 درجة مئوية (البعض منها يصل إلى 3000 درجة مئوية)، فتصنف بأنها مجمعات مرتفعة درجات الحرارة. ويمكن الوصول إلى مثل هذه الدرجات من الحرارة المرتفعة باستخدام المركبات الشمسية القوية، والتي تستخدم في الصناعة وفي محطات إنتاج الطاقة الكهربائية [34,35]. تعتبر المجمعات الشمسية المستوية من أكثر المجمعات شيوعاً واستخداماً في التطبيقات المنخفضة درجات الحرارة، كالتطبيقات المنزلية مثلاً، وذلك لبساطة تصميمها، رخص ثمنها، لا تحتاج إلى صيانة كبيرة، وتعمل بكفاءة تصل في المعدل إلى 50%. كما يمتاز هذا النوع من المجمعات الشمسية عن الأنواع الأخرى، بأنه يقوم بتحويل كل من الأشعة المباشرة والمنتشرة بنفس الكفاءة. وتمثل هذه المجمعات أبسط أنواع المجمعات الشمسية، والتطبيقات الأساسية لهذه الوحدات يتمثل في تسخين المياه، تدفئة المباني، وبعض العمليات الحرارية الصناعية الخفيفة [36,37].

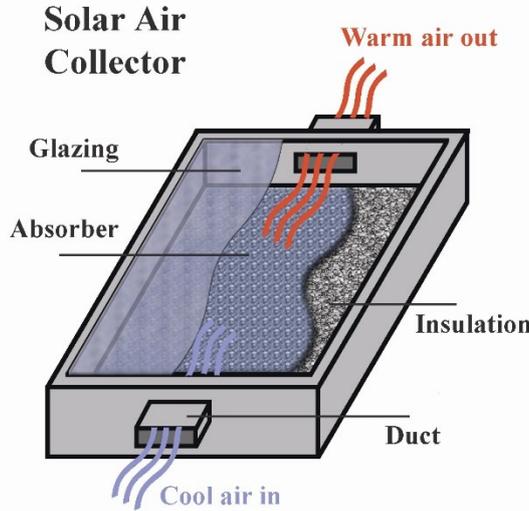


الشكل (2): رسم توضيحي لمنظومة تسخين مياه وتدفئة منزلية نموذجية مبيناً مكوناتها الأساسية [34]

أجرى Nahar and Gupta دراسة تجريبية لمعرفة تأثير المسافة الفاصلة بين الغطاء الزجاجي والصفحة الماصة في المجمعات الشمسية المستوية، وذلك من خلال تصميم ثلاثة مجمعات شمسية متماثلة بمسافات فاصلة مختلفة 25 و 50 و 150 mm. أظهرت النتائج أن متوسط الكفاءة الكلية للمجمعات كانت 52.5% و 57.8% و 54.1% المناظرة للمسافات الفاصلة 25 و 50 و 150 mm على التوالي. وعليه فإن المسافة الفاصلة المثالية هي 50 mm [38]. إجراء Chabane et al. دراسة تجريبية لتحديد تأثير معدل التدفق الكتلي للهواء على درجة حرارة الخروج وانتقال الحرارة في المجمع الشمسي والكفاءة الحرارية. أظهرت النتائج أن معدلات تدفق الكتلة لها تأثير كبير على الكفاءة الحرارية. كذلك تم الحصول على زاوية الميل المثالية والتي تراوحت بين 20 و 30 درجة [39]. كذلك قام Chabane and Moumni بتحقيق تجريبي في انتقال الحرارة وتحليل الطاقة لمجمع الشمسي المستوي الهوائي. أجريت الدراسة تجريبية على نموذج أولي مثبت على منصة الاختبارات التجريبية في جامعة بسكرة بالجزائر. كما أجريت دراسة تجريبية أخرى لتقييم الطاقة والانتقال الحراري لخمسة أيام من مجمعات الهواء الشمسي أحادية التدفق في ظل مجموعة واسعة من ظروف التشغيل. وفقاً لنتائج التجارب. تم تسجيل أعلى قيمة للكفاءة وكانت 58.30% مع معدل تدفق كتلي يساوي 0.0202 kg/s عند الساعة 13:15 [40]. درس Yilmaz and Er التحليل الحراري لمجمعات الهواء الشمسية المصممة على أساس كيفية التدفق وبمعدلات تدفق مختلفة باستخدام صفيحة من الألمنيوم. في هذه الدراسة، تمت مقارنة مجمع الهواء الشمسي بطريقتين مختلفتين (تدفق متوالي، تدفق متوازي) باستخدام طبقة من فحم الكوك فوق صفيحة الألمنيوم وفقاً

للظروف المناخية المحلية. أظهرت النتائج أن أعلى فرق في درجات الحرارة في القياسات التي تم إجراؤها عند سرعة الهواء 3 m/s كان 68 درجة مئوية في التدفق المتوازي وسجلت درجة 56 درجة مئوية للمجمع التسلسلي عند سرعة هواء 6.5 m/s. وفقًا للنتائج، عندما تم تشغيل النظام بسرعة 3 m/s، لوحظ أن المجمع المتوازي قدم نتائج جيدة، وعندما تم تشغيله بسرعة 6.5 م / ث، لوحظ أن المجمع المتوالي حقق نتائج جيدة. وبالتالي ومن أجل زيادة كفاءة المجمع يجب تحديد نوع تدفق الهواء والتطبيق وسرعة الهواء [41]. تم إجراء محاكاة عددية من قبل Al-Nuaimi and Elzer لتحديد عدد الأغشية الزجاجية ومعامل الانكسار لتحسين الكفاءة البصرية والكفاءة الحرارية للمجمع. تمت المحاكاة تحت الظروف الجوية لمدينة درنة لأعداد مختلفة من الأغشية (1 و 2 و 3) ومؤشرات انكسار مختلفة تبلغ 1.1 و 1.4 و 1.7. أظهرت النتيجة أنه مع زيادة معامل الانكسار، ينخفض أداء المجمع الشمسي. كما سجل الكسب الحراري أفضل ما يمكن عندما تكون عدد الأغشية المستخدمة 3 ويكون معامل الانكسار 1.1 [42]. طور Yasser and Sharif نموذجًا رياضيًا أحادي البعد للحالة المستقرة لدراسة السلوك الحراري لنوعين من مجمعات تسخين الهواء الشمسي المستوية. يسمح النموذج بدراسة تأثير الأبعاد التصميمية للمجمعات الشمسية على الأداء الحراري للمجمع وهدف البحث إلى الحصول على الطول المثالي للمجمعات الشمسية الهوائية. تم تنفيذ النموذج عدديًا باستخدام تقنية الفروق المحدودة بمعدل تدفق كتلة 0.01 kg/s لكل وحدة مساحة من المجمع وشدة الإشعاع الشمسي تساوي 900 W/m². أظهر التحليل الاقتصادي أن الطول يجب أن يكون أكبر من 2.5 m ولا يتعدى 6 m لكل أنواع المجمعات التي وضعت تحت الدراسة [43].

