

RENEWABLE ENERGY

Optimum Number of Glass Covers of Thermal Flat Plate Solar Collectors

Yasser Nassar¹ , Abubaker Alatrash^{2,*} , Rahma Elzer³ , Ali Alkhazmi⁴ , Hala El-Khozondar⁵ ,
Abdulgader Alsharif⁶ , Abdussalam Ahmed⁷ , Mohamed Khaleel⁸ 

¹ Research Center for Renewable Energy and Sustainable Development, Wadi Alshatti University, Brack, Libya

² Mechanical and Aerospace Engineering, Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada

³ Physics Department Faculty of Science, Derna University, Derna-Libya

⁴ Mechanical & Renewable energy, Eng, Wadi Alshatti University, Brack – Libya

⁵ Dept. of Electrical Eng. and Smart Systems, Islamic Univ. of Gaza, Gaza Strip, Palestine

⁶ Electrical Engineering School, Faculty of Engineering, Universiti Teknologi Malaysia (UTM), Malaysia

⁷ Mechanical Engineering Department, Bani Waleed University, Bani Waleed, Libya

⁸ Electrical-Electronics Engineering Department, Faculty of Engineering, Karabuk University, Karabuk, Turkey

ARTICLE HISTORY

Received 13 November 2023
Revised 10 October 2023
Accepted 14 October 2023
Online 01 January 2024

KEYWORDS

Solar energy;
Flat-plate solar collector;
Efficiency;
Optical efficiency;
Thermal performance;
Optimum number of transparent covers.

ABSTRACT

Within the framework of Libya's pursuit to harness solar energy and integrate it into the national energy mix, surpassing a 50% contribution from renewable energies by 2050, this study focuses on the optimal utilization of solar energy, both photovoltaic and thermal, along with wind energy. The research presents an exemplary design for flat solar collectors, emphasizing the requisite number of transparent covers to achieve optimal thermal performance. Simulations were conducted under specified weather conditions, including solar irradiance of 100W/m^2 , ambient air temperature of 30°C , and wind speed of 3m/s . Operating conditions were set at a flow rate of $100\text{m}^3/\text{h}$, with the inlet air temperature equal to the ambient air temperature. The efficiency equation provided by the manufacturer, a linear function considering the fluid inlet temperature, ambient air temperature, and solar irradiance on the inclined collector surface at a 30° angle south, was adopted. Consequently, a novel design for flat solar collectors, incorporating both air and water channels, was proposed. The design was delineated based on temperature differentials between the absorber plate and ambient air in distinct intervals: the range ($5-0^\circ\text{C}$) without any cover, the range ($40-5^\circ\text{C}$) with one cover, the range ($85-40^\circ\text{C}$) with two covers, the range ($140-85^\circ\text{C}$) with three covers, the range ($180-140^\circ\text{C}$) with four covers, and the range ($>180^\circ\text{C}$) with five covers. This distribution was applied to an air-based flat solar collector of 5m length, resulting in the following configuration: no cover for distances ($0-0.1\text{m}$), one cover for distances ($0.1-2.3\text{m}$), two covers for distances ($2.3-3.9\text{m}$), and three covers for the remaining distance ($3.9-5.0\text{m}$).

العدد الأمثل للأغطية الزجاجية لمجمعات الطاقة الشمسية الحرارية المسطحة

ياسر نصار¹، أبو بكر الأطرش^{2,*}، رحمة الزير³، علي الخازمي⁴، هالة الخزندار⁵، عبد القادر الشريف⁶، عبد السلام أحمد⁷، محمد خليل⁸

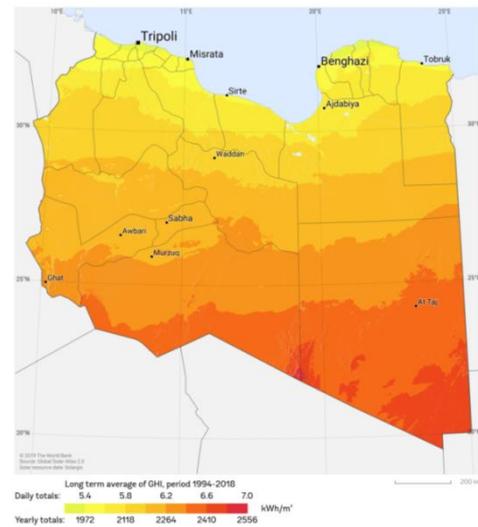
الكلمات المفتاحية	المخلص
الطاقة الشمسية	في إطار سعي الدولة الليبية لاستغلال الطاقة الشمسية وادخالها في مزيج الطاقة المنتجة في البلاد ليتعدى نصيب مساهمة الطاقات المتجددة أكثر من 50% في عام 2050، والذي سيكون من خلال الاستخدام الأمثل للطاقة الشمسية (طاقة فوتوضوئية وطاقة حرارية) وكذلك طاقة الرياح. قدمت هذه الدراسة التصميم المثالي للمجمعات الشمسية المسطحة من حيث عدد الأغطية الشفافة اللازمة لتحقيق أفضل أداء حراري للمجمع الشمسي المسطح. تمت المحاكاة عند الظروف الجوية المفروضة من شدة اشعاع شمسي 100W/m^2 ودرجة حرارة الهواء الجوي 30°C وسرعة رياح 3m/s . وكانت الظروف التشغيلية عند معدل تدفق $100\text{m}^3/\text{h}$. ودرجة دخول الهواء الى المجمع مساوية لدرجة حرارة الهواء الجوي، وأُعتمدت معادلة الكفاءة الواردة من المُصنِّع، والتي كانت دالة خطية في الظروف الجوية والمتمثلة في درجة حرارة دخول المانع، ودرجة حرارة الهواء الجوي، وشدة الاشعاع الشمسي الساقط على سطح المجمع المائل بزاوية 30° جنوبا. وعليه تم اقتراح تصميم جديد للمجمعات الشمسية المستوية بشقيها الهوائي والمائي حيث تم تمثيلها في فترات فرق درجات حرارة الصفيحة الماصة والهواء الجوي وكانت كالتالي: الفترة ($5-0^\circ\text{C}$) بدون غطاء، الفترة ($40-5^\circ\text{C}$) غطاء واحد، الفترة ($85-40^\circ\text{C}$) غطائين، الفترة ($140-85^\circ\text{C}$) ثلاثة أغطية، الفترة ($180-140^\circ\text{C}$) أربعة أغطية، الفترة ($>180^\circ\text{C}$) خمسة أغطية. تم تطبيق هذا التوزيع على مجمع شمسي مسطح هوائي بطول 5m وكانت النتيجة كالتالي: المسافة ($0.1-0\text{m}$) تكون بدون غطاء، المسافة ($2.3-0.1\text{m}$) تكون بغطاء واحد، المسافة ($3.9-2.3\text{m}$) تكون بغطائين، وأخيرا المسافة المتبقية ($5.0-3.9\text{m}$) تكون بثلاثة أغطية.

وتوفير الماء الساخن لتلبية الاحتياجات الصحية من خدمات الطاقة الأساسية. في ليبيا، يعتبر قطاع صناعة الطاقة الكهربائية الأكثر استهلاكاً للنفط (71 مليون برميل في العام) والأكثر تلوثاً من باقي القطاعات الأخرى (35.5% من مجموع انبعاثات غاز CO₂ [8]). ويستهلك القطاع المنزلي ما يقارب 36% من إنتاج الطاقة الكهربائية في البلاد، وان ما يقارب من 30% منها تستهلك في تسخين المياه [9] (أي ما يقدر بحوالي 11% من إجمالي الطاقة الكهربائية المنتجة في ليبيا) وحوالي 6% تستهلك في أجهزة تكييف الهواء - 2.22% للتدفئة و3.78% للتبريد [10] (أي ما يقدر بحوالي 0.8% و1.4% من إجمالي الطاقة الكهربائية المنتجة، على التوالي)، كما هو موضح بالشكل (2)، وبالتالي فإن استخدام المنظومات الشمسية الحرارية لتسخين المياه وبنسبة تغطية 80% [5]، يمكن أن توفر على الشركة العامة للكهرباء ما يقدر بحوالي 511,617 MW [11]، وهذا بدوره سيحول دون إطلاق كمية كبيرة من غاز ثاني أكسيد الكربون CO₂ في الهواء تقدر بحوالي 503,150 طناً من CO₂ في السنة، وسيتم توفير 148,870 طناً من زيت الديزل، وسيتم توفير ما قيمته 37.736 مليون دولار في السنة تكلفة الضرر البيئي الناجم عن انبعاثات CO₂ [12].

