Numerical Study of a Solar Collector Equipped With a Finned Tube Network

Mohammed Alassaf*
Dr. Jihad Baddour**
Dr. Rami George***

(Received 31 / 3 / 2026. Accepted 3 / 6 / 2026)

Abstract

This research presents a numerical study using Computational Fluid Dynamics (CFD) to analyze the performance of a flat plate solar collector equipped with a finned spiral tube network. The ANSYS Workbench (CFX) software was used to solve the Navier-Stokes equations, adopting the finite volume method, along with the Rosseland radiation model and the Boussinesq approximation for buoyancy forces. Eight turbulence models were compared with reference experimental data at four different flow rates. The results showed the Zero equation model is the most accurate and stable across all conditions, recording lowest mean absolute error (0.86 °C for hot water and 0.95 °C for cold), making it most suitable for simulation in presence of bends and fins. Meanwhile, the k-ε model with the Kato Launder correction was accurate at one flow rate (0.036 kg/s) and showed unstable behavior at higher flow rates, while RSM models failed despite their computational cost. The dimensionless relationships revealed the existence of an optimal flow rate (~0.09981 kg/s) for maximizing thermal performance against pumping power consumption. It is recommended to avoid standard k-ε model and RSM models without prior calibration, and determine the optimal flow rate according to project requirements.

Keywords: Numerical Solutions. Numerical Fluid Dynamics. Solar Collector.

Copyright **:**Latakia University journal (formerly Tishreen) -Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

*PhD Student - Department of Mechanical Power Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Latakia University (formerly Tishreen)- Latakia- Syria.
mohammed.alassaf@latakia.univ.edu.sy

**Professor - Department of Mechanical Power Engineering- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering- Latakia University (formerly Tishreen)- Latakia- Syria.
baddour@latakia.univ.edu.sy

***Professor - Department of Mechanical Power Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Latakia University (formerly Tishreen)- Latakia- Syria.
rami.george@latakia.univ.edu.sy

دراسة عددية للاقط شمسي مزود بشبكة أنابيب مزعنفة

محمد أحمد العساف *

د. **جهاد ياسين بدور** **

د. رامي إبراهيم جورج ***

(تاريخ الإيداع 31 / 3 / 2026. قُبِل للنشر في 3/ 6 / 2026)

□ ملخّص □

يُقدّم هذا البحث دراسة عددية باستخدام ديناميك الموائع الحسابي (CFD) لتحليل أداء لاقط شمسي مسطح مزوّد بشبكة أنابيب حلزونية مزعنفة. تم استخدام برنامج ANSYS Workbench (CFX) لحل معادلات نافييه–ستوكس، واعتماد طريقة الحجوم المنتهية، مع تطبيق نموذج Rosseland للإشعاع وتقريب Boussinesq لقوى الطفو. تم اختبار ثمانية نماذج اضطراب بمقارنتها مع بيانات تجريبية عند أربعة معدلات تدفق. أظهرت النتائج أن نموذج Zero equation هو الأكثر دقة وثباتاً عبر التدفقات المدروسة وبكافة الظروف، حيث سجل أقل متوسط خطأ مطلق (0.86 C° للماء الساخن 0.95 C° للماء البارد)، مما يجعله الأنسب للمحاكاة في وجود انحناءات وزعانف. بينما كان نموذج k–ε مع تصحيح Kato Launder دقيقاً عند تدفق واحد (0.036 kg/s)، وأظهر سلوكاً غير مستقر عند التدفقات الأعلى، وفشلت نماذج RSM رغم تكلفتها الحاسوبية العالية. كشفت الأرقام اللابعدية عن وجود معدل تدفق أمثل (~0.09981 kg/s) لزيادة الأداء الحراري الى أعظم حد ممكن مقابل استهلاك طاقة الضخ. يُوصى بتجنب نموذج k–ε القياسي ونماذج RSM دون معايرة مسبقة، وتحديد معدل التدفق الأمثل حسب متطلبات المشروع.

الكلمات المفتاحية: الحلول العددية، ديناميك الموائع العددي، اللاقط الشمسي.

حقوق النشر : مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص CC BY–NC–SA 04

* طالب دكتوراه – قسم هندسة القوى الميكانيكية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– اللاذقية– سورية. mohammed.alassaf@latakia.univ.edu.sy

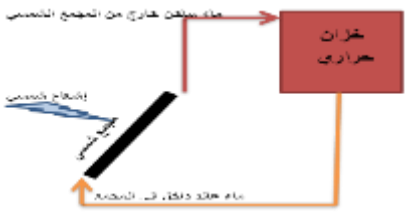
** أستاذ – قسم هندسة القوى الميكانيكية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– اللاذقية– سورية. baddour@latakia.univ.edu.sy

*** أستاذ – قسم هندسة القوى الميكانيكية– كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية– جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً)– اللاذقية– سورية. baddour@latakia.univ.edu.sy

1- مقدمة:

تعد اللواقط الشمسية المسطحة من أهم التطبيقات في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية، حيث يعمل اللاقط الشمسي كمبادل حراري. ان استخدام لواقط شمسية مسطحة محسنة حسب النموذج المقترح تستخدم الماء كوسيط تشغيل يخفض بشكل ملحوظ مساحة الحقل الشمسي اللازمة لواحدة الانتاج مع ارتفاع درجات الحرارة بحيث يحقق وفر في المساحة المطلوبة، وخفض التكلفة الاقتصادية، ويؤدي الى زيادة الانتاجية نتيجة لزيادة المردود لنفس مساحة السطح المشغولة مما ينعكس بشكل ايجابي على نتيجة تصميم النظام حسب الغاية المرجوة.

في هذه الدراسة تم تحليل لاقط شمسي مصنع محليا من خلال إجراء تحسينات تصميمية ساهمت في تحسين انتقال الحرارة بالإشعاع مما انعكس على زيادة الحرارة المكتسبة من قبل اللاقط، وبالتالي زيادة المردود. نظرا لأهمية تأثير معدل التدفق الكتلي في أداء المبادلات الحرارية، فقد تم اعتماده كمتغير رئيسي في هذه الدراسة، نظرا لإمكانيه التحكم به وتأثيره المباشر على خصائص الجريان وانتقال الحرارة.



الشكل (1) النموذج المقترح للدارة

الشكل (2) اللاقط الشمسي المسطح المصنع محليا

فرضيات النموذج المقترح لدارة اللاقط الشمسي هي:

1- تعمل الدارة بالجريان الحر دون وجود مضخة كما يوضح الشكل (1).

2- اللاقط الشمسي المسطح مصنع محليا، يستخدم الماء كوسيط عامل.

3- الانابيب مثبتة بالصفيحة الماصة ومزودة بزعانف ماصة بشكل حلقات دائرية لزيادة مساحة السطح الفعال كما يوضح الشكل(2).

ويعرف علم "ديناميك الموائع العددي "بأنه الحل الرياضي العددي المتغير مع الزمن، والموضع للمعادلات التفاضلية الواصفة لتدفق مائع ما للحصول على حل كامل لمتغيرات حقل الجريان المدروس، حيث كانت الحلول التحليلية لمعادلات نافييه ستوكس على مر الزمن ممكنة فقط للجريانات البسيطة تحت شروط مثالية في حين أن الحصول على حلول الجريانات الحقيقية يشوبه الكثير من الصعوبات، ولهذا تم اعتماد طريقة الحلول التقريبية، حيث تم استبدال جملة المعادلات التفاضلية بتراكيب جبرية يمكن حلها باستخدام الرياضيات العددية، وقد انتشرت في الآونة الأخيرة الكثير من البرامج الهندسية التي تعتمد على الطرق العددية في حل جمل المعادلات التفاضلية، والجبرية، ومن هذه البرامج (CFX, COSMOS, NASTRAN, ABAQUS,..). إن الهدف من أي نموذج اضطراب هو تقريب تأثير الدوامات (vortices) في الجريان

المضطرب دون الحاجة إلى شبكة حسابية دقيقة جداً (وهو ما كان سيكلف طاقة حاسوبية كبيرة). النماذج تختلف في عدد المعادلات الإضافية التي تحلها، وفي دقتها وتطبيقاتها.

2- نماذج الاضطراب Turbulent Model

☒ نموذج المعادلة الصفرية – (Zero Equation Model): يُسمى أيضاً نموذج "اللزوجة الدوامية الثابتة أو مختلط الطول .(Mixing Length) "لا يحل أي معادلة نقل إضافية للاضطراب. يربط لزوجة الاضطراب (μt) بشكل جبري مباشر بمتوسط مجال السرعة وتدرجها.

☒ نموذج المعادلتين – (Two-Equation k-ε Model): هو نموذج "شبه تجريبي" وهو النموذج الأكثر استخداماً في الصناعة والتطبيقات الهندسية. يحل معادلتي نقل:

K: طاقة الاضطراب الحركية(Turbulent Kinetic Energy) .

ε: معدل تبدد طاقة الاضطراب(Dissipation Rate) .

تمتاز هذه الطريقة بأنها توازن بين الدقة والتكلفة، وتعمل جيداً في معظم الجريانات المضطربة (قنوات، أنابيب، صفائح). من نقاط ضعفها عدم استقرارها في حال وجود انحناءات قوية، دوامات كبيرة، جريانات ذات تدرج ضغط.

☒ نموذج – RNG k-ε : هي نسخة محسنة من k-ε اختصار لـ (Renormalization Group)، يعتمد على نظرية رياضية أكثر تقدماً لتحسين ثوابت النموذج وتعريف إضافي للزوجة الاضطرابية. تختلف عن k-ε القياسي بأنها تضيف حداً إضافياً في معادلة ε يجعله أكثر حساسية لمعدلات الإجهاد والانحناء، كما أنها تعمل بشكل أفضل في الجريانات ذات مقادير رينولدز المنخفضة (Low Re)، والمناطق القريبة من الجدران.

☒ نموذج إجهاد رينولدز – (Reynolds Stress Model – RSM): يعتبر هذا النموذج الأكثر تعقيداً ودقة، يتجاهل فرضية "اللزوجة الدوامية (Boussinesq hypothesis) تماماً. بدلاً من ذلك، يحل معادلة نقل منفصلة لكل مركبة من مركبات إجهاد رينولدز، بالإضافة إلى معادلة مقياس الطول .

☒ نموذج Eddy viscosity: يعتبر نموذج اللزوجة الدوامية – (Eddy Viscosity Model EVM)هو النموذج الأبسط ، والمقابل لنموذج (RSM) الأكثر تعقيداً، واستخداماً في تطبيقات ديناميكا الموائع الحسابية (CFD) . يفترض هذا النموذج أن الاضطراب (Turbulence) يشبه "اللزوجة" الإضافية للمائع، فكما تعمل اللزوجة الجزيئية على مقاومة حركة طبقات المائع، فإن الدوامات وكمية الحركة الناتجة عن الاضطراب يخلقان لزوجة "مضاعفة" كبيرة تُسمى اللزوجة الدوامية ، وعلى ذلك يفترض أن إجهاد رينولدز (Reynolds Stress)الناتج عن الاضطراب يتناسب طردياً مع معدل تشوه متوسط التدفق (متوسط سرعة المائع)، وبدلاً من حل 6 معادلات منفصلة لمركبات إجهاد رينولدز كما في نموذج RSM ، يقوم نموذج EVM بحل معادلة أو معادلتين إضافيتين فقط لحساب قيمة μt. يؤخذ على هذا النموذج أن الاضطراب يعمل بنفس القوة في جميع الاتجاهات (أيزوتروبي)، وهو افتراض غير دقيق في العديد من التطبيقات الواقعية.

☒ نموذج (ω-based Reynolds Stress Model – RSM): يعتبر نموذج Omega- Reynolds Stress نموذج من الدرجة الثانية يحل كل مركبة من مركبات إجهاد رينولدز لوحدها بشكل منفصل، ويستخدم متغير ω لتحديد مقياس التبديد، وهو دقيق، ولكنه مكلف حسابياً مقارنة بالنماذج البسيطة .

☒ نموذج (Reynolds Shear Stress – RSS): هذا المصطلح له معنى فيزيائي ومباشر أكثر، وهو أحد مكونات إجهاد رينولدز الذي ذكرناه سابقاً. يمثل RSS معدل نقل كمية الحركة بسبب التغيرات في الاضطراب. بعبارة أبسط، هو مقياس لقوة "الاحتكاك" أو "الخلط" التي يسببها الاضطراب في التدفق.

الدراسة التحليلية (النظرية)

ينقسم الجريان داخل الانابيب الى جريانات صفحية ومضطربة تحدث مع زيادة سرعة الجريان للمائع ضمن الانبوب. ان انتقال الجريان من صفائحي الى مضطرب لا يحدث فجأة إنما يمر بمرحلة تسمى مرحلة الجريان الانتقالي ينتقل فيها الجريان من صفائحي الى مضطرب ومن ثم العكس حتى يصبح مضطرب بالكامل.

يحدد رقم رينولدز شكل الجريان $Re = \frac{UD_h}{\vartheta}$

من أجل الجريان الصفحي فإن (Re<2300) ومن أجل الجريان المضطرب يكون (Re>10000)، والجريان الانتقالي بينهما.

يعد رقم نوسلت من أهم الأرقام اللابعدية المستخدمة لتوصيف انتقال الحرارة بالحمل $Nu = \frac{h_i D_h}{\lambda}$

كما توجد علاقات تجريبية لحساب رقم نوسيلت عند قيم منخفضة لقم رينولدز

$$\mathrm{Nu} = \frac{\left(\mathrm{f}/_8\right)(\mathrm{Re} - 1000)\mathrm{Pr}}{1 + 12.7\left(\mathrm{f}/_8\right)^{0.5}\left(\mathrm{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1\right)} \begin{pmatrix} 0.5 \le \mathrm{Pr} \le 2000 \\ 3000 < Re < 5 * 10\text{^}6 \end{pmatrix}$$

حيث أن معامل الاحتكاك (f) يعرف من العلاقة التجريبية للجريان المضطرب في انبوب أملس

$$f = (0.790lnRe - 1.64)^{-2}(2300 < Re < 10000)$$

كما يعرف رقم برانتل لربط الخصائص الحرارية $Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda}$. في حين يستخدم رقم دين لوصف تأثير الانحناء في الجريان $\mathrm{De} = \mathrm{Re}\sqrt{\frac{\mathrm{D_p}}{\mathrm{D_c}}}$

3- أهمية البحث وأهدافه:

تهدف هذه الدراسة الى نمذجة لاقط شمسي مبتكر عددياً باستخدام برنامج CFX للتأكيد على أهمية استخدام النماذج العددية في تطوير الصناعات البحثية من خلال مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج العددية. كما تسعى الدراسة الى تقييم نماذج الاضطراب المختلفة. وتحديد النموذج الأكثر دقة في تمثيل الظواهر الفيزيائية المدروسة.

4- الدراسات المرجعية

قام A. Al-MOGBEL كما في [1] بإجراء دراسة تحليل تجريبي وديناميكي للموائع الحسابية لمبادل حراري أنبوبي حلزوني، وقارن النتائج التجريبية ونتائج ديناميك الموائع الحسابية. ومن خلال المقارنة بينهما لمبادل حراري أنبوبي حلزوني ملفوف بالأسلاك، لاحظ تحسن معامل انتقال الحرارة الداخلي عندما زاد معدل تدفق المائع في الأنبوب الداخلي. ودرس وأثبت أن رقم نوسيلت يتناسب طردياً مع معامل انتقال الحرارة الداخلي، ووجد ان الفرق في درجة الحرارة المتوسطة اللوغاريتمية (LMTD) يتناسب طرداً مع معدل تدفق المائع في الأنبوب الداخلي، بالنسبة لمعدل تدفق الماء البارد الثابت ، ووجد أن معدل تدفق المائع في الأنبوب الداخلي يزداد مع زيادة اكتساب الحرارة بواسطة الماء البارد. عمل Madhukeshwara. N وآخرون كما

في [2] على المحاكاة العددية لتعزيز انتقال الحرارة في أنبوب مع مولدات دوامة شريطية حلزونية قضيبية وبدونه، حيث أظهرت الدراسة أن تحليل ديناميك الموائع الحسابي الذي أجري للتحقيق في تعزيز انتقال الحرارة عن طريق إدخالات الشريط الحلزوني في مبادل حراري مزدوج الأنبوب باستخدام الماء البارد، والهواء الساخن كموائع اختبار. تم اعتبار معدل تدفق الأنبوب في نطاق رقم رينولدز بين 2300 و8800. كما وجد أن تعزيز انتقال الحرارة باستخدام أنواع مختلفة من بناء الشريط الحلزوني في الأنبوب الداخلي لمبادل حراري مزدوج الأنبوب متحد المركز يمكن أن يحسن معدل انتقال الحرارة بكفاءة، حيث أن الحد الأقصى لمتوسط رقم نوسيلت بنسبة 160% للشريط الحلزوني كامل الطول مع قضيب مركزي، و150% للشريط الحلزوني كامل الطول بدون قضيب بالمقارنة مع الأنبوب العادي.

كما أجرى Y. CHENG SHIH وآخرون كما في [3] تحليلاً عددياً لتعزيز انتقال الحرارة في المبادلات الحرارية الحلزونية الأنبوبية داخل الأنبوب، وركزوا على تأثير الأنابيب الداخلية عند قيمة ثابتة لمعدل التدفق الكتلي، وتغير معدل التدفق الكتلي الحلقي على معامل انتقال الحرارة الكلي، ورقم دين مع درجة حرارة جدار ثابتة بالإضافة إلى ذلك، درسوا تأثير رقم دين فيما يتعلق برقم رينولدز ورقم نوسيلت ومعامل انتقال الحرارة الكلي على تغيير تكوين الملف للأنبوب الحلزوني. وتمت مقارنة النتيجة بدراسات أخرى مماثلة في الشروط الحدية للملفات الحلزونية. وفي دراسة أخرى قام P.C.CROPPER وآخرون بإجراء دراسات ANSYS Fluent لمعدل انتقال الحرارة لمبادل حراري حلزوني الأنبوب داخل الأنبوب كما في [4]، حيث تم إجراء تحليل بمعامل انتقال الحرارة الثابت للتدفق المضطرب، أجريت الدراسة لشروط حدية مختلفة، وتم العثور على حالة نقل الحرارة المثلى لنسبة D /d المختلفة، وتم النظر في نموذج التدفق المضطرب مع المبادل الحراري ذي التدفق العكسي لغرض التحقيق، كما أظهرت الدراسة أنه مع زيادة رقم رينولدز، يزداد رقم نوسيلت للأنبوب الداخلي، ويتمتع رقم نوسيلت بأفضل قيمة عندD/d=25. و قام P.O. FANGER كما في [5] بدراسة تجريبية لمبادل حراري حلزوني ملفوف بأنبوب سلكي مع مراعاة الماء الساخن في الأنبوب الداخلي، ومع وجود ماء تبريد في الأنبوب الخارجي، وتم اختبار التدفق العكسي والتيار، وعند تغيير معدلات التدفق الكتلي في الأنبوب الداخلي وفي الأنبوب الخارجي لوحظ أن معامل نقل الحرارة الكلي يزداد مع زيادة معدل تدفق المائع في الأنبوب الملفوف الداخلي، لمعدل تدفق ثابت في منطقة الحلقة، ووجد أن كفاءة المبادل الحراري أكثر بنسبة 15-20% مقارنة بالمبادل الحراري التقليدي، والكفاءة المحسوبة تجريبياً هي 93,33%. أما B. LAUNDER وآخرون كما في [6] فقد أنجزوا دراسة المبادلات الحرارية الحلزونية ثنائية الأنابيب تجريبياً وعدديا متجاهلين تأثير ميل الأنبوب الحلزوني. كانت الحالة الحدودية مختلفة عن الشروط الحدية لدرجة حرارة الجدار الثابتة، وتدفق الحرارة الثابت. تمت دراسة كل من تكوين التدفق الموازي والتدفق المعاكس، وتم ربط أرقام نوسيلت للحلقة برقم دين المتغير، مما أدى إلى علاقة خطية قوية على النحو التالي: Nu= 0.075De + 5.36. قام Milan وآخرون كما في [7] بدراسة قدرة نماذج RANS المختلفة (SST (k-ε) (k-ω، و (RSM) القابل للتحقق، على محاكاة انتقال الحرارة في أنابيب حلزونية مموجة. وجدت هذه الدراسة أن نموذج (SST k-ω) كان الأكثر دقة في المنطقة الانتقالية، بينما كان RSM أفضل في المنطقة المضطربة بالكامل. كما أشارت إلى أن جميع النماذج واجهت صعوبة في التنبؤ الكامل بتفاعل الجريان المعقد مع التموجات. وعلى ذلك فإن اختيار نموذج الاضطراب المناسب لا يزال يمثل تحدياً لإنجاز مثل هذه المحاكاة. كما وثق Ameer ورفاقه في[8] أداء الأنظمة الحرارية الشمسية باستخدام أنبوب مزود بزعانف طولية، وذلك بالاعتماد على

كل من الطرق التجريبية والديناميك العددي للموائع. تم تصنيع أنبوبين من النحاس في جامعة بغداد/ الأول ذو سطح أملس، والثاني مزود بزعانف طولية/. قام البحث بدراسة الكفاءة الحرارية، واستخلاص الطاقة المفيدة عند معدلات تدفق مختلفة، وقد أظهرت النتائج التجريبية اختلافات كبيرة بين الأنبوب الأملس والمزود بزعانف حلزونية، عند تدفقات صغيرة، كما أظهر الأنبوب الأملس زيادات تدريجية في الطاقة المفيدة، بينما حقق الأنبوب المزود بزعانف قيماً أعلى بشكل ملحوظ، مما أدى إلى كفاءة حرارية تتراوح بين 10% و 52%. بالمقابل، عند معدلات التدفق الأعلى، أظهر كلا النظامين كفاءات حرارية متقاربة، كما أظهرت المقارنة بين النتائج التجريبية ونتائج ANSYS توافقاً مع هامش خطأ معقول (لا يتجاوز 12%)، مما يؤكد صحة إجراءات المحاكاة.

5- التحليل العددي

يعرف ديناميك الموائع العددي بأنه استخدام الرياضيات التطبيقية، الفيزيائية والتطبيقات الحسابية من أجل وصف سلوك الجريان. يبنى ديناميك الموائع العددي على معادلات نافييه ستوكس. هذه المعادلات تصف حقل السرعة، الضغط، درجة الحرارة، والكثافة للجريان، وينقسم التحليل العددي الى ثلاث عمليات أساسية:

مرحلة قبل المعالجة **(Preprocessing)**.

مرحلة المعالجة **(Processing)**.

مرحلة ما بعد المعالجة وإيجاد النتائج **(Postprocessor)**.

مرحلة قبل المعالجة (Preprocessing):

- يتم رسم حقل الجريان وبناء النموذج الفيزيائي للمشكلة المدروسة باستخدام برنامج حاسوبي (computer aided design (CAD).).
- يتم تصدير حقل الجريان بعد ذلك.
- يقسم حقل الجريان الى خلايا صغيرة (شبكة حسابية). هذه الشبكة يمكن أن تكون منتظمة أو غير منتظمة، بنيوية، غير بنيوية، تتكون بشكل موشوري أو سداسيات أوجه، رباعيات أوجه أو عناصر قطبية.
- يتم تعريف النموذج الفيزيائي.
- يتم بعد ذلك تعريف الشروط الحدية. وهذا يتضمن تحديد مميزات وسلوك المائع عند سطوح الحدود لحقل الجريان. ومن أجل المسائل غير المستقرة زمنياً (العابرة)، فإن الشروط الابتدائية يجب تحديدها.

مرحلة المعالجة (Processing):

يتم خلالها حل المعادلات بواسطة التكرار لحل مستقر بواسطة نظرية الحجوم المنتهية وهي طريقة شائعة من طرق (CFD) لحل المعادلات، وهي طريقة لها أفضلية مهمة في استخدام الذواكر وسرعة عالية في الحل، وخاصة من أجل المسائل الكبيرة والجريانات المضطربة.

في طريقة الحجوم المنتهية يتم حل المعادلات التفاضلية الجزئية بواسطة طرق عددية من أجل إيجاد بارامترات الجريان في عقد خلايا الشبكة الحسابية، في حين يتم استخدام طرق الاستيفاء الرياضي من أجل إيجاد قيم البارامترات بين العقد.

مرحلة ما بعد المعالجة وإيجاد النتائج (Postprocessor):

في النهاية يتم استخدام هذه المرحلة من أجل تحليل النتائج للحل العددي.

6- النموذج الرياضي كما في [13-10]

بفرض أن جريان الماء المتدفق عبر الفتحات غير متغير مع الزمن، وبالتالي يمكن كتابة المعادلات التفاضلية الواصفة للجريان كما يلي:

معادلة مصونيه الكتلة يمكن أن تكتب بالشكل التالي:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla.(\rho \boldsymbol{U}) = 0 \qquad (1)$$

$\nabla = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial z} \end{bmatrix}$: مؤثر التدرج .$\otimes$: جداء خارجي.$\rho$: كثافة المائع. $\boldsymbol{U}$: شعاع السرعة للمائع.$\frac{\partial \rho}{\partial t}$: تغير كثافة المائع مع الزمن. بفرض أن الجريان مضطرب، وبفرض نموذج $(k-\varepsilon)$ للاضطراب. نكتب معادلة مصونية كمية الحركة بالشكل التالي:

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla.(\rho U \otimes U) = -\nabla(P + \frac{2}{3}\rho K + \frac{2}{3}\mu_{eff}\,\nabla \boldsymbol{U}) + \nabla.(\mu_{eff}(\nabla U + (\nabla U)^T)) + S_M \qquad (2)$$

K : تمثل طاقة الاضطراب الحركية، وهي تعرف على إنها التباين في تموج السرعة.

ε : تمثل التبدد الدوامي للاضطراب (معدل تبدد تموج السرعة)، وله واحدة K لكل وحدة زمنية .

$P + \frac{2}{3}\rho K + \frac{2}{3}\mu_{eff}\,\nabla \boldsymbol{U}$: الضغط المعدل يأخذ بعين الاعتبار لزوجة المائع والطاقة الحركية له.

μ_{eff}: اللزوجة الدوامية، وعليه فإن: $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$.

μ_t: لزوجة الاضطراب. ويفترض هذا النموذج بأن لزوجة الاضطراب ترتبط مع الطاقة الحركية المضطربة، والتبدد بواسطة العلاقة التالية: $\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon}$ .S_M :هي مجموع قوى المائع.

C_μ ثابت يملك القيمة $(0{,}09)$. أما قيم $(\varepsilon، K)$ فيتم حسابها بصورة مباشرة من معادلات الانتقال التفاضلية من أجل الطاقة الحركية للاضطراب، ومعدل تبدد الاضطراب.

تعتبر خواص الماء كلها ثوابت، ما عدا الكثافة (تعتبر تابع لدرجة حرارة المزيج، وتراكيز المكونات الداخلة فيه)، وهو يسبب الطفو في الجريان، ويضاف تأثيرها عن طريق إضافة حد قوة جديد إلى معادلة مصونيه كمية الحركة.

يتم اضافة حد قوة الطفو الناتج بسبب تغيرات الكثافة الى المعادلات بواسطة تقريب (Boussinesq) كما في[10]، والذي يفترض بأن تغيرات الكثافة تؤثر فقط على قوى الطفو في المعادلات. في بحثنا هذا نعتبر أن تراكيز المكونات صغيرة جداً، وبالتالي يمكن إهمال تأثيرها على حد الطفو. لذا يتم إضافة حد قوة الطفو الناتج بسبب تغيرات الكثافة إلى المعادلات، ويكتب الحد المعبّر عن تأثير تغير الكثافة على قوى الطفو في المعادلة السابقة بالشكل التالي:

$$S_{M,buoy} = (\rho - \rho_{ref}).g \qquad (3)$$

$$\rho - \rho_{ref} = -\rho_{ref}\beta(T - T_{ref}),$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial T}\Big|_P ،\mu_{eff} = \mu + \mu_t \;،\mu_t = C_\mu \rho \frac{K^2}{\varepsilon}$$

يتم حساب كل من المتغيرين الجديدين $(k-\varepsilon)$ باستخدام معادلات الإنتقال التفاضلية للطاقة الحركية للاضطراب، ومعدل تبدد الاضطراب:

$$\frac{\partial(\rho K)}{\partial t}+\nabla.(\rho \boldsymbol{U}K)=\nabla.\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_K}\right)\nabla \mathrm{K}\right]+P_K+P_{Kb}-\rho\varepsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t}+\nabla.(\rho \boldsymbol{U}\varepsilon)=\nabla.\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla \varepsilon\right]+\frac{\varepsilon}{\mathrm{K}}\left(C_{\varepsilon 1}\left(\mathrm{P_{Kb}}+P_{\varepsilon b}\right)-C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon\right) \quad (5)$$

$\mathrm{P_{\varepsilon b}}$ &$\mathrm{P_{Kb}}$ تمثل تأثير قوى الطفو.

$$P_K=\mu_t\nabla\mathbf{U}.(\nabla\mathbf{U}+\nabla\boldsymbol{U}^{\mathrm{T}})-\frac{2}{3}\nabla\mathbf{U}(3\mu_t\nabla\mathbf{U}+\rho K) \quad (6)$$

لمنع توليد الاضطراب المبالغ فيه بالقرب من المناطق الراكدة هناك العديد من الصيغ المحددة لهذا التوليد تتم إضافتها إلى معادلة الاضطراب.

لذلك اقترح (Kato and Launder) كما في[13] الاستعاضة عن حد التوليد بالصيغة التالية:

$$P_K=\mu_t.s.\Omega \quad (7)$$

$$\Omega=\sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}\ ,\qquad \Omega_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}-\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)$$

$$s_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j}+\frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\quad ،s=\sqrt{2s_{ij}s_{ij}}$$

حيث أن:

s: تشير إلى قيمة معدل الإجهاد. $\mathrm{s_{ij}}$: تشير إلى توتر معدل الإجهاد.

Ω: تشير إلى قيمة معدل السرعة. Ω_{ij}: تشير إلى توتر السرعة.

عند استخدام نموذج (Boussinesq buoyancy) فإن:

$$P_{Kb}=\frac{\mu_t}{\rho\sigma_\rho}\rho\beta g.\nabla T, P_{\varepsilon b}=C_3.\max(0,P_{Kb}) \quad (8)$$

وبفرض أنه لا يوجد مصدر لتوليد الحرارة الداخلية ضمن الحقل المدروس، فإن معادلة مصونيه الطاقة تكتب بالشكل التالي:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t}-\frac{\partial P}{\partial t}+\nabla.(\rho \boldsymbol{U}h_{tot})=\nabla.\left(\lambda_{eff}\nabla T\right)+\nabla.(\boldsymbol{U}.\tau)+\boldsymbol{U}.\boldsymbol{S}_M+\mathrm{S_E} \quad (9)$$

$$\lambda_t=\frac{c_p\mu_t}{pr_t}\qquad \lambda_{eff}=\lambda_t+\lambda\ ,$$

$\nabla.(\mathrm{U}.\tau)$: العمل العائد لإجهاد اللزوجة.

$\mathrm{U}.\mathrm{S_M}$: العمل العائد لمنابع كمية الحركة الخارجية.

وباستخدام نموذج (Rosseland) للإشعاع فإن التدفق الحراري الإشعاعي الكلي في وسط مشتت متباين الخواص خطياً يمكن أن يكتب بالشكل التالي:

$$\mathrm{q_r}=-\int_0^\infty\frac{4}{3\beta-\mathrm{AK_s}}\nabla\mathrm{E_{bv}}\mathrm{dv} \quad (10)$$

v: التردد.

عندما يضاف تقريب (Rosseland) إلى معادلة الطاقة فإن التدفق الحراري بالإشعاع، والتوصيل سيتم جمعهم وفق:

$$\mathrm{q}=\mathrm{q_r}+\mathrm{q_c}=-(\mathrm{k}+\mathrm{k_r})\nabla\mathrm{T} \quad (11)$$

$$\mathrm{k_r}=-\frac{16.\sigma.\mathrm{n}^2\mathrm{T}^3}{3\beta}$$

k : الإيصالية الحرارية. n: معامل الانكسار. k_r: الموصلية الإشعاعية الكلية. ويعطى التدفق الحراري عند الجدار بالعلاقة التالية:

$$q_{r,w} = \frac{-\sigma(T_w^4 - T_g^4)}{\varphi} \qquad (12)$$

$$\varphi = \frac{3}{4\pi}\int_0^1 \operatorname{atan}\frac{1}{\emptyset_v}\,d\emptyset \quad , \quad \emptyset_v = \frac{1}{\pi}\left[\frac{\beta k}{8\emptyset^3\sigma T_w^3} - \frac{2}{\emptyset} - \ln\frac{1-\emptyset}{1+\emptyset}\right]$$

β : معامل الإنطفاء (امتصاص+ تشتت).

إن معادلات الانتقال الموصوفة مسبقاً يجب أن تستكمل بمعادلات أساسية للحالة من أجل الإنتالبي، والكثافة لتشكيل نظام مغلق من المعادلات لحل كامل المتغيرات. في الحالة العامة معادلات الحالة تملك الصيغة التالية:

$$\frac{\partial c_p}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial T}\left(v - T\frac{\partial v}{\partial T}\Big|_p\right) \qquad (13)$$

P: الضغط بواحدة pa.

الشروط الحدية: لتعريف الدراسة بشكل كامل، يجب تعريف مجموعة من الشروط الحدية المناسبة على حدود الحقل المدروس.

7- المحاكاة العددية

- نختار البيئة الافتراضية التالية المكونة من:
- نفترض أن الأسطح جدران داخلية معزولة.
- ➢ يتم التصميم الحراري وفق قياس درجات الحرارة في 23 تموز – الساعة 10 صباحاً.
- يدخل الماء بشكل عمودي عبر فتحات دخول المبادل، وبسرعة دخول محددة

$$V_{inlet} = V_{spec} = 1\ [m/s].$$

عند كل السطوح الصلبة غير المتحركة، فإن سرعة المائع عند الجدار الحدي غير المتحرك:

$$U_{wall} = 0\ [m/s].$$

- ➢ الشروط الحدية لدرجات الحرارة:
- عند فتحات الدخول، وعلى السطوح الحدية، والسطوح المتواجدة ضمن حقل الدراسة يتم اعتبار درجة الحرارة ستاتيكية، ومنه فإن درجة الحرارة على فتحات الدخول كما هو مبين في الجداول:

$$T_{stat,inlet} = T_{spec}.$$

T_{spec}: درجة الحرارة الستاتيكية للماء على فتحات الدخول تؤخذ القيمة التجريبية.

- ➢ الشروط الحدية لكميات الحرارة المتدفقة عبر الأسطح المختلفة كما في[10] يكون التدفق الحراري عبر الأسطح $q_w = q_{spec}$.

q_{spec}: تمثل الحرارة المحسوبة وفق نموذج الاشعاع المقدمة الى اللاقط.

يستخدم برنامج (ANSYS CFX) المعتمد في الحل طريقة الحجوم المنتهية، والتي تتضمن بدايةً تقسيم الحقل المكاني لبناء الحجوم المنتهية، والتي تستخدم بدورها لتحقيق مبدأ المصونية لكل الكميات ذات الصلة مثل، الكتلة، وكمية الحركة، والطاقة، وتراكيز مكونات الحقل المدروس. تم تحديده توزع الشبكة، ومقاس الحجم المنتهي من سلسلة من التجارب بأعداد، ومقاسات مختلفة من الحجوم المنتهية، وأشكال مختلفة عند المناطق الحساسة من الحقل المدروس، ومن ثم مقارنة نتائج محاكاة أولية مع نتائج مرجعية تجريبية تم القيام بها باستخدام البرنامج للتأكد من صحة مقاسات، وتوزيعات الشبكة المستخدمة، ونقوم بعدها بتحويل المعادلات

التفاضلية الحاكمة للجريان إلى جملة معادلات جبرية تحل عددياً في نقاط معينه (نقاط التكامل) من الشبكة المختارة لإيجاد قيم المتغيرات المحسوبة، ثم نستخدم توابع الاستيفاء لإيجاد قيم هذه المتغيرات على كامل الحقل المدروس. تمت صياغة نموذج مشابه للنموذج الذي درسه محمد وآخرون كما في[9] ، وبتطبيق الشروط الحدية التي تمت فيها التجارب، على النموذج العددي من أجل مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها مع نتائج البحث المرجعي كما في[9] للتأكد من صلاحية النموذج العددي الذي سوف نتبناه.

8- النتائج والمناقشة:

يوضح الجدول (1) بارامترات الماء الوسطية المستخدمة للوسيط العامل في ملفات اللاقط الشمسي. في حين يوضح الجدول (2) بارامترات مادة ملف اللاقط.

الجدول (1) خواص الماء الوسطية المستخدمة للوسيط العامل

Description	Value
Viscosity	0.001003 kg/m.s
Density	998.2 kg/m³
Specific Heat capacity	4182 J/kg.K
Thermal Conductivity	0.6 W/m.K

الجدول (2) خواص مادة ملف اللاقط (النحاس)

Description	Value
Density	8978 kg/m³
Specific Heat Capacity	381 J/kg.K
Thermal Conductivity	387.6 W/m.K

الجدول(3) مميزات الشبكة المستخدمة في الحل العددي.

Mesh software	workbench meshing
Min size	5*10^-5 m
Max size	1*10^-2 m
Max face size	5*10^-3 m
Growth rate	1.2
Nodes number	646409
Elements number	618324
Number divisions on circular edge	30

الشكل (3) الشبكة الحسابية

الجدول (4) البارامترات الهندسية للاقط

Dimensional parameters	Value
Di, mm	23 mm
Do, mm	25 mm
Curvature Radius, mm	125mm
No. of Turn	14

الشكل (4) الشكل الهندسي للمبادل

جدول (5) خصائص الحل

Solution software	CFX solver
Convergence criteria – Residual type – RMS	Target =0.00001

يبين الجدول (6) مقارنة بين نتائج الحل العددي باستخدام نماذج اضطراب مختلفة مع الحل التجريبي عند قيمة لتدفق الماء ضمن ملف اللاقط (0.03600kg/s).

الجدول (6) مقارنة بين نتائج الحل العددي باستخدام نماذج اضطراب مختلفة مع الحل التجريبي

water Flow rate =0.03600kg/s		
Cold water T_{in}[C]	Hot water T_{out}	Turbulent model
36.36	40.4	with correction k–ε
37.5	38.57	Zero equation
36.8	39.7	Eddy viscosity
35.8	43.6	Omega–Reynolds stress
37.1	40.77	RNG k– ε
35.3	45.96	IRR R–S
35	42	k–ε
36	40.1	Experimental

الجدول (7) مقارنة بين نماذج الاضطراب من أجل قيمة تدفق 0.03600kg/s

الترتيب	النتيجة	ملاحظات
1	أفضل نموذج هو k–ε مع تصحيح Kato–Launder بفارق واضح عن البقية.	أقل خطأ مطلق (0.33 C) في المتوسط
2	النماذج البسيطة (Eddy viscosity, Zero equation) تقدم أداءً مقبولاً جداً وتتفوق على النماذج المعقدة غير المعدلة.	Eddy viscosity خطأ (0.6 C) أفضل من k–ε standard (1.45C)
3	نموذج k–ε القياسي غير مناسب للهندسيات ذات الانحناءات الكبيرة.	يبالغ في Tout
4	نماذج إجهاد رينولدز (RSM) لم تقدم أي تحسن رغم تكلفتها الحاسوبية العالية.	IRR R–S ،1,85 C خطأ Omega–RSM 3,28 C خطأ

من الجدول(7) نستدل أن تصحيح Kato–Launder ضروري عند استخدام نموذج k–ε في هذه التطبيقات، من أجل أعلى دقة ممكنة، ومن أجل التوفير الحاسوبي. كما أننا نستطيع استخدام نموذج Eddy viscosity أو Zero equation للوصول الى دقة مقبولة، كما أنه علينا تجنب نموذج k–ε القياسي لأنه يبالغ في تقدير قيم درجة الحرارة Tout بسبب افتراض الاضطراب متناظر الخواص، وعدم حساسيته للانحناءات ، أو أي نموذج من نماذج RSM دون معايرة مسبقة. قمنا باستبعاد نتائج IRR R–S لان الحل العددي لم يتقارب وبقيت القيمة بعيدة عن قيمتها التجريبية، لا يوصى به للهندسيات الحلزونية. قمنا بإعادة الدراسة للنماذج المرشحة عند قيم مختلفة للتدفقات وكانت النتائج مقارنة بالحل التجريبي كما يظهر في الجدول (8).

الجدول (8) مقارنة بين نتائج الحل العددي والحل التجريبي كما في[9] عند قيم مختلفة للتدفق

Water flow rate[kg/s]	Turbulent model	Hot water	Cold water
		$T_{out}[\mathbb{C}]$	$T_{in}[\mathbb{C}]$
0.03600	Zero equation	38.57	37.5
	k−ε with correction	40.4	36.36
	k−ε	42	35
	Experimental[9]	40.1	36
0.06654	Zero equation	43	39
	k−ε with correction	41.9	37
	k−ε	46	41
	Experimental[9]	42.2	38
0.09981	Zero equation	46.1	39.8
	k −ε with correction	43	38
	k−ε	49	41
	Experimental[9]	45.4	40
0.133	Zero equation	47.4	41.2
	k−ε with correction	50.7	39
	k−ε	52	43
	Experimental[9]	47	42

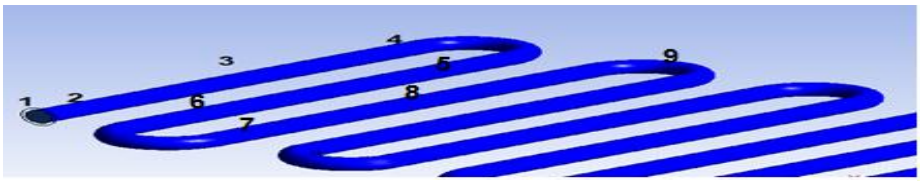
ومن ملاحظة الجدول (8) الذي يبين مقارنة بين نتائج الحل العددي والحل التجريبي عند قيم مختلفة للتدفق يظهر نموذج Zero equation تقارباً مقبولاً ضمن المجال المدروس، مع ميل إلى الابتعاد عند التدفقات المنخفضة والمبالغة الطفيفة عند التدفقات المتوسطة، ثم يعود للدقة عند التدفق الأعلى. هذا السلوك المتغير قد يعود إلى أن الجريان ينتقل من منطقة انتقالية إلى مضطربة بالكامل، والنموذج البسيط لا يلتقط هذا التحول بدقة. أما فيما يتعلق بنموذج k-ε with correction فعلى الرغم من أن هذا النموذج كان الأفضل عند نقطة واحدة للتدفق، إلا أن أداؤه غير مستقر عند تغير معدل التدفق. هذا يشير أن تصحيحKato-Launder ، رغم فعاليته في الانحناءات، قد يصبح حساساً بشكل مفرط لرقم رينولدز في بعض الظروف، ولا يمكن الاعتماد عليه عبر مدى واسع من التدفقات دون معايرة إضافية. ويفسر السلوك غير المستقر للنموذج k-ε with correction بـ:

1. **التصحيح مصمم لمنطقة الاضطراب المتطور**: تصحيح Kato-Launder يحد من توليد الاضطراب في مناطق الانحناء، لكنه يفترض أن الجريان مضطرب بالكامل. عند التدفقات المتوسطة إلى العالية، قد يصبح التصحيح مقيداً بشكل مفرط، مما يقلل من الاضطراب الحقيقي وبالتالي يقلل من انتقال الحرارة (كما حدث عند تدفق 0,09981 كان ($\Delta T_out = -2.4$) .
2. **تأثيرات أخرى :** عند التدفقات العالية (0.133 kg/s)، قد تصبح تأثيرات أخرى (مثل قوى الطفو أو تباين الخواص) أكثر هيمنة، والنموذج المعدل لا يلتقطها بشكل صحيح، مما يؤدي إلى مبالغة كبيرة (+3,7).
3. **معايرة النموذج :** ثوابت النموذج ($C\varepsilon1, C\varepsilon2, \sigma k, \sigma\varepsilon$) معايرة للجريانات القياسية، وليس بالضرورة للهندسة الحلزونية المزعنفة. قد تحتاج هذه الثوابت إلى تعديل ما يسمى بـ "model calibration" لكل مدى تدفق. عند حساب متوسط الخطأ عبر جميع نقاط التدفق الأربع، نجد أن نموذج Zero equation يتفوق علىk-ε with correction ، رغم أن الأخير كان الأفضل عند نقطة واحدة (0,036). وذلك

لأن أداء k-ε with correction تدهور بشدة عند التدفقات الأعلى، بينما حافظ Zero equation على خطأ معتدل ومستقر.

الجدول (9) مقارنة متوسط الخطأ المطلق لكل نموذج

نموذج الاضطراب	ΔT out	ΔT in
Zero equation	0,86	0,95
k-ε with correction	1,68	1,59
k-ε standard	3,58	1,5

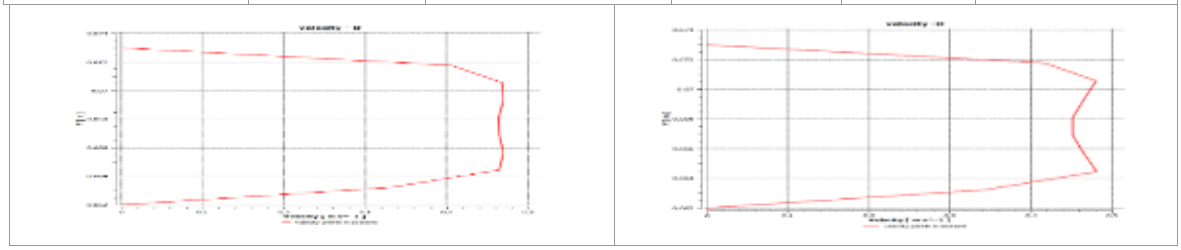


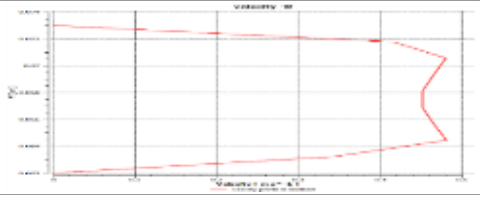
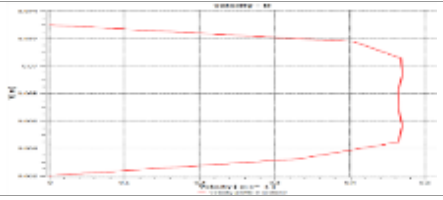
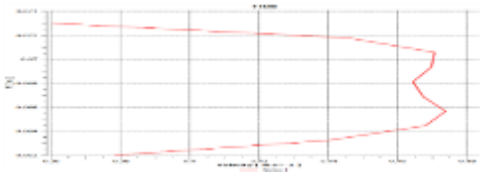
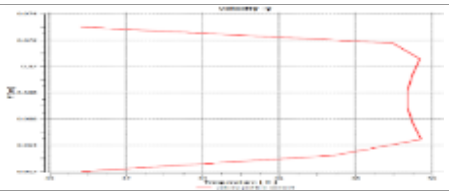
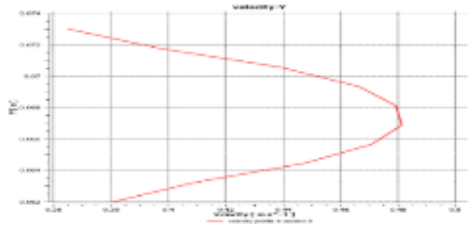
الشكل (5) رسم بروفايل الحقل المدروس مع تحديد مقاطع محددة لغرض الدراسة

بالنسبة الى نموذج k-ε القياسي فكما هو متوقع، غير مناسب تماماً لهذا التطبيق، حيث يبالغ بشكل منهجي في انتقال الحرارة بسبب افتراض الاضطراب متناظر الخواص. ومن ملاحظة الجدول (9) في مقارنة للأداء العام للنماذج الثلاثة تبين مقدار الخطأ المطلق كان هو الأقل في نموذج (Zero equation). يبين الشكل (5) الشكل الهندسي لحقل الجريان ضمن المبادل مع ترقيم للمقاطع التي سيتم عندها دراسة مخطط بروفايل السرعة. تم رسم مخطط السرعة عند مقاطع مختلفة من الأنبوب حيث يظهر الشكل(6) مخطط بروفايل السرعة لنماذج الجريان المختلفة المستخدمة بالدراسة. من الشكل(6) نلاحظ أن مخطط السرعة عند استخدام نموذج Zero equation أقرب الى مخطط السرعة الفعلي في المنطقة تامة التطور وفق[15] وهو ما دعى الى استخدام النموذج بعد ثلاث خطوات تحقيقية.

الجدول (10) مقارنة النماذج المستخدمة في الحل

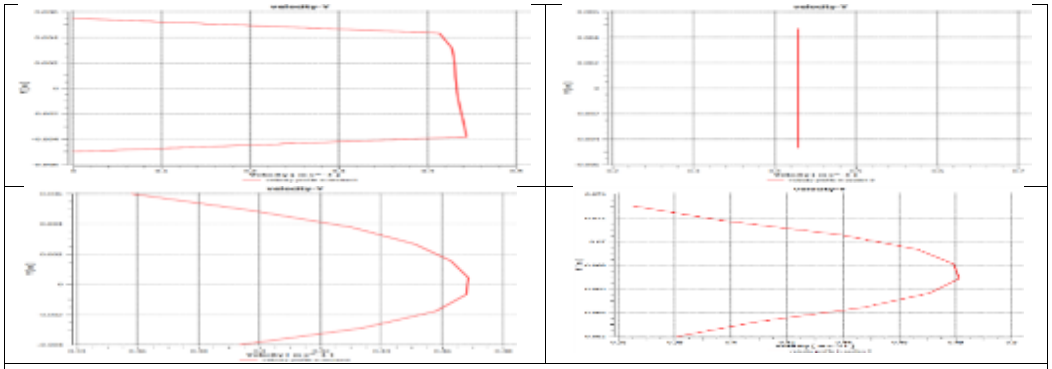
النموذج	عدد المعادلات الإضافية	التعقيد الحاسوبي	تصوير الانحناءات والدوامات	الدقة قرب الجدار	ملاحظة
Zero equation	0	منخفض جداً	ضعيف	ضعيف	الأقرب للتجربة (ربما بسبب بساطة geometry)
k-ε قياسي	2	متوسط	متوسط إلى ضعيف	يحتاج توابع جدار	نتائجه أبعد قليلاً عن التجربة
k-ε مع تصحيح Kato-Launder	2	متوسط	جيد (يقلل الدوامات المبالغ فيها)	متوسط	حسّن النتائج مقارنة بـ k-ε القياسي
RNG k-ε	2	متوسط	جيد	جيد (للجريان المنخفض)	متقارباً مع k-ε القياسي
Reynolds Stress	7-9	مرتفع جداً	ممتاز	جيد	مكلف ولم يظهر تحسن كبير في هذه الحالة



k–ε	k–ε with correction
	
IRR R–S	Eddy viscosity
	
Omega–Reynolds stress	RNG k– ε
	
Zero equation	velocity profile in turbulent flow in hydro dynamically fully developed region[]

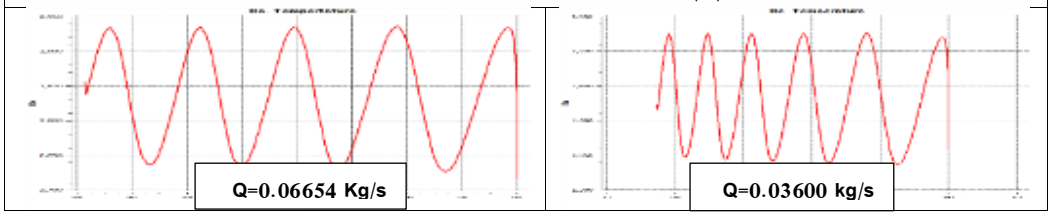
الشكل(6) مخطط بروفايل السرعة لنماذج الجريان المختلفة المستخدمة بالدراسة عند المقطع 3.

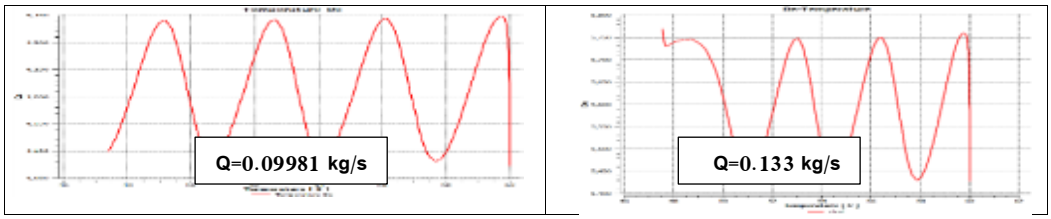
كما يبين الشكل(7) مخطط تغيرات السرعة عند نقاط متعددة (9-4-3-1) تم الاشارة لها في رسم من الأنبوب حيث نلاحظ تحول الجريان من منطقة الدخول حتى المنطقة تامة التطور.



velocity distribution in different sections (1–3–4–9) for (zero equation) model

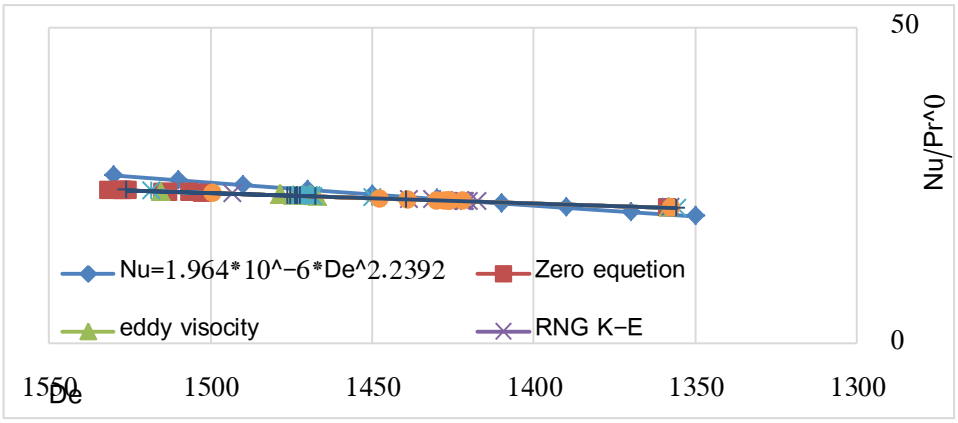
الشكل(7) مخطط تغيرات السرعة عند نقاط متعددة من الأنبوب.





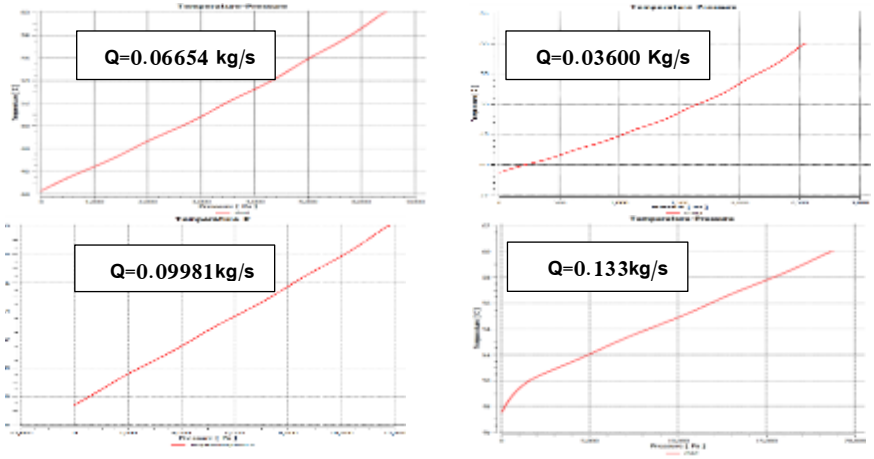
الشكل(8) تغيرات رقم دين مع درجات الحرارة من أجل تدفقات مختلفة

نلاحظ تغير رقم دين بشكل دوري مع درجة الحرارة على طول المبادل. وهي ميزة للمبادلات الحلزونية ذات السطوح المنحنية. ويوضح الشكل (9) تغيرات رقم دين مع رقمي نوسيلت وبرانتل من أجل نماذج مختلفة للاضطراب وهو ما يؤشر الى أن العلاقة لا تتأثر بنموذج الاضطراب على الاطلاق.



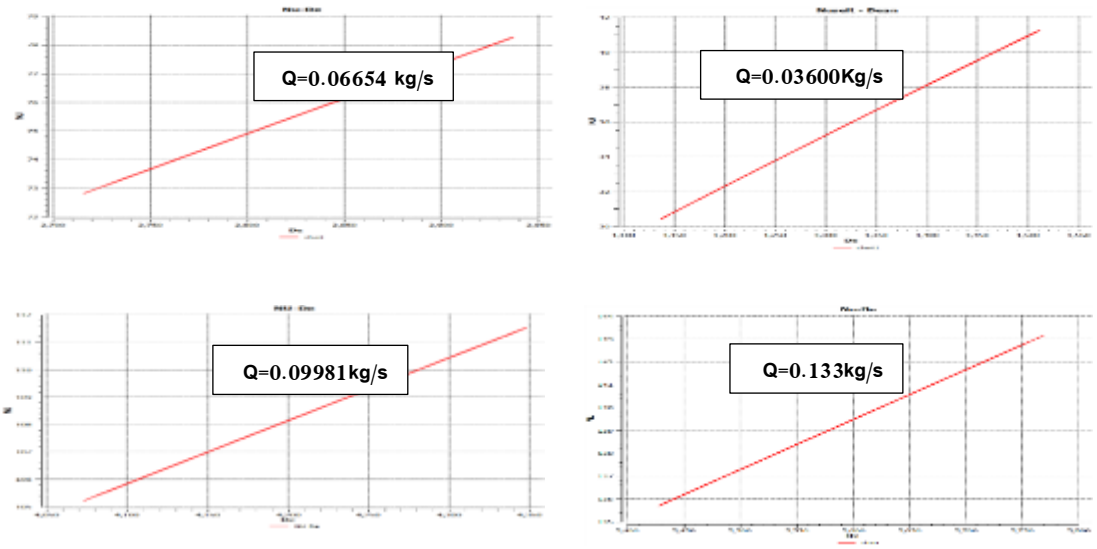
الشكل(9) تغيرات رقم دين مع رقمي نوسيلت وبرانتل من أجل نماذج مختلفة للاضطراب

يوضح الشكل(10) علاقة تغير الضغط مع درجة الحرارة عند قيم مختلفة لتدفقات الماء ضمن المبادل، حيث نلاحظ خطية العلاقة على طول المبادل.



الشكل (10) علاقة تغير الضغط مع درجة الحرارة عند قيم مختلفة لتدفقات الماء ضمن المبادل.

يوضح الشكل (11)علاقة رقم نوسيلت مع رقم دين ونلاحظ أن العلاقة كانت خطية على طول المبادل عند تدفقات مختلفة.

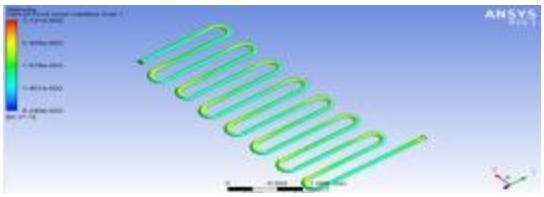


الشكل (11) علاقة رقم نوسيلت مع رقم دين

من الشكل (9) نجد أن جميع نماذج الاضطراب المستخدمة تعطي علاقات متقاربة بين(De, Nu, Pr) ، رغم اختلافها في تقدير القيم المطلقة لدرجات الحرارة. هذا يؤكد أن البنية الأساسية للجريان الحلزوني (التي يصفها رقم دين) يتم التقاطها بشكل صحيح حتى بواسطة النماذج البسيطة. الاختلافات بين النماذج تنحصر في مقدار انتقال الحرارة، وليس في الديناميكية الكلية للجريان، يعزز هذا التقارب الثقة في صحة إجراءات المحاكاة العددية المتبعة، ويتوافق مع ما ورد في الدراسات المرجعية كما في[7,8]. كما يوضح الشكل (10) أن انخفاض الضغط يتغير خطياً مع درجة الحرارة على طول المبادل الحراري لجميع معدلات التدفق المدروسة. إن هذا السلوك متوقع في الجريان المضطرب ضمن أنابيب ذات انحناءات ثابتة، حيث يخضع هبوط الضغط لعلاقة خطية تقريباً مع الطول (وبالتالي مع درجة الحرارة المتزايدة خطياً). تظهر الخطوط ميلاً متزايداً مع زيادة معدل التدفق، مما يعكس زيادة ضياعات الاحتكاك مع السرعة. لوحظ أن الفائدة الحرارية الإضافية عند الانتقال من معدل تدفق (0.09981 kg/s) إلى (0.133 kg/s) كانت طفيفة مقارنة بالزيادة الكبيرة في انخفاض الضغط، مما يشير إلى وجود قيمة تدفق مثلى تعظم الأداء الحراري مقابل استهلاك طاقة الضخ. هذا يتوافق مع نتائج الدراسات كما في[7,8]، وتؤكد على أهمية تحديد معدل التدفق الأمثل في تصميم اللواقط الشمسية ذات الأنابيب الحلزونية المزعنفة.

وبملاحظة الشكل (11) نجد أن رقم نوسيلت (Nu) يتناسب طردياً، وبصورة خطية مع رقم دين (De) عبر جميع معدلات التدفق المدروسة. يزداد ميل هذه العلاقة مع زيادة معدل التدفق، مما يعكس الدور المتزايد للدوامات الثانوية الناتجة عن قوى الطرد المركزي في تحسين انتقال الحرارة عند أرقام دين أعلى. عند أعلى تدفق (0.133 kg/s)، نلاحظ أن الخط يميل إلى الثبات نسبياً، حيث أن الزيادة الإضافية في De لم تترجم إلى تحسن مكافئ في – Nu وهذا ما يتماشى مع النتائج في الجدول (8) التي أظهرت زيادة متواضعة في(Tout فقط 1.6 C°) رغم ارتفاع معدل التدفق بنسبة (33%). السلوك الخطي المتوافق يدعم صحة إجراءات المحاكاة، ويُمكن من استخلاص

علاقة تجريبية لتقدير أداء اللواقط الشمسية ذات الأنابيب الحلزونية المزعنفة في نطاق التشغيل هذا مستقبلاً.



الشكل(12) تغيرات سرعة المائع على طول الأنبوب للحل العددي

الشكل(13) تغيرات الضغط على طول الانبوب للحل العددي.

يظهر الشكل (12) تغير سرعة المائع على طول الأنبوب الحلزوني المزعنفة، حيث نلاحظ سلوكاً دورياً واضحاً يعكس مرور الجريان عبر كل لفة من الملف. سعة التذبذب لا تستقر تماماً على طول الأنبوب، مما يشير إلى أن الجريان لم يصل إلى منطقة متطورة هيدروديناميكياً بالكامل خلال 14 لفة – وهي ظاهرة معروفة في المبادلات الحلزونية ذات الانحناء الحاد، حيث تحتاج الدوامات الثانوية الناتجة عن قوى الطرد المركزي إلى مسافات أطول لتتطور. مع ذلك، فإن الانتظام والثبات النسبي للتذبذب يؤكدان أن الحل العددي قد تقارب بشكل جيد، وأن نموذج الاضطراب المستخدم (Zero equation) يلتقط السلوك الأساسي للجريان. هذا السلوك الدوري هو الذي ينعكس أيضاً على العلاقات الدورية بين الأرقام اللابعدية (De, Nu, Pr) كما نوقش في الأشكال السابقة، مما يعزز صحة إجراءات المحاكاة ويتوافق مع الدراسات المرجعية كما في[7,8]. يوضح الشكل (13) توزع الضغط على طول الأنبوب كما تم حسابه عددياً باستخدام نموذج Zero equation . يظهر الضغط انخفاضاً شبه خطي مع زيادة طول الأنبوب، وهو السلوك المتوقع للجريان المضطرب المتطور في أنبوب ذي مقطع ثابت، وذلك وفق قانون دارسي– وايسباخ. هذا الانخفاض الخطي يشير إلى أن معامل الاحتكاك، والخصائص الفيزيائية للمائع لم تتغير بشكل جذري على طول المبادل، ويؤكد غياب تقلبات ضغط موضعية كبيرة نتيجة تأثير الزعانف أو الانحناءات. تتوافق هذه النتيجة مع الدراسات[7,8] التي أكدت أن العلاقة بين الضغط، والطول في الأنابيب الحلزونية تبقى خطية، ولو بقيم أعلى من الأنابيب الملساء. تعزز هذه النتيجة من صحة استخدام Zero equation البسيط في التقاط السلوك الهيدروديناميكي الأساسي للنظام، مما يدعم التوصية بتبنيه في الدراسات المشابهة(تفاصيل الاضطراب الدقيقة غير مطلوبة). وأخيراً: يتوافق هذا التوزيع الخطي للضغط مع نتيجة الشكل (10) والتي أظهرت خطية العلاقة بين الضغط، ودرجة الحرارة (ازدياد درجة الحرارة خطياً مع الطول)، مما يؤكد توافق النتائج.

9- الاستنتاجات والتوصيات:

من خلال الدراسة العددية المقدمة، والمقارنة المنهجية بين نماذج اضطراب عند أربعة معدلات تدفق مختلفة، تم التوصل إلى النتائج والتوصيات التالية:

1- تفوق نموذج Zero equation عبر مجال التشغيل الكامل: عند حساب متوسط الخطأ المطلق لدرجات حرارة الماء الساخن، والبارد عبر جميع معدلات التدفق (0,036، 0,06654، 0,09981، 0,133)kg/s، كان نموذج Zero equation صاحب أقل خطأ (0,86°C الساخن، 0,95°C البارد)، متفقاً بذلك مع النتائج

التجريبية المرجعية كما في [8]. هذا الأداء المستقر جعله الأنسب للمحاكاة عندما يكون مجال التدفقات واسعاً والهندسة معقدة (انحناءات + زعانف)، يُنصح باستخدام نموذج Zero equation إذا كان مجال التشغيل واسعاً.

2- نموذج k-ε مع تصحيح Kato-Launder دقيق عند نقطة واحدة لكنه غير مستقر: أظهر النموذج أعلى دقة عند معدل التدفق (0.036 kg/s) بخطأ (±0,3)، لكنه انحرف عند (ΔTout = -(0.09981 kg/s) (2.4°C، وعند (0.133 kg/s) (ΔTout = +3.7°C) ، يعود عدم الاستقرار إلى أن التصحيح يفترض جرياناً مضطرباً بالكامل، ويصبح مقيداً بشكل مفرط عند التدفقات المتوسطة، بينما تفشل ثوابت النموذج المعايرة للجريانات القياسية في التقاط الهيمنة المتزايدة لقوى الطفو وتباين الخواص عند التدفقات العالية.

3- نموذج k-ε القياسي غير مناسب تماماً لهذه التطبيقات: حيث أنه يبالغ في تقدير انتقال الحرارة بشكل منتظم ΔTout) يصل إلى (3,58+ C°) عند أعلى تدفق، بسبب افتراض الاضطراب متناظر الخواص وعدم حساسيته للانحناءات الحادة، كما أن **نماذج إجهاد رينولدز (RSM) لم تقدم أي تحسن رغم كلفتها الحاسوبية العالية**، حيث أظهر نموذج Omega-Reynolds stress خطأ متوسط (1.85 C°) ، بينما كان نموذج IRR R-S الأسوأ خطأ (3.28 C°)، مما يؤكد أن التعقيد الحاسوبي لا يضمن الدقة، خاصة في غياب معايرة مسبقة.

4- الأرقام اللابعدية (De-Nu-Pr) لا تتأثر باختيار نموذج الاضطراب: أظهر الشكل (9) تقارباً كبيراً بين جميع النماذج في العلاقات بين رقم دين ورقم نوسيلت ورقم برانتل، مما يعني أن الأخطاء العددية تؤثر على القيم المطلقة لدرجات الحرارة، لكنها لا تغير البنية الأساسية للجريان المنحني. هذا التقارب يعزز الثقة في صحة إجراءات المحاكاة المتبعة.

5- خطية العلاقة بين الضغط ودرجة الحرارة الشكل (10) وبين (Nu و De) الشكل (11) تسمح باستخلاص علاقات تجريبية: لوحظ أن الميل يزداد مع معدل التدفق، كما ظهر ثبات حراري عند الانتقال من تدفق (0.09981 kg/s) الى (0.133 kg/s)، مما يشير إلى وجود قيمة تدفق مثلى تعظم الأداء الحراري مقابل استهلاك طاقة الضخ.

6- السلوك الدوري للسرعة وتوزيع الضغط الخطي يؤكدان صحة الحل العددي: أظهر الشكل (12) تذبذباً دورياً للسرعة يعكس تأثير كل لفة من الملف، مع عدم وصول الجريان إلى منطقة متطورة هيدروديناميكياً بالكامل خلال 14 لفة، بينما أظهر الشكل (13) انخفاضاً خطياً للضغط وفق قانون دارسي– وايسباخ، دون تقلبات موضعية ناتجة عن الانحناءات – وهي نتائج متوافقة مع الدراسات المرجعية [7,8].

- **التوصيات المستقبلية**
- يُستحسن تحديد معدل التدفق الأمثل للمجمع من خلال موازنة الكسب الحراري المرتبط بـ (Nu) مع استهلاك طاقة الضخ المرتبط بـ (ΔP) . تشير النتائج الحالية إلى أن التدفق (0.09981 kg/s) يمثل نقطة تحول هامة، حيث تبدأ الزيادة الإضافية في التدفق بإعطاء تحسن حراري محدود مقابل ارتفاع كبير في فقدان الضغط. عند التعامل مع هندسة تحتوي انحناءات حادة وزعانف، ويجب إضافة تصحيحات عند استخدام نماذج k–ε ، لكن مع الانتباه إلى أن هذه التصحيحات قد تصبح مقيدة بشكل مفرط خارج نطاق التصميم. يُوصى دائماً بالتحقق من النموذج المختار عند أكثر من نقطة تشغيل، لأن النموذج الدقيق عند نقطة واحدة قد يكون غير مستقر عبر نطاق واسع. يوصى بإجراء تحسين عددي لثوابت

نموذج k–ε مع تصحيح Kato–Launder (model calibration) ليتلاءم مع هذه الهندسة الخاصة، واستخدام تقنيات DNS أو LES لمعايرة النماذج RANS في نطاق De الأعلى.

References:

[1] A. Al-Mogbel, "A coupled model for predicting heat and mass transfer from a human body to its surroundings", in *Proceedings of the 36the AIAA Thermo physics Conference*,Orlando, FL, USA, 2003.

[2] N. Madhukeshwarak, H.D. Baehr, and K.M Stephan, *Heat and Mass Transfer*, 2nd.ed. New York, NY, John Willey &Sons, 2006.

[3] Y. Cheng Shih, C. Chi Chiui, and O. Wang, "Dynamic airflow simulation within an isolation room", *Building and Environment Netherlands*, vol. 42, no. 9,pp. 3194–3209 ,2006.

[4] P. C. Cropper, T. Yang, M. J. Cook, D. Fiala, and R. Yousaf, "Simulating the effect of complex indoor environmental conditions on human thermal comfort," in *Proceedings of the 11th International IBPSA Conference*, Glasgow, Scotland, 2009.

[5] P. O. Fanger, *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. New York, NY: McGraw-Hill, 1970

[6] B. Launder, and D. Spalding, "The numerical computation of turbulent flows", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* Netherlands, vol. 3, no. 2,pp. 269–289, 1974.

[7] Milan Lj. Đorđević, Marko V. Mančić, Velimir P. Stefanović, Mića V. Vukić, " Numerical investigation of heat transfer in spirally coiled corrugated pipes: Assessment of turbulence models", Thermal Science, vol.28,no.1,pp 529-540,2024.

[8] Ameer R. Kalash; Nabil J. Yasin, " Experimental and computational assessment of the heat transfer exchange in evacuated tube receiver using helical external fins", International Journal of Thermofluids, vol.24,no.1,pp.963-1000,2024.

[9]Mohammed Al Assaf, Jehad Baddor, Rami George," Study on the optimization of specific productivity for a solar-powered desalination plant", Tartous University journal, Vol.7,NO.3,2023.

[10] ANSYS Inc, *ANSYS CFX Users Guide*, Release 12.0.Canonsburg, PA: ANSYS inc., 2009.[Online]. Available: http://www.ansys.com

[11] ASHRAE, *Thermal environmental conditions for human occupancy*,Standard 55-1992. GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, . Atlanta, 1992.

[12] ISO 7730, *Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort*. Switzerland: International Organization for Standardization, Geneva,1994.

[13] M. Kato, and B. Launder, "The modeling of turbulent flow around stationary and vibrating square cylinders," in *Proceedings of the Ninth Symposium on Turbulent Shear Flows*,pp. 10-4-1--10-4-8, Kyoto, Japan, August, 1993.

[14] A. M. Kilic Nour, A. Borujerdi, G. Fathi, "Numerical simulation of buoyancy affected turbulent air flow in a room," in *Proceedings of the 8th Biennial ASME Conference on Engineering System Design and Analysis*, Torino, Italy, 2006.

[15] Y. A. Cengel and A. J. Ghajar,"Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications." New York, McGraw-Hill Education, 2015.

الجدول (11) الرموز والمصطلحات العلمية

الرمز	الدلالة والواحدة المعتمد	القيمة	الرمز	الدلالة والواحدة المعتمدة	القيمة
τ	مصفوفة الاجهاد	-	Γ_t	انتشارية الاضطراب $kgm^{-1}s^{-1}$	--
λ	الإيصالية الحرارية $kg.m.s^{-3}K^{-1}$	-	ε	معدل تشتت الاضطراب m^2s^{-3}	--
λ_t	إيصالية الاضطراب $kg.m.s^{-3}K^{-1}$	-	κ	ثابت فون كارامان	0.041
λ_{eff}	الإيصالية الفعالة $kg.m.s^{-3}K^{-1}$	-	pr_t	رقم برانتل للاضطراب $c_p\mu_t/\lambda_t$	--
S_E	منبع الطاقة $kg.m^{-1}s^{-3}$	--	T_{ref}	درجة الحرارة المرجعية للطفو K	22
c_p	السعة الحرارية النوعية تحت ضغط ثابت $m^2.s^{-2}.K^{-1}$	--	u	مركبة السرعة المتذبذبة في الجريان المضطرب $m.s^{-1}$	--
μ	لزوجة الهواء $kg.m^{-1}s^{-1}$	--	g	شعاع الجاذبية الأرضية $m.s^{-2}$	--
μ_t	لزوجة الاضطراب $kg.m^{-1}s^{-1}$	--	U	قيمة السرعة $m.s^{-1}$	--
C_μ	ثابت تجريبي	0.09	U	شعاع السرعة $m.s^{-1}$	--
σ_ε	*ثابت* نموذج الاضطراب $(k-\varepsilon)$	1.3	K_s	معامل التشتت	--
σ_K	*ثابت* نموذج $(k-\varepsilon)$ في معادلة k	1	Φ	تابع طور التشتت الداخلي	--
$C_{\varepsilon 2}$	ثابت نموذج إجهاد رينولدز	1.92	E_{bv}	طيف طاقة الإشعاع للجسم الأسود	--
$C_{\varepsilon 1}$	ثابت نموذج إجهاد رينولدز	1.44	A	عامل تباين مميزات المادة الخطي	--
σ_ρ	ثابت (Bossiness buoyancy)	0.9	T_w	درجة حرارة الجدار K	--
C_3	معامل التبديد	1	T_g	درجة حرارة الغاز عند الجدار K	--
T_{ref}	درجة الحرارة المرجعية للطفو في تقريب K (Bossiness)	--	P_w	الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء الرطب بواحدة Pa	--
D_w	الانتشارية الديناميكية للبخار m^2s^{-1}	--	β	معامل التمدد الحراري K^{-1}	--
P_K	توليد قص الاضطراب $kg.m^{-1}s^{-3}$	--	P_{ws}	ضغط بخار الماء المشبعPa	--
h_{tot}	الإنتالبي الكلي النوعي m^2s^{-2}	--	σ	ثابت ستيفان بولتزمان $\frac{2\pi^5k^4}{15h^3c^2}$	--
K	طاقة الاضطراب الحركية لواحدة الكتلة	--	f_{cl}	نسبة مساحة السطح المكسي إلى مساحة السطح العاري	--
S_M	منبع كمية الحركة $kg.m^{-2}s^{-2}$	--	V	متوسط سرعة هواء قرب الجسم m/s	--
Sc_t	رقم شمايدت للاضطراب $\frac{\mu_t}{\Gamma_t}$	--	h_c	معامل انتقال الحرارة الحملي W/m^2k	--