في منحنى آخر من تطبيقات المجمعات الشمسية الهوائية الهجينة قدم Nassar et al. عدة تصاميم لمجمع شمسي مستوي هوائي هجين لإنتاج الطاقة الحرارية والطاقة الكهربائية من الخلايا الشمسية التي تمثل الصفيحة الماصة. يعمل التصميم على تجنب ارتفاع درجة حرارة الكهروضوئية. تم إجراء تحليل الطاقة الكهروضوئية (PV/T). نموذج رياضي تم بناؤه من أجل تحديد نسبة المساهمة المثلى للخلايا الكهروضوئية في المجمع المقدم [44-46]. يأخذ النموذج في الاعتبار تباين الخصائص الكهربائية مع الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الخلية الكهروضوئية. وقد أظهرت نتائج المحاكاة التي أجريت على مجمع شمسي هوائي بطول 3 أمتار أن أقصى طاقة مستخرجة من المجمع تكون عندما تحتل الخلايا الشمسية مساحة 2.4 مترًا وبقيّة المجمع يكون مجمع شمسي مستوي تقليدي بصفيحة ماصة. علاوة على ذلك، فإنه لوحظ تحسن في الكفاءة الكهربائية وانخفاض في الكفاءة الحرارية إلا أن الكفاءة الكلية ازدادت عن ما إذا كانت هناك حالتين منفصلتين من المجمع الشمسي المستوي الهوائي ولوح الخلايا الكهروضوئية [47-50]. تتناول هذه الدراسة التحليل الحراري لمجموعة من تصاميم المجمعات الشمسية المستوية الهوائية. يمثل الشكل 3 رسماً تخطيطياً لمكونات المجمع الشمسي المستوي لتسخين الهواء.



الشكل (3): رسم توضيحي لمكونات المجمع الشمسي المستوي لتسخين الهواء

2. منهجية البحث

1.2 مفهوم الكفاءة الحرارية والكفاءة الكلية للمجمعات الشمسية

يمكن استنباط الأداء الحراري للمجمع الشمسي بواسطة الاتزان الحراري، والذي يعتبر الطاقة الداخلة هي الطاقة الشمسية، بينما الطاقة الخارجة تتمثل في الطاقة المفيدة والطاقة المفقودة. لمجمع شمسي مستوي بمساحة سطحية A_c ، يمكن كتابة معادلة الاتزان للحالة اللامستقرة كالتالي [33]:

$$I_c A_c (\tau \alpha) = q_u + q_{loss} + \frac{q_{ec}}{dt} \quad (1)$$

حيث: I_c - الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح المجمع الشمسي W/m^2 ، $(\tau \alpha)$ - الكفاءة البصرية للمجمع: τ ، نفاذية الغطاء الشفاف α ، امتصاصية الصفيحة الماصة، q_u - الطاقة المفيدة، وهي تتمثل في الحرارة المنتقلة من الصفيحة الماصة إلى المائع العامل W ، q_{loss} - معدل انتقال الحرارة بين الصفيحة الماصة والوسط المحيط، أو الفقد الحراري W ، q_{ec}/dt - معدل تغير الطاقة الداخلية لعناصر المجمع الشمسي W تمثل الكفاءة الحرارية اللحظية η_t ، نسبة الطاقة المفيدة q_u إلى الطاقة الشمسية الممتصة في الصفيحة الماصة H_a على وحدة المساحة السطحية للمجمع الشمسي A_c [33]:

$$\eta_t = \frac{q_u}{A_c H_a} \quad (2)$$

وبالتالي فإن الكفاءة الكلية للمجمع الشمسي η_c تكون حاصل ضرب الكفاءة البصرية في الكفاءة الحرارية، على الصورة التالية [33]:

$$\eta_c = \eta_{optical} \eta_t = \frac{H_t (\tau \alpha)}{H_t} \frac{q_u}{A_c H_a} = \frac{H_a}{H_t} \frac{q_u}{A_c H_a} \quad (3)$$

$$\eta_c = \frac{q_u}{A_c H_t}$$

2.2. التحليل الحراري الكلي للمجمعات الشمسية المستوية

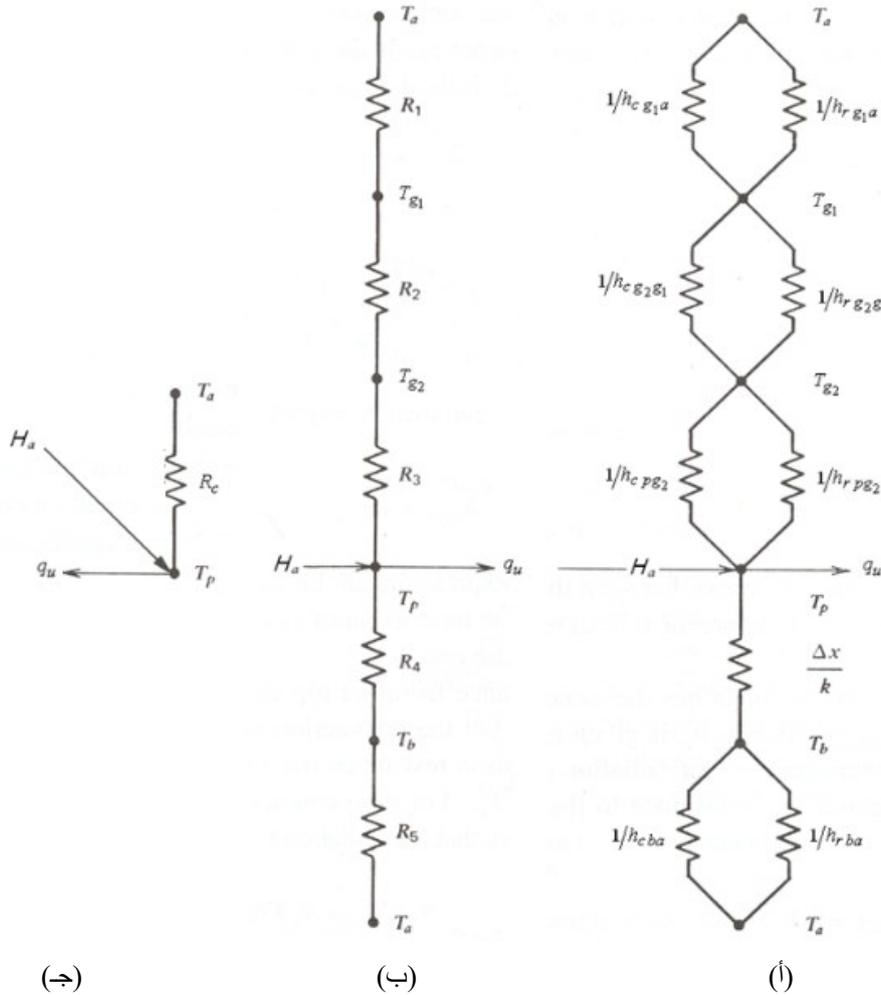
عندما تستقبل الصفيحة الماصة كمية من الطاقة الشمسية، فإن جليها ينتقل إلى الوسط العامل وتنتقل بعيداً كطاقة مفيدة. ومهما يكن فإن جزءاً من الطاقة يُفقد إلى الوسط المحيط بالطرق المختلفة لانتقال الحرارة. سيتناول هذا الجزء من الفصل تحليل الفوائد الحرارية، كبدائية لدراسة الأداء الحراري للمجمعات الشمسية. يمثل الشكل (4) شبكة المقاومات الحرارية لمجمع شمسي مسطح مزدوج الأغشية المبين في الشكل (3). لتبسيط التحليل نفرض الفرضيات التالية:

1. الأشعة الشمسية على المجمع متجانسة ومستقرة.
2. أداء المجمع في حالة استقرار.
3. الصفيحة الماصة والأغشية الشفافة عند درجات حرارة متجانسة.
4. فقدان الطاقة من أعلى المجمع خلال الأغشية الشفافة أحادي البعد.
5. فقدان الطاقة من أسفل المجمع خلال العازل السفلي أحادي البعد.
6. فقدان الطاقة من جوانب المجمع خلال العازل الجانبي أحادي البعد.
7. درجة حرارة المحيط حول كل المجمع متساوية.
8. الأغشية الشفافة لا تمتص الإشعاع الشمسي.
9. الخواص الحرارية ثابتة ولا تعتمد على درجة الحرارة.
10. ظل المجمع على الصفيحة الماصة مهمل.

في المجمعات الشمسية يمكن حساب الاتزان الحراري بجمع المقاومات الحرارية المبينة في الشكل (4) إلى مقاومة مكافئة واحدة R_c المبينة في الشكل (4-ج)، وبهذا فإن الطاقة المفقودة من المجمع يمكن صياغتها بالصورة المبسطة [33]:

$$q_{loss} = \frac{T_p - T_a}{R_c} = U_c A_c (T_p - T_a) \quad (4)$$

حيث: U_c - معامل الفقد الحراري الكلي، على أساس مساحة المجمع الشمسي A_c ، $W/m^2 K$ ، T_p - درجة حرارة الصفيحة الماصة، T_a - درجة حرارة الوسط المحيط. ولتجميع المقاومات المتعددة المبينة في الشكل (4-أ)، يتم في البداية تحليل الطاقة المفقودة خلال الأغشية الشفافة. للحالة المستقرة. إنتقال الحرارة من الصفيحة الماصة عند T_p إلى الغطاء الشفاف السفلي عند T_{g2} ، بواسطة الحمل والإشعاع وبمعاملتي حمل وإشعاع h_{rpg2} ، h_{cpg2} ، على التوالي. لمثل هذه الحالة يمكن صياغة الاتزان الحراري على الصورة التالية [33]:



الشكل (4): شبكة المقاومات الحرارية لمجمع مستوي ثنائي الأغشية الشفافة: (أ) بدلالة مقاومات التوصيل، الحمل والإشعاع، (ب) بدلالة المقاومات بين الأسطح، (ج) المقاومة الحرارية المكافئة.

$$q_{top\ loss} = q_{absorber\ plate\ to\ lower\ cover} = [h_{cpg_2} + h_{rpg_2}] A_c (T_p - T_{g_2}) \tag{5}$$

$$= \frac{T_p - T_{g_2}}{R_1} \tag{6}$$

$$R_1 = \frac{1}{(h_{cpg_2} + h_{rpg_2}) A_c} \tag{7}$$

حيث: h_{cpg_2} = معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الصفيحة الماصة والغطاء الشفاف السفلي،
 h_{rpg_2} = معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الصفيحة الماصة والغطاء الشفاف السفلي،

$$h_{rpg_2} = \frac{\sigma (T_p^2 + T_{g_2}^2) (T_p + T_{g_2})}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_{g_2} - 1}$$

حيث: $\epsilon_p, \epsilon_{g_2}$ ، انبعاثية الأشعة تحت الحمراء للصفيحة الماصة والغطاء الشفاف، على التوالي.
 تبعاً، فإنه يمكن كتابة معادلة الاتزان الحراري بين الغطاءين السفلي والعلوي، كالتالي

$$q_{top\ loss} = q_{lower\ cover\ to\ top\ cover} = [h_{cg_2g_1} + h_{rg_2g_1}] A_c (T_{g_2} - T_{g_1}) \tag{8}$$

$$R_2 = \frac{1}{(h_{cg_2g_1} + h_{rg_2g_1})A_c} \quad (9)$$

حيث: $h_{cg_2g_1}$ = معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الغطاء الشفاف السفلي والعلوي
 $h_{rg_2g_1}$ = معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الغطاء الشفاف السفلي والغطاء العلوي

$$h_{rg_2g_1} = \frac{\sigma (T_{g_2}^2 + T_{g_1}^2)(T_{g_2} + T_{g_1})}{1/\varepsilon_{g_2} + 1/\varepsilon_{g_1} - 1} \quad (10)$$

حيث: ε_{g_1} ، انبعاثية الأشعة تحت الحمراء للغطاء الشفاف العلوي.
 والفاقد الحراري من الغطاء الشفاف العلوي إلى الهواء المحيط T_a بواسطة الحمل، وأيضاً هناك تبادل بالإشعاع مع السماء عند درجة حرارة T_{sky} ، وبالتالي:

$$q_{top\ loss} = q_{top\ cover\ to\ ambient}$$

$$= [h_{cg_1a} + h_{rg_1a}] A_c (T_{g_1} - T_a) \quad (11)$$

$$R_3 = \frac{1}{(h_{cg_1a} + h_{rg_1a})A_c} \quad (12)$$

حيث: h_{cg_1a} = معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الغطاء الشفاف العلوي والهواء المحيط
 h_{rg_1a} = معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين الغطاء الشفاف العلوي والسماء

$$h_{rg_1a} = \frac{\sigma \varepsilon_{g_1} (T_{g_1}^4 - T_{sky}^4)}{(T_{g_1} - T_a)} \quad (13)$$

ولأن هذه المقاومات R_3, R_2, R_1 متصلة على التوالي، فإن المحصلة تكون:

$$R_{top} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{U_{top} A_c} \quad (14)$$

وبهذا تكون الطاقة المفقودة من الأسطح العلوية للمجمع الشمسي:

$$q_{top\ loss} = \frac{(T_p - T_a)}{R_{top}} = U_{top} A_c (T_p - T_a) \quad (15)$$

حيث U_{top} معامل الفقد الحراري الكلي العلوي للمجمع، على أساس المساحة A_c .
 وبنفس السياق يمكن الحصول على فقد الطاقة من الجهة السفلية للمجمع، كالتالي:

$$R_{bottom} = R_4 + R_5 = \frac{L_{ins}}{k_{ins} A_c} + \frac{1}{h_{cba} A_c} = \frac{1}{U_{bottom} A_c} \quad (16)$$

حيث: L_{ins} = سمك العازل السفلي
 k_{ins} = الموصلية الحرارية لمادة العازل السفلي
 h_{cba} = معامل انتقال الحرارة بالحمل بين العازل السفلي والهواء المحيط
 U_{bottom} = معامل الفقد الحراري الكلي من الجهة السفلية للمجمع، على أساس المساحة A_c .
 وعادة ما تفرض R_5 مساوية للصفر، وبالتالي تكون المقاومة بالتوصيل نتيجة العزل وبهذا:

$$U_{bottom} = \frac{1}{R_4} = \frac{k_{ins}}{L_{ins}} \quad (17)$$

وبمعلومية R_{bottom}, U_{bottom} ، يمكن إيجاد الطاقة المفقودة من أسفل المجمع،

$$q_{bottom\ loss} = \frac{(T_p - T_a)}{R_{bottom}} = U_{bottom} A_c (T_p - T_a) \quad (18)$$

يبقى لنا أن نُعرف الفاقد الحراري من جوانب المجمع، والتي يمكن تقديرها كالتالي:

$$q_{edge\ loss} = \frac{(T_p - T_a)}{R_{edge}} = U'_{edge} A_{perimeter} (T_p - T_a) \quad (19)$$

حيث: $A_{perimeter}$ = المساحة الجانبية للمجمع

U'_{edge} = معامل الفقد الحراري الكلي الجانبي، على أساس $A_{perimeter}$ ، (لأغراض التصميم يمكن اعتبار

$$U'_{edge} = 0.5 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ القيمة}$$

المعادلة السابقة يمكن إعادة صياغتها لكي يصبح معامل الفقد الحراري الجانبي على أساس A_c ، كالتالي:

$$U_{edge} A_c = U'_{edge} A_{perimeter}$$

وبهذا تكون الطاقة المفقودة من جوانب المجمع، على الصورة:

$$q_{edge\ loss} = \frac{(T_p - T_a)}{R_{edge}} = U_{edge} A_c (T_p - T_a) \quad (20)$$

وبمعرفة المقاومات الثلاثة R_{edge} ، R_{bottom} ، R_{top} ، كما هو مُعطى بالمعادلات (14)، (17)، (20):

$$R_c = \left(\frac{1}{R_{top}} + \frac{1}{R_{bottom}} + \frac{1}{R_{edge}} \right)^{-1} \quad (21)$$

$$U_c = U_{top} + U_{bottom} + U_{edge} \quad (22)$$

حيث: R_c = المقاومة الكلية للفقد الحراري للمجمع

U_c = معامل الفقد الحراري الكلي للمجمع، على أساس A_c .

عملياً، وللمجمعات الشمسية الجيدة التصنيع، فإن الفقد الحراري الجانبي يكون ضئيلاً مقارنة مع الفقد الحراري العلوي، ولأغراض التصميم يمكن إهماله. وبالتالي فإنه بالإمكان صياغة معادلة للطاقة المفيدة المكتسبة بدلالة معامل الفقد الحراري الكلي كالتالي:

$$q_u = A_c [H_a - U_c (T_p - T_a)] \quad (23)$$

المعادلات السابقة لتعيين معاملات الفقد الحراري، مخصصة فقط للنظام المبين في الشكل (3)، وفي حالة تغير النظام فإنه يجب الحصول على معادلات أخرى، ولكن على نفس أسلوب التقريب السابق تماماً. وعليه فعلى القارئ أن يكون ملماً بمعادلات الاتزان، وأن يتدرب على كيفية الحصول على معاملات الفقد لعدة أنواع أخرى من المجمعات الشمسية المستوية. طورت معادلة لحساب الفاقد الحراري العلوي، والتي يمكن استخدامها في الحسابات اليدوية أو على الحاسوب. هذه العلاقة تضبط منحنيات U_{top} لدرجات حرارة الصفيحة الماصة المتوسطة T_{pm} والتي تتراوح بين درجة حرارة الوسط

المحيط T_a إلى 200°C بنسبة خطأ $\pm 0.3 \text{ W/m}^2\text{K}$.

$$U_{top} = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{(T_{pm} - T_a)^e}{(N + f)} \right]} + \frac{1}{h_w} \right\}^{-1} + \frac{\sigma (T_{pm} + T_a) (T_{pm}^2 + T_a^2)}{A + B - N} \quad (24)$$

حيث: $A = (\varepsilon_p + 0.00591N h_w)^{-1}$

$$B = \frac{2N + f - 1 + 0.133 \varepsilon_p}{\varepsilon_g}$$

$$f = (1 + 0.089h_w - 0.1166h_w \varepsilon_p)(1 + 0.07866N)$$

$$C = 520(1 - 0.000051s^2) \quad \text{عندما } 0^\circ < s < 70^\circ$$

وفي حالة ما تكون $70^\circ < s < 90^\circ$ استعمل $s = 70^\circ$.

$$e = 0.430(1 - 100/T_{pm})$$

$$N = \text{عدد أغطية الزجاج}$$

$$s = \text{زاوية ميل المجمع، (درجة)}$$

$$\varepsilon_g = \text{انبعاثية الزجاج}$$

$$\varepsilon_p = \text{انبعاثية الصفيحة الماصة}$$

$$T_a = \text{درجة حرارة الوسط المحيط، (K)}$$

$$T_{pm} = \text{درجة الحرارة المتوسطة للصفيحة الماصة، (K)}$$

$$h_w = \text{معامل انتقال الحرارة بواسطة الرياح، (W/m}^2\text{K)}$$

2.3 التحليل الحراري الموضوعي العددي للمجمعات الشمسية المستوية

الشكل (5) يبين بعض تصاميم مجمعات تسخين الهواء. وأدرجت أيضاً في الشكل المعادلات الخاصة بمعامل الكفاءة للمجمع F' ومعامل الفقد الحراري الكلي U_c ، كما ورد في [46]. سوف تُتبع نفس الخطوات السابقة لتقييم الأداء الحراري للمجمعات الشمسية للموائع، ولتوضيح ذلك سوف يُدرس المجمع الشمسي المبين في الشكل (5) النوع (أ) وصولاً إلى اشتقاق معادلات F' ، U_c . ويستعرض **الشكل (6)** الاتزان الحراري للمجمع الشمسي والمقاومات الحرارية المرافقة. باعتبار جزء من مجمع شمسي على وحدة العرض العمودية على اتجاه سريان الهواء وبطول δx وارتفاع القناة S ، فإنه يمكن استنتاج معادلة اتزان الطاقة للحالة المستقرة لجميع عناصر المجمع كالتالي:

معادلة اتزان الطاقة للصفيحة الماصة بمساحة $(\delta x.1)$ [35]:

$$H_a \delta x = U_b \delta x (T_p - T_a) + h_{cpf} \delta x (T_p - T_f) + h_{rpg_1} \delta x (T_p - T_{g_1}) \quad (25)$$

معادلة اتزان الطاقة لتيار الهواء في حجم التحكم $(s.\delta x.1)$ [35]:

$$\dot{m} c_p \left(\frac{dT}{dx} \delta x \right) = h_{cpf} \delta x (T_p - T_f) + h_{cg_1f} \delta x (T_{g_1} - T_f) \quad (26)$$

معادلة اتزان الطاقة للغطاء الزجاجي بمساحة $(\delta x.1)$ تُعطى [35]:

$$h_{rpg_1} \delta x (T_p - T_{g_1}) = U_t \delta x (T_{g_1} - T_a) + h_{cg_1f} \delta x (T_{g_1} - T_f) \quad (27)$$

كما يمكن صياغة فيض الطاقة المفيدة المكتسبة q_u'' الناتج من انتقال الحرارة بالحمل من الغطاء الشفاف والصفيحة

الماصة، على الصورة التالية [35]:

$$q_u'' = h_{cpf} (T_p - T_f) + h_{cg_1f} (T_{g_1} - T_f) \quad (28)$$

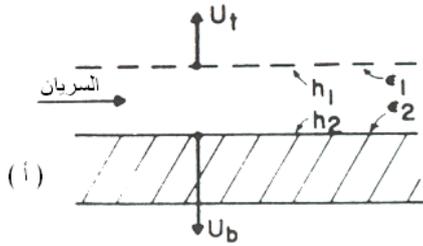
ولإيجاد $(T_p - T_f)$ ، $(T_{g_1} - T_f)$ ، يُعوض بالمعادلة (25) في المعادلة (27) فنحصل على درجة حرارة الغطاء

الزجاجي كدالة فقط في درجة حرارة المائع ودرجة حرارة المحيط والإشعاع الشمسي الممتص في الصفيحة الماصة، وبالمثل يُعوض بالمعادلة (27) في المعادلة (25) فنحصل على درجة حرارة الصفيحة

الماصة كدالة فقط في درجة حرارة المائع ودرجة حرارة المحيط والإشعاع الشمسي الممتص في الصفيحة الماصة $T_p = f(T_f, T_a, H_a)$ وتكون النتيجة كالتالي:

$$(T_p - T_f) = \frac{\left\{ H_a (U_t + h_{rpg1} + h_{cg1f}) - \left((T_f - T_a) (U_t h_{rpg1} + U_t U_b + U_b h_{rpg1} + U_b h_{cg1f}) \right) \right\}}{(U_t + h_{cg1f} + h_{rpg1})(U_b + h_{cpf} + h_{rpg1}) - h_{rpg1}^2} \quad (28)$$

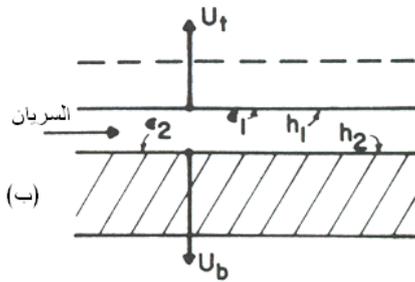
$$(T_{g1} - T_f) = \frac{\left\{ H_a h_{rpg1} - \left((T_f - T_a) (U_t h_{cpf} + U_t U_b + U_t h_{rpg1} + U_b h_{rpg1}) \right) \right\}}{(U_t + h_{cg1f} + h_{rpg1})(U_b + h_{cpf} + h_{rpg1}) - h_{rpg1}^2} \quad (29)$$



$$U_c = \frac{(U_b + U_t)(h_1 h_2 + h_1 h_r + h_2 h_r) + U_b U_t (h_1 + h_2)}{h_1 h_r + h_2 U_t + h_2 h_r + h_1 h_2}$$

$$F' = \frac{h_r h_1 + h_2 U_t + h_2 h_r + h_1 h_2}{(U_t + h_r + h_1)(U_b + h_2 + h_r) - h_r^2}$$

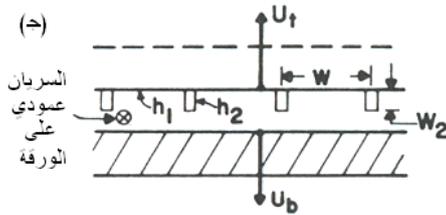
$$h_r = \frac{\sigma (T_1^2 + T_2^2)(T_1 + T_2)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1}$$



$$U_c = U_t + U_b$$

$$F' = \frac{1}{1 + \frac{U_t}{h_1 + \frac{1}{\frac{1}{h_2} + \frac{1}{h_r}}}}$$

(أ) كما في (أ)

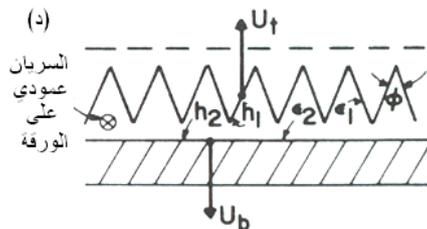


$$F' = F'_0 \left[1 + \frac{1 - F'_0}{\frac{F'_0}{F_p} + \frac{W h_1}{2 W_2 h_2 F_F}} \right]$$

(ب) في $F' = F'_0$

كفاءة زعفة الصفحة = F_p

كفاءة زعفة الرعفة = F_F



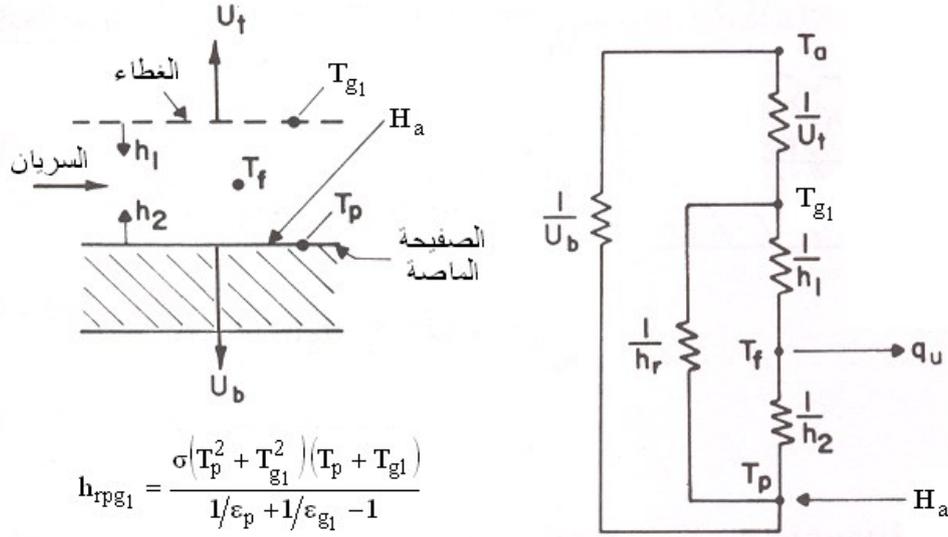
$$U_c = U_t + U_b$$

U_t على أساس مساحة السقف

$F' = F'$ كما في (ب) ولكن h_1

تبدل إلى $h_1 / \sin \phi/2$

الشكل (5): تصاميم لمجمعات تسخين الهواء ومعاملات الكفاءة والفقد الحراري الكلي. المجمعات (ب)، (ج)، (د) تم فرض أن الفقد الحراري السفلي يتم عند نفس درجة حرارة الفقد الحراري العلوي [34]



$$h_{rpg1} = \frac{\sigma(T_p^2 + T_{g1}^2)(T_p + T_{g1})}{1/\epsilon_p + 1/\epsilon_{g1} - 1}$$

الشكل (6): مجمع لتسخين الهواء نوع (أ) وشبكة المقاومات الحرارية [33]

وبتعويض المعادلتين (28) و (29) في المعادلة (27)، تُوضع الصيغة النهائية للمعادلة الناتجة على الصورة:

$$q''_u = F' [H_a - U_c (T_f - T_a)] \quad (30)$$

وبمناظرة الحدود، فيكون الحد الذي مع H_a يمثل F' والحد الذي مع $(T_f - T_a)$ يمثل $F'U_c$ ومنه يمكن

استنباط التالي [35]:

$$F' = \frac{h_{rpg1} h_{cg1f} + U_t h_{cpf} + h_{rpg1} h_{cpf} + h_{cg1f} h_{cpf}}{(U_t + h_{cg1f} + h_{rpg1})(U_b + h_{cpf} + h_{rpg1}) - h_{rpg1}^2} \quad (31)$$

$$U_c = \frac{(U_t + U_b)(h_{rpg1} h_{cg1f} + h_{rpg1} h_{cpf} + h_{cg1f} h_{cpf}) + U_t U_b (h_{cg1f} + h_{cpf})}{h_{rpg1} h_{cg1f} + U_t h_{cpf} + h_{rpg1} h_{cpf} + h_{cg1f} h_{cpf}} \quad (32)$$

معادلات المجمع نوع (ب) المدرجة في الشكل (3)، أُشتقت بنفس الطريقة ولكن للتبسيط، تم فرض أن الفقد الحراري من الأسفل يحدث عند درجة حرارة الصفحة الماصة. أُشتق Nassar كلاً من U_c , F' لنفس المجمع في حالة أن الفقد

الحراري السفلي يحدث عند درجة حرارة الصفحة السفلية للمجمع T_b ، وكانت النتيجة على الصورة التالية [35]:

$$U_c = \left(U_t + U_b \frac{F''}{F'} \right) \quad (33)$$

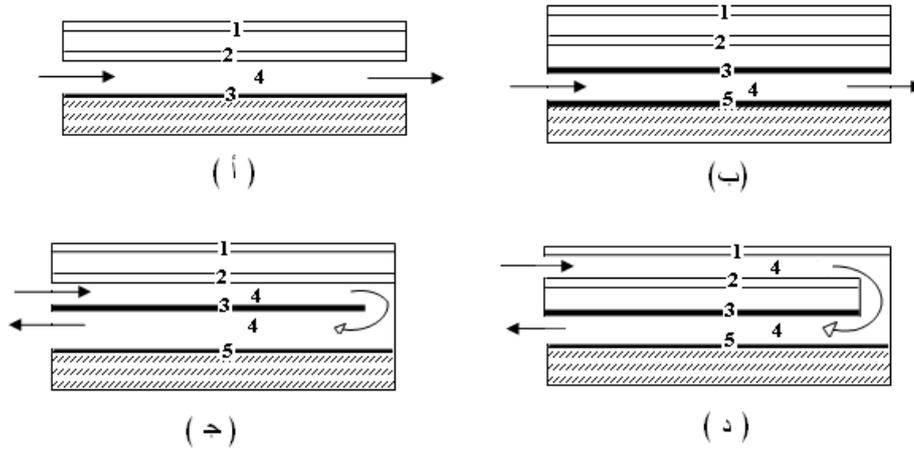
$$F'' = \frac{U_t h_{cpf} + h_{rpb} h_{cpf} + h_{rpb} h_{cbf} + h_{cpf} h_{cbf}}{(U_t + h_{cpf} + h_{rpb})(U_b + h_{cbf} + h_{rpb}) - h_{rpb}^2} \quad (34)$$

$$F' = \frac{U_b h_{cpf} + h_{rpb} h_{cpf} + h_{rpb} h_{cbf} + h_{cpf} h_{cbf}}{(U_t + h_{cpf} + h_{rpb})(U_b + h_{cbf} + h_{rpb}) - h_{rpb}^2} \quad (35)$$

3. النتائج والمناقشة

أوردت الدراسة المشار إليها أعلاه مجموعة المعادلات الخاصة بالخصائص الحرارية U_c , F' ، وتوزيع درجات الحرارة لعناصر أربعة أنواع من المجمعات الشمسية المبينة في الشكل (7)، للحالتين المستقرة واللامستقرة. مقارنة لتوزيع درجات حرارة الأنواع المدروسة مثلت بيانياً في الشكل (8)، وذلك عند: معدل تدفق الهواء عبر المجمع

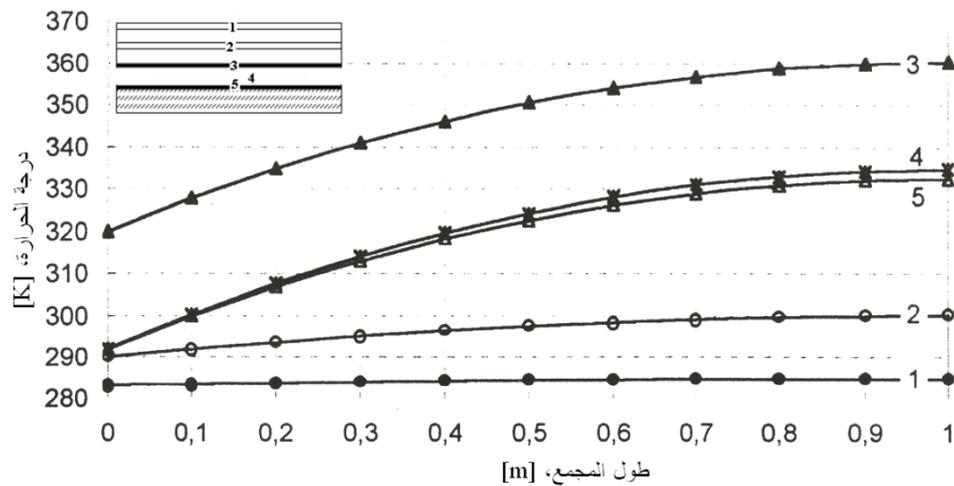
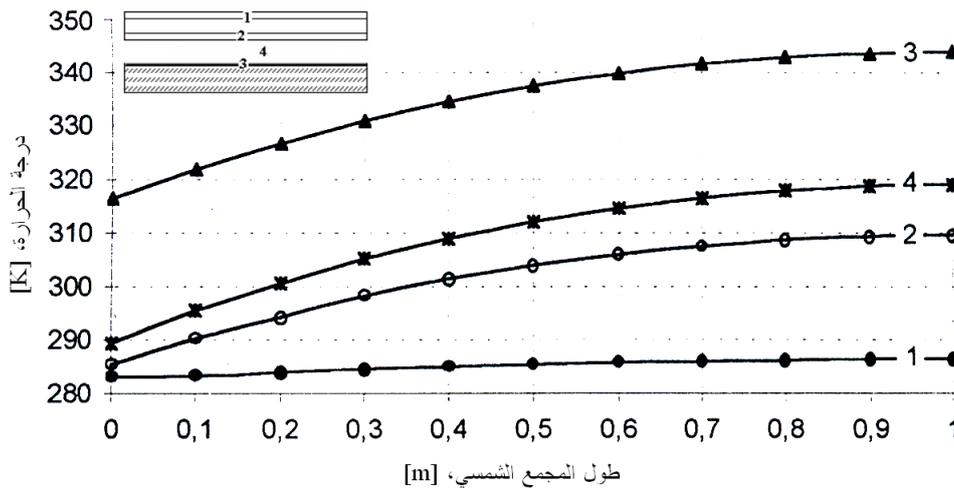
$$.T_{fi} = 20, T_a = 10^\circ C, H_t = 1000W/m^2, \dot{m} = 29kg/m^2h$$

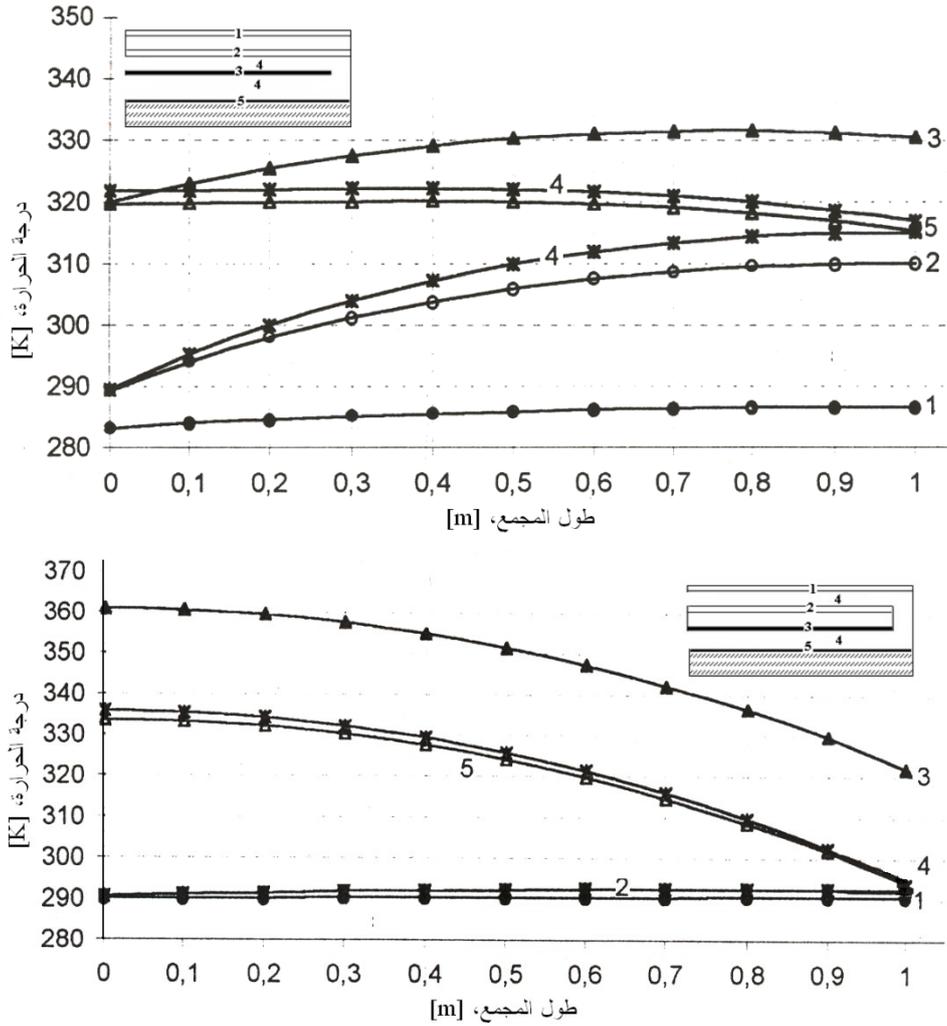


الشكل (7): أشكال مختلفة من المجمعات الشمسية الهوائية المستوية واتجاه سريان الهواء. الأرقام المدرجة في الشكل تدل على التوالي على: الغطاء الزجاجي الأول، الغطاء الزجاجي الثاني، الصفيحة الماصة، الهواء، الصفيحة السفلى، وهذه الأرقام مطابقة لدرجات الحرارة الموضعية في الشكل (8)

يستعرض الشكل (8) تمثيلاً بيانياً لدرجات الحرارة الموضعية للمجمعات الشمسية المبينة في الشكل (7) وبنفس

ترتيب الأرقام.





الشكل (8): درجات الحرارة الموضعية لبعض تصاميم المجمعات الشمسية الهوائية المستوية

4. الاستنتاجات

تم في هذه الدراسة استعراض العمليات الرياضية والعديدية لاجراء التحليل الحراري الاحادي البعد المستقر لمجموعة من المجمعات الشمسية الحرارية المستوية لتسخين الهواء. كما تم اجراء التحليل الحراري الموضوعي لأربعة انواع من المجمعات الشمسية الشائعة الاستخدام للحصول على توزيع درجات الحرارة في اتجاه سريان المائع. تبين من التحليل أن المجمع من النوع الرابع هو الافضل حراريا يليه المجمع من النوع الثاني. غير ان بساطة التصميم وقلة الفاقد الهيدروليكي يجعل من المجمع الثاني الاكثر انتشارا في سوق الطاقة العالمية. في ختام هذه الدراسة، تم استعراض العمليات الرياضية والعديدية المستخدمة لإجراء تحليل حراري ثابت البعد لمجموعة متنوعة من المجمعات الشمسية الحرارية المستوية المستخدمة في تسخين الهواء. وقد تم أيضاً إجراء تحليل حراري موضوعي لأربعة أنواع من المجمعات الشمسية الأكثر شيوعاً، بهدف تحديد توزيع درجات الحرارة عبر اتجاه تدفق المائع. توصلت نتائج التحليل إلى أن المجمع من النوع الرابع يتميز بأداء حراري ممتاز، يليه المجمع من النوع الثاني. وعلى الرغم من ذلك، يُعدُّ المجمع من النوع الثاني الأكثر انتشاراً على نطاق واسع في سوق الطاقة العالمي بسبب تصميمه البسيط وقلة الفاقد الهيدروليكي. تظهر هذه النتائج أهمية تطوير وتحسين المجمعات الشمسية الحرارية لتحقيق أقصى كفاءة حرارية وتوزيع مثلى لدرجات الحرارة، مما سيساهم في دعم استدامة استخدام الطاقة الشمسية في مجال تسخين الهواء وتوليد الطاقة. تمثل هذه الدراسة خطوة مهمة نحو تعزيز فهمنا لأداء المجمعات الشمسية والعوامل المؤثرة في تحسينها، وتمثل إشارة إلى اتجاهات مستقبلية محتملة في مجال الطاقة المستدامة. هذه النتائج تعكس جهود البحث والتحليل الدقيقة، وتشجع المزيد من الأبحاث والتطوير في هذا المجال سيسهم في تحقيق تقدم مستدام وإيجابي نحو تحقيق هدفنا من استغلال الطاقة الشمسية بكفاءة وفعالية.

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

التمويل: لم يفتق هذا البحث أي تمويل خارجي.

بيان توفر البيانات: لا ينطبق.

شكر وتقدير: نود أن ننهت هذه الفرصة للتعبير عن خالص امتناني لجامعة وادي الشاطي على دعمهم الذي لا يقدر بثمن خلال بحثنا.

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

References

- [1] Y. Nassar et al., "Regression Model for Optimum Solar Collectors' Tilt Angles in Libya," in *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023)*, Gaza Strip, Palestine, 2023.
- [2] A. M'Baye, "Review on Energy Audit: Benefits, Barriers, and Opportunities," *American Journal of Energy and Natural Resources*, vol. 1, no. 1, pp. 45–58, 2022.
- [3] A. M'Baye, "Energy Performance Management in an Industrial Site: Definition and Application of a Specific Methodology for Carbon Emissions Reduction," *Low Carbon Economy*, vol. 13, no. 3.
- [4] M. M. Khaleel, S. A. Abulifa, and A. A. Abulifa, "Artificial intelligent techniques for identifying the cause of disturbances in the power grid," *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, vol. 3, no. 1, pp. 19–31, 2023.
- [5] M. M. Khaleel, Z. Yusupov, M. T. Güneşer, A. A. Abulifa, A. A. Ahmed, and A. Alsharif, "The effect of PEMFC on power grid using advanced equilibrium optimizer and particle swarm optimisation for voltage sag mitigation," in *2023 IEEE 3rd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, 2023, pp. 755–760.
- [6] M. Khaleel, N. El-Naily, H. Alzargi, M. Amer, T. Ghandoori, and A. Abulifa, "Recent progress in synchronization approaches to mitigation voltage sag using HESS D-FACTS," in *2022 International Conference on Emerging Trends in Engineering and Medical Sciences (ICETEMS)*, 2022, pp. 186–190.
- [7] Y. Nassar, K. Aissa, and S. Alsadi, "Air Pollution Sources in Libya," *Journal of Ecology and Environmental Sciences*, vol. 5, pp. 63–79, 2017.
- [8] A. Alkhazmi and M. Hamdan, "An Experimental and Theoretical Study of the Performance of the Thermal Storage Using Phase Change Materials," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 5, pp. 60–73, 2023.
- [9] M. Abdunnabi, N. Etiab, Y. Nassar, H. El-Khozondar, and R. Khargotra, "Energy savings strategy for the residential sector in Libya and its impacts on the global environment and the nation economy," in *Advances in Building Energy Research*, 2023.
- [10] M. Khaleel, Z. Yusupov, A. A. Ahmed, A. Alsharif, A. Alarga, and I. Imbayah, "The effect of digital technologies on energy efficiency policy," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 1, pp. 1–8, 2023.
- [11] M. Eteriki, W. El-Osta, Y. Nassar, and H. El-Khozondar, "Effect of Implementation of Energy Efficiency in Residential Sector in Libya," in *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability CRES 2023*, Gaza-Palestine, 2023.
- [12] M. K. A. Ghayth and Z. Yuspov, "Performance enhancement of PV array utilizing Perturb & Observe algorithm," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 2, pp. 29–37, 2023.
- [13] A. Makhzom et al., "Estimation of CO2 emission factor for Power Industry Sector in Libya," in *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability*, Gaza-Strip, Palestine.
- [14] Y. Nassar, M. Salem, K. Iessa, I. Alshareef, K. Amer, and M. Fakher, "Estimation of CO 2 emission factor for the energy industry sector in libya: a case study," *Environment, Development and Sustainability*, pp. 1–29, 2021.
- [15] M. Khaleel et al., "Effect of fuel cells on voltage sag mitigation in power grids using advanced equilibrium optimizer and particle swarm optimization," *Jordan Journal of Electrical Engineering*, vol. 9, no. 2, pp. 175–188, 2023.
- [16] Y. Fathi, K. Aissa, and S. Alsadi, "Estimation of Environmental Damage Costs from CO2e Emissions in Libya and the Revenue from Carbon Tax Implementation," *Low Carbon Economy*, vol. 8, pp. 118–132, 2017.
- [17] S. Mohammed et al., "Carbon and Energy Life Cycle Analysis of Wind Energy Industry in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 50–68, 2023.
- [18] M. M. Khaleel, M. R. Adzman, and S. M. Zali, "An integrated of hydrogen fuel cell to distribution network system: Challenging and opportunity for D-STATCOM," *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 7073, 2021.

- [19] A. Salem, Y. Nassar, and Y. Yousif, *The Choice of Solar Energy in the Field of Electrical Generation-Photovoltaic or Solar Thermal-For Arabic Region*. World Renewable Energy Congress VIII, Colorado USA, 2004.
- [20] M. Khaleel, Z. Yusupov, N. Yasser, and H. El-Khozondar, "Enhancing Microgrid performance through hybrid energy storage system integration: ANFIS and GA approaches," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 2, pp. 38–48, 2023.
- [21] Y. Nassar et al., "Solar and wind atlas for Libya," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability*, vol. 1, no. 3, pp. 27–34, 2023.
- [22] M. Khaleel, Z. Yusupov, Y. Nassar, H. El-Khozondar, A. Ahmed, and A. Alsharif, "Technical challenges and optimization of superconducting magnetic energy storage in electrical power systems," *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol.5, p. 100223, 2023.
- [23] M. Abdunnabi, I. Rohuma, E. Endya, and E. Belal, "Review on solar water heating in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 7, no. SI, pp. 1–27, 2018.
- [24] M. J. R. Abdunnabi, K. Dadesh, O. R. Mrehel, and N. El-shamekh, "Effect of full implementation of domestic solar water heaters on the electricity peak load in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 5, no. 2, pp. 33–43, 2016.
- [25] Y. Nassar, "Thermodynamic Analysis and Optimization Procedure for Domestic Solar Water Heating System," *American Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 2, no. 6, pp. 92–99, 2015.
- [26] I. Tawil and K. Agha, "Possibilities of Domestic Solar Water Heating in Improving Energy Demand Management in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 18–30, 2017.
- [27] A. Algareu, M. Abdunnabi, M. Mabruk, and A. Elmaghribi, "Legionella Bacteria Activity investigation in Domestic Water Heating Systems: Tripoli-Libya as a case study," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 11–20, 2021.
- [28] S. Abdulwahab, Y. F. Nassar, H. J. El-Khozondar, M. Khaleel, A. A. Ahmed, and A. Alsharif, "Meeting solar energy demands: Significance of transposition models for solar irradiance," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 3, pp. 90–150, 2023.
- [29] M. J. R. Abdunnabi, M. Al-Ahjal, and I. O. Rahoma, "Optimum sizing of residential active solar water heating systems for Libyan families," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 6, no. 1, pp. 18–26, 2017.
- [30] M. Abdunnabi and D. Loveday, "In-Situ Measurements of the Performance of Thermosyphon Solar Water Heating Systems in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 1–9, 2014.
- [31] M. J. R. Abdunnabi and M. A. Musa, "Towards strategic plan for wide spreading of solar water heaters in Libya," *jsesd*, vol. 2, no. 1, 2021.
- [32] N. Alkishriwi, C. Schorn, and D. Theis, "The International Standards for Solar Thermal Collectors and Components as a Medium of Quality Assurance," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 3, no. 1, pp. 10–27, 2014.
- [33] Y. Nassar, *Solar energy engineering active applications*. Sebha - Libya; Sabha University, 2006.
- [34] J. Duffie and W. Beckman, *Solar engineering of thermal processes, 4th ed*. John Wiley & Sons Inc, 2013.
- [35] Y. Nassar, *A design procedure of a solar heating system for domestic application on the base of flat-plate solar air-heating collector*. Moscow-Russia, 1999.
- [36] Y. Nassar and S. Salem, "The utilization concept of the thermal storage in solar heating systems," in *International forum on renewable energies -FIRE*, Tetuan, Morocco, 2002.
- [37] M. Khaleel, Z. Yusupov, N. Yasser, H. Elkhazondar, and A. A. Ahmed, "An integrated PV farm to the unified power flow controller for electrical power system stability," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 1, pp. 18–30, 2023.
- [38] N. M. Nahar and M. P. Gupta, "Studies on gap spacing between absorber and cover glazing in flat plate solar collectors," *Int. J. Energy Res.*, vol. 13, no. 6, pp. 727–732, 1989.
- [39] F. Chabane, "Experimental study of heat transfer and an effect the tilt angle with variation of the mass flow rates on the solar air heater," *Int J Sci Eng Invest*, vol. 9, no. 1, pp. 51–61, 2012.
- [40] F. Chabane and N. Moummi, "Heat transfer and energy analysis of a solar air collector with smooth plate," *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, vol. 66, no. 1, p. 10901, 2014.
- [41] A. Yilmaz and A. Er, "Thermal analysis of solar air collectors designed in different types with different flow rates using aluminum cans," *Energy Sources Recovery Util. Environ. Eff.*, vol. 44, no. 2, pp. 5545–5561, 2022.
- [42] M. M. Khaleel, A. A. Ahmed, and A. Alsharif, "Artificial Intelligence in Engineering," *Brilliance: Research of*

- Artificial Intelligence*, vol. 3, no. 1, pp. 32–42, 2023.
- [43] A. Al-Nuaimi and R. Elzer, "Study of the effect of cover characteristics on the performance of flat-plate solar collector," in *the Arab conference on Renewable ad Sustainable Energy*, 2023.
- [44] N. Yasser and M. Sharif, "Economic and energetic analysis for optimizing the length of flat-plate solar air heating collectors," *Applied Mechanics and Materials*, pp. 810–816, 2014.
- [45] M. M. Khaleel, A. Alsharif, and I. I. K. Imbayah, "Renewable energy technologies: Recent advances and future predictions," *African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS)*, pp. 58–64, 2022.
- [46] N. Yasser, S. Alsadi, K. Amer, A. Yousef, and M. Fakher, "Numerical Analysis and Optimization of Area Contribution of The PV Cells in the PV/T Flat-Plate Solar Air Heating Collector," *Solar Energy Research Update*, vol. 6, pp. 43–50, 2019.
- [47] N. Yasser, K. Amer, H. El- Khozondar, A. Ahmed, A. Alsharif, and M. Khaleel, "Thermal-electrical Analysis of a New Hybrid PV/T Flat-Plate Solar Collector," in *the 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023)*, Gaza Strip, Palestine, 2023.
- [48] F. Nassar and E. Sergievsky, "Heat transfer in flat-plate solar air-heating collectors," *WIT Transactions on Engineering Sciences*, vol. 27, pp. 575-584, 2000.
- [49] M. M. Khaleel, S. A. Abulifa, I. M. Abdaldeam, A. A. Abulifa, M. Amer, and T. M. Ghandoori, "A current assessment of the renewable energy industry," *African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS)*, vol. 2, no. 1, pp. 122–127, 2023.
- [50] F. Alasali, A. S. Saidi, N. El-Naily, O. Alsmadi, M. Khaleel, and I. Ghirani, "Assessment of the impact of a 10-MW grid-tied solar system on the Libyan grid in terms of the power-protection system stability," *Clean Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 389–407, 2023.