محلياً، ناقشت العديد من الدراسات سبل تحسين الأداء الحراري لمنظومات التسخين الحرارية الشمسية [13-19]، والتحليل الحراري لمثل هذه المنظومات موثق في معظم كتب الطاقة الشمسية [20,21]. تعتبر المجمعات الشمسية المستوية من أكثر المجمعات شيوعاً واستخداماً في التطبيقات المنزلية مثل تسخين المياه والتدفئة، وذلك لبساطة تصميمها، ورخص ثمنها، وعدم احتياجها إلى صيانة كبيرة، وتعمل بكفاءة تصل في المعدل إلى 70%. كما أنها تتميز عن غيرها من الأنواع الأخرى من المجمعات الشمسية، بأنها تقوم بتحويل كل من الأشعة المباشرة والمنتشرة بنفس الكفاءة. هذه المجمعات ضرورية لتحرير صناعة الطاقة الحرارية في القطاع المنزلي من الكربون والتحول نحو الطاقات الصديقة للبيئة. فقد بلغت قيمة الاستثمارات في سوق المجمعات الحرارية الشمسية في عام 2022 حوالي 25.84 مليار دولار، ومن المتوقع أن بنمو السوق إلى 44.73 مليار دولار في عام 2030، بمعدل نمو سنوي يبلغ 8.15%. حيث شهد عام 2020 نمواً بنسبة 36% عن عام 2015، وبلغت القدرات الحرارية المركبة حول العالم للمجمعات الشمسية المستوية حوالي 6,479 ميجاوات. وتعد الصين وألمانيا والدنمارك من أكبر المستثمرين في هذه الصناعة [22]. للأسف لا توجد أي معلومات حول القدرات الحرارية المركبة في ليبيا!

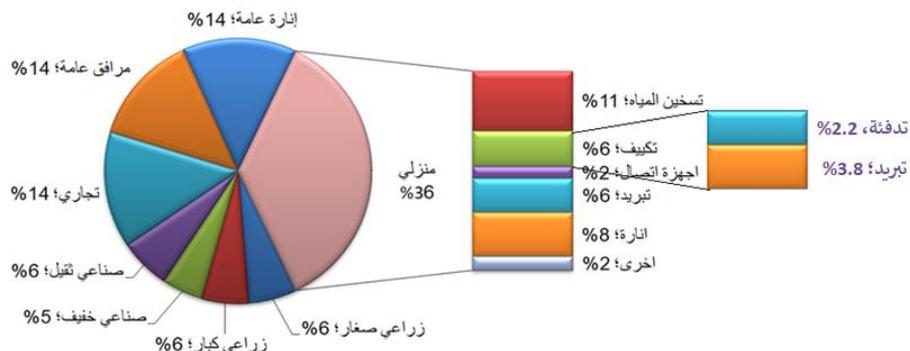
تنفيذاً للخطة الاستراتيجية للحكومة الليبية للتلايين سنة القادمة (2020-2050)، والتي تقضي بزيادة مساهمة الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة في مزيج الطاقة الكهربائية المنتجة لعام 2050 ليتعدى النصف، وسيتم ذلك باستخدام الأمثل للطاقة الشمسية (طاقة كهربائية وطاقة حرارية) وكذلك طاقة الرياح [1]. يأتي ذلك في سبيل تحقيق عدة أهداف منها: الوفاء بالتزامات الدولة الليبية نحو المجتمع الدولي وما تم الاتفاق عليه في مؤتمر باريس للتغير المناخي، والحد من انبعاثات الغازات الدفيئة وتلطيف أثارها السلبية على البيئة، والمحافظة على الموارد الطبيعية للبلاد، والامداد الأمن والمستدام للطاقة الكهربائية. ويمكن تحقيق هذه الأهداف الاستراتيجية عن طريق استغلال الطاقات المتجددة المتوفرة [2-4]، والالتزام بتحقيق أعلى كفاءة للطاقة في الإنتاج والاستهلاك [5].

وكون ليبيا تقع في منطقة "الحزام الشمسي" والتي يفضل فيها الاستخدامات الحرارية للطاقة الشمسية [6]، حيث يصل المجموع اليومي للإشعاع الشمسي الأفقي حوالي 7.1 kWh/m²/day على الساحل وحوالي 8.1 kWh/m²/day على الجنوب [7]، كما هو مبين في الشكل (1).



الشكل 1: المتوسط السنوي للإشعاع الشمسي الكلي اليومي
[Source: solargis.com/maps-and-gis-data/download/libya]

تكمين أهمية الدراسة في أن احتمالات التدفئة وتسخين المياه تشكل ما يقرب من نصف الطاقة المستهلكة في المباني. ويعد الحفاظ على دفاء المنازل في الشتاء



الشكل 2: توزيع استهلاك الطاقة الكهربائية في ليبيا

أداء المجمعات الشمسية المسطحة السائلة في جامعة فيت فيلور بالهند في 21 يناير كل نصف ساعة بأعداد مختلفة من الأغطية الشفافة (0-3) وقيم معامل انكسار مختلفة من 1.1 إلى 1.7. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن أعلى معدل للكسب الحراري كان عند عدد الأغطية 2 ومعامل الانكسار 1.1 [28].

كذلك أجرى Supriti دراسة لمعرفة العدد الأمثل للأغطية الشفافة ومعامل الانكسار للحصول على أفضل أداء لسخان المياه بالطاقة الشمسية باستخدام برنامج الماتلاب. تم إجراء المحاكاة على مجمع شمسي مسطح مائي في جامعة ولاية أريزونا بأمريكا في 21 يوليو و 21 أكتوبر من الساعة 8 صباحا إلى 4 مساء مع قيم معامل انكسار مختلفة 1.1 ، 1.4 ، 1.7 ، وأعداد مختلفة من الأغطية الشفافة (0-3). أظهرت النتائج أن كفاءة المجمع الشمسي المسطح زادت مع زيادة عدد الأغطية، وانخفض أداء المجمع عندما كان معامل الانكسار 1.7. وكان أفضل أداء للمجمع عند عدد الأغطية المستخدمة 3 ومعامل الانكسار 1.1 [29].

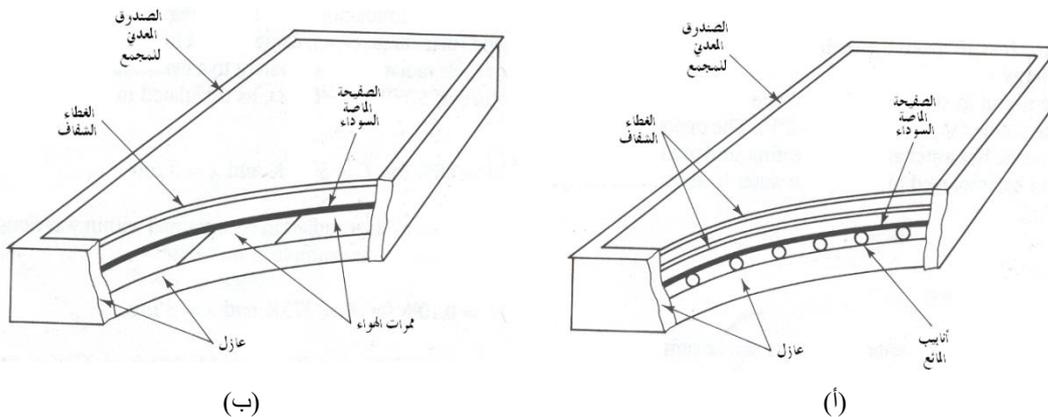
حاكي Chen et al أربعة نماذج مختلفة من المجمعات الشمسية المسطحة بهدف مقارنة تأثير الأغطية الشفافة على الأداء الحراري لها عند درجات حرارة محيطية مختلفة، ودرجات حرارة دخول هواء مختلفة، ومعدلات تدفق مختلفة. (النموذج 1) عبارة عن مجمع شمسي بغطاء زجاجي مفرد، بينما (النموذج 2) عبارة عن مجمع شمسي بغطائين زجاجين يفصلهما الهواء، (النموذج 3) عبارة عن مجمع شمسي بغطائين زجاجين مملوء بالأرجون، (النموذج 4) عبارة عن مجمع شمسي بغطائين زجاجين مفرغ الفاصل بينهما. توضح النتائج المتحصل عليها أن النماذج 2 و 3 و 4 تتمتع بأداء حراري أفضل عند درجة حرارة محيطية منخفضة ودرجة حرارة دخول للهواء عالية مقارنة بالنموذج 1. عندما تكون درجة حرارة الدخول 65°C درجة مئوية ودرجة الحرارة المحيطة 10°C ، وكانت الكفاءة الحرارية للنماذج 2 و 3 و 4 أعلى بمقدار 1.65 و 1.72 و 2.29 مرة من النموذج 1 على التوالي. ومعامل الكفاءة ومعامل فقد الحرارة الكلي للنموذج 4 كانت 0.62707 و 2.21745 على التوالي [30].

تم إجراء محاكاة عددية من قبل Elzer لتحديد عدد الأغطية الزجاجية ومعامل الانكسار لتحسين الكفاءة البصرية والكفاءة الحرارية للمجمعات الشمسية المسطحة المائية. تمت المحاكاة تحت الظروف الجوية لمدينة البيضاء في ليبيا مع أعداد مختلفة من الأغطية 1 (3×2×1) ومؤشرات انكسار

تتكون المجمعات الشمسية المستوية (كما هو مبين في الشكل 3) من خمسة عناصر رئيسية: الغطاء الشفاف والذي يسمح بمرور الأشعة الشمسية من خلاله ويقلل من الفقد الحراري من أعلى المجمع، ويمكن أن يكون غطاء واحد أو عدة أغطية (وهو يمثل مشكلة البحث الحالي). الصفيحة الماصة والتي تمتص الطاقة الشمسية وتنقلها كطاقة مفيدة إلى المائع العامل. قناة مرور المائع والتي يمر فيها المائع العامل. والطبقة العازلة الخلفية لتقليل فقدان الحرارة من أسفل المجمع، والصندوق الذي يجمع كافة هذه العناصر ولذي يمكن ان يكون من الخشب أو الألمونيوم. ينعكس وينتقل ويمتص الإشعاع الشمسي الساقط على سطح المجمع الشمسي عن طريق الغطاء/الأغطية الشفافة واللوحه الماصة بمعدلات متفاوتة تحدد الكفاءة البصرية للمجمع الشمسي. يتم تحديد الخصائص البصرية مثل: النفاذية، الانعكاسية، الامتصاصية والانبعاثية للمجمع بواسطة سمك (L)، معامل الانكسار (n)، ومعامل الخمود (k)، وهي دالة في الطول الموجي للضوء وزاوية سقوط الأشعة الشمسية [20].

قدمت العديد من الدراسات والتي تضمنت تصاميم هندسية جديدة للمجمعات الشمسية المسطحة بهدف زيادة فعالية هذه المجمعات لاداء وظيفتها بعدة طرق منها: استخدام موانع النانو [23]، وتحديد الأبعاد المثالية لقناة الهواء [24]، وكذلك تأثير الظروف التصميمية والتشغيلية والوظيفية للمجمعات الشمسية [25]، وأيضا تأثير الأغطية الشفافة وخصائصها الفيزيائية في العديد من الأبحاث [26]. هذه الأبحاث تشير إلى الاهتمام البالغ الذي تلقاه المجمعات الشمسية الحرارية المسطحة حيث سيكون الرهان عليها كبيرا في تغطية الاحمال الحرارية في مدى درجات الحرارة أقل من 70°C . أجرى Fischer and Hahne دراسة حول تأثير عدد الأغطية الزجاجية المختلفة على اكتساب الطاقة السنوي لمجمع الطاقة الشمسية. تم إجراء القياسات تحت الظروف الجوية لمدينة برلين على مجمع شمسي باستخدام ثلاثة أغطية زجاجية مختلفة. تم استخدام معاملات المجمع كمعاملات إدخال لبرنامج المحاكاة. تم اعتبار هذه الدراسة كمواصفات نظام تسخين المياه بالطاقة الشمسية النموذجي المستخدم في ألمانيا. بينت الدراسة أن المجمع الشمسي الثلاثي الأغطية الزجاجية جمع 3% طاقة سنوية أكثر من باقي الخيارات [27].

قام Kalidasan and Srinivas بالتحقيق في تأثير عدد الأغطية الشفافة ومعامل الانكسار على أداء سخان مياه يعمل بالطاقة الشمسية. تمت محاكاة



الشكل 3: رسم توضيحي لمكونات المجمع الشمسي المستوي (أ) مائي، (ب) هوائي [20]

من تحسينه [38].
 قارن Vetrivel and Mathiazhagan عدة مجمعات شمسية مسطحة مع أنظمة أغطية مفردة ومزدوجة. أظهرت النتائج أن كفاءة المجمع الشمسي المسطح مع نظام الزجاج المزدوج أعلى مقارنة بنظام الزجاج الفردي عند نفس القيمة من الإشعاع الشمسي [39]. قارن Bandara et al. كفاءة وأداء تجميع الطاقة الشمسية من مجمع شمسي بدون غطاء مع اخر مغطى بزجاج تقليدي لغرض تجفيف المحاصيل الزراعية تحت الظروف المناخية لمدينة رالونوا في سيريلانكا. تمت المقارنة تحت مديوسع من الظروف الجوية حيث تراوحت درجة حرارة الهواء الجوي ($28\pm 32^\circ\text{C}$) وشدة الإشعاع الشمسي ($504\pm 95\text{W/m}^2$) وسرعة الرياح ($1.5\pm 0.4\text{m/s}$). أظهرت الدراسة أن كفاءة تجميع الطاقة الشمسية للمجمع الشمسي بدون غطاء أفضل من ذلك المجمع بغطاء [40].

أجرى Chabane and Sekseff دراسة تجريبية لمجمع الهواء الشمسي مزدوج الزجاج في موقع بسكرة بالجزائر. كان الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تقليل الفقد الحراري العلوي. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها من القراءات التجريبية أن تقليل الفقد الحراري العلوي كان عاملاً مهماً للغاية لتحسين أداء المجمع الهوائي الشمسي وأن الزجاج المزدوج كان فعالاً في تقليل الخسائر الحرارية لمجمع الهواء الشمسي [41].

أجراء Liu et al. دراسة تجريبية على الظروف التصميمية (سمك الغطاء الشفاف: 4mm, 6) والجوية (شدة الإشعاع الشمسي: $670, 850\text{ W/m}^2$) (1000) والتشغيلية (معدل تدفق المائع: $0.1, 0.13, 0.15\text{ kg/s}$) على كفاءة المجمع الشمسي المسطح. بينت النتائج أن عند شدة اشعاع شمسي عالية أكبر من 1000 W/m^2 كانت كفاءة المجمع ذو الغطاء بسماكة 6mm أعلى بحوالي 6% من المجمع ذو الغطاء بسمك 4mm الا انه كمعدل كفاءة تحت كل الظروف التجريبية كانت كفاءة المجمع الشمسي ذو غطاء زجاجي بسماكة 4mm أفضل من ذلك بسمك 6mm. وكانت أقصى كفاءة للمجمع 0.89، 0.86، 0.73 عند معدلات تدفق ($0.15, 0.13, 0.1\text{kg/s}$) وعند اشعاع شمسي ($1000, 850, 670\text{W/m}^2$) للمجمع الشمسي بغطاء زجاجي بسمك 4mm [26].

قدم Hammad et al. دراسة عن تأثير عدد الأغطية الزجاجية على أداء سخانات الهواء الشمسية ذات الألواح المسطحة والموجة. تظهر نتائج هذه الدراسة، إن زيادة عدد الأغطية الزجاجية له تأثير إيجابي يتمثل في تقليل معامل الفقد الحراري الكلي وله تأثير سلبي يتمثل في تقليل الكفاءة البصرية للمجمع. وبناء على النموذج في هذا العمل والظروف التشغيلية لمدينة عمان – الاردن، فإن العدد الأمثل للأغطية الزجاجية هو اثنان [42].

قدم Kumar et al. مراجعة عن دور الصفيحة الماصة والاعطية الزجاجية في تحسين الأداء الحراري للمجمعات الشمسية المسطحة السائلة، وخلص البحث في أن اعداد الاغطية الزجاجية تعتمد بصورة كبيرة على الحالة الجوية لمنطقة الدراسة، الا انه في معظم الحالات كان الأداء الحراري للمجمع الشمسي المزدوج الاغطية أعلى من ذلك مفرد الاغطية [43].

