مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٧) ٢٠٢٦

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (7) 2026

دراسة عددية لتأثير رقم رينولدز، انتقال الحرارة وتدفق المائع في الأنابيب المتقاربة على نمو الطبقة الحدية الحرارية باستخدام CFD

د. مي سعيد *

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٢/١١. قُبِل للنشر في ٢٠٢٦/٤/١٦)

□ ملخّص□

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل تأثير درجة الحرارة وزاوية ميل الأنبوب على نمو الطبقة الحدية الحرارية في الأنابيب المتقاربة باستخدام ديناميك الموائع الحسابية (CFD) واستخدام برنامج (ANSYS FLUENT 2021R1)، إذ تمّ دراسة نمو الطبقة الحدية الحرارية وتشكّلها قرب جدران الأنبوب عند تغير درجة حرارة المائع وعند قيم مختلفة لرقم رينولدز وزوايا الميل، ومن ثمّ بحثنا تأثير كل من العوامل السابقة على سماكة الطبقة الحدية الحرارية، لاختيار التصميم الأمثل للأنبوب المتقارب الذي تتحقق عنده السرعة العظمى عند مقطع الخروج.

أظهرت النتائج أنّ سماكة الطبقة الحدية الحرارية تبدأ من قيمة أعظمية عند مقطع الدخول للأنبوب، ثمّ تعود بالانخفاض تدريجيا حتى مخرجه، كما تُظهر النتائج انخفاض سماكة الطبقة الحدية الحرارية بانخفاض زاوية الميل للفوهة إذ تنخفض بمقدار 11.44% عند انخفاض زاوية الميل ضمن المجال (°68−°84)، كما لوحظ أنّ تأثير درجة الحرارة على سماكة الطبقة الحدية الحرارية أقل من تأثير تغير سرعة الجريان داخل الأنبوب، إذ تبيّن أنّ سماكة الطبقة الحدية الحرارية تنخفض بمقدار12.033% عند انخفاض درجة حرارة الهواء ضمن المجال c°(95−35)، وأنّ سماكة الطبقة الحدية الحرارية تزداد بمقدار 100.5% عند انخفاض سرعة الجريان وبالتالي انخفاض رقم رينولدز ضمن المجال ($9.2*10^5-4*10^4$).

الكلمات المفتاحية: الطبقة الحدية الحرارية، CFD، انتقال الحرارة، زاوية الميل، رقم رينولدز.

* مدير أعمال – قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة اللاذقية – اللاذقية – سوريا.
البريد الالكتروني: mai.saaeed@Latakia-univ.edu.sy

مجلة جامعة طرطوس للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (١٠) العدد (٧) ٢٠٢٦

Tartous University Journal for Research and Scientific Studies - engineering Sciences Series Vol. (10) No. (7) 2026

Numerical Investigation of the Effect of Reynolds Number, Heat Transfer and Fluid Flow in Converging Tubes on Thermal Boundary Layer Growth in Using CFD

Dr. Mai Saaeed *

(Received 11/12/2025 . Accepted 16/4/2026)

□ **ABSTRACT** □

This study aims to analyze the effect of temperature and tube inclination angle on the thermal boundary layer growth in converging tubes using computational fluid dynamics (CFD) and the ANSYS FLUENT 2021R1 software, the growth and formation of the thermal boundary layer near the pipe walls was studied under varying fluid temperature, different Reynolds number values, and different inclination angles, then we searched the impact of each of the above factors on the thermal boundary layer thickness, in order to select the optimal converging pipe design at which the maximum speed is achieved at the exit section.

The results showed that the thermal boundary layer thickness starts at a maximum value at the inlet cross-section of the pipe, then gradually decreases towards its outlet, the results also show a decrease in the thermal boundary layer thickness with a decrease in the inclination angle of the nozzle, as it decreases by 11.44% when the angle of inclination decreases within the range (84°-68°), it was also noted that the effect of temperature on the thermal boundary layer thickness is less than the effect of changing flow velocity inside the pipe, as it was found that the thermal boundary layer thickness decreases by 12.033% when the air temperature decreases within the range (95-35)°C, and that the thermal boundary layer thickness increases by 100.5% when the flow velocity decreases and consequently the Reynolds number decreases within the range ($9.2*10^5$-$4*10^4$).

Key Words: Thermal Boundary Layer, CFD, Heat Transfer, Inclination Angle, Reynolds Number.

* Works Manager - Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Latakia University, Latakia, Syria.

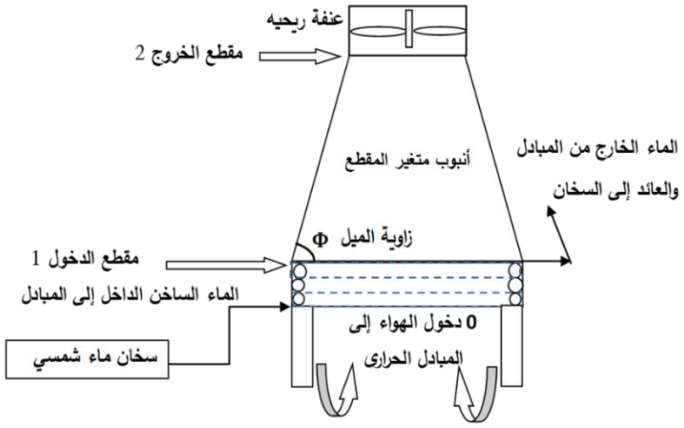
Email: mai.saaeed@latakia-univ.edu.sy

١. مقدمة

تستخدم الفوهات المتقاربة لزيادة سرعة الغاز (Gas Velocity) المار ضمنها والذي يتحرك بسرعة أقل من سرعة الصوت، حيث تزداد السرعة وتنخفض درجة الحرارة (POTTER and WIGGERT, 1991, p 357-360)، إلا أنّ تشكل الطبقة الحدية الحرارية (Thermal Boundary Layer) عند جدران الأنبوب (ÇENGEL, 2014)، يؤثر بشكل سلبي على سرعة المائع المار ضمنها ويخفض من طاقته، ولذلك ركزت الدراسات الحديثة على دراسة الطبقة الحدية الحرارية.

يتطرق البحث إلى نمذجة الطبقة الحدية الحرارية ودراسة نموها وتغيرها على طول جدار الأنبوب المتقارب، ودراسة تأثير العديد من العوامل عليها والتي تتضمن: رقم رينولدز، زاوية الميل، ودرجة الحرارة وذلك بهدف الحصول على أعلى سرعة عند مقطع الخروج للأنبوب وبالتالي أعلى استطاعة كهربائية للعنفة الريحية.

بناءً على ما تقدم تمّ اعتماد أنبوب متقارب في منشأة تشغيل العنفة الريحية في المناطق ذات سرعة الرياح المنخفضة (حسن وآخرون، ٢٠٢٢، ص٣١)، كما هو موضّح في (الشكل ١)، والتي تتكون من الأقسام التالية: سخان ماء شمسي، مبادل حراري ذو جريان متقاطع (هواء – ماء)، مروحة تعمل بالطاقة الشمسية لتأمين سرعة ابتدائية للهواء تتوضع عند مدخل المبادل الحراري، أنبوب متغير المقطع (متقارب) (Converging Pipe)، عنفة ريحية.



الشكل ١: مخطط منظومة تشغيل العنفة الريحية

إنّ الوسيط الحراري الساخن المار ضمن المبادل الحراري (ماء–هواء) هو الماء الساخن والذي يتم تسخينه بواسطة سخان الماء الشمسي، ويقوم المبادل الحراري بتسخين الهواء المدفوع بواسطة المروحة إلى المبادل الحراري (حسن، ٢٠٠٨، ص ٦٦٣–٦٦٤)، إذ ترتفع درجة حرارته ويندفع على طول الأنبوب المتقارب وتزداد السرعة نتيجة تضيق المقطع حتى تصل إلى أعلى قيمة لها عند مقطع الخروج، حيث يصطدم بشفرات العنفة الريحية ويؤدي إلى تدويرها وتوليد الطاقة الكهربائية.

٢. الدراسات المرجعية

اتجه (BAZGIR, 2017, p 3-5) نحو إجراء دراسة عددية باستخدام برنامج ANSYS FLUENT لسلوك الهواء المتدفق عبر أنبوب متقارب والذي يستخدم لتوجيه الهواء باتجاه شفرات عنفة ريحية، وأجرى

الباحثون مقارنة بين الاستطاعة الناتجة للعنفة الريحية بوجود وغياب الفوهة المتقاربة، وتبيّن أنّه باستخدام الأنبوب المتقارب تحقق ازدياد في السرعة بمقدار 60% ممّا أدى إلى ازدياد الاستطاعة المنتجة بمقدار 5 أضعاف، كما أجرى (حسن وآخرون، ٢٠٢٣) دراسة عددية للطبقة الحدية الحرارية لجريان دون صوتي للهواء الساخن المار داخل الأنابيب المتقاربة باستخدام ANSYS FLUENT عند شروط حدية حرارية مختلفة وزوايا ميل مختلفة، إذ توصّل البحث أنّ سماكة الطبقة الحدية الحرارية في حالة التدفق الحراري الثابت تكون أعلى من سماكة الطبقة الحدية الحرارية في حالة درجة حرارة جدار ثابتة عند قيم مختلفة لزاوية الميل، كما أنّه بازدياد زاوية ميل الأنبوب تزداد سماكة الطبقة الحدية الحرارية بمقدار (8.67%) في حالة التدفق الحراري الثابت، أما في حال درجة حرارة جدار ثابتة فمقدار الزيادة (10.44%).

وتناول (KASHIWAGI and SUGU, 1978) دراسة الطبقة الحدية الحرارية لجريان صفائحي ضمن أنبوب متقارب وتوصّل البحث إلى أن الطبقة الحدية الحرارية تتلاشى باتجاه مقطع الخروج أي تنخفض سماكتها باتجاه الجريان، كما أنّ رقم نوسل الموضعي يتناقص في اتجاه الجريان، ألقى (SHIMURA et al., 1994) الضوء على دراسة تأثير الشروط الحرارية على سماكة الطبقة الحدية الحرارية عند زاوية ثابتة للفوهة في الفوهات فوق الصوتية، إذ توصل البحث إلى أنّ سماكة الطبقة الحدية الحرارية حيث درجة حرارة جدارها ثابتة تكون أقل من سماكة الطبقة الحدية الحرارية في الجريانات الأدياباتية.

ألقى (BROUGERDI and KEBRIAEE, 2012, p 261-264) الضوء على دراسة الطبقة الحدية المضطربة في الفوهات المتقاربة، وتمّت دراسة تأثير رقم رينولدز على سماكة الطبقة الحدية، إذ توصّل البحث أنّه بزيادة رقم رينولدز تنخفض سماكة الطبقة الحدية عند زاوية مخروط محددة (40 degree)، واتجهت أبحاث أخرى (BROUGERDI and KEBRIAEE, 2010, p 3-5) نحو دراسة الطبقة الحدية المضطربة لجريان انضغاطي عالي السرعة في الفوهات المتقاربة الثلاثية الأبعاد، وتبيّن أنّه بانخفاض زاوية المخروط تزداد سماكة الطبقة الحدية عند قيمة محددة لرقم رينولدز ($Re=5*10^4$)، وقام (FARHANIEH and FIROOZABADI, 2011) بدراسة سلوك الطبقة الحدية بالقرب من جدران الأنبوب المتقارب، توصل البحث إلى أنّ سماكة الطبقة الحدية تصل إلى قيمة أعظمية بالقرب من مدخل الفوهة، ثم تعود بالانخفاض بشكل تدريجي بالقرب من المخرج عند قيم مختلفة لزوايا الميل ورقم رينولدز.

وتناولت أبحاث (SURYA and SADHASHIVA, 2016, p 61-65) نمذجة حقل الجريان باستخدام (ANSYS FLUENT) ضمن الفوهات عند سرعات جريان مرتفعة، وتطرّقت إلى دراسة عدد تقسيمات الشبكة الرقمية (Mesh) في نموذج المحاكاة على حقل الجريان، إذ توصّل الباحثون إلى أنّه بزيادة عدد تقسيمات الشبكة الرقمية (مع الأخذ بعين الاعتبار ارتفاع أول خلية في الشبكة) يزداد رقم ماخ وينخفض رقم رينولدز، وتناولت أبحاث (WITT et al., 2007) دراسة الطبقة الحدية باستخدام ANSYS FLUENT وتمت دراسة تأثير ارتفاع أول خلية في الشبكة الرقمية على سماكة الطبقة الحدية، أظهرت النتائج أنّه للحصول على نتائج دقيقة عند دراسة الطبقة الحدية يجب جعل قيمة ($y^+<1$)، وبالتالي يصبح البعد بين عقد الشبكة صغيراً جداً، الأمر الذي يؤدي إلى الحصول على نتائج دقيقة لسماكة الطبقة الحدية، تناول (RUZICKA, 2018, p 5-12) دراسة الطبقة الحدية باستخدام ANSYS FLUENT وتمت دراسة تأثير عدد الطبقات

الجدارية على سماكة الطبقة الحدية، إذ توصل البحث أنّه بازدياد عدد الطبقات الجدارية حتى 15 يؤدي للحصول على نتائج أدق منها في حال عدد طبقات جدارية منخفض.

نلاحظ من خلال الدراسات السابقة أنّها لم تتطرّق إلى نمذجة الطبقة الحدية الحرارية ودراسة تأثير درجة الحرارة ورقم رينولدز للجريان وزاوية الميل للفوهة على نموها باستخدام (ANSYS FLUENT) ضمن الفوهات المتقاربة ثلاثية الأبعاد ذات الأبعاد الكبيرة عند سرعات جريان منخفضة وغير قابلة للانضغاط (إنّ جريان الهواء غير قابل للانضغاط لأنّ سرعة الهواء أصغر من (100m/sec) (محمود، ٢٠٠٧، ص ٧٩) إذ أنّ أعلى قيمة تصل لها سرعة الهواء لدوران العنفة الريحية عند مقطع الخروج (10m/sec).

٣. أهمية البحث وأهدافه

تتجلى أهمية البحث في دراسة وتحليل الطبقة الحدية الحرارية لما لها من تأثير سلبي على سرعة للهواء ضمن الأنبوب وبالتالي السرعة عند مقطع الخروج الأمر الذي يؤثر على سرعة العنفة الريحية، والذي ينعكس بدوره على استطاعة العنفة الريحية الأفقