مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد42 العدد (3) – 2026: 271- 282

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 42 number (3) -2026: 271-282

دراسة الأداء الحراري لمركّز طبقي مكافئ مع محرك ستيرلينغ

براءة هيثم حمادي[1]*

[1]*. دكتورة، مدرسة، قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

baraah.ammadi@damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

كما نعلم فإنَّ هناك عدد كبير من التطبيقات التي تحتاج إلى طاقة حرارية كتسخين المياه للاستخدام المنزلي وتجفيف الفواكه والتدفئة والتبريد وصولاً إلى توليد الطاقة الكهربائية. من جهة أخرى تُصنَّف سوريا على أنَّها بلد شمسي ممتاز حيث تصل كمية الطاقة الوسطية السنوية من الإشعاع الشمسي الكلي الأفقي الوارد إلى المتر المربع الواحد من الأرض إلى أكثر من [kW.h/m^2.year] 2000 حسب المركز الوطني لبحوث الطاقة، وهذا ما يشجع كثيراً على نشر تطبيقات الطاقة الشمسية.

يتركز البحث حول تسليط الضوء على الطاقات المتجددة وخاصة الطاقة الشمسية للحد من التلوث البيئي وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، وتقديم دراسة تفصيلية للمركّز الشمسي الطبقي مع محرك ستيرلينغ من حيث دراسة الأداء الهندسي والحراري وحساب الكفاءة لهذا النوع من المركّزات الشمسية.

لقد تبيّن أنّه من أجل مركّز طبقي مع محرك ستيرلينغ بقطر [m] 5 وبعد محرقي [m] 7.81 وزاوية حافة [rad] 0.328 وانعكاسية 0.94 تكون الكفاءة الكلية للنظام 0.279، والاستطاعة الكهربائية الناتجة [W] 3244.91 وذلك في شهر أيلول لمدينة دمشق حيث الإشعاع الشمسي المباشر أعظمياً.

الكلمات المفتاحية: المركّز الطبقي المكافئ، محرك ستيرلينغ، الكفاءة البصرية، المستقبل المجوّف، نظام التتبع.

تاريخ الإيداع: 2023/9/20
تاريخ القبول: 2023/11/26

حقوق النشر: جامعة دمشق –سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب CC BY-NC-SA

Thermal Performance Study of the Parabolic Dish Concentrator with a Stirling Engine

Baraah Hammadi*[1]

***[1].** Dr, Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Damascus university.

baraahhammadi@damascusuniversity.edu.sy.

Received: 20/9/2023
Accepted: 26/11/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a **CC BY- NC-SA**

Abstract:

As we know, there are a large number of applications that need thermal energy, such as heating water for domestic use, drying fruits, heating and cooling, and even electric power generation. On the other hand, Syria is classified as an excellent solar country, as the annual average energy amount of the total horizontal solar radiation received per square meter of land reaches more than 2000 [kW.h/m^2.year] according to National Center for Energy Research, and this greatly encourages the deployment of solar applications.

The research focuses on highlighting renewable energies, especially solar energy, to reduce environmental pollution and reduce dependence on fossil fuels, and to present a detailed study of the parabolic dish concentrator with the Stirling engine in terms of studying the engineering and thermal performance and calculating the efficiency of this type of the solar concentrators.

It has been shown that for a parabolic dish concentrator with diameter of 5 [m], focal length of 7.81 [m], rim angle of 0.328 [rad], and a reflectivity of 0.94, the overall efficiency of the system is 0.279, and the electrical capacity generated 3244.91 [W] in the month of September in Damascus where direct solar radiation is greatest.

Key Words: The Parabolic Dish Concentrator, Stirling Engine, The Optical Efficiency, The Cavity Receiver, Trackin System.

المقدمة:

تستفيد الخلايا الشمسية من فوتونات ضوء الشمس لتولّد طاقة كهربائية بينما تستفيد أنظمة التركيز الشمسية من الطاقة المُحمّلة بالفوتونات على مساحة السطح وتُركّزهم على نقطة واحدة لرفع درجة حرارتها.

متوسط كفاءة الخلايا الشمسية 15–18% بينما متوسط كفاءة المركزات الشمسية 20–25%. حسب (Zekai, 2008).

أنظمة الطاقة الشمسية المُركِّزة تُدعى عادة CSPs (Concentrating Solar Power Systems): وهي أجهزة تُولّد طاقة كهربائية من طاقة الشمس، غالباً تستخدم هذه الأجهزة مرايا، عدسات أو مواد عاكسة لتركيز الإشعاع الشمسي الذي تم الحصول عليه على سطح المجمع على مساحة أصغر.

تشمل هذه الأنظمة:

مركزات حوض القطع المكافئ والتي تُستخدم إما لتسخين الماء أو لتوليد الكهرباء.

البرج الشمسي والذي يستخدم مرايا مباشرة لتركيز الطاقة الشمسية.

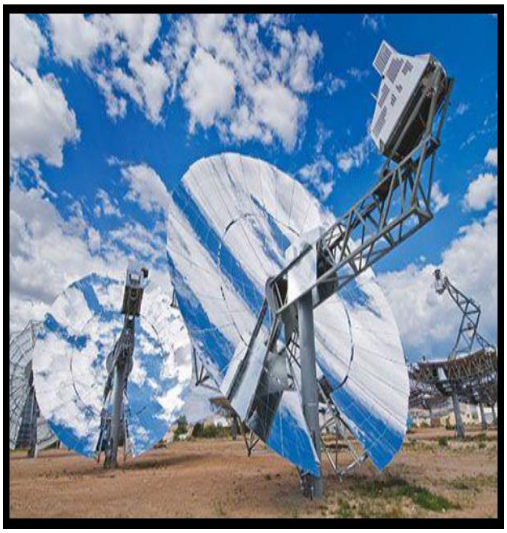
مركزات الطبق المكافئ والتي تُركّز الإشعاع الشمسي على نقطة المحرق بفضل هندسة التقعير (الطبق المقعر).

عاكسات فرينل: تعتمد على مجموعة من شرائط المرآة الخطية التي تُركّز الضوء على المستقبل الخطي. يمكن تصوّر عاكس فرينل على أنّه عاكس حوض مكافئ مكسور، لكن على عكس أحواض القطع المكافئ لا يلزم أن تكون الشرائط الفردية ذات شكل مكافئ. حسب (Zekai, 2008).

تُحقق تقنيات CSPs بشكل عام مستويات كفاءة أعلى من تقنيات الطاقة الشمسية التقليدية الأخرى.

1- الدراسات المرجعية:

يوضح لنا الشكل (1) مركّز طبقي مكافئ مع محرك سترلينغ (Gueymard, 2004).



الشكل (1) الطبق المكافئ مع محرك سترلينغ

تُركِّز الأطباق المكافئة إشعاع الشمس في نقطة تُدعى المستقبل. يُستفاد من هندستها في تحقيق أعلى الكفاءات بين تقنيات الطاقة الشمسية ويُحقق هذا النوع من المركّزات أعلى كفاءة لأنّه لا يعاني من ضياعات بصرية كبيرة كما هو الحال في أنظمة التركيز الأخرى. تجمع هذه الأنظمة الأشعة الواردة من الشمس والموازية

لمحور القطع وتعكسهم إلى نقطة المحرق حيث يكون المستقبل متوضعاً. يجب توجيه المركّز باتجاه الشمس بشكل مثالي وهذا

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

هو السبب في أنَّ معظم المركّزات الطبقية تستخدم نظام ملاحقة ثنائي المحور من أجل تتبع الشمس باستمرار.

يُغطى سطح المركّز بمرايا عاكسة أو مواد طلاء أخرى ذات انعكاسية كبيرة.

في مدينة أغادير في المغرب التي تقع على خط عرض 30° قام الباحث (Hamza et al., 2019) بتصميم مركّز شمسي طبقي مكافئ قادر على إعطاء الطاقة إلى منزل صغير الحجم أو قادر على تغطية جزء من احتياجات الطاقة لمنزل (متطلبات كهرباء)، اليوم الذي تم دراسته هو يوم صيفي 14 حزيران 2018. تم الحصول على الإشعاع الشمسي العمودي المباشر، درجات حرارة الوسط المحيط، بالإضافة لسرعات الرياح من بيانات الطقس العامة. ثم تم تحليل البيانات بالساعة لتقييم تغيّر الكفاءة الحرارية للمستقبل وخرج الكهرباء الكلي للنظام في أوقات مختلفة من اليوم. وتبين أنّ أعظم طاقة كهربائية تم الحصول عليها كانت [kW] 5.5 حيث الكفاءة الكلية للنظام 0.27.

كما توصل الباحثون (Rubén Gil et al., 2015) إلى نموذج حراري لمركّز طبقي ذي محرك سترلينغ والذي يحوي مستقبل مجوف اعتماداً على طريقة الفروق المنتهية CFD والبرامج الحاسوبية. يتيح هذا النموذج إمكانية تغيير أبعاد التجويف والمستقبل والمواد لتحديد تصميم التجويف الأمثل. هدف هذه الدراسة: تحليل كيف تؤثر الأبعاد المختلفة على كفاءة وطاقة النظام. وتم الحصول على طاقة كهربائية مقدارها [kW] 10 من هذا النموذج الذي نصف قطر فتحة الطبق فيه 10.13 [cm] ونصف قطر المستقبل [cm] 15.98.

في عام 2010 تم تركيب محطة شمسية بأنظمة سترلينغ في أريزونا باستطاعة كهربائية [MW] 1.5. تتألف من 60 وحدة من أنظمة الطبق المكافئ، استطاعة كل طبق [kW_e] 25. وقد تم اعتبار هذه المحطة كنموذج لمشاريع مستقبلية أكبر بكثير. بشكل عام تُعتبر أنظمة طبق سترلينغ الأكثر مناسبة للتطبيقات اللامركزية والبعيدة عن الشبكة.

صنع العالمان (Matthias et al.,) في أوروبا وحدتان تتكونان من أطباق [m] 17 ومحركات سترلينغ تم تركيبهم في المملكة العربية السعودية. وتم الحصول على استطاعة [kW_e] 50 عند إشعاع عمودي مباشر على فتحة المركّز حوالي $800\left[\frac{W}{m^2}\right]$ (قيمة نموذجية مثالية في يوم شمسي أوروبي). تراوحت كفاءة النظام النموذجية η_{sys} عند نقطة التصميم بين 15% و 25%.

2- مواد البحث وطرائقه:

1.2 التحليل الهندسي والبصري للطبق المكافئ مع محرك سترلينغ:

يمكن تقسيم وصف النظام هذا إلى أربعة أجزاء رئيسية:

1. تصميم الطبق.
2. تصميم المستقبل.
3. نظام التتبع.
4. محرك سترلينغ.

1.1.2 تصميم الطبق:

يعتمد على شكل العاكس، وقد تضمنت دراسات عديدة أشكال مختلفة للعاكس مثل مرايا مسطحة أو مكافئة أو كروية، وتبيّن من خلال هذه الدراسات أنّ المرِكزات ذات الشكل المكافئ هي الأفضل من بين الأشكال الأخرى (Rubén, 2015).

اختيار مادة العاكس ليتم استخدامها لعكس الإشعاع الشمسي الوارد هو معيار هام من أجل التصميم. يجب أن يكون سطح العاكس عاكس للغاية من أجل تخفيض الطاقة الممتصة بواسطة مادة العاكس وعكس معظم الإشعاع الشمسي الوارد على المستوي المحرقي. مواد المرآة المستخدمة عادة تكون لها خصائص انعكاس جيدة.

في الواقع القيم النموذجية للانعكاسية لمثل هذه المواد تتراوح بين 0.7−0.95 (Rubén, 2015). يجب أن يكون السطح من المعدن المصقول مثل الألمنيوم أو الستانلس ستيل. غالباً يُستخدم الزجاج المطلي بالفضة. ويجب أن تقاوم المادة الشروط المناخية لكي تؤمن وقت تشغيل طويل الأمد.

يؤثّر نوع المادة بشدّة على مقدار الإشعاع الشمسي المنتقل إلى المستقبل. حيث تجمع مركّزات الطبق المكافئ الحزم القادمة من الشمس والموازية لمحور القطع المكافئ، وتعكسها إلى المحرق حيث يوجد المستقبل الحراري.

مـن أجـل هـذا التطبيـق مـادة العـاكس المفضـلة هـي Glass/Silver 2mm بانعكاسية $\rho = 0.94$ كما هو مبين في الجـدول (1) (Rubén, 2015). والغطـاء المضـاد (المـانع) للتلوث هو ثاني أكسيد التيتانيوم لخصائصه الفريدة.

يُسخّن مـائع التسـخين (إمـا هيـدروجين أو هيليـوم) فـي محـرك ستيرلينغ حتى درجة حرارة 750$\left[C°\right]$، ثم يتم تحويل الحرارة إلى كهرباء عن طريق محرك ستيرلينغ (Mohamed, 2021).

من المميزات الأساسية لمركّز ستيرلينغ الطبقي أنّه لا يحتاج إلى تخزين طاقة حرارية أو احتمال نقلها، لأنّ الطاقة تتحول مباشرة إلى كهرباء. والحجم الصغير للنظام له القدرة على التطبيقات الصغيرة لإنتاج طاقة غير مركزية وبعيدة عن الشبكة.

من العيوب الرئيسية لـه الاحتيـاج إلـى عـاكس هندسـي معقد وبالتالي تكلفة تصنيع مرتفعة، وكذلك صيانته معقدة (Hamza, 2019).

الجدول (1) مواد العاكس المتاحة

Materials	Reflective (%)	Emissive (%)
Polymeric film, non metal	98	2
Aluminum, acrylic	98	2
Silver, aluminum acrylic	97	3
Silver, acrylic	95	5
Aluminum	86	14
Aluminum, polyethylene	97	3
Plexiglas with mirror	90	10
Thermoplastic, silver, gold, brass, etc.	80	20
Aluminum mylar	97	3
Polymer, copper, silvered, alumina	97	3
Polished stainless	50	50
Ceramic metallic coating layer	95	5
Glass/silver 4 mm	93.8	6.2
Glass/silver 2 mm	94	6
Glass/silver 1 mm	94.6	5.4
Miro 2–95	88.6	11.4
Miro 3–95	91.1	8.9
Anod aluminum	86.8	13.2
1000.90	89.8	10.2
ECP305+/aluminum	95.6	4.4
ECP305+/glass	96.1	3.9
Sunflex (polymer/aluminum)	86.9	10.1
SA 85/glass	88.1	11.9
SA 85/steel	88.2	11.8
Sol-gel coated silver	95.5	4.5
Sol-gel coated aluminum	91	9

سطح الطبق:

هو المساحة التي تشغل فتحة الطبق، وبما أنّ القاعدة العلوية للطبق هي سطح دائري، فإن مساحة الفتحة محددة بمساحة الدائرة، ويتم الحصول عليها من خلال المعادلة التالية:

$$A_a = \frac{\pi D_c^2}{4} \quad (1)$$

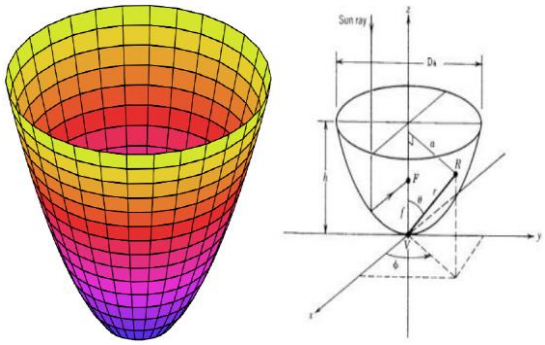
حيث:

D_c: قطـر الطبـق [m]. وعـادة يكـون بـين [m] 5-15. (Rubén, 2015).

تفرض الاستطاعة المطلوبة من محرك ستيرلينغ مقدار قطر الطبق أو حجمه، الذي يصمّم عند شدة إشعاع شمسي 1000 $[W/m^2]$ [5].

يعتمد قطر المركّز بشكل أساسي على طاقة النظام الكهربائي المطلوبة والإشعاع المتاح وكفاءة تحويل الإشعاع إلى طاقة كهربائية.

أهم بارامترات الطبق المكافئ هو البعد المحرقي f، والذي يُعرَّف بأنّه المسافة بين نقطة المحرق والنقطة V من محور تناظر القطع والموجودة عند ذروة القطع. يُبين الشكل (2) هذه الذروة (vertex) والتي هي أعمق نقطة في القطع.



http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

الشكل (2) توضيح 3D ورسم بياني لقطع مُدوّر

يشير العمق h إلى المسافة من مركز فتحة المركّز الطبقي إلى النقطة V ذروة القطع.

D: قطر فتحة القطع التي لها سطح دائري من قاعدتها العلوية.

تُعتبر هذه البارامترات هامة لتعريف شكل المركّز الشمسي وبالتالي تحديد موقع نقطة المحرق F.

إذا أخذنا مستوي المحورين yz ستكون معادلة القطع ببساطة:

$$y^2 = 4fz$$

بما أنَّ D موجّهة على طول المحور y والمستوي الذي يهمنا هو مستوي yz، عندها يكون البارامتر y ببساطة هو نصف قطر الفتحة R. وبما أنَّ h موجهة على طول المحور z تُصبح المعادلة بالشكل:

$R^2 = 4fh$ والتي تكون مساوية لـ: $\frac{D^2}{4} = 4fh$ عندها يتم الحصول على البعد المحرقي من المعادلة:

$$f = \frac{D^2}{16h} \qquad (2)$$

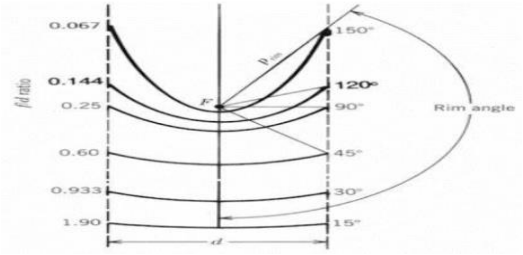
أهم بارامتر عند تصميم المركّز الشمسي المكافئ: زاوية الحافة ψ وتُعرَّف بأنَّها الزاوية المحصورة بين الخط الواصل من حافة القطع إلى المحرق والمحور z. وتُعطى بالشكل:

$$\tan(\psi) = \frac{1}{\left(\frac{D}{8h}\right)-\left(\frac{2h}{D}\right)} \qquad (3)$$

زاوية الحافة هي التي تُحدد فيما إذا كان الطبق المكافئ منحني أو مسطح. وبالتالي المركّز ذو زاوية حافة كبيرة يكون منحني نسبياً والمركّز ذو زاوية حافة صغيرة يكون مسطح نسبياً. يبين الشكل (3) تغير البعد المحرقي تبعاً لزاوية الحافة.

بما أنَّ القاعدة العلوية للطبق المكافئ هي سطح دائري، لذلك تُعرَّف مساحة الفتحة بمساحة دائرة. وأيضاً يمكن التعبير عنها كتابع لزاوية الحافة وتُعطى بالشكل:

$$A_a = 4\pi f^2 \frac{\sin^2\psi}{(1+\cos\psi)^2} \qquad (4)$$



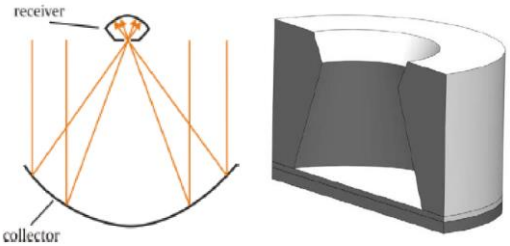
الشكل (3) تغير البعد المحرقي تبعاً لزاوية الحافة

2.1.3 تصميم المستقبل:

مستقبل الطبق المكافئ هو الجزء الواصل بين المركّز الشمسي المكافئ ومحرك الحرارة المستخدم لإنتاج عمل ميكانيكي. هذا الوسيط (المستقبل) يمتص كمية كبيرة من الإشعاع المنعكس بواسطة المركّز ويسمح للحرارة أن تنتقل إلى المائع العامل في محرك الحرارة والذي هو في حالتنا محرك سيرلينغ.

في تصميم أنظمة الطبق المكافئ يتم اعتبار نوعين رئيسيين في هندسة المستقبل: المستقبل الخارجي والمستقبل المجوّف. الأداء البصري للنظام متعلق جداً بحجم المستقبل. في هذه الدراسة تم اعتماد المستقبل المجوّف ذو الشكل المخروطي لأنّه يخفّض الضياعات الحرارية (Hamza et al., 2019) وبالتالي يحقق أعظم استفادة من الحرارة المنتقلة إلى المائع العامل.

في الواقع الجزء الكبير من الإشعاع المنبعث من المستقبل المجوف يبقى داخله ليعاد امتصاصه مرة ثانية بواسطة محرك الحرارة. أيضاً الضياعات الحرارية بالحمل محدودة في المستقبل المجوف مقارنة مع المستقبل الخارجي الذي يتعرض للمحيط الخارجي. كما أنّه من المهم ملاحظة أنَّ فتحة المستقبل موجودة في المستوي المحرقي للمركّز بينما يوجد الماص خلفها. إضافة إلى أنّه كما هو مبين في الشكل (4) قد يكون حجم الماص أكبر من حجم فتحة المستقبل وهكذا فإنَّ الإشعاع الوارد ينتشر داخل الفجوة قبل الوصول إلى الماص الذي يمنع المواد المستخدمة أن تكون مضغوطة حرارياً. إذاً تُستخدم المستقبلات المجوفة من أجل تطبيقات درجات الحرارة العالية.



الشكل (4) توضيح لمستقبل مجوف (على اليسار) وهندسة شكل التجويف (على اليمين) (Hamza et al., 2019)

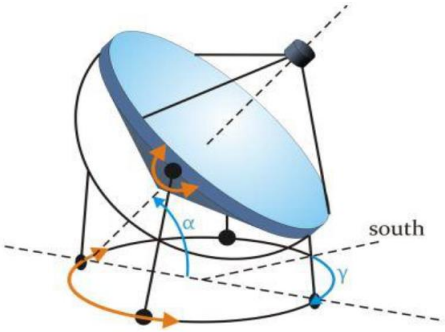
نسبة التركيز هي بارامتر هام وتشير إلى نسبة مساحة الطبق المكافئ إلى مساحة المستقبل. يمكن أن تصل نسبة التركيز إلى قيم كبيرة طالما تطبيق هذه الأنظمة يتطلب مساحة مركّز كبيرة. وتعطى بالعلاقة التالية:

$$C_g = \frac{A_{dish}}{A_{rec}} \quad (5)$$

لا تأخذ نسبة التركيز الهندسية بالاعتبار أشعة الشمس المنحرفة بسبب أخطاء الميل أو عيوب المرايا أو مواد انعكاس المرايا. وهذا يدل على اعتبار كل أشعة الشمس موزعة بانتظام على فتحة المستقبل. يمكن أن تصل نسبة التركيز في هذا النوع من المركّزات إلى 2000 (Rubén Gil et al., 2015).

3.1.2نظام تتبع الشمس:

يتميز الطبق المكافئ أو أي مركّز نقطي بنظام ملاحقة ثنائي المحور مما يجعل الطبق يتجه باستمرار نحو الشمس من أجل المحافظة على الإشعاع العمودي المباشر. بمعنى أنَّ أشعة الشمس توازي المحور البصري للمركّز الموجود في نقطة المحرق.



الشكل (5) توضيح لـ γ و α

تتحرك الشمس في السماء تبعاً لمسار محدد يتميز بزاويتين رئيسيتين: زاوية السمت (zenith angle) أو زاوية ارتفاع الشمس α وزاوية سمت الشمس (azimuth angle) γ الموضحتين في الشكل (5) (Solar Energy Engineering Processes and Systems. 2009).

نظام الملاحقة الارتفاع_ سمت الشمس هو نظام ملاحقة بمحورين لأنَّه يلاحق موقع الشمس تبعاً للمحور الأفقي (سمت الشمس) وتبعاً للمحور العمودي (السمت الشمسي).

4.1.3 محرك ستيرلينغ:

هو نوع من محركات الحرارة والتي تتميز بقدرة الغاز على التمدد عندما يُسخَّن، ويتقلص عندما يُبرّد. في المحرك يكون الغاز محبوس في أسطوانات ذات حجم ثابت لذلك سيزداد ضغطه عندما يتم تسخينه ويُبرّد ليخفض درجة حرارته. تتحرك مكابس الأسطوانات خارجاً عندما يكون ضغط الغاز عالي وتتحرك داخلاً عندما ينخفض الضغط. تُسبب حركة المكابس بدوران العمود المرفقي (عمود الكرنك) وإنتاج عمل ميكانيكي.

المحرك الأكثر استخداماً لأجل تطبيقات الطاقة الشمسية هو محرك ألفا ستيرلينغ والذي يتألف من محرك بأسطوانتين: أسطوانة ساخنة وأخرى باردة. مبدأ العمل مشابه لأي محرك ستيرلينغ. المائع المستخدم في هذه الحالة هو الهيدروجين وذلك لأدائه العالي (Gueymard, 2004).

تتراوح الكفاءة الحرارية لمحرك ألفا ستيرلينغ المستخدم لأجل تطبيقات الطاقة الشمسية بين 65 − 75% (Hamza et al., 2019). لذلك نفترض كفاءة تشغيل اسمية $\eta_{st} = 0.7$ والتي تتوافق مع القيمة الوسطية للمجال المعطى.

2.3 كفاءة نظام المركّز/ المستقبل:

1.2.3 الكفاءة البصرية للمركّز: رمزها η_0 تُقيّم كم إشعاع يمكن للمركّز عكسه باتجاه المستقبل. يعتمد هذا البارامتر بشكل أساسي على مواد الانعكاس، الهندسة المقترحة لأجل التصميم. تم الحصول على الكفاءة البصرية من خلال تحليل مجموعة الضياعات المختلفة عند مستوي المركّز.

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

يخضع النظام إلى:

○ ضياع التظليل الذي يحدث بسبب المستقبل ومحرك ستيرلينغ اللذين يحجبان أشعة الشمس من الوصول إلى مساحة صغيرة من المركّز. يتم حسابه كنسبة من فتحة المستقبل على فتحة الطبق إذاً تُحسب الكفاءة بسبب ضياع التظليل بالعلاقة:

$$\gamma = 1 - \frac{A_r}{A_a} \quad (5)$$

ضياع الانعكاسية: يشير إلى الإشعاع الضائع بسبب انعكاسية المركز. يعتمد على انعكاسية مادة العاكس.

الكفاءة في هذه الدراسة ببساطة هي انعكاسية مادتنا وهي: $\rho = 0.94$.

ضياع التسرب (Spillage loss): يجب اعتبار هذا الضياع الذي يتوافق مع الإشعاع المنعكس الذي يخطئ مدخل المستقبل. يتم تقديره بين المجال 1−3% لذلك تكون الكفاءة باعتبار هذا الضياع 2% لتكون: $\partial = 0.98\%$.

وبالتالي تكون الكفاءة البصرية معطاة بالشكل:

$$\eta_0 = \gamma\rho\,\partial \quad (6)$$

2.2.3 الكفاءة الحرارية للمستقبل:

تُعرَّف على أنَّها نسبة الطاقة الواصلة إلى المستقبل إلى الطاقة الواردة على فتحة المركّز الطبقي.

$\dot{Q}_u$: معدل الطاقة المنتقلة إلى المستقبل.

$\dot{Q}_s$: معدل الطاقة الواصلة إلى المركّز الطبقي وتساوي:

$$\dot{Q}_s = DNI \times A_a \quad (7)$$

معدل الطاقة المنتقلة إلى المستقبل (قبل الضياع الحراري في المستقبل) هو الطاقة المستلمة بواسطة المركّز مضروبة بالكفاءة البصرية لذلك يمكن كتابة:

$$\dot{Q}_R = \eta_0 \dot{Q}_s = \eta_0 DNI \times A_a \quad (8)$$

$\dot{Q}_R$: الطاقة المنعكسة من المركّز إلى المستقبل.

A_a: مساحة الطبق.

تصف كفاءة المستقبل قابليته لنقل الحرارة من التجويف إلى ماص محرك ستيرلينغ وتُعطى الكفاءة الحرارية للمستقبل بالشكل:

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_u}{\eta_0 \dot{Q}_s} = \frac{\dot{Q}_u}{\eta_0 DNI \times A_a} \quad (9)$$

وتعطى الطاقة المفيدة التي سيتم الحصول عليها من المركّز الطبقي بالشكل:

$$\dot{Q}_u = \dot{Q}_R - \dot{Q}_L \quad (10)$$

$\dot{Q}_L$: الضياع الحراري من المستقبل إلى المحيط.

$\dot{Q}_R$: الطاقة الممتصة من قبل مائع نقل الحرارة.

يعتمد الإشعاع الشمسي العمودي المباشر على الموقع الجغرافي، اتجاه المركّز، بالإضافة إلى بيانات الطقس والوقت من اليوم بما أنَّ الإشعاع الشمسي يكون أعظمياً عند الظهر الشمسي مقارنة مع الصباح الباكر أو بعد الظهر.

بافتراض شروط الحالة المستقرة تُعطى الطاقة الممتصة بواسطة مائع نقل الحرارة بطرح الضياع الحراري من المستقبل إلى المحيط $(\dot{Q}_L)$ من الطاقة المنعكسة على المستقبل بواسطة المركز $\dot{Q}_R$.

3.2.3 الضياعات الحرارية في المستقبل:

تحدث بعدة أشكال: التوصيل والحمل الحراري والإشعاع.

ضياعات التوصيل: تعطى بالشكل:

$$\dot{Q}_{cond} = \frac{T_{cav} - T_{amb}}{\ln\left[\frac{\left(\frac{d_{cav}}{2}\right)+\delta_{ins}}{\frac{d_{cav}}{2}}\right]/(2\pi k_{ins} L_{cav})} \quad (11)$$

T_{amb}: درجة حرارة الوسط المحيط وهي درجة الحرارة عند الوقت المعطى من اليوم بالكلفن.

T_{cav}: درجة حرارة التجويف وتُعطى بالشكل:

$$T_{cav} = \sqrt[4]{\frac{\dot{Q}_R}{A_t \varepsilon_r \sigma}} \quad (12)$$

ε_r: انبعاثية المستقبل.

$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$ ثابت ستيفان بولتسمان.

δ_{ins}: سماكة العازل.

k_{ins}: الموصلية الحرارية للعازل.

ضياعات الحمل: تُحسب باستخدام معامل انتقال الحرارة بالحمل والذي يشمل معامل انتقال الحرارة بالحمل الطبيعي ويتم تقريبه عن طريق عدد نوسلت، ومعامل انتقال الحرارة بالحمل القسري.

$$h = h_{natural} + h_{forced} \quad (13)$$

$$h_{natural} = \frac{Nu \times \lambda}{d_{cav}} \quad (14)$$

λ: الموصلية الحرارية للهواء والتي تعتمد على درجة حرارته وضغطه.

بما أننا سنتعامل مع المحيط، يمكن أن تُقرَّب الموصلية للهواء وتصبح الموصلية عند درجة حرارة المحيط والضغط الجوي.

$$\dot{Q}_{conv} = hA_{cav}(T_{cav} - T_{amb}) \quad (15)$$

عدد نوسلت هو عدد يُستخدم في ديناميك الموائع ليتوقع معدل انتقال الحرارة بالحمل. في هذا النموذج يُعطى بالشكل:

$$Nu_{natural} = 0.088Gr^{1/3}\left(\frac{T_{cav}}{T_{amb}}\right)^{0.18} \times (\cos\theta)^{2.47} \times \left(\frac{D_{ap}}{D_{cav}}\right)^{-0.982\frac{D_{ap}}{D_{cav}}+1.12} \quad (16)$$

θ: زاوية الورود.

وبفرض أنَّ نظامنا يلاحق الشمس بشكل كامل فإنَّ θ تُحسب بالشكل التالي (Hamza et al., 2019):

$$\cos(\theta) = \sin(L)\sin(\delta) + \cos(L)\cos(\delta)\cos(h) \quad (17)$$

L زاوية خط العرض وتساوي 33.5° لمدينة دمشق.

δ: زاوية الانحراف وتُحسب بالشكل.

$$\delta = 23.45\sin\left[\frac{360}{365}(284 + N)\right] \quad (18)$$

N: رقم اليوم في السنة تمت الدراسة ليوم الاعتدال الخريفي.

h: الزاوية الساعية تُحسب بالشكل.

$$h = \pm\frac{1}{4}\begin{pmatrix}\text{Number of minutes from}\\ \text{local solar noon}\end{pmatrix} \quad (19)$$

Gr: عدد غراتشوف ويُعرَّف بالعلاقة:

$$Gr = \frac{g\beta_{air}(T_{cav}-T_{amb})L_{cav}^3\rho_{air}}{\mu^2} \quad (20)$$

μ: لزوجة الهواء.

g: تسارع الجاذبية.

ρ_{air}: كثافة الهواء.

β_{air}: معامل تمدد الهواء.

نفرض الهواء غاز مثالي وبالتالي:

$$\beta_{air} = \frac{1}{T_{cav}} \quad (21)$$

يُعطى معامل انتقال الحرارة بالحمل القسري بالشكل:

$$h_{forced} = 0.1967 \times v^{1.849} \quad (22)$$

ضياعات الإشعاع:

جزء هام من الضياع الذي يتعرض له المستقبل يكون بسبب ضياع الإشعاع.

يتميز انتقال الحرارة بالإشعاع بآليتين: انبعاث وانعكاس.

يعطى ضياع الحرارة بالإشعاع بالعلاقة:

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon_{eff}.A_{cav}.\sigma(T_{cav}^4 - T_{amb}^4) \quad (23)$$

ε_{eff}: الامتصاصية الفعالة للمستقبل المجوف وتُحسب من:

$$\varepsilon_{eff} = \frac{1}{\left[1+\left(\frac{1}{\varepsilon_c}-1\right).\frac{A_{ap}}{A_{cav}}\right]} \quad (24)$$

ε_c: انبعاثية التجويف.

A_{cav}: مساحة التجويف.

أخيراً تعطى الضياعات الحرارية الكلية من المستقبل بالشكل:

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_{cond} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (25)$$

3.3 كفاءة النظام الكلية η_{tot}:

الكفاءة الكلية للنظام هي جداء كل من الكفاءة الحرارية والبصرية للمستقبل في كفاءة محرك ستيرلينغ وكفاءة مولّد الطاقة وتُعطى بالعلاقة التالية:

$$\eta_{tot} = \eta_{th} \times \eta_0 \times \eta_{st} \times \eta_{gen} \quad (26)$$

حيث:

η_{st} : كفاءة محرك ستيرلينغ.

η_{gen}: كفاءة مولّد الطاقة.

تُحسب الاستطاعة الكهربائية من هذا النظام بالشكل:

$$P = \eta_{tot}.A_a.DNI = \eta_{tot}.\dot{Q}_s \quad (27)$$

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index
ISSN (online): 2789-6854

4. النتائج والمناقشة:

يبين الجدول (2) مواصفات طبق ستريلينغ والجدول (3) مواصفات المستقبل.

الجدول (2) مواصفات طبق ستريلينغ

القطر	5 [m]
الارتفاع	0.2 [m]
الانعكاسية	0.94
البعد المحرقي	7.81 [m]
زاوية الحافة	0.328 [rad]
مساحة فتحة الطبق	19.63 [m^2]

الجدول (3) مواصفات المستقبل

قطر المستقبل	$D_r = 0.25$ [m]
مساحة فتحة جهاز المستقبل	$A_r = 0.05$ [m^2]
قطر التجويف	$D_{cav} = 0.15$[m]
طول التجويف	$L_{cav} = 0.1$ [m]
انبعاثية التجويف	$\varepsilon_r = 0.85$
الامتصاص الفعال	$\alpha_{abs,r} = 0.96$
سماكة العزل	$_{ins} = 0.05\delta$
الموصلية الحرارية للعزل	$K_{ins} = 0.04$
مساحة التجويف	$A_{cav} = 0.0176$ [m^2]

تم الحصول على المتوسط الشهري لدرجة الحرارة وسرعة الرياح والإشعاع الشمسي المباشر لشهر أيلول لمدينة دمشق المبين في الجدول (3) من برنامج Dview.

ملاحظة: تمت الحسابات لهذا الشهر لأنّ أعظم إشعاع شمسي مباشر طيلة أيام السنة يكون في هذا الشهر.

سرعة الرياح الوسطية $\left[\frac{m}{s}\right]$ 6، درجة الحرارة الوسطية للوسط المحيط [°C]28.

الجدول (4) الإشعاع الشمسي المباشر لأيلول

الساعة	DNI [W/m^2]
7.5	607
8.5	811
9.5	892
10.5	922
11.5	933
12.5	926
13.5	892
14.5	817
15.5	677
16.5	405

نتيجة الحسابات السابقة ينتج لدينا ما يلي:

الكفاءة الحرارية للمستقبل 0.87.

الكفاءة البصرية للطبق 0.918.

كفاءة محرك ستريلينغ 0.7.

كفاءة المولد 0.5.

بالتالي تكون الكفاءة الكلية للنظام 0.279.

والاستطاعة الكهربائية الناتجة .[W]3244.91

5. الخاتمة:

يعمل نظام المركّز الطبقي مع محرك ستريلينغ بكفاءات عالية (حوالي 25– 27%) وهو قادر على إنتاج مقدار مقبول من الكهرباء. يمكن أن تغطي الطاقة المُنتَجة احتياجات الطاقة لعدة تطبيقات مثل حاجة أسرة، أنظمة تدفئة وتبريد أو توليد طاقة لتعمل في البرادات الصناعية (والتي هي معروفة أنَّها تستهلك كميات كبيرة من الكهرباء مثلاً). على أي حال بما أنَّ النموذج يتضمن محرك ستريلينغ بكفاءة 70% ومولّد طاقة بكفاءة 50% يمكن إجراء المزيد من الدراسة والبحث لتحسين الكفاءة الحرارية لأجزاء أخرى من وحدة تحويل الطاقة. ومن المهم أيضاً إجراء تحليل مالي لفهم هذا النظام وتحديد فترة استرجاع رأس المال.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

References:

فارس، أمينة. (2016). أنظمة التسخين الشمسي 1. منشورات جامعة دمشق.[1]

المركز الوطني لبحوث الطاقة.[2]

[3] Zekai ¸S. (2008 Springer) Solar Energy Fundamentals and Modeling Techniques. Atmosphere, Environment, Climate Change and Renewable Energy. Istanbul Technical University.

[4] Solar Energy Engineering Processes and Systems. 2009, Elsevier Inc.

[5] Duffie, J and Beckman, W. (2006). Solar engineering of the thermal processes, 3rd ed.; John Wiley & Sons Inc.: New York, NY, USA.

[6] Duffie, J and Beckman, W. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth ed.; John Wiley & Sons Inc.: New York, NY, USA.

[7] Gueymard ،C. 2004،. "The sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models". Solar energy 76،(4) ،pp. 423–453.

[8] A.A SFEIR G. GUARRACINO, ingénieur des systèmes solaires, application a l'habitat, technique et documentation, Edition paris,1981.

[9] K-Messaitfa, Evaluation de l'apport quantitatif des inclinaisons optimales d'un Système de pompage photovoltaïques – enersole'01-adrar-algerie pp 255-272. 2001

[10] Hamani Nadjette, Modélisation du flux solaire incident et de la température de sortie dans un capteur solaire à eau avec effet de concentration du rayonnement solaire incident, mémoire de magister, Université Mohamed Khider- Biskra,2005.

[11] Goswami ،D. Y. ،Kreith ،F. ،Kreider ،J. F. ،and Kreith ،F. 2000،. Principles of Solar Engineering. second ed. ،Taylor & Francis ،Philadelphia ،PA.

[12] Hamza, Werzgan. April 22nd (2019). Solar Thermal Dish Collector, School of Science & Engineering – AL AKHAWAYN UNIVERSITY.

[13] Matthias, G and Reza S. Advanced CSP Teaching Materials. Chapter 7, Solar Dish Technology. (DLR) Deutsches Zentrum fur Luft- und Raumfahrt e.V.

[14] Rubén Gil, Carlos Monné, Nuria Bernal, Mariano Muñoz and Francisco Moreno. Thermal Model of a Dish Stirling Cavity-Receiver. Energies 2015, 8, 1042-1057; doi:10.3390/en8021042.

[15] Mohamed, E. Jun, Z. Ammar, H. Elsheikh. Zhennan, Z. Shengyuan, Z. February (2021). DOI: 10.1016/j.psep.2020.09.007. Comprehensive parametric analysis, design and performance assessment of a solar dish/Stirling system.

http://journal.damascusuniversity.edu.sy/index.php/index/index

ISSN (online): 2789-6854