

حساب نسبة التركيز و توزيع الفيض الشمسي للمركز الشمسي الهرمي المقطوع باستخدام محاكاة تتبع الأشعة في ثلاثة أبعاد

“Calculation of the Concentration Ratio and Solar Flux Distribution of the Truncated Pyramid Solar Concentrator Using Three-Dimensional Ray Tracing Simulation”

أ هناء جمعة بن حليم¹، د بدر الدين جمعة سعد²، أ د محمد عبد العزيز منصور³

1 قسم تقنية البصريات، المعهد العالي للعلوم و التقنية الشموخ، طرابلس

2 المركز الليبي التقني العالي للتدريب والإنتاج، طرابلس ليبيا

3 قسم فيزياء، كلية العلوم، جامعة طرابلس، ليبيا

Received 09 November 2025; revised 12 November 2025; accepted 01 December 2025

المخلص

المركز الشمسي الهرمي المقطوع هو جهاز بأربعة مرايا على هيئة هرم مربع مقطوع الرأس، يُستخدم في تقنية الأفران الشمسية لتوليد درجات حرارة متوسطة. تهدف هذه الدراسة لحساب نسبة التركيز و توزيع الفيض الشمسي علي المستقبل و ذلك بتتبع الأشعة الشمسية الساقطة على مساحة المنفذ و حتى سقوطها على المستقبل أو نفاذها إلى الخارج، وذلك بفرض أن الأشعة الشمسية عبارة على مستقيمات متساوية و ممتائلة وتميل بزواوية β على الرأس، و زواوية φ على الجنوب، و أسطح المرايا مستوية و ناعمة و بإهمال تأثير معامل الإمتصاص للأسطح. كما تناولت الدراسة تأثير كلا من ارتفاع المرايا، و النسبة بين مساحة المستقبل إلى مساحة المنفذ، و زوايا سقوط الشعاع الشمسي، على نسبة التركيز و توزيع الفيض الشمسي على المستقبل. تُظهر النتائج أن توزيع الفيض يتأثر بشكل ملحوظ بارتفاع المرايا و النسبة بين مساحة المستقبل إلى مساحة المنفذ، فعند $(\beta=\varphi=0)$ تزداد نسبة التركيز بزيادة ارتفاع المرآة، و مساحة المنفذ و لكن لمدى معين بعدها تصبح تقل. عند $(\beta=10)$ و $(\varphi=0)$ تزداد نسبة التركيز بزيادة ارتفاع المرآة بينما تقل بزيادة مساحة المنفذ و بالمقارنة بين الحالتين نستنتج أن نسبة التركيز تقل بزيادة زاوية السمات، لذلك يستعمل المركز الشمسي الهرمي المقطوع لفترة زمنية قصيرة. كما أن زاوية السمات الشمسية تقلل من نسبة التركيز و لكن بنسبة بسيطة مقارنة بتأثير زاوية السمات. نستخلص من هذه النتائج أن ارتفاع المرايا و النسبة بين مساحة المستقبل إلى مساحة المنفذ لهما تأثير كبير على توزيع الفيض الشمسي و نسبة التركيز. أخيراً، تشير النتائج المتحصل عليها إلى أهمية استخدام هذا النموذج الرياضي كأداة تصميم لمركز الشمسي الهرمي المقطوع، حيث يوفر هذا العمل نموذجاً حسابياً أكثر دقة و تفصيلاً لتحديد توزيع الفيض على المستقبل مقارنة بالدراسات السابقة، مما يتيح تحسين الأداء الحراري في التطبيقات الشمسية.

الكلمات المفتاحية: المجمعات الشمسية، التحليل البصري لمجمعات الشمسية، تحليل تتبع الأشعة، نسبة التركيز

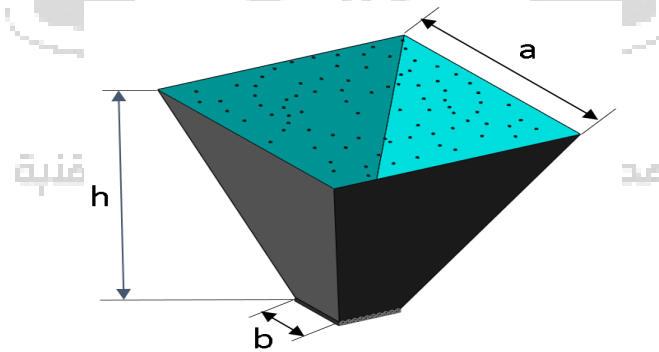
Abstract

The Truncated Pyramidal Solar Concentrator (TPSC) is a four-mirror device configured as a square frustum, utilized in solar oven technology for medium-temperature applications. This study aims to calculate the concentration ratio and solar flux distribution on the receiver by ray-tracing incident solar radiation from the aperture until it strikes the receiver or escapes. Assumptions include solar rays as equal, symmetric straight lines tilted by the altitude angle β and the solar azimuth angle γ , and flat, smooth mirrors with negligible absorption. This study investigates the impact of mirror height, receiver-to-aperture area ratio, and solar ray incidence angles β , γ on flux distribution and concentration. Results indicate that flux distribution is significantly affected by height, receiver-to-aperture area ratio. At $\beta = \gamma = 0^\circ$, the concentration ratio increases with both height and aperture area, although the latter only up to a limit. At $\beta = 10^\circ$ and $\gamma = 0^\circ$, the concentration ratio increases with height but decreases with increasing aperture area. Comparing the two cases, the concentration ratio is found to decrease with increasing altitude angle β , suggesting that the TPSC is best utilized for a short period. The solar azimuth angle γ also reduces concentration, but less significantly than β . conclude that height and aperture area have a major impact on flux distribution and concentration. This mathematical model is crucial as a design tool, providing a more accurate and detailed computational framework for flux mapping on the receiver compared to previous studies, thereby enabling thermal performance optimization in solar applications.

Keywords: Solar collectors, optical analysis of solar collectors, ray tracing analysis, concentration ratio

المقدمة

المركزات الشمسية هي عبارة عن مجموعة من العواكس تقوم بتجميع الأشعة الشمسية الساقطة و تركيزها على مساحة صغيرة مستهدفة يوضع فيها المستقبل، و تسمى عادة بالمكثفات الشمسية، و تستعمل على نطاق واسع لزيادة من كمية الطاقة الشمسية المستفادة وتقليل التكلفة. لقد تم تصميم وإقترح عدد من التصاميم تختلف على حسب نوع التركيز، و تصنف إلي مركزات ذات تركيز خطي مثل المركزات الحوضية ذات القطع المكافئ و مركزات فرنزال، ومركزات ذات تركيز نقطي مثل المركزات الصحنية ومركزات ذات تركيز مستوي مثل المضاعف البسيط و المركز الشمسي الهرمي المقطوع [1-3]، وحديثاً ركزت الدراسات على تطوير أداء المركز الشمسي الهرمي المقطوع باستخدام مواد تغيير الطور [4]، وأنظمة التخزين الحراري المختلفة [5]، والتطبيقات الهجينة الضوئية-حرارية [6]. و تتناول هذه الدراسة المركز الشمسي الهرمي المقطوع و هو على شكل هرم مربع مقطوع الرأس كما في الشكل (1) و يتركب من أربعة مرايا و كل مرأتين مستويتين و متقابلتين و متواجهتين و يميلان بزواوية α علي الرأس و يبعدان عن بعضهما البعض في القاعدة مسافة b يوضع بها المستقبل و يصنف من المركزات ذات درجة حرارة متوسطة، حيث يمكن إستعماله كفرن للطهي. درس العديد من البحوث أداء الأفران الشمسية لتطويرها وتحسين الأداء فمثلا طور كاهساي و زملاؤه [7] نموذج تحليلي لحساب الكفاءة الحرارية و إختبر النموذج عمليا على فرن شمسي صندوقي بعاكس داخلي، و بدون عاكس، و أستنتج إمكانية تحسين الأداء بستعمال العاكس الداخلي المائل بزواوية مناسبة. كما قام زيد و زملاؤه [8] بتصميم وتطوير نموذج رياضي لحساب الكفاءة الحرارية لفرن شمسي من النوع الصندوقي بأربع عواكس خارجية، و أجرى بعض الأختبارات للتنبؤ و تقييم الأداء للفرن في منطقة صفاقس في تونس، و أستنتج أن العواكس الخارجية لها تأثير كبير على أداء الأفران من خلال جمع المزيد من الأشعة الشمسية. أختبار أمانويل و زملاؤه [9] عمليا أداء فرن شمسي صندوقي بمختلف أنواع تكوينات العواكس و تمكن من تحقيق أعلى درجة حراره (148.7 درجة مئوية) بواسطة فرن مع عاكس يتتبع الشمس، و حسينية الكفاءة الحرارية بنسبة 15.4% باستخدام وعاء طهي من الألمونيوم بدلا من إستخدام الصلب الغير قابل للصدأ، و أستنتج من هذه التجارب أن الإستخدام الفعال لعراض الإشعاع الشمسي بإستخدام العاكس و إستخدام وعاء الطهي المناسب تساهم في تحسين أداء الطهي للأفران الشمسية.



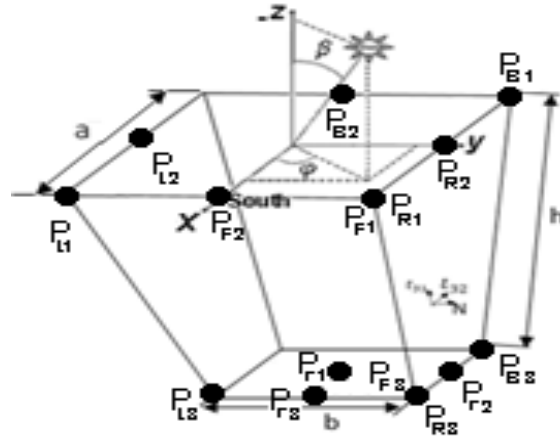
الشكل (1) المركز الشمسي الهرمي المقطوع

دراسة العديد من البحوث الكفاءة البصرية للمركزات الشمسية [10-16]، وذلك بإستخدام تقنية تتبع الشعاع الشمسي، و هي عبارة عن تتبع مسار الشعاع الشمس الساقط على مساحة المنفذ إلى النقطة الأخيرة الذي يسقط عليها و بذلك يتم إيجاد توزيع الشعاع الشمسي و تركيزه على المستقبل، و تتميز هذه الطريقة بقدرتها على التعامل مع أي نوع من الأشكال الهندسية و تعطي رؤية واضحة لتوزيع الشعاع الشمسي. فمثلا أستعمل كاريديو و زملاؤه [17] تقنية تتبع الشعاع على سطح طبق مكافئ بسطح مستمر أملس، و سطح مصنوعة من مرايا مسطحة، و توصلوا إلى أنه من الممكن إستخدام نموذج التتبع كأداة تصميم في بناء أنظمة تركيز الطاقة الشمسية لتطبيقات درجات الحرارة المتوسطة (200 درجة مئوية) المناسبة للطهي الريفي. كما قمنا في دراسة سابقة لنا [18] بإستعمال تقنية تتبع الشعاع الشمسي لحساب نسبة التركيز و توزيع الشعاع الشمسي للمضاعف البسيط و إشتقاقنا علاقة لحساب نسبة التركيز و توصلنا لأهمية إستعمالها عند تصميم المضاعف البسيط. كما أظهرت تقنيات التعلم الآلي الحديثة إمكانية التنبؤ بكفاءة المركزات الشمسية بدقة عالية [19]، ونظراً لأهمية المركز الشمسي الهرمي المقطوع في التطبيقات الضوئية المتنوعة [20] و للطبيعة

الهندسية المعقدة، فإن دراسة توزيعه البصري ثلاثي الأبعاد تكتسب أهمية خاصة لفهم سلوك الفيض الشمسي بدقة، خصوصاً في ظل تغير الزوايا الهندسية وزوايا سقوط الأشعة. تهدف هذه الدراسة لحساب نسبة التركيز و توزيع الفيض الشمسي المركز الشمسي الهرمي المقطوع باستخدام تقنية تتبع الشعاع الشمسي و بفرض أن توزيع الشعاع الشمسي متماثلاً و أسطح العواكس ملسى و بإهمال معامل الإمتصاص للأسطح. أخيراً تناونا تأثير النسبة بين مساحة المستقبل المربع و مساحة المنفذ المربع (R) و إرتفاع المرايا (h) و زوايا ميل الشعاع الشمس (β و φ)، على نسبة التركيز و توزيع الفيض الشمسي .

النموذج وطريقة المحاكاة

المركز الشمسي الهرمي المقطوع هو عبارة عن أربعة مرايا و كل مرأتين مستويتين و متقابلتين متواجهتين و يميلان بزوايا α علي الرأسى، و القاعدة عبارة عن مربع طول ضلعه b و تمثل المستقبل، و المنفذ عبارة على مربع طول ضلعه a ، كما موضح بالشكل (1). الشعاع الشمسي يميل بزوايا β على الرأسى (زاوية الظل)، و زاوية φ على الجنوب (زاوية السمات الشمسية)، كما هو مبين في الشكل (2)، و يعطى متجه إتجاه الشعاع الشمسي الساقط \hat{I} عند إي وقت و مكان بالعلاقة [1، 2]،



الشكل (2) إتجاه الشعاع الشمسي الساقط على المركز الشمسي الهرمي المقطوع و أحداثيات النقاط المستعملة لإيجاد معادلات المرايا و المستقبل

$$\hat{I} = \langle \sin \beta \cos \varphi, \sin \beta \sin \varphi, \cos \beta \rangle \dots\dots\dots 1$$

بفرض أن الأشعة الشمسية الساقطة على مساحة المنفذ المربع هي عبارة عن مستقيمتان متوازيتان و متماثلتان، و المرايا و المستقبل عبارة عن مستويات ذات أسطح ناعمة و مستوية، و باستعمال نظرية مستقيم يقطع مستوى نوجد نقاط سقوط الأشعة على المرايا و المستقبل و باستعمال قانون سنل يمكن تتبع الأشعة حتى سقوطها على المستقبل أو نفاذها إلى الخارج و بما يلي خطوات تتبع الأشعة الشمسية:

1. تقسم مساحة المنفذ المربع إلى مجموعة نقاط m تمثل نقاط سقوط الأشعة (نقاط البداية)، و يقسم المستقبل المربع إلى مجموعة نقاط تمثل نقاط توزيع الأشعة الشمسية على المستقبل المربع.
2. نبدأ بنقطة $Q_i = (x_i, y_i, z_i)$ و $i = 1:m$ على مساحة المنفذ المربع.

3. بمعلومية إتجاه الشعاع الشمسي الساقط \vec{T} معادلة 1، ونقطة السقوط على مساحة المنفذ المربع $Q_i = (x_i, y_i, z_i)$ ، يمكن

إيجاد المعادلة البارمترية للمستقيم الممثل للشعاع الشمسي الساقط على مساحة المنفذ المربع، معادلة 2. كما يمكن كتابتها

بصيغة متجه، بدلالة متجهات الموضع لنقطة البداية و أي نقطة على المستقيم المربع، معادلة 3

$$(x, y, z) = (x_i, y_i, z_i) + t\vec{T} \quad 2$$

$$\vec{r} = \vec{Q} + t\vec{T} \quad 3$$

حيث أن t تمثل المسافة بين نقطة البداية Q و أي نقطة على المستقيم المربع، و $\vec{Q} = \langle x_i, y_i, z_i \rangle$ متجه الموضع

لنقطة البداية، و $\vec{r} = \langle x, y, z \rangle$ متجه الموضع لأي نقطة على المستقيم المربع.

4. من الشكل 2. نحدد ثلاثة نقاط على كل مستوى كما في جدول 1

الجدول 1. أحداثيات ثلاثة نقاط على المرايا الأربعة والمستقبل المربع

أحداثيات النقاط (x, y, z)			المستوى
P_3	P_2	P_1	
$(0.5b, 0.5b, h)$	$(0, 0.5a, 0)$	$(0.5a, 0.5a, 0)$	المرآة اليمنى
$(0.5b, -0.5b, h)$	$(0, -0.5a, 0)$	$(0.5a, -0.5a, 0)$	المرآة اليسرى
$(0.5b, 0.5b, h)$	$(0.5a, 0, 0)$	$(0.5a, 0.5a, 0)$	المرآة الأمامية
$(-0.5b, 0.5b, h)$	$(-0.5a, 0, 0)$	$(-0.5a, 0.5a, 0)$	المرآة الخلفية
$(0, 0.5b, h)$	$(0.5b, 0, h)$	$(0, 0, h)$	المستقبل

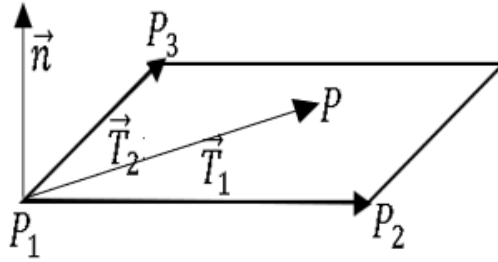
5. إيجاد معادلة المستوى بمعلومية ثلاثة نقاط كما يلي:

أ. بمعلومية أحداثيات ثلاث نقاط في المستوى، يُمكن إيجاد متجهين ليسا على إستقامة واحدة في المستوى وليكونا المتجه

\vec{T}_1 معادلة (4) و المتجه \vec{T}_2 معادلة (5)، و كما هو موضح في الشكل (3).

$$\vec{T}_1 = P_2 - P_1 = \langle x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1 \rangle \quad 4$$

$$\vec{T}_2 = P_3 - P_1 = \langle x_3 - x_1, y_3 - y_1, z_3 - z_1 \rangle \quad 5$$



الشكل (3) النقاط و المتجهات المستعملة لإيجاد معادلة المستوى

ب. حساب المتجه العمودي \vec{N} و متجه الوحدة العمودي \hat{n} على المستوى معادلة 6 و 7

$$\vec{N} = \vec{T}_1 \times \vec{T}_2 \quad 6$$

$$\hat{n} = \frac{\vec{N}}{\sqrt{\vec{N} \cdot \vec{N}}} = \langle a, b, c \rangle \quad 7$$

ت. بأخذ أي نقطة على المستوى ولتكون P_1 و بمعلومية متجه الوحدة العمودي على المستوى، فإن معادلة المستوى هي

$$ax + by + cz = ax_1 + by_1 + cz_1 \quad 8$$

تكتب معادلة المستوى بصيغة متجهات الموضع لنقطة معلومة $\vec{P}_1 = \langle x_1, y_1, z_1 \rangle$ و متجه الموضع لأي نقطة في

المستوى $\vec{P} = \langle x, y, z \rangle$ ، و متجه الوحدة العمودي للمستوى \hat{n} . كما يلي:

$$\vec{P} \cdot \hat{n} = \vec{P}_1 \cdot \hat{n} \quad 9$$

6. نوجد نقطة التقاطع $P = (x, y, z)$ بين المستقيم الممثل للشعاع الشمسي معادلة 3، و المستوى الذي قد يكون إحدى

المراي أو المستقبل المربع معادلة 9.

$$\vec{P} = \vec{Q} + t\hat{I}$$

$$\vec{P} \cdot \hat{n} = \vec{P}_1 \cdot \hat{n}$$

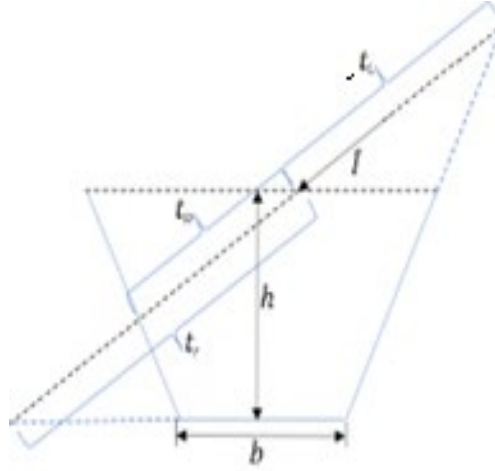
$$(\vec{Q} + t\hat{I}) \cdot \hat{n} = \vec{P}_1 \cdot \hat{n}$$

$$t = \frac{(\vec{P}_1 - \vec{Q}) \cdot \hat{n}}{\hat{I} \cdot \hat{n}} \quad 10$$

حيث أن t تمثل المسافة بين نقطة البداية Q و نقطة تقاطع المستقيم الممثل للشعاع الشمسي مع المستوى، و بالتعويض في

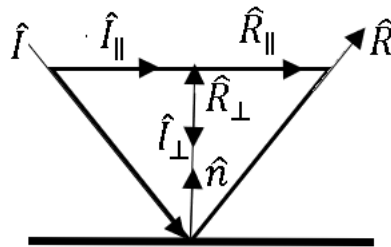
المعادلة 3 نوجد أحداثيات نقطة التقاطع P

7. لتحديد المستوى الذي سيسقط عليه الشعاع الشمسي نوجد قيمة t لكل المرايا و المستقبل بإستعمال المعادلة 10.
يكون المستوى الذي سيسقط عليه الشعاع هو المستوى ذو أقل قيمة موجبة ل t ، كما هو موضح بالشكل 4.



الشكل (4) احتمالية تقاطع الشعاع الساقط مع المرايا و المستوى

8. إذا كان المستوى الذي سيسقط عليه الشعاع هو المستقبل المربع ننتقل إلى الخطوة 13
9. أما إذا كان المستوى الذي سيسقط عليه الشعاع هو إحدى المرايا، نختبر ما إذا كان الشعاع سينفذ إلى الخارج و ذلك عندما يكون طول المسار t_r للمستقبل المربع أقل من الصفر. فإذا كان الشعاع ينفذ إلى الخارج ننتقل إلى الخطوة 2
10. أما إذا كان الشعاع لا ينفذ إلى الخارج، نوجد إتجاه الشعاع المنعكس بإستعمال قانون سنل كما يلي
بإستعمال قانون سنل و مركبات الشعاع الساقط العمودية و الموازية للمستوى $(\hat{I}_\perp, \hat{I}_\parallel)$ و مركبات الشعاع المنعكس العمودية و الموازية للمستوى $(\hat{R}_\perp, \hat{R}_\parallel)$ كما هو موضح في الشكل (5) و بمعلومية متجه الوحدة العمودي للمستوى \hat{n} ، و نقطة التقاطع P يمكن إستنتاج معادلة لإيجاد إتجاه الشعاع المنعكس \hat{R} بدلالة متجه إتجاه الشعاع الساقط \hat{I} معادلة (11)



الشكل (5) إتجاهات مركبات متجه الوحدة للشعاع الساقط \hat{I} و الشعاع المنعكس \hat{R}

$$\hat{R} = \hat{I} - 2(\hat{I} \cdot \hat{n})\hat{n}$$

11

11. نستبدل إتجاه متجه الوحدة للشعاع الساقط بالشعاع المنعكس المعادلة 11 ونقطة البداية بنقطة التقاطع.

$$Q = P \text{ و } \hat{I} = \hat{R}$$

12

12. نكرر العملية من 3 إلى 10 حتى نصل إلى المستقبل المربع.

13. نقرب نقطة سقوط الشعاع على المستقبل المربع الى أقرب نقطة لنقاط تقسيم المستقبل المربع (i, j) و نخزن في مصفوفة B

$$B(i, j) = B(i, j) + 1$$

13

14. نكرر العملية من 2 إلى 13 لجميع النقاط الموزعة على مساحة المنفذ المربع وستحصل على عدد الأشعة الساقطة على كل

نقطة من نقاط المستقبل المربع

15. نحسب نسبة التركيز من المعادلة 14

$$C = B \cdot \frac{A_a}{A_r} \cos \beta$$

14

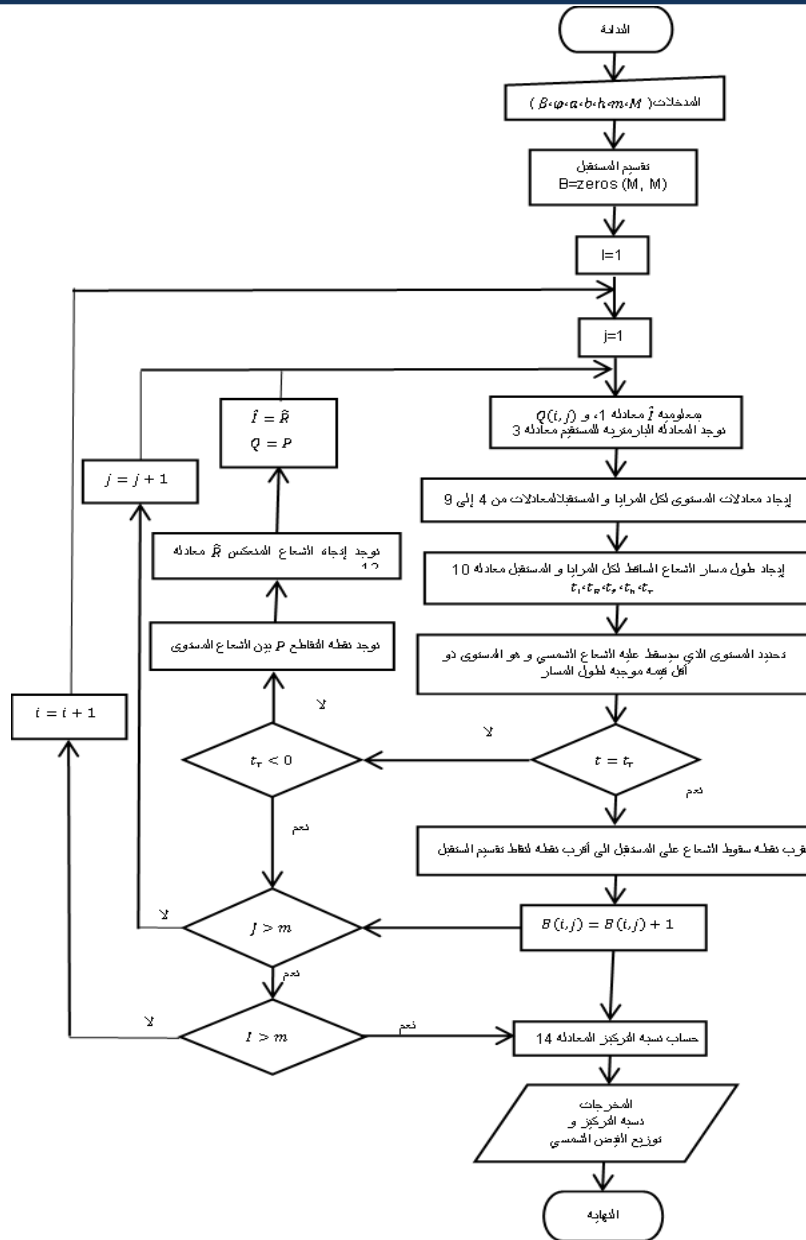
حيث أن C نسبة التركيز، و B عدد الأشعة الساقطة على كل نقطة من نقاط المستقبل المربع ، A_a مساحة المنفذ المربع و A_r مساحة المستقبل المربع ، و β زاوية الظل.

أستخدم لغة المات كاد لبرمجة خوارزمية إيجاد نسبة التركيز و توزيع الفيض الشمسي للمركز الشمسي الهرمي المقطوع

ولخصة في الخطط الإنسيابي الموضح في الشكل (6)



مجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية

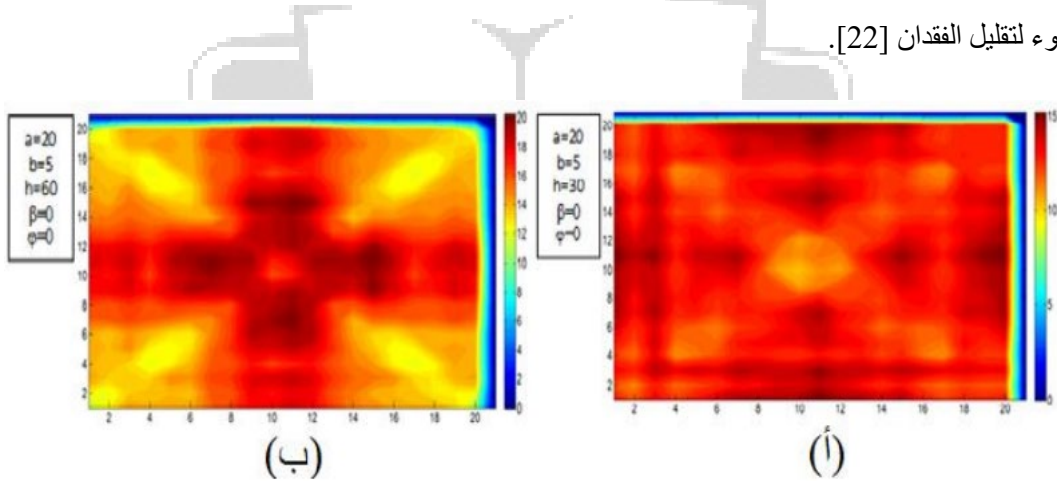


الشكل (6) الخطط الإنسيابي لحساب نسبة التركيز و توزيع الفيض الشمسي للمركز الشمسي الهرمي المقطوع

النتائج و المناقشة

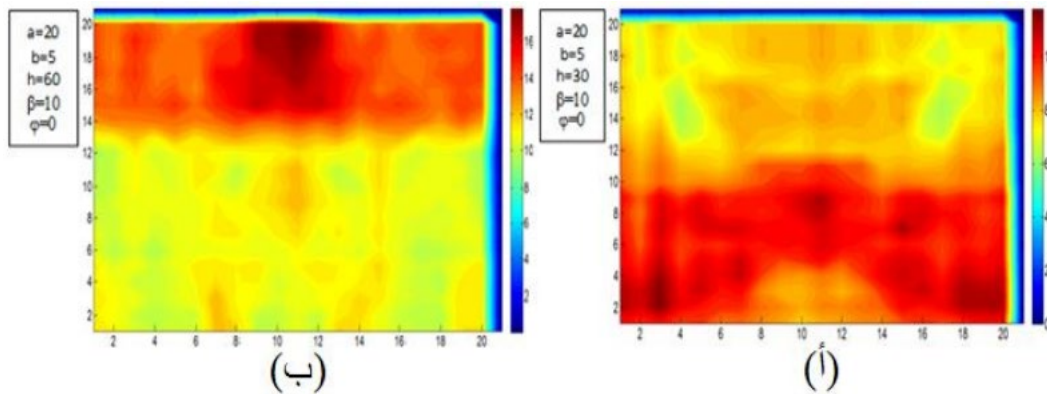
يوضح الشكل (7) توزيع الفيض الشمسي و نسبة التركيز علي المستقبل المربع لمركز الشمسي الهرمي المقطوع عند $\beta=\phi=0$ و النسبة بين مساحة المستقبل المربع إلى مساحة المنفذ المربع $R=1/4$ لقيمتين لإرتفاع المرايا $h=30,60$. فعندما $h=30$ الشكل (7-أ) يكون توزيع الفيض الشمسي عند أطراف المستقبل المربع عالي ونتيجة توالي الإنعكاسات للأشعة الشمسي يقل كلما إتجاهنا نحو منتصف المستقبل المربع. وبذلك تتكون بقعة حارة في أطراف المستقبل المربع مقارنة بالمنتصف، وتتراوح نسبة التركيز ما بين 10

إلى 15، و لذلك يمكن إستخدامة في تحلية و تسخين المياه. عند زيادة إرتفاع المرايا $h=60$ الشكل (7- ب) يتغير توزيع الفيض الشمس فيكون عالي في منتصف المستقبل المربع ، و يقل كلما نتجه نحو الأطراف، و تتكون بقعة حارة علي شكل إشارة زائد عند المنتصف. بزيادة زاوية سقوط الشعاع الشمسي $\beta=10$ الشكل (8) يتغير توزيع الفيض الشمسي بشكل ملحوظ، فعندما $h=30$ شكل (8- أ)، يتركز توزيع الفيض الشمسي في الجزء السفلي للمستقبل المربع و يقل في الجزء العلوي للمستقبل المربع وبذلك تتكون بقعة حارة في الجزء السفلي مقارنة بالجزء العلوي للمستقبل المربع، و تتراوح نسبة التركيز بين 9 إلى 12 و بزيادة إرتفاع المرايا $h=60$ شكل (8- ب)، يتغير التوزيع ليكون أعلا في الجزء العلوي مما يكون بقعة حارة في الجزء العلوي مقارنة بالجزء السفلي للمستقبل المربع ، و تتراوح نسبة التركيز بين 12 إلى 17. بزيادة زاوية السمت الشمسي $\varphi=7$ و ثبوت زاوية الظل $\beta=10$ الشكل (9)، نلاحظ عدم وجود تغير ملحوظ في توزيع الفيض الشمسي ولكن نسبة التركيز تقل بنسبة 40%. نستنتج من الأشكال السابقة أن زوايا سقوط الشعاع الشمسي و إرتفاع المرايا لها تأثير كبير على توزيع الفيض الشمسي لا يمكن إهماله، هذه النتائج تتفق مع الدراسات الحديثة التي أظهرت تحسن أداء المجمعات الشمسية المزودة بأنظمة تتبع [21]، كما تؤكد البحوث الأخيرة على أهمية تحسين مسارات انتشار الضوء لتقليل الفقدان [22].



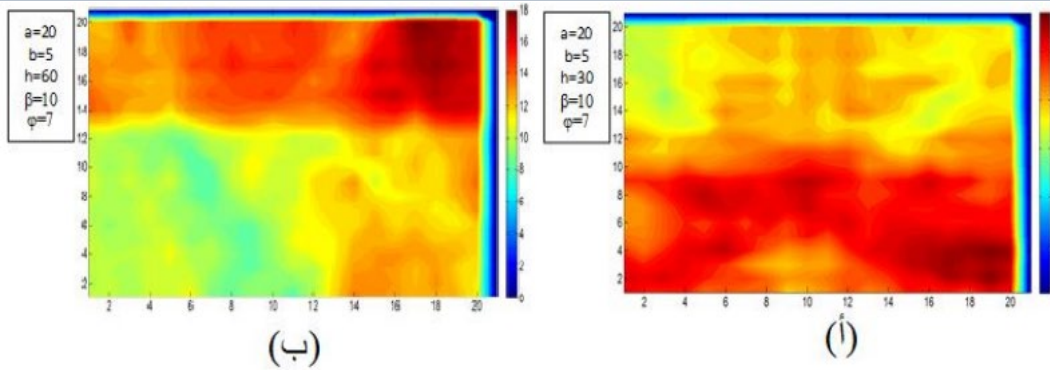
الشكل (7) توزيع الفيض الشمسي علي المستقبل المربع عند زاوية سقوط الشعاع $(\beta = \varphi = 0)$ ،

و إرتفاع المرايا (30 و 60)، النسبة بين مساحة المستقبل المربع إلى مساحة المنفذ المربع $R = 0.25$



الشكل (8) توزيع الفيض الشمسي علي المستقبل عند زاوية سقوط الشعاع $(\beta = 10, \varphi = 0)$ ،

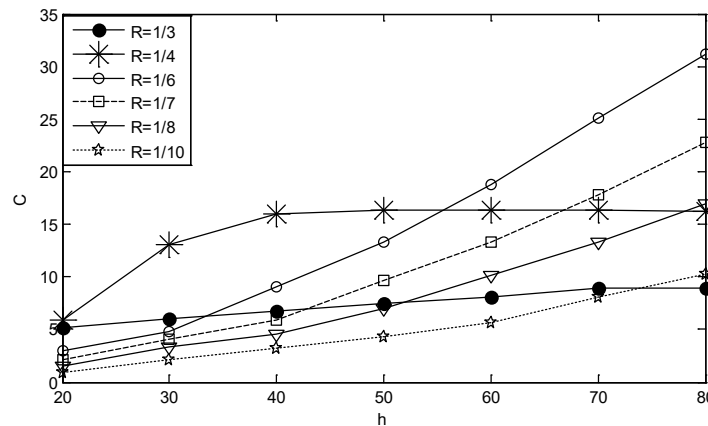
و إرتفاع المرايا (30 و 60)، النسبة بين مساحة المستقبل المربع إلى مساحة المنفذ المربع $R = 0.25$



الشكل (9) توزيع الفيض الشمسي على المستقبل عند زاوية سقوط الشعاع $(\beta = 10, \varphi = 7)$

و ارتفاع المرايا (30 و 60)، النسبة بين مساحة المستقبل المربع إلى مساحة المنفذ المربع $R = 0.25$

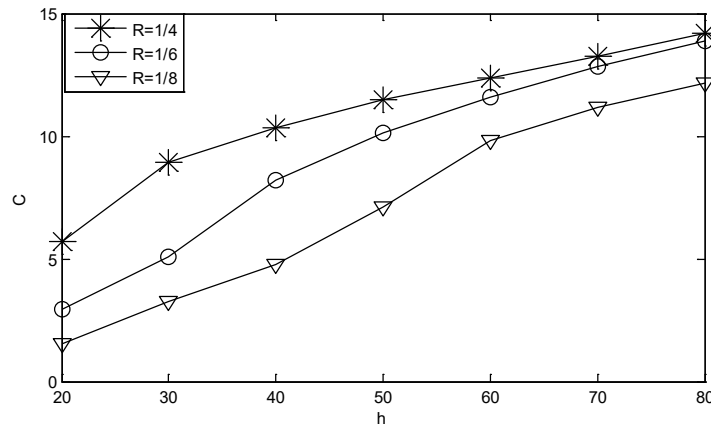
لدراسة تأثير زوايا سقوط الشعاع الشمسي، و ارتفاع المرايا، و النسبة بين مساحة المستقبل المربع إلى مساحة المنفذ المربع R ، على نسبة التركيز، قمنا بحساب متوسط نسبة التركيز على المستقبل لحالات مختلفة، فالشكل (10) يبين تأثير التغير في كلا من ارتفاع المرايا h و النسبة بين مساحة المستقبل المربع إلى مساحة المنفذ المربع R ، عند $\beta = \varphi = 0$. في حالة $R = 1/3$ ، بزيادة الإرتفاع يزداد التركيز، حيث كان متوسط نسبة التركيز 0.97 ± 5.15 عند $h = 20$ و زادة إلى 2.96 ± 8.99 عند $h = 80$. و بزيادة مساحة المنفذ المربع $R = 1/4$ زادة نسبة التركيز، فكانت 2.28 ± 16.27 عند إرتفاع $h = 80$. و لكن في حالة $R = 1/6$ قلة نسبة التركيز عند أطوال أقل من 50، و إزداد عند أطوال أكبر من 50 حيث كانت 1.80 ± 18.75 عند $h = 60$ و زادة إلى 2.45 ± 31.15 عند $h = 80$. و بزيادة مساحة المنفذ المربع أكثر من ذلك تقل نسبة التركيز. نلاحظ من الشكل (10) أن عند $\beta = \varphi = 0$ تزداد نسبة التركيز بزيادة إرتفاع المرايا، و إن زيادة مساحة المنفذ المربع تزيد من نسبة التركيز لمدى معين وبعدها تصبح تقل منه.



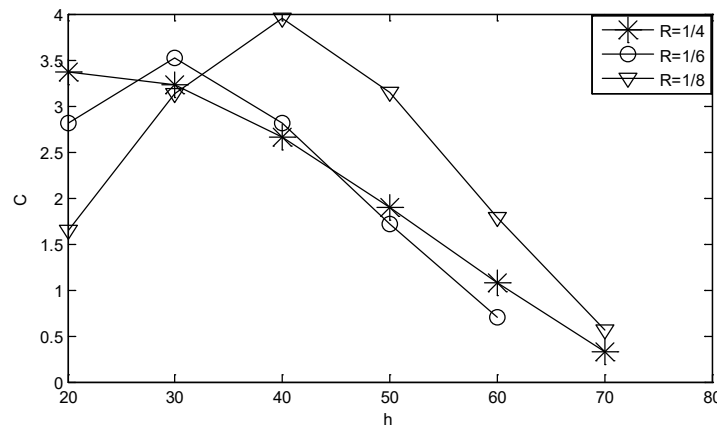
الشكل (10) تأثير التغير في إرتفاع المرايا h والنسبة بين مساحة المستقبل المربع إلى مساحة المنفذ المربع R ، على نسبة التركيز عند $\beta = \varphi = 0$

الشكل (11) يبين تأثير التغير في إرتفاع المرايا h و النسبة بين مساحة المستقبل المربع إلى مساحة المنفذ المربع R على نسبة التركيز عند $\beta = 10$ و $\varphi = 0$. نلاحظ من الشكل أن نسبة التركيز تزداد بزيادة إرتفاع المرايا h بينما تقل بزيادة مساحة المنفذ المربع و

بالمقارنة مع شكل (10) نلاحظ إنخفاض التركيز بنسبة 30% عند $h=20$ ويزداد هذا الفرق بزيادة ارتفاع المرايا ليصل إلى 50% عند $h=80$. بزيادة زوايا $\beta=20$ و $\varphi=0$ الشكل (12)، تقل نسبة التركيز لذلك يمكن إستعمال المضاعف المركب لفترة زمنية قصيرة لهذا يعتبر مناسب للأفران الشمسية حيث يمكن التحصل على تركيز مناسب لعملية الطهي يصل إلى أكثر من 20 في بعض الحالات.



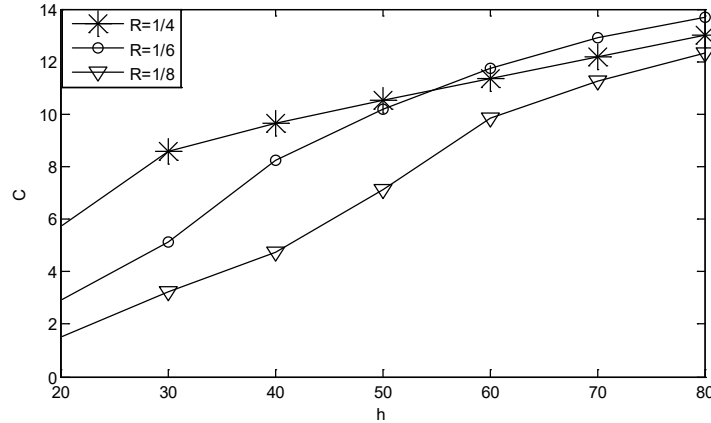
شكل (11) تأثير التغير في إرتفاع المرايا h و النسبة بين مساحة المستقبل المربع إلى مساحة المنفذ المربع R على نسبة التركيز عند $\beta=10$ و $\varphi=0$.



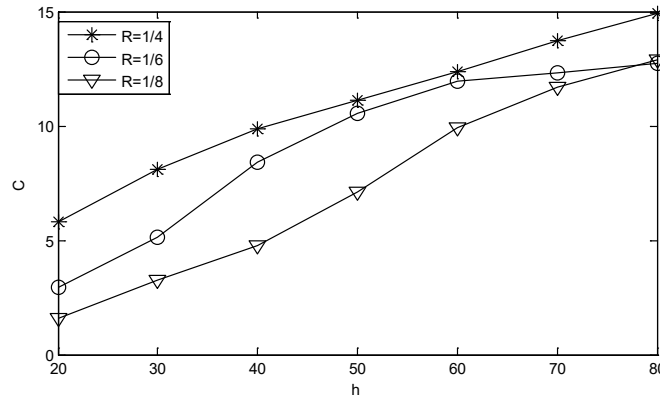
شكل (12) تأثير التغير في إرتفاع المرايا h و النسبة بين مساحة المستقبل المربع إلى مساحة المنفذ المربع R على نسبة التركيز عند $\beta=20$ و $\varphi=0$.

الشكل (13) يبين تأثير إرتفاع المرايا h و النسبة بين مساحة المستقبل المربع إلى مساحة المنفذ المربع R على نسبة التركيز عند $\beta=10$. نلاحظ زيادة نسبة التركيز بزيادة إرتفاع المرايا h بينما تقل بزيادة مساحة المنفذ المربع ، و بالمقارنة مع شكل (11) نلاحظ أن نسبة التركيز تقل بنسبة بسيطة 0.4% عند زيادة زاوية سمت الشمسية φ و ينعدم تأثيرها بزيادة مساحة المنفذ المربع. بزيادة

زاوية السمات الشمسية إلى $\varphi=20$ تقل نسبة التركيز بنسبة بسيطة 0.03% كما هو موضح في شكل (14). ونستنتج من ذلك أن زيادة زاوية السمات الشمسية φ تقلل من نسبة التركيز و تأثيرها أقل من زاوية الظل β .



الشكل (13) تأثير ارتفاع المرايا h و النسبة بين مساحة المستطيل المربع إلى مساحة المنفذ المربع R على نسبة التركيز عند $\beta=10$ ، $\varphi=20$.



الشكل (14) تأثير ارتفاع المرايا h و النسبة بين مساحة المستطيل المربع إلى مساحة المنفذ المربع R على نسبة التركيز عند $\beta=10$ ، $\varphi=20$.

الخلاصة

تركز هذه الورقة في المقام الأول على التحليل البصري للمركز الشمسي الهرمي المقطوع باستخدام تقنية تتبع الأشعة في ثلاثة أبعاد و يفرض أن الأشعة الشمسية عبارة على مستقيمت متساوية و ممتاللة و تميل بزوايا β على الرأس، و زاوية φ على الجنوب، و أسطح المرايا مستوية و ناعمة و بإهمال تأثير معامل الإمتصاص للأسطح. حيث وصفة خوارزمية إيجاد توزيع الفيض الشمسي على المستقبل و نسبة التركيز بالتفصيل و نفذت بلغة المات كاد. كما تناولت دراسة تأثير كلا من ارتفاع المرايا، و النسبة بين مساحة المستقبل المربع إلى مساحة المنفذ المربع، و زوايا سقوط الشعاع الشمسي على نسبة التركيز و توزيع الفيض الشمسي على المستقبل. تظهر نتائج هذه الدراسة ما يلي:

- توزيع الفيض الشمسي يتأثر تأثير كبيراً بارتفاع المرايا و زاوية الظل وتأثير طفيف بزوايا السمات الشمسية.
- تنخفض نسبة التركيز مع زيادة زاوية الظل وزاوية السمات الشمسي، التي يعتبر تأثيرها ضئيلاً مقارنة بزوايا الظل
- زيادة إرتفاع المرايا يؤدي إلى زيادة نسبة التركيز ولكن إلى إرتفاع معين. في حالة زيادته ، يؤدي إلى انخفاض نسبة التركيز، و يعتمد مقدار الإرتفاع على زوايا سقوط الشعاع الشمسي حيث يقل بزيادة الزوايا
- تؤدي زيادة مساحة المنفذ المربع بالنسبة لمساحة المستقبل المربع إلى تقليل من نسبة التركيز مع ملاحظة أنه عندما تكون زوايا ميل الشعاع صغيرة فإن نسبة التركيز ستزداد عند اقتراب مساحة المنفذ المربع من مساحة المستقبل المربع

وتبرز أهمية هذا النموذج في كونه أداة تصميم فعالة للمركزات الشمسية المستخدمة في التطبيقات الصناعية الحرارية، مثل تحلية المياه أو الطهي الشمسي، حيث يتيح تحسين توزيع الفيض وتقليل الفقد البصري.

الرموز

β : زاوية ميل الشعاع الشمسي على الراسي وتعرف بزواوية الظل	\hat{R} : متجه إتجاه الشعاع المنعكس
φ : الزاوية بين مسقط الشعاع الشمس علي الأفقي و إتجاه الجنوب وتعرف بزواوية السمات الشمسية	\vec{Q} : متجه الموضع لنقطة البداية
h : إرتفاع المرآة	\hat{I}_\perp : مركبة الشعاع الساقط العمودية على المستوى
A_a : مساحة المنفذ المربع	\hat{I}_\parallel : مركبة الشعاع الساقط الموازية للمستوى
A_r : مساحة المستقبل المربع	\hat{R}_\parallel : مركبة الشعاع المنعكس الموازية للمستوى
R : النسبة بين مساحة المستقبل المربع إلى مساحة المنفذ المربع	\hat{R}_\perp : مركبة الشعاع المنعكس العمودية على المستوى
m : عدد نقاط تقسمات مساحة المنفذ المربع	t_L : المسافة بين نقطة البداية و نقطة تقاطع المستقيم الممثل للشعاع الشمسي و المرآة اليسرى
M : عدد نقاط تقسمات مساحة المستقبل المربع	t_R : المسافة بين نقطة البداية و نقطة تقاطع المستقيم الممثل للشعاع الشمسي و المرآة اليمنى
Q : نقطة البداية	t_F : المسافة بين نقطة البداية و نقطة تقاطع المستقيم الممثل للشعاع الشمسي و المرآة الأمامية
P_i $i = 1,2,3$: نقاط تقع في المستوى	t_B : المسافة بين نقطة البداية و نقطة تقاطع المستقيم الممثل للشعاع الشمسي و المرآة الخلفية
P : نقطة التقاطع	t_r : المسافة بين نقطة البداية و نقطة تقاطع المستقيم الممثل للشعاع الشمسي و المستقبل
\hat{I} : متجه إتجاه الشعاع الشمسي الساقط	
\vec{r} : متجه الموضع لأي نقطة على المستقيم.	

<p>B : مصفوفة تحتوي على عدد الأشعة الساقطة على كل نقطة من نقاط المستقبل</p> <p>C : نسبة التركيز</p>	<p>\vec{P} : متجه الموضع لأي نقطة في المستوى</p> <p>\vec{T}_1 و \vec{T}_2 متجهان ليس على استقامة واحدة في المستوى</p> <p>\hat{n} : متجه الوحدة العمودي</p> <p>t : المسافة بين نقطة البداية و نقطة تقاطع المستقيم المربع الممثل للشعاع الشمسي و المستوى</p>
---	---

المراجع

- [1] A. D. John and A. B. William, Solar Engineering of Thermal Processes, New York. John Wiley & Sons, Inc.
- [2] هناء جمعة بن حليم، محمد عبد العزيز منصور، "حساب معدل التركيز وتوزيع الفيض الشمسي لمركز شمسي ذو بؤرة مربعة مصمم من مرايا فرنزل متواجعة ومتعامدة"، قسم فيزياء، كلية العلوم، جامعة طرابلس، ليبيا، 2022
- [3] K Soteris, Solar energy engineering: processes and systems. Vol. 1. 2009. 756
- [4] Performance of compound parabolic concentrator solar air flat plate collector using phase change material. Applied Thermal Engineering, 240, 122203. (2024)
- [5] Experimental study in a compound parabolic solar concentrator with different configurations of thermal energy storage system. International Journal of Green Energy, 21(1), 145-162. (2023)
- [6] A Review of Recent Developments and Applications of Compound Parabolic Concentrator-Based Hybrid Solar Photovoltaic/Thermal Collectors. Sustainability, 14(9), 5529. (2022)
- [7] M. B. Khasay, J. Paintin, A. Mustefa, A. Haileselassie, Meseret Tesfay and B. Gebray, "Theoretical and Experimental Comparison of Box Solar Cookers with and without Internal Reflector," *Energy Procedia*, vol. 57, no. 1876-6102, pp. 1613-1622, 2014.
- [8] Z. Guidara, M. Souissi, A. Morgenstern and A. Maalej, "Thermal performance of a solar box cooker with outer reflectors: Numerical study and experimental

investigation," *Solar Energy*, vol. 158, no. 0038-092X, pp. 347-359, 2017.

- [9] A. Weldu, L. Zhao, S. Deng, N. Mulugeta, Y. Zhang, X. Nie and W. Xu, "Performance evaluation on solar box cooker with reflector tracking at optimal angle under Bahir Dar climate," *Solar Energy*, vol. 180, no. 0038-092X, pp. 664-677, 2019.
- [10] K. K. Chong and M. H. Tan, "Comparison Study of Two Different Sun-Tracking Methods in Optical Efficiency of Heliostat Field," *International Journal of Photoenergy*, Vols. 1-10, p. 2012, 2012.
- [11] H. Terres, A. Lizardi, R. López, M. Vaca and S. Chávez, "Mathematical Model to Study Solar Cookers Box-Type with Internal Reflectors," *Energy Procedia*, vol. 57, no. 1876-6102, pp. 15 [1]83-1592, 2014.
- [12] J. C. G. Pereira, J. C. Fernandes and L. G. Rosa, "Mathematical Models for Simulation and Optimization of High-Flux Solar Furnaces," *Mathematical and Computational Applications*, vol. 24, no. 2297-8747, pp. 1-16, 2019.
- [13] D. Jafrancesco, P. Sansoni, F. Francini, G. Contento, C. Cancro, C. Privato, G. Graditi, D. Ferruzzi, L. Mercatelli, E. Sani and D. Fontani, "Mirrors array for a solar furnace: Optical analysis and simulation results," *Renewable Energy*, vol. 63, pp. 263-271, 2014.
- [14] H. Ahlem, M. Taher, E. A. Souheil and B. N. Sassi, "Optical modeling and investigation of sun tracking parabolic trough solar collector basing on Ray Tracing 3Dimensions-4Rays," *Sustainable Cities and Society*, vol. 35, p. 786–798, 2017.
- [15] J. Ruelas, G. Pando, B. Lucero and J. Tzab, "Ray Tracing Study to Determine the Characteristics of the Solar Image in the Receiver for a Scheffler-type Solar Concentrator Coupled with a Stirling Engine.," *Energy Procedia*, vol. 57, no. 1876-6102, pp. 2858-2866, 2014.
- [16] K. Nyeinga, D. Okello and O. J. Nydal, "A ray tracer model for analysis of solar concentrating systems.," *Journal of Energy in Southern Africa*, vol. 30(1), no. 2413-3051, pp. 8-19, 2019.
- [17] هناء جمعة بن حليم، محمد عبد العزيز منصور، خالد مازوز، بدر الدين جمعة سعد، " حساب نسبة تركيز الأشعة الشمسية للمضاعف البسيط"، *المجلة الدولية للعلوم والتقنية*، عدد خاص – سبتمبر 2022
- [18] G. Zhu, "Development of an Analytical Optical Method for Linear Fresnel

Collectors," *Solar Energy*, vol. 94, no. 0038-092X, pp. 240-252, 2013.

- [19] Predicting the efficiency of luminescent solar concentrators for solar energy harvesting using machine learning. *Scientific Reports*, 14, 4160. (2024)
- [20] The compound parabolic concentrators for solar photovoltaic applications: Opportunities and challenges. *Energy Reports*, 8, 11852-11874. (2022)
- [21] Concentration performance of solar collector integrated compound parabolic concentrator and flat microchannel tube with tracking system. *Renewable Energy*, 200, 809-820. (2022)
- [22] RETRACTED ARTICLE: Luminescent solar concentrator efficiency enhanced via nearly lossless propagation pathways. *Nature Photonics*, 18, 177-185. (2024)
- [23]] A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82. (2018)

