

دراسة عددية لتقييم تأثير الزعانف الداخلية على أداء المجمع الشمسي ذي الصندوق المسطح

د. فادي إسكندر علي*

د. عزيز رزق الحزوري**

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/٨/٣ . قُبل للنشر في ٢٠٢٥/٩/١٧)

□ ملخّص □

يقدم البحث دراسة عددية لتحسين أداء المجمع الشمسي ذي الصندوق المسطح باستخدام الزعانف الداخلية كمولدات اضطراب للتدفق. أُجريت محاكاة عددية باستخدام برنامج ANSYS Workbench (CFD (fluent)). يتكون مجال الدراسة من الماء (حيز المائع) وهيكل المجمع المعدني المصنوع من الألومنيوم (حيز الجسم الصلب). تمت من خلال الدراسة مقارنة تأثير الزعانف الطولية، والعرضية، والعرضية المثقبة على تدفق السوائل وتوزيع درجة الحرارة في المجمع. بيّنت النتائج أن لاتجاه الزعانف تأثير كبير على اضطراب التدفق ودرجة حرارة المخرج على طول المجمع. كما حققت الزعانف العرضية المثقبة أفضل أداء للمجمع الشمسي ذي اللوح المسطح.

الكلمات المفتاحية: ديناميك الموائع الحسابية، مجمع شمسي، زعانف عرضية مثقبة

* أستاذ مساعد - قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس.

** دكتور - قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة - كلية الهندسة التقنية - جامعة طرطوس.

Numerical study to evaluate the effect of internal fins on the performance of a flat box solar collector

Dr. Eng. Fadi Ali *
Dr. Eng. Aziz Al-Hazouri **

(Received 3/8/2025 . Accepted 17/9/2025)

□ ABSTRACT □

This paper presents a numerical study to improve the performance of a flat-box solar collector using internal fins as flow turbulence generators. Numerical simulations were performed using ANSYS Workbench (CFD fluent), The study area consists of water (fluid domain) and a metallic aluminum collector structure (solid domain). The study compared the effects of longitudinal, transverse, and perforated fins on fluid flow and temperature distribution in the collector. The results show that fin orientation has a significant effect on flow turbulence and outlet temperature along the collector. Perforated transverse fins exhibit improved performance relative to outlet temperature.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Solar Collector, Perforated Transverse Fins

* Assistant professor, Department of Renewable Energy Technologies Engineering, Faculty of Technical Engineering, Tartous University.

** Dr, Department of Renewable Energy Technologies Engineering, Faculty of Technical Engineering, Tartous University.

١- مقدمة

تُعد الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقة المتجددة، والتي يُمكن استغلالها على نطاق واسع، نظرًا لتوفرها على مدار العام (وتبدو أكثر ديمومة من الوقود الأحفوري أو النووي)، كما أنها طاقة نظيفة لا تُلوث البيئة (لا تُصدر ثاني أكسيد الكربون)، وتقنياتها سهلة التصنيع، ويمكن تصنيعها محليًا. أصبح استهلاك الطاقة في المنشآت المنزلية والصناعية كبيرًا جدًا، ومع الارتفاع المستمر في أسعار الوقود، بالإضافة إلى نضوبه، أصبح من الضروري البحث عن طرق بديلة فعالة للحصول على الطاقة.

في العصور القديمة، كان المصريون يُعجبون بالشمس ودورها في الحياة على الأرض. ففي الأساطير المصرية، تم تصوير قرص شمسي يُصدر أشعة كمصدر للحياة [١]. في عام ١٧٦٧، صمم العالم السويسري الفرنسي هوراس بنديكت دي سوسير ونفذ أول فرن حراري شمسي (صندوق حراري) يُستخدم في الطهي [٢]. كان أول جهاز حراري شمسي تم إنتاجه بكميات كبيرة هو الفرن الشمسي الذي اخترعه ديليو آدامز في سبعينيات القرن التاسع عشر في بومباي بالهند [٣]. تُستخدم المجمعات الشمسية الحرارية الحديثة حاليًا في المنازل والصناعة، والمجمعات الشمسية ذات الصندوق المسطح هي نوع خاص من المبادلات الحرارية التي تحول الطاقة الشمسية إلى طاقة داخلية في وسط نقل الحرارة [٤]. يجب أن تكون المسارات داخل المجمعات الشمسية لتسخين السوائل جزءًا لا يتجزأ من لوح الامتصاص أو على الأقل متصلة بها ارتباطًا وثيقًا. تتمثل إحدى المشكلات الرئيسية في صناعة المجمعات الشمسية في الحصول على اتصال حراري جيد بين الأنابيب وألواح الامتصاص دون تكبد تكاليف عالية في العمالة أو المواد الخام. والمواد التي تُستخدم باستمرار في تصنيعها هي النحاس والألمنيوم والفولاذ المقاوم للصدأ [٥]. قام روزا كلوت وآخرون [٦-٧] ببناء وحدة هجينة كهروضوئية/حرارية (PVT) باستخدام طبقة من الماء محصورة في مجمع صندوقي مسطح من البولي كربونات.

يستخدم هذا التكوين قنوات توجيه متعرجة للتحكم في تدفق المياه وزيادة المتانة الهيكلية للمجمع. أصبحت هذه الطريقة الآن حلاً محتملاً وأعدًا كمتصات حرارية شمسية معيارية لوحدات PVT ذات الصندوق المسطح في مجموعة واسعة من التطبيقات لأن هذه الأنواع من متصات الحرارة يمكن إنتاجها بتكلفة منخفضة في الإنتاج الصناعي الضخم. بالإضافة إلى ذلك، يمكن تشكيل قنوات تدفق معقدة للغاية دون أي تكاليف إضافية ويمكن التخلص من نظام الأنابيب المعقد. استخدم مسعود محمدي وآخرون [٨] طريقة ديناميك الموائع الحسابية (CFD) لمحاكاة تصميمات مختلفة لمجمعات PVT. للتحقق من صحة نتائج المحاكاة، أُجريت مجموعة من التجارب باستخدام مجمع PVT من النوع الصندوقي بمعدلات تدفق مياه مختلفة. وقد وجد من الملاحظة التجريبية أن زيادة معدل التدفق من ٣٠ إلى 90Lit/h أدى إلى انخفاض بنسبة 6% في درجات حرارة السطح و 18% المخرج. بالإضافة إلى ذلك، تم تحقيق متوسط أقصى قيمة للكفاءة الحرارية بنسبة 56% تجريبيًا عند معدل تدفق 90Lit/h. أشارت نتائج المحاكاة إلى أن النتائج الحسابية لدرجة حرارة المخرج، وخاصة عند معدلات تدفق منخفضة، كانت قريبة من البيانات المقاسة. وقد وُجد أن المبادل الحراري الصندوقي أظهر فقدانًا حراريًا منخفضًا نسبيًا. وتم الحصول على أقصى قيم للكفاءة الحرارية باستخدام مجمعات المياه ذات الأنابيب المربع والهيكل الصندوقي. قام جمعة وآخرون [٩] بدراسة عددية لمجمع صندوقي ذي قناة متناهية

الدقة. تُظهر النتائج تأثيرًا كبيرًا لمعدل تدفق مياه التبريد وكثافة الإشعاع الشمسي على أداء نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية/الحرارية الهجين. أُجريت المحاكاة باستخدام نموذج ثلاثي الأبعاد في برنامج ANSYS.

٢- مشكلة البحث وأهميته

تكمن مشكلة البحث في انخفاض الكفاءة الحرارية للمجمعات الشمسية ذات الصندوق المسطح وذلك عندما يكون الإشعاع الشمسي منخفض. وبالرغم من ذلك تُستخدم هذه المجمعات على نطاق واسع في جميع أنحاء العالم نظرًا لبساطتها وانخفاض تكلفتها مقارنةً بأنواع المجمعات الشمسية الأخرى. لذلك هناك حاجة مستمرة لتطوير أداء هذه المجمعات من خلال تحسين معايير التصميم وتعزيز امتصاص الحرارة، ومن هنا تأتي أهمية هذا البحث من خلال دراسة تأثير هندسة وشكل واتجاه زعانف المجمع الشمسي ذي اللوح المسطح (الزعانف مُدمجة بالسطح الماص) باستخدام ديناميك الموائع الحسابية (CFD) في برنامج Ansys-fluent.

٣- هدف البحث

يهدف البحث لتقديم نموذج لمجمع شمسي ذي لوح مسطح مزود بمولدات اضطراب داخلية (زعانف أو شفرات). تتمثل مهمة الزعانف الداخلية في توجيه تدفق المائع وزيادة مساحة التبادل الحراري. في الواقع، تُنشئ الزعانف طبقة حدودية مضطربة بدلاً من طبقة حدودية صفائحية تقود لزيادة فعالية انتقال الحرارة، مما يُحسن أداء المُجمَع الشمسي.

٤- منهجية البحث

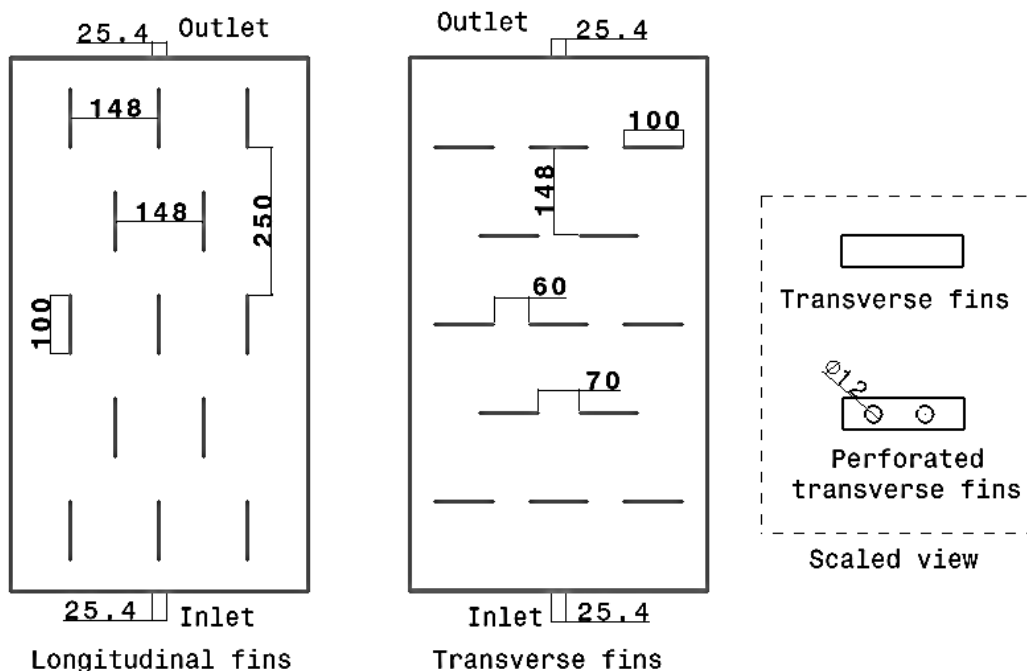
تم اعتماد منهج المحاكاة الرقمية لدراسة ومقارنة تأثير ثلاث أنماط من الزعانف: زعانف متوضعة طولياً باتجاه الجريان - زعانف متوضعة عرضياً - زعانف مثقبة متوضعة عرضياً.

٥- طريقة البحث

أُجريت الدراسة العددية باستخدام برنامج ANSYS Fluent الإصدار ١٥. تم تقسيم نطاق التدفق لتحليل خصائص التدفق. وذلك باستخدام عناصر رباعية السطوح باستخدام وحدة تشبيك ANSYS الإصدار ١٥. تم تحسين حجم الشبكة بالقرب من منطقة السطح الماص والجدار لالتقاط تأثير الطبقة الحدية بدقة. لتجنب التكلفة والوقت الحسابيين، أُجريت المحاكاة بعدد عقد = ٨٣١٢٠ وعدد عناصر = ٤٤٤٢١٥.

٥-١ نموذج المجمع الصندوقي ذي اللوح المسطح المزود بزعانف طولية وعرضية:

لدراسة تأثير اتجاه الزعانف على تدفق السائل وتوزيع درجة الحرارة، تم إنشاء نموذجين لمجمع ذي صفائح مسطحة كما هو موضح في الشكل (١). أحدهما بزعانف طولية والآخر بزعانف عرضية. أبعاد المجمع 90cm × 50cm وسماكة المجمع 3cm. قطر المدخل والمخرج واحد انش (25.4mm). لإجراء مقارنة عادلة، يتطابق كل من عدد ومساحة الزعانف في النموذجين الموضحين في الشكل ١. طول الزعانف 100mm وسمكها 2mm. في الواقع، تمت مقارنة نوعين من الزعانف العرضية (زعانف العرضية غير مثقبة وزعانف عرضية مثقبة، قطر الثقب 12mm). استُخدم نموذج اضطراب (RING) k-ε مع دوال الجدار المُحسنة في المحاكاة العددية.



الشكل (1) أبعاد نموذج المجمع وتوزيع الزعانف الطولية والعرضية ومنظر مقياسي للزعانف العرضية المثقبة.

٢-5 خصائص المواد

يتكون حيز المحاكاة العددية من الماء كسائل (سعته الحرارية النوعية 4.184 KJ/Kg.k ، وموصلية الحرارية 0.598 W/m.k عند درجة حرارة 20°C ، ولزوجته 1.002 m.Pas.sec ، ومجمع الألومنيوم كصلب (سعته الحرارية النوعية 0.89 KJ/Kg.k ، وموصلية الحرارية 239 W/m.k).

٣-٥ المعادلات الحاكمة

معادلة الاستمرارية:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

حيث: ∇ هو التباعد $(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z})$ ، \vec{V} هو مجال سرعة التدفق.

معادلة الزخم (كمية الحركة):

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} \right) = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

حيث: ρ هي كثافة السائل، \vec{g} هي متجه الجاذبية، ∇p هي تدرج الضغط، $\mu \nabla^2 \vec{V}$ هي قوى اللزوجة.

معادلة حفظ الطاقة:

$$\rho C_p \nabla \cdot (\vec{V} T) = k \nabla^2 T \quad (3)$$

حيث: C_p هي السعة الحرارية النوعية للسائل بثبات الضغط، k هي الموصلية الحرارية، T هي درجة الحرارة المطلقة.

٤-٥ إجراء المحاكاة العددية

حُلَّت المعادلات باستخدام برنامج Ansys Fluent والحلّ قائم على اعتبار الضغط في حالة مستقرة (لا يوجد انقطاع أو تغير بقيمة التدفق أثناء المحاكاة). يتحقق التقارب عندما تكون جميع القيم المتبقية أقل من 10^{-6} في المجال الحسابي. عدد التكرارات ٤٠.

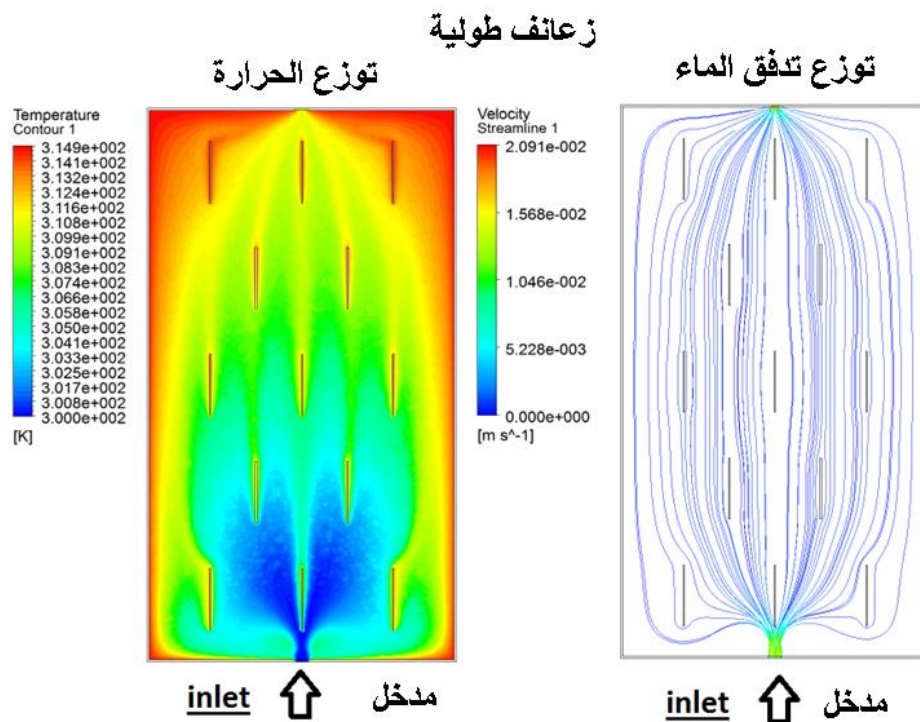
٥-٥ الشروط الحدية

تُعتبر سرعة السائل الداخل 15mm/s . درجة حرارة السطح الماص تحفظ عند درجة حرارة ثابتة تبلغ 315k وهو ما يقابل شدة اشعاع شمسي 1000W/m^2 ، بينما تُضبط درجة حرارة سائل المدخل على 300k . يُعتبر المجمع معزولاً تماماً، ولا يُسمح بتبديد الحرارة.

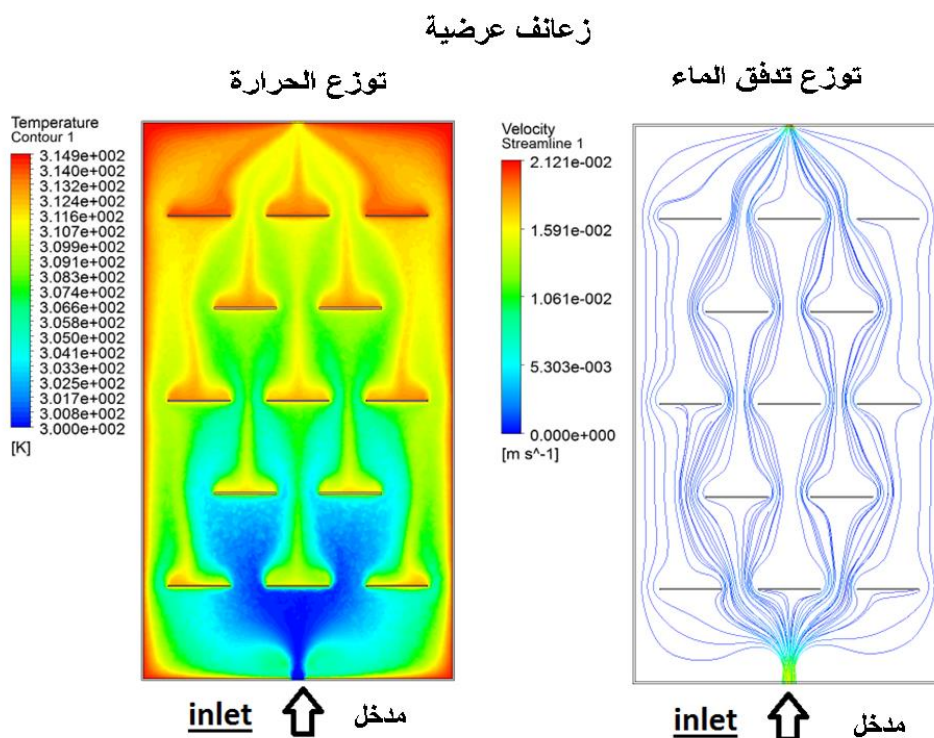
٦- النتائج والمناقشات

تمت مقارنة ثلاثة أنواع من الزعانف، وهي الزعانف الطولية، والزعانف العرضية، والزعانف العرضية المثقبة، المقارنة العددية تهدف لتقييم تأثير اتجاه الزعانف على تدفق المائع وتوزيع درجة الحرارة في المجمع ذي الصندوق المسطح. تبلغ سرعة الماء الداخل 15mm/s ، ودرجة حرارة السطح الماص 315k . توضح الأشكال ٢ و ٣ و ٤ نتائج المحاكاة العددية.

يتضح أن الزعانف الطولية لا تُسبب اضطراباً كبيراً في تدفق السوائل، بينما يزداد اضطراب تدفق السوائل في الزعانف العرضية المثقبة، ويكون الأكبر في الزعانف العرضية. كما يتضح أن جميع أنواع الزعانف تُحدث تأثيراً كبيراً على درجة الحرارة المحيطة بالزعانف. في الواقع، بالنسبة للزعانف المتوضعة عرضياً، تكون درجة حرارة السائل قرب الوجه باتجاه التدفق أعلى بشكل واضح من درجة حرارة السائل قرب الوجه المعاكس للتدفق ويعود ذلك إلى ركود الماء خلف الزعانف وهو عامل سلبي يقلل انتقال الحرارة. لتلافي ذلك، تم وضع ثقوب ضمن الزعانف العرضية (قطر الثقب 12mm). نلاحظ أنه بالنسبة للزعانف العرضية المثقبة، يقل هذا التأثير السلبي بسبب مرور السائل عبر الثقوب.



الشكل (٢) تأثير الزعانف الطولية على تدفق الماء وتوزيع درجة الحرارة في المجمع

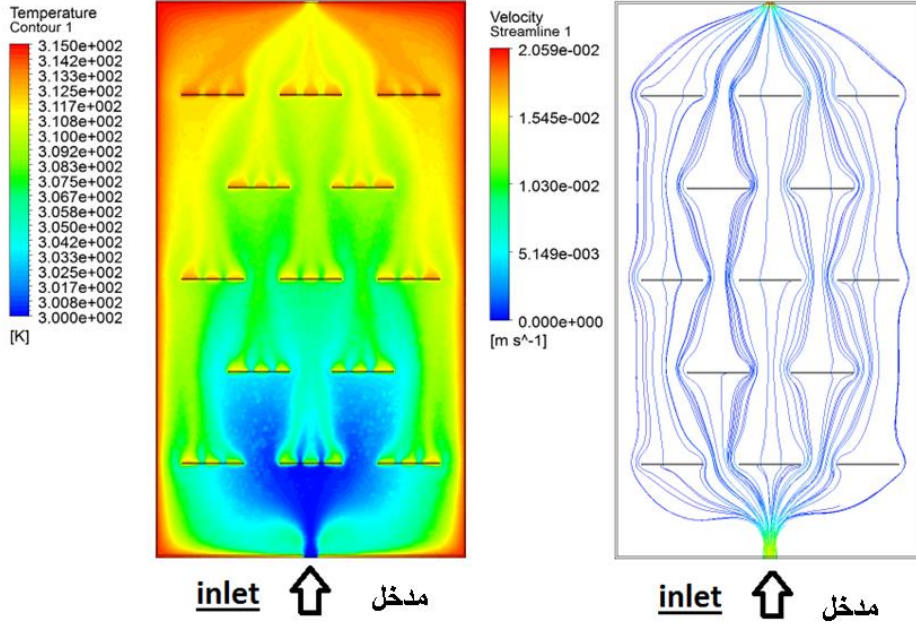


الشكل (٣) تأثير الزعانف العرضية على تدفق الماء وتوزيع درجة الحرارة في المجمع.

زعانف عرضية مثقبة

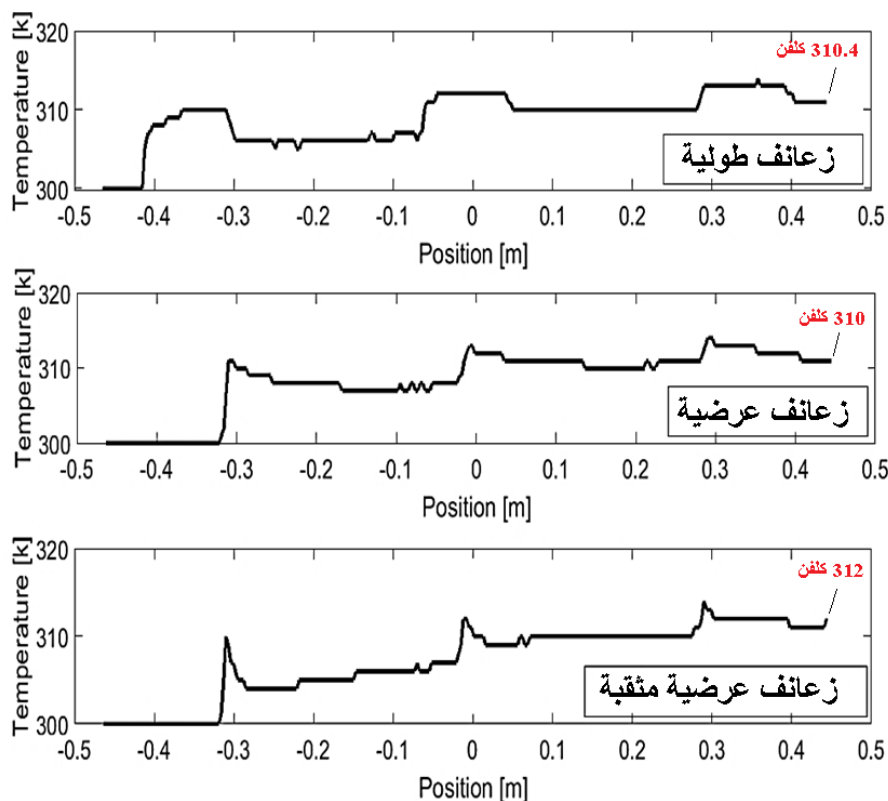
توزع الحرارة

توزع تدفق الماء



الشكل (٤) تأثير الزعانف العرضية المثقبة على تدفق الماء وتوزيع درجة الحرارة في المجمع.

يوضح الشكل (5) مقارنة قيم درجات الحرارة على طول المحور الطولي للمجمع ذي اللوح المسطح بناءً على نوع الزعانف. يتجلى تأثير الزعانف بشكل واضح في شكل قمم درجات الحرارة. درجة حرارة المخرج متقاربة جدًا للزعانف الطولية والعرضية، حيث تبلغ 310.4k و310k على التوالي، بينما تبلغ درجة حرارة المخرج للزعانف العرضية المثقبة حوالي 312k. وبالتالي، تُحسن الزعانف العرضية المثقبة أداء المجمع بأكبر قيمة لدرجة حرارة الخروج للمائع.



الشكل (5) مقارنة قيم درجات الحرارة على طول المحور الطولي للمجمع ذي اللوح المسطح بناءً على نوع الزعانف

٧- الاستنتاجات والتوصيات

تسلط هذه الدراسة الضوء على تأثير هندسة وشكل واتجاه زعانف المجمع الشمسي ذي اللوح المسطح. الزعانف مُدمجة بالسطح الماص. أُجريت الدراسة باستخدام ديناميك الموائع الحسابية (CFD) في برنامج Ansys-fluent. أظهرت الدراسة مايلي:

١. من خلال مقارنة ثلاثة أنواع من الزعانف: الزعانف الطولية، والزعانف العرضية، والزعانف المتقبة، حيث يتطابق عدد الزعانف ومساحتها في كل نموذج، لوحظ اضطراب تدفق السوائل بشكل واضح في الزعانف العرضية المتقبة، بينما يكون تأثير الزعانف الطولية على اضطراب تدفق السوائل ضئيلاً.
٢. درجة حرارة مخرج الزعانف الطولية والعرضية متقاربة، بينما درجة حرارة مخرج الزعانف العرضية المتقبة أعلى في ظل نفس ظروف التشغيل.
٣. أداء المجمع الشمسي ذي اللوح المسطح بوجود الزعانف العرضية المتقبة المدمجة بالسطح الماص كان الأفضل.

التوصيات:

١. إجراء المزيد من الاختبارات الحاسوبية على تأثير شكل وتوزيع تصاميم مختلفة من الزعانف.
٢. تصنيع النموذج المقترح واختباره تجريبياً.
٣. إجراء المزيد من الاختبارات من أجل شروط تشغيلية مختلفة (التدفق، الإشعاع الشمسي، درجة حرارة الوسط المحيط).

المراجع

- [1] P. Roberts, HSC Ancient History. Glebe (UK): Pascal Press, 2003.
- [2] K. Butti and J. Perlin. A Golden Thread. Marion Boyers, London Boston,1980.
- [3] W. Adams. Cooking by Solar Heat. *Scientific American*, 1878:376, 1878.
- [4] Suman S, Khan MK, Pathak M. Performance enhancement of solar collectors-A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015 Sep 1;49:192-210.
- [5] Kalogirou SA. Solar energy engineering: processes and systems. Academic press; 2013 Oct 25.
- [6] Rosa-Clot M, Rosa-Clot P, Tina GM, Ventura C. Experimental photovoltaic-thermal Power Plants based on TESPI panel. *Solar Energy*. 2016 Aug 1;133:305-14.
- [7] Rosa-Clot M, Rosa-Clot P, Tina GM. TESPI: thermal electric solar panel integration. *Solar Energy*. 2011 Oct 1;85(10):2433-42.
- [8] Sardouei MM, Mortezapour H, JAFARI NAEIMI KA. Temperature distribution and efficiency assessment of different PVT water collector designs. *Sādhanā*. 2018 Jun;43(6):1-3.
- [9] Gomaa MR, Ahmed M, Rezk H. Temperature distribution modeling of PV and cooling water PV/T collectors through thin and thick cooling cross-fined channel box. *Energy Reports*. 2022 Apr 1;8:1144-53.