يتبين من الدراسات السابقة تباين كبير في التوصيات الخاصة بالعدد المثالي للاغطية الشفافة لتحقيق أفضل أداء للمجمع الشمسي، ويرجع سبب ذلك الى اعتماد المسألة على عدد كبير من الظروف الجوية والتشغيلية وكذلك الوظيفة المناطة بالمجمع الشمسي، حيث يقوم المجمع الشمسي بأداء طائفة

مختلفة (1.1، 1.4، 1.7). وأظهرت النتائج المتحصل عليها ان أعلى أداء حراري للمجمع يكون عند عدد الأغطية المستخدمة 3 ومعامل الانكسار 1.1 [31].
 قام Murugavael et al. بمقارنة كفاءة المجمع الشمسي المسطح بأغطية زجاجية ذات سماكة 3mm، 6 وأفادت هذه الدراسة أن المجمع الشمسي بغطاء زجاجي بسمك 3mm كان أكثر كفاءة مقارنة بالمجمع الشمسي المسطح بغطاء زجاجي بسمك 6mm [32]. أكدت تلك النتائج دراسة أخرى أجراها Bakari et al. عن تأثير سمك الغطاء الزجاجي على أداء مجمعات الطاقة الشمسية المسطحة، حيث استخدام زجاج منخفض الحديد (شفاف للغاية) بسمك (4,5,6mm). أظهرت النتائج أن المجمع الشمسي المسطح بسماكة زجاج 4mm أعطى أفضل كفاءة [33]. كما قام Panchal بدراسة تأثير النفاذية على سمك الغطاء الزجاجي. في هذه الدراسة، تم اختيار ثلاثة سماكات مختلفة للغطاء الزجاجي (4,5,6mm) للدراسة على ثلاث صور من المقطرات الشمسية من نفس الحجم، وتم اختبارها في الظروف المناخية لمدينة ميسانا بالهند. بعد ستة أشهر من التجارب، وجد أن سمك الغطاء الزجاجي 4mm كان له أفضل متوسط انتاج للمقطر الشمسي مقارنة بالخيارات الأخرى من سمك الغطاء الزجاجي [34]. فيما أقتراح Liu et al. نظاماً جديداً للتجفيف الشمسي يتمتع بكفاءة عالية في تجميع الحرارة الشمسية، ودرجة حرارة عالية لخروج الهواء الساخن، وكفاءة تجفيف عالية تعتمد على استخدام هلام السيليكا (silica aerogels) الشفاف بدلاً من الزجاج ولها موصلية حرارية منخفضة للغاية. أظهرت النتائج أن السمك الأمثل للغطاء الشفاف هو 10mm. عند مدى واسع من درجات الحرارة المحيطة (10°C – 30°C) وكانت درجات حرارة خروج الهواء من المجمع الشمسي (52°C – 97°C) [35].

كما أجرى Manikandan and Sivaraman دراسة مقارنة حول الكفاءة الحرارية لسخانات المياه بالطاقة الشمسية أحادي وثنائي الأغطية الشفافة وعند تدفقات متعددة ($0.0041, 0.0083, 0.0125\text{ kg/s}$). أظهرت الدراسة أن الكفاءة الحرارية للمجمع الشمسي الثنائي الأغطية أعلى مقارنة بالمجمع الشمسي الأحادي الغطاء وبغض النظر عن معدل تدفق المائع [36].
 أجريت تجربتان في جامعة مسيلة بالجزائر باستخدام مصباح الهالوجين كمحاكي للشمس لدراسة تأثير عدد الأغطية الزجاجية على أداء المجمع الحراري الشمسي. في هذه الدراسة، استخدم في التجربة الأولى غطائين زجاجيين بسمك (3mm, 5). وفي التجربة الثانية، تم استبدال الغطائين بغطاء واحد بسمك 8mm. أظهرت الدراسة أن كفاءة المجمع ذو الغطاء الزجاجي المفرد بسماكة 8mm له كفاءة 44% مقابل 40% للمجمع ذو الغطائين بسمك (3mm, 5) [37]. كما قام نفس الباحثون بأجراء تجربة أخرى للتعرف على تأثير عدد الأغطية الزجاجية على كفاءة المجمع الحراري الشمسي. في هذه الدراسة تم استخدام ثلاثة ألواح زجاجية بسماكة 3mm. تم إجراء الاختبارات مع وبدون الألواح الزجاجية المضافة، بمعدل تدفق ماء ثابت قدره 5.8L/h. يعمل الزجاج المزدوج والثلاثي والرباعي على تقليل كمية الحرارة التي يمتصها الماء. كما أدى اضافة لوحين من الزجاج إلى خفض كفاءة المجمع الشمسي بنسبة 15%، وانخفضت هذه الكفاءة بنسبة 29,95% عند اضافة لوح زجاجي ثالث، وانخفضت بنسبة 45,96% للزجاج الرباعي. إن إضافة ألواح زجاجية فوق سطح المجمع تضعف من دخول الطاقة الشمسية إلى المجمع، وهذا التأثير يقلل من أداء المجمع الشمسي بدلاً

7. اعتبار معامل انتقال الحرارة بالحمل من السطح العلوي والسفلي لقناة الهواء ($h_1 = h_2$) متساو.

8. باعتبار الموصلية الحرارية لمادة لحام الانابيب مع الصفيحة الماصة كبيرة جدا وبالتالي يمكن اعتبار الحد $\frac{1}{c_b} = 0$.

9. اعتبار التحليل الحراري أحادي البعد في اتجاه تدفق المانع. تتمثل محدودية الدراسة في عدم دراسة الحالة اللامستقرة وكذلك تأثير تغير بعض المعالم على النتائج.

تعتبر المعلومات المقدمة من الشركات المصنعة والبيانات المناخية أحد أهم مصادر الالاقين في البحث.

شمولية الدراسة

التحليل الذي أُتبع في هذه الدراسة شاملاً ويمكن ان يمثل النوعين المائي والهوائي وبالتالي يمكن تطبيق النتائج المتحصل عليها في هذا البحث على جميع المجمعات الشمسية المستوية.

الاتزان الحراري للمجمعات الشمسية

يمكن استنباط المعادلة العامة للأداء الحراري للمجمع الشمسي للحالة اللامستقرة بواسطة الاتزان الحراري، والذي يعتبر الطاقة الداخلة هي الطاقة الشمسية المتحصلة من قبل الصفيحة الماصة (A_c, H_t, η_{opt})، بينما الطاقة الخارجة تتمثل في الطاقة المفيدة (Q_u) والطاقة المفقودة (Q_{loss})، ومعدل تغيير الطاقة الداخلية مع الزمن (dE/dt). وبالتالي يمكن صياغة معادلة الاتزان الحراري للحالة اللامستقرة لمجمع شمسي مستوي بمساحة سطحية (A_c) كالتالي [20]:

$$A_c H_t \eta_{opt} = Q_u + Q_{loss} + \frac{dE}{dt} \quad (1)$$

حيث: H_t - الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح المجمع الشمسي (W/m^2)، η_{opt} - الكفاءة البصرية للمجمع، Q_u - الطاقة المفيدة، وهي الحرارة المنتقلة من الصفيحة الماصة إلى المائع العامل (W)، Q_{loss} - الطاقة الحرارية المفقودة مع المحيط (W)، A_c - مساحة المجمع الشمسي السطحية (m^2).

للحالة المستقرة، يمكن إعادة صياغة المعادلة (1) بدلالة معامل الفقد الحراري العلوي كالتالي [20]:

$$Q_u = A_c [H_t \eta_{opt} - U_t (T_p - T_\infty)] \quad (2)$$

حيث: T_p, T_∞ - درجة حرارة الهواء الجوي والصفيحة الماصة، على التوالي $U_t, ^\circ C$ - معامل الفقد الحراري العلوي ($W/m^2.K$).

كما يمكن صياغة المعادلة (1) بدلالة الكفاءة والظروف الجوية على الصورة التالية [20]:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c H_t} = \eta_{opt} - \frac{U_t (T_p - T_\infty)}{A_c H_t} \quad (3)$$

تكمن أهمية صيغة المعادلة (3) في أنه يمكن الحصول على كفاءة المجمع الشمسي كدالة في البيانات المناخية والمتمثلة في الحد $\frac{(T_{ft} - T_\infty)}{H_t}$ من

الخصائص الفنية والتصميمية للمجمع الشمسي وهي معلومات موجودة لدى الشركات المصنعة، وبالتالي فإن درجة حرارة الصفيحة الماصة (T_p) فقط هي المجهولة في هذه المعادلة، باعتبار أن معامل الفقد الحراري العلوي (U_t) دالة في مجهول واحد فقط وهو T_p . وبحسب معامل الفقد الحراري العلوي (U_t) تقريبا من مجموعة المعادلات (7).

كذلك يمكن حساب الطاقة المفيدة بمعلمة معامل الازاحة الحرارية (F_R)

واسعة من المهام مجمعات تسخين المياه، مجمعات تسخين الهواء، مجمعات لتجفيف المحاصيل الزراعية، مجمعات لتحلية المياه، مجمعات تعمل في نظام المدخنة الشمسية... الخ. وعليه فان اي دراسة تكون في هذا المجال هي دراسة ذات قيمة علمية وعملية وغير مكررة.

استنادا على ما سبق ذكره في المقدمة، فانه يمكن تلخيص المساهمة العلمية لهذا البحث في النقاط التالية:

1. ايجاد أداة جديدة لتحديد عدد الاغطية الشفافة في المجمعات الشمسية المسطحة والمتمثلة في فرق درجات حرارة الصفيحة الماصة والهواء الجوي.
2. اقتراح مجمع شمسي مسطح جديد يحتوي على تراكيب متعددة من الاغطية الشفافة وليس تركيب واحد.
3. الوصول الى الامثلية في الاداء الحراري وتقليل التكلفة الاقتصادية للمجمع الشمسي.

وينقسم البحث فيما تبقى الى ثلاثة أجزاء، منهجية البحث، حيث تم عرض المنهجية المتبعة لتحقيق هدف البحث، وكذلك ادراج الفرضيات التي تبناها البحث وجدود الدراسة ومصادر الالاقين في النتائج، كما تم سرد المعادلات الحاكمة للتحليل الحراري للمجمعات الشمسية المستوية. النتائج والمناقشة، حيث تم تمثيل ما توصل اليه البحث ببيانيا وتمت مناقشة النتائج. وفي نهاية البحث ادرجت الاستنتاجات المستنبطة وعرضت الخطط البحثية التي تعتمزم المجموعة البحثية القيام بها في المستقبل. وختمت الدراسة بقائمة المراجع والتي تضمنت 46 عنوانا.

منهجية البحث

يمكن تلخيص المنهجية المتبعة في هذا البحث في النقاط التالية:

1. تحديد المواصفات الفنية والمعلومات الجوية والتشغيلية للمجمع الشمسي الجدول (1).
 2. حساب معامل الفقد الحراري العلوي:
 $U_t = f(T_p, T_\infty, V_\infty, \beta, N, \varepsilon_p, \varepsilon_g)$
 3. حساب زاوية سقوط الأشعة الشمسية: $\theta_1 = f(\phi, n, h, \beta, \psi)$
 4. تعيين شدة الإشعاع الشمسي المائل الكلي الساقط على سطح المجمع الشمسي [44]: $H_t = f(H_{b,h}, H_{d,h}, \theta_1, \beta, \rho_g, POA)$
 5. حساب الكفاءة البصرية للمجمع الشمسي:
 $\eta_{opt} = f(\theta_1, K, t, N, n_2, \alpha_p)$
 6. حساب درجة حرارة الصفيحة الماصة:
 $T_p = f(H_t, T_\infty, U_t, \eta_{opt}, A_c, Q_u)$
- فرضيات وحدود ومصادر الالاقين في البحث
- بما أن هدف البحث تحديد عدد الاغطية الشفافة لمجمع شمسي مستوي لتسخين الهواء، ولتبسيط التحليل سيتبنى البحث الفرضيات التالية:
1. الأشعة الشمسية على المجمع متجانسة ومستقرة.
 2. أداء المجمع في حالة استقرار.
 3. الصفيحة الماصة والأغطية الشفافة عند درجات حرارة متجانسة.
 4. اهمال الطاقة المفقودة من أسفل وجوانب المجمع.
 5. الخواص الحرارية ثابتة ولا تعتمد على درجة الحرارة.
 6. اهمال تأثير الظل والغبار والأتربة على أداء المجمع [45].

حيث F' -معامل كفاءة المجمع الشمسي، وهي تختلف باختلاف نوع المجمع وتصميمه. أشقت Nassar and Sergievsky [46] صيغة لمعامل كفاءة العديد من التصاميم للمجمعات الشمسية المسطحة الهوائية المعادلة (4) وللماثية المعادلة (5) [20].

من المعادلة التالية [20]:

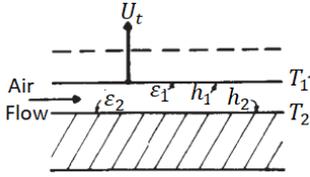
$$Q_u = F_R A_c [H_t \eta_{opt} - U_t (T_{fi} - T_\infty)] \quad (4)$$

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{U_t A_c} \left[1 - e^{-\frac{U_t A_c F'}{\dot{m} C_p}} \right]$$

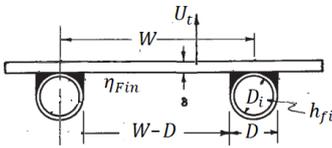
$$F' = \frac{h_1 h_2 + h_1 h_r + h_2 h_r}{U_t (h_2 + h_r) + h_1 h_2 + h_1 h_r + h_2 h_r}$$

$$h_r = \frac{(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

$$h_1 = h_2 = \frac{k_f}{L_c} \left[0.0233 Pr^{0.4} \left(\frac{\dot{m} L_c}{A_{channel} \mu_f} \right)^{0.8} \right]$$



حيث h_2, h_1 معامل انتقال الحرارة بالحمل للسطح العلوي والسفلي لقناة الهواء على التوالي $\frac{W}{m^2 K}$ ، $\varepsilon_2, \varepsilon_1$ انبعائية السطحين العلوي والسفلي لقناة الهواء على التوالي.



$$F' = \frac{1}{W \left[\frac{1}{U_t [D + (W - D) \eta_{Fin}] + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}}} \right]}$$

$$h_{fi} = \frac{k_f}{D_i} \left[0.0233 Pr^{0.4} \left(\frac{4 \dot{m}}{\pi D_i \mu_f} \right)^{0.8} \right]$$

$$\eta_{Fin} = \frac{\tanh \left[\frac{\sqrt{U_L} (W - D)}{k \delta} \right]}{\frac{\sqrt{U_L} (W - D)}{k \delta}}$$

$$U_t = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_p} \left[\frac{T_p - T_\infty}{N + f} \right]^e + \frac{1}{h_w}} \right\}^{-1} + \frac{\sigma (T_p + T_\infty) (T_p^2 + T_\infty^2)}{A + B - N}; \quad \frac{W}{m^2 K}$$

$$A = [\varepsilon_p + 0.00591 N h_w]^{-1}$$

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

$$f = [1 + 0.089 h_w - 0.1166 h_w \varepsilon_p] [1 + 0.07866 N]$$

$$C = 520 [1 - 5.1 \times 10^{-5} \beta^2],$$

$$e = 0.43 \left[1 - \frac{100}{T_p} \right],$$

$$h_w = 5.7 + 3.8 V_\infty$$

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\theta_1 = \cos^{-1} (\sin(\theta - \beta) \sin \delta + \cos(\theta - \beta) \cos \delta \cos \omega)$$

$$\delta = 23.45 \sin \left\{ \frac{360 (284 + n)}{365} \right\}$$

$$\omega = 15 (ST - 12)$$

$$\rho_{\parallel} = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)}$$

$$\rho_{\perp} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)}$$

$$\tau_b = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \rho_{\parallel}}{1 + (2N - 1) \rho_{\parallel}} + \frac{1 - \rho_{\perp}}{1 + (2N - 1) \rho_{\perp}} \right)$$

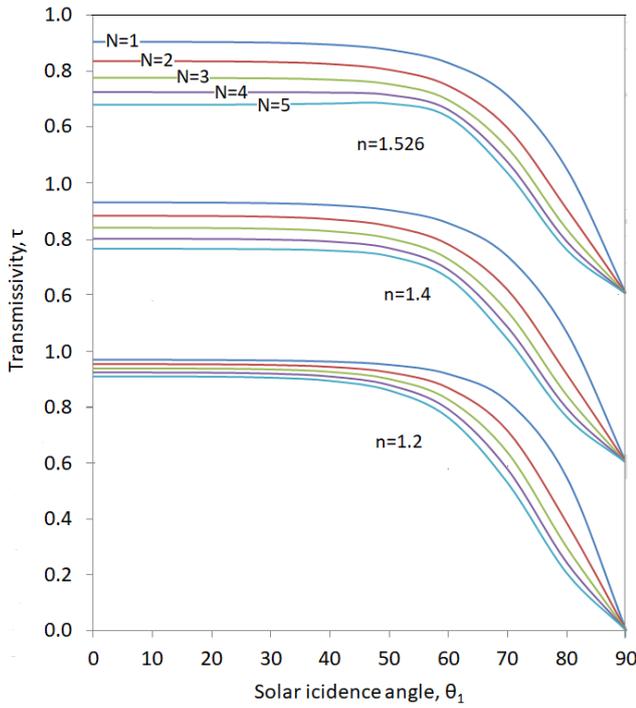
$$\tau_d = e^{-kt / \cos \theta_2}$$

$$\tau_g = \tau_b \cdot \tau_d$$

$$\eta_{opt} = \tau_g \alpha_p$$

حيث: n_2, n_1 يمثلان معامل الانكسار للوسيطين التي يمر فيها الاشعاع الشمسي

حيث N - عدد الاغطية الشفافة، $\varepsilon_p, \varepsilon_g$ - انبعائية كلا من الصفيحة الماصة والغطاء الشفاف، على التوالي، β - زاوية ميل المجمع الشمسي بالدرجة، V_∞ - سرعة الرياح m/s . يُعتبر المجمعات الشمسية نوعاً من المبادلات الحرارية، حيث يتم تحويل الطاقة الشمسية الى طاقة حرارية يحملها المائع العامل كطاقة مفيدة. يسقط الاشعاع الشمسي بكافة مركباته على الغطاء الشفاف فجزء منه ينعكس وجزء اخر يُمتص من قبل الاغطية الزجاجية والجزء المتبقى ينفذ (τ) ويسقط على الصفيحة الماصة، وبنفس الكيفية؛ يرتد جزء منه ويُمتص الجزء الباقي (α_p). وبالتالي فإن الأغطية الزجاجية تعتبر الجهاز الاول الذي تعبر من خلاله الأشعة الشمسية ولهذا السبب سميت قيمة ضرب نفاذية الاغطية في امتصاصية الصفيحة الماصة ($\tau \alpha$) بالكفاءة البصرية (η_{opt}) والتي تُحسب من مجموعة المعادلات التالية [20]:



الشكل 4: علاقة نفاذية الاغطية الزجاجية مع زاوية سقوط الاشعة الشمسية لعدد من الاغطية الشفافة ولعدد من معاملات الانكسار

أمكن الحصول على علاقة درجة حرارة الصفيحة الماصة مع الطاقة المفيدة بدلالة عدد الاغطية الزجاجية وذلك باستخدام المعادلة (2)، وهذا وتم حساب الكفاءة البصرية عند زاوية سقوط الاشعة الشمسية على المجمع الشمسي $\theta_1=30^\circ$ وللخصائص الفنية والتشغيلية المذكورة في الجدول (1). يتبين من الشكل (5) أنه كلما ارتفعت درجة حرارة الصفيحة الماصة زادت الحاجة لتقليل الفقد الحراري العلوي ويتحقق ذلك بزيادة عدد الاغطية الشفافة، وبطبيعة الحال ستكون الضريبة لهذه الزيادة انخفاض في كمية الطاقة الشمسية الممتصة من قبل الصفيحة الماصة. كما يمثل الشكل العلوي من الشكل (5) مدى الفرق في درجات الحرارة بين الصفيحة الماصة ودرجة حرارة الهواء الجوي $\Delta T_{p,\infty}$ ليكون من الضروري إضافة غطاء شفاف اخر لتحقيق أفضل أداء للمجمع الشمسي، ويمكن تمثيل نطاق درجات الحرارة $\Delta T_{p,\infty}$ في فترات كما هو مبين في الجدول (2).

الجدول 2: فترات درجة الحرارة لكل عدد من الاغطية الشفافة

عدد الاغطية الشفافة	فترة درجة الحرارة $\Delta T_{p,\infty}$
0	5-0
1	40-5
2	85-40
3	140-85
4	180-140
5	>180

وعليه يجب الان حساب درجة حرارة الصفيحة الماصة لمجمع شمسي بمواصفات تقنية وظروف تشغيلية حقيقية باستخدام المعادلات (2-7) وباستخدام تقنية المحاولة والخطأ وبمعرفة الكفاءة من جدول المواصفات الفنية (الجدول 1) فإنه يمكن الحصول على درجة حرارة الصفيحة الماصة.

وفي حالة المجمعات الشمسية الهواء والغطاء الشفاف. للهواء $n_1 = 1$ وتعتمد قيمة n_2 على نوعية الغطاء الشفاف؛ فإذا كان من الزجاج فان $n_2 = 1.526$ ، θ - زاوية خط العرض للموقع، β - زاوية ميل المجمع الشمسي، ST- التوقيت الشمسي بنظام 24 ساعة، k - معامل الحيوذ الضوئي m^{-1} ، t سمك الغطاء الشفاف m .

الخصائص الفنية والبيانات المناخية

يمثل الجدول (1) الخصائص الفنية والبيانات المناخية المستخدمة في هذا البحث

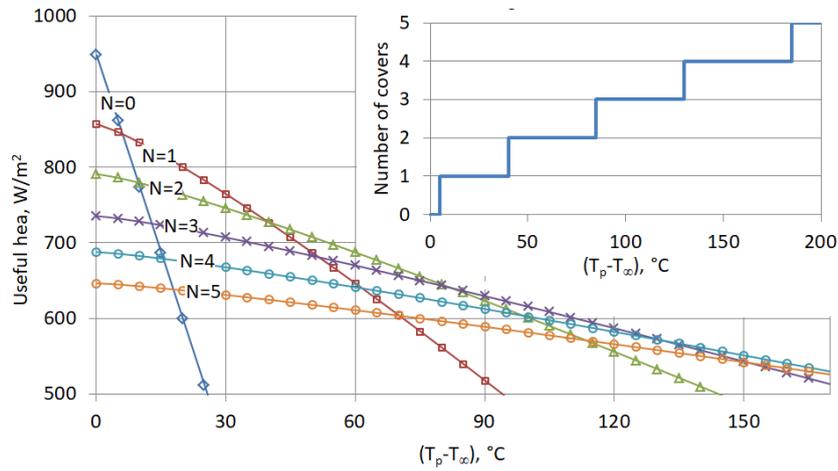
الجدول 1: الخصائص الفنية للمجمع الشمسي الهوائي تحت الدراسة

المعلومة	البيان
BlueClean	نوع المجمع الشمسي
تشانغتشو - الصين	بلد المنشأ
5060 × 1060 × 90	أبعاد المجمع الشمسي، mm
5000 × 1020 × 1.0	ابعاد الصفيحة الماصة، mm
5010 × 1028 × 3.2	أبعاد الغطاء الشفاف، mm
24mm	المسافة الفاصلة بين الصفيحة الماصة والغطاء الشفاف
24mm	المسافة الفاصلة بين الاغطية الشفافة
20mm	عمق قناة الهواء ($d_{channel}$)
401W/mK	الموصلية الحرارية للصفيحة الماصة (k_p)
ألومنيوم	معدن الصفيحة الماصة
الكروم الأسود الانتقائي	طلاء سطح الصفيحة الماصة
0.95	امتصاصية الصفيحة الماصة (α)
0.11	انبعاثية الصفيحة الماصة (ϵ_p)
0.94	انبعاثية السطح السفلي للصفيحة السفلية (ϵ_1)
0.94	انبعاثية الصفيحة السفلية (ϵ_2)
$4m^{-1}$	معامل الحيوذ الضوئي للغطاء الشفاف (K)
$0.08 W/m^2C$	معامل الفقد الحراري السفلي للمجمع الشمسي (U_b)
جنوباً 30°	زاوية ميل واتجاه المجمع الشمسي (\square)
سبيكة المونيوم	معدن اللاتار
mm0.48	سمك الاطار
بولي كربونات	الغطاء الشفاف
31 kg	الوزن الكلي
0.92	نفاذية الغطاء الشفاف (T_a)
0.06	امتصاصية الغطاء الشفاف (α_g)
0.9	انبعاثية الغطاء الشفاف (ϵ_g)
$130^\circ C$	أعلى درجة حرارة خروج للهواء الساخن (T_{fo})
$0.027 kg/s$	التدفق الموصى به (\dot{m})
ألياف الزجاج	المادة العازلة
30 mm	سمك المادة العازلة (L_{ins})
$0.025 W/mK$	الموصلية الحرارية لمادة العزل (k_{ins})
$1000 W/m^2$	الاشعاع الشمسي الساقط على المجمع الشمسي (H_t)
$30^\circ C$	درجة حرارة الهواء الجوي (T_{∞})
3 m/s	سرعة الرياح (V_{∞})
$\eta = 0.7 - 7.1429 \left[\frac{T_p - T_{\infty}}{H_t} \right]$	الكفاءة:

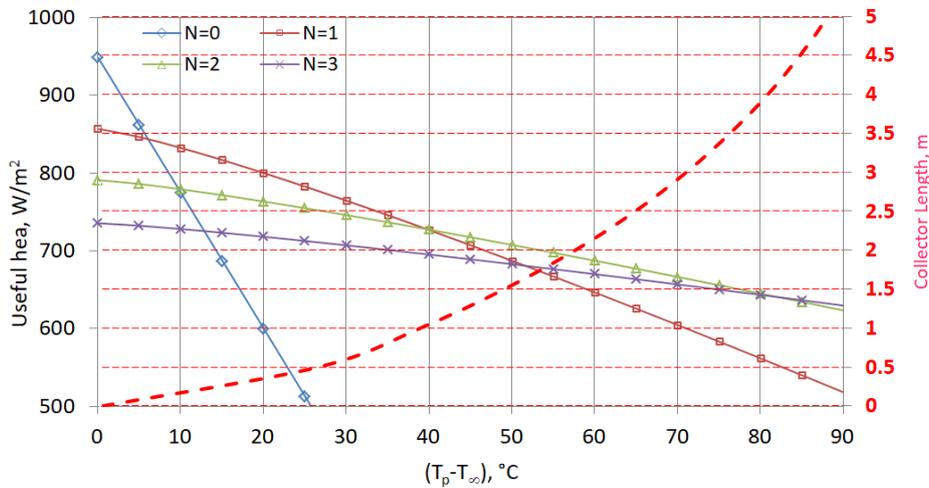
النتائج والمناقشة

يمثل الشكل 4 علاقة الكفاءة البصرية مع زاوية سقوط الاشعة الشمسية لمجمعات شمسية بعدة أغطية شفافة ولعدة معاملات انكسار عند سمك الأغطية الزجاجية يساوي 3.2mm.

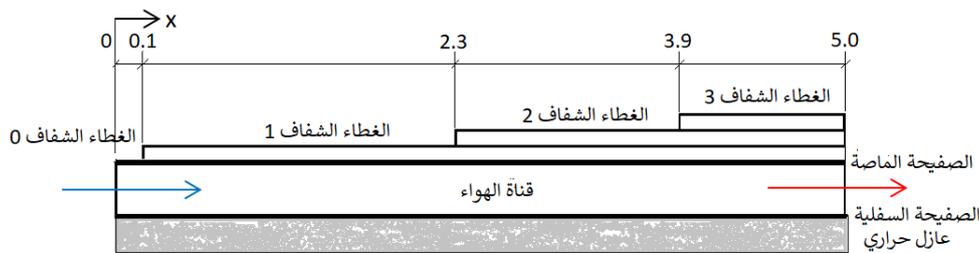
يتبين من الشكل (4) ان زاوية سقوط الاشعة الشمسية θ_1 تعتبر أهم عامل في زيادة نفاذية الاغطية الزجاجية وخاصة عندما تكون $\theta_1 > 40^\circ$ ولعل هذا يفسر نجاح منظومات تتبع الشمس في رفع كفاءة أداء المجمعات الشمسية والتي تسعى دائماً لتقليل زاوية سقوط الاشعة الشمسية [47]. وبطبيعة الحال كلما زادت الاغطية الزجاجية قلت النفاذية وكلما قل معامل الانكسار زادت النفاذية.



الشكل 5: علاقة درجة حرارة الصفيحة الماصة مع الطاقة المستفاد منها بدلالة عدد الاغطية الشفافة



الشكل 6: الاعداد المثالية للأغطية الشفافة إستنادا على درجة حرارة الصفيحة الماصة بدلالة طول المجمع الشمسي



الشكل 7: رسم تخطيطي لمكونات المجمع الشمسي المسطح الهوائي المثالي

سينشط السوق المحلية [48].

الاستنتاجات والخطط البحثية المستقبلية

تم في هذا البحث محاكاة الاداء الحراري لمجمع شمسي مسطح هوائي بطول 5m وبمعدل تدفق الهواء $100\text{m}^3/\text{h}$ ، تحت الظروف الجوية من اشعاع شمسي قدره $1000\text{W}/\text{m}^2$ ودرجة حرارة الهواء الجوي 30°C وسرعة الرياح $3\text{m}/\text{s}$ ، وذلك لتحديد العدد الأمثل من الاغطية الشفافة للحصول على أفضل كفاءة للمجمع. تبين من خلال التحليل أن عدد الأغطية يعتمد بصورة كبيرة على درجة حرارة الصفيحة الماصة وعلى درجة حرارة الهواء الجوي. وعليه تم اقتراح تصميم جديد للمجمعات الشمسية المسطحة بشقيها

استنادا على البيانات المدرجة رقميا في الجدول (2) وبيانيا في الشكل 6. فإن مجمعا شمسياً مسطحاً بطول 5 مترا يجب أن يصمم بالصورة الموضحة في الشكل (7).

أهمية البحث على الصعيد البيئي والاقتصادي والاجتماعي

تساهم نتائج البحث في تلطيف الضرر البيئي الناجم عن حرق الوقود الاحفوري في سبيل انتاج الطاقة الكهربائية والحفاظ على الموارد الطبيعية واستخدام الثروة النفطية في الصناعات البتروكيمياوية التي تدر على الوطن عائدا ماديا أكبر بكثير من حرقه لتوليد الطاقة الكهربائية. أما التأثير الاجتماعي فيتمثل في توفير وظائف وفرص عمل عديدة ومتنوعة، بالإضافة إلى اقتراح عدة نماذج استثمارية في مجالات الطاقة الشمسية الامر الذي

- Sustainability (IJEES), vol. 1, no. 3, pp. 27-43, 2023.
- [8] Y. Nassar, K. Aissa and S. Alsadi, "Air Pollution Sources in Libya," *Research & Reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 63-79, 2018.
- [9] Y. Nassar, R. Elzer, A. Alkhazmi, H. El-Khozondar, M. Essid and A. Mbaye, "Thermal Analysis of Air-Heating Flat-Plate Thermal Solar Collectors," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 3, p. 129–144, 2023.
- [10] 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," *Advances in Building Energy Research*, vol. 17, no. 4, pp. 379-411, 2023.
- [11] A. Makhzom, A. Eshdok, F. Yasser, S. Alsadi, T. Foqha, M. Salem, I. AlShareef and H. El-Khozondar, "Estimation of CO2 emission factor for Power Industry Sector in Libya," in *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023)*, Gaza Strip - Palestine, May 8-9, 2023 .
- [12] N. Yasser, 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] A. Algareu, M. Abdunnabi, M. Mabruk and A. Elmagrabi, "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, p. 11–20, 2021.
- [16] M. Abdunnabi, M. Al-Ahjal and I. Rahoma, "Optimum Sizing of Residential Active Solar Water Heating Systems for Libyan Families," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 6, no. 1, p. 18–26, 2017.
- [17] M. Abdunnabi and D. Loveday, "In-Situ Measurements of the Performance of ermosyphon Solar Water Heating Systems in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 3, no. 1, p. 1–9, 2014.
- [18] M. Abdunnabi and M. Musa, "Towards Strategic Plan for Wide Spreading of Solar Water Heaters in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 2, no. 1, pp. 11-25, 2021.
- [19] 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 Sustainability Development Journal*, vol. 3, no. 1, p. 10–27, 2014.
- [20] Y. Nassar, *Solar energy engineering, active applications*, Sebha, Libya: Sebha University, 2006 .
- [21] J. Duffie and W. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*, 4 th ed. ed., John Wiley & Sons Inc., 2013 .
- [22] P. Nagrale, "Solar Thermal Collectors Market Research Report Information," *Market Research Future*, 2023.
- [23] A. Ajeena, I. Farkas and P. Víg, "Energy and exergy assessment of a flat plate solar thermal collector by examine silicon carbide nanofluid: An experimental study for sustainable energy," *Applied Thermal Engineering*, vol. 236, pp. 1185-1195, 2022.
- الهوائي والمائي حيث تم تمثيلها في فترات فوق درجة حرارة الصفيحة الماصة والهواء الجوي وكانت كالتالي: الفترة (5-0°C) بدون غطاء، الفترة (40-5°C) غطاء واحد، الفترة (85-40°C) غطائين، الفترة (140-85°C) ثلاثة أغطية، الفترة (180-140°C) أربعة أغطية، الفترة (>180°C) خمسة أغطية.
- إثر هذه الدراسة التحليلية، تم وضع خطة بحثية مستقبلية والتي تتضمن:
1. إجراء تجربة عملية للتحقق من صلاحية التحليل العددي تحت ظروف معملية محددة من شدة اشعاع شمسي ودرجة حرارة الهواء المحيط وكذلك معدلات مختلفة من تدفق ودرجات حرارة دخول المائع.
 2. إجراء محاكاة باستخدام برنامج المحاكاة الديناميكي (TRNSYS) Simulation Tool
- Author Contributions:** "All authors have made a substantial, direct, and intellectual contribution to the work and approved it for publication."
- Funding:** "This research received no external funding."
- Data Availability Statement:** "No data were used to support this study."
- Conflicts of Interest:** "The authors declare that they have no conflict of interest."
- Acknowledgments:** "The authors would like to express their appreciation to the Research Center for Renewable Energy and Sustainable Development, Wadi Alshatti University, Brack-Libya, for their support during the study."
- References**
- [1] Y. Nassar, H. El- Khozondar, N. Abohamoud, A. Abubaker, A. Ahmed, A. Alsharif and M. Khaleel, "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, May 8-9, 2023 .
 - [2] M. Andeef, K. Bakouri, B. Ahmed, A. Gait, F. El-Batta, F. Foqha and H. Qarqad, "The Role of Renewable Energies in Achieving a More Secure and Stable Future," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 2, pp. 11-23, 2023.
 - [3] K. Moumani, "Management of Sustainable Development in the Light of Arab and International Cooperation, a Case Study of the Arab Vision of Management of Sustainable Development," *Wadi AlShatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 1-8, 2023.
 - [4] A. Almabrouk and S. Abulifa, "The Technology of Renewable Energy and Its Role in Achieving Sustainable Development," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 2, pp. 1-9, 2023.
 - [5] M. Eteriki, W. El-Osta, Y. Nassar and H. El-Khozonda, "Effect of Implementation of Energy Efficiency in Residential Sector in Libya," in *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability*, Gaza Strip, Palestine, May 8-9, 2023 .
 - [6] 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," in *World Renewable Energy Congress VIII*, Colorado USA, August 29-September 3, 2004.
 - [7] Y. Nassar, H. El-Khozondar, G. Ghaboun, M. Khaleel, Z. Yusupov, A. Ahmed and A. Alsharif, "Solar and wind atlas for Libya," *International Journal of Electrical Engineering and*

- Collector," *International Journal of Electronics and Electrical Engineering*, vol. 4, no. 2, pp. 151-156, 2016.
- [38] N. Ihaddadene, R. Ihaddadene and A. Mahdi, "Effect of glazing number on the performance of a solar thermal collector," in *5th International Renewable Energy Congress (IREC)*, Hammamet, Tunisia, 25-27 March 2014.
- [39] H. Vetrivel and P. Mathiazhagan, "Comparison study of solar flat plate collector with single and double glazing systems," *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, vol. 7, no. 1, pp. 266-274, 2017.
- [40] W. Bandara, B. Amarasekara and C. Rupasinghe, "Assessment of the possibility of unglazed transpired type solar collector to be used for drying purposes: a comparative assessment of efficiency of unglazed transpired type solar collector with glazed type," *Procedia Engineering*, vol. 212, p. 1295–1302, 2018 .
- [41] F. Chabane and E. Sekseff, "Experimental study of a solar air collector with doubles glazed," *Iranian (Iranica) Journal of Energy & Environment*, vol. 9, no. 3, pp. 163-167, 2018.
- [42] B. Hammad, M. Baker and M. Abdulhameed, "Effect of number of glass covers on performance of flat-and corrugated-plate solar air heaters," in *13th International Renewable Energy Congress (IREC)*, 13-15 December 2022.
- [43] V. Kumar, S. Kumar and P. Verma, "Role of absorber and glazing in thermal performance improvements of liquid flat plate solar collector: a review," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 45, no. 4, pp. 10802-10826, 2023.
- [44] Y. Nassar, N. Abuhamoud, G. Miskeen, H. El-Khozondar, S. Alsadi and O. Ahwidi, "Investigating the applicability of horizontal to tilted sky-diffuse solar irradiation transposition models for key Libyan cities," in *2022 IEEE 2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, Sabratha, Libya, 23-25 May 2022.
- [45] A. Alsharif, A. Ahmed, Y. Nassar, M. Khaleel, H. El-Khozondar, T. E.Alhoudier, E. Esmail, "Mitigation of Dust Impact on Solar Photovoltaics Performance Considering Libyan Climate Zone: A Review," *Wadi AlShatti University Journal of Pure and Applied Science*, vol.1, no. 1, pp. 22-27, 2023.
- [46] Y. Nassar and E. Sergievsky, "Heat transfer in flat-plate solar air-heating collectors," in *Sixth international conference on advanced computational methods in heat transfer, Heat Transfer 2000*, Madrid, 2000 .
- [47] Y. Nassar, "Simulation of solar tracking systems," *Energy & Life Journal*, vol. 21, pp. 81-90, 2005.
- [48] G. Azzain, "Exploration of the potential employment opportunities in the field of renewable energies in "Wadi AL-ajal," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 1-14, 2015.
- no. 1, p. 121844, 2024.
- [24] R. Khargotra, T. Alam, K. Thu, K. András and T. Singh, "Optimization of design parameter of V-shaped perforated blocks in rectangular duct of solar air heater by using hybrid BWM-CODAS technique," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 264, no. 1, p. 112627, 2024.
- [25] V. Shemelin and T. Matuška, "Quantitative review on recent developments of flat-plate solar collector design. Part 1: Front-side heat loss reduction," *Energy Reports*, vol. 9, no. 11, pp. 64-69, 2023.
- [26] Y. Liu, C. Tan, Y. Jin and S. Ma, "Heat collection performance analysis of corrugated flat plate collector: An experimental study," *Renewable Energy*, vol. 181, no. 1, pp. 1-9, 2022.
- [27] S. Fischer and E. Hahne, "The effect of different glass covers on the yearly energy gain of a solar collector," in *3. ISES European solar congress*, Copenhagen (Denmark), 19-22 Jun 2000.
- [28] B. Kalidasan and T. Srinivas, "Study on effect of number of transparent covers and refractive index on performance of solar water heater," *Journal of Renewable Energy*, 2014.
- [29] S. Supriti, "Study to Find Out the Optimum Number of Transparent Covers and Refractive Index for the Best Performance of Sunearth Solar Water Heater Using Matlab Software," MSc thesis: Arizona State University, 2015.
- [30] C. Chen, Y. Diao, Y. Zhao, Z. Wang, T. Zhu and L. Wang, "Numerical evaluation of the thermal performance of different types of double glazing flat-plate solar air collectors," *Energy*, vol. 233, no. 10, p. 121087, 2022.
- [31] R. Elzer, "Study of the Effect of Cover Characteristics on the Performance of Flat-plate Solar Collector.," MSc thesis: Omar Al-Mukhtar University, Libya, 2022 .
- [32] K. Murugavel, K. Chockalingam and K. Srihar, "Progresses in improving the effectiveness of the single basin passive solar still," *Desalination*, vol. 220, no. 1-3, pp. 677-686, 2008.
- [33] R. Bakari, R. Minja and K. Njau, "Effect of glass thickness on performance of flat plate solar collectors for fruits drying," *Journal of energy*, 2014.
- [34] H. Panchal, "Performance investigation on variations of glass cover thickness on solar still: experimental and theoretical analysis," *Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy*, vol. 1, no. 7, 2016.
- [35] H. Liu, Y. Tian, J. Liu, D. Zhang, X. Wu and Z. Li, "Performance analysis of solar drying system with sunlight transparent thermally insulating aerogels," *Energy*, vol. 269, no. 4, p. 126698, 2023.
- [36] J. Manikandan and B. Sivaraman, "Comparative studies on thermal efficiency of single and double glazed flat plate solar water heater," *ARNP Journal of engineering and applied sciences*, vol. 11, no. 9, pp. 5521-5526, 2016.
- [37] N. Ihaddadene, R. Ihaddadene and A. Betka, "Effect of Glass Superposition on the Efficiency of the ET 200 Flat Plate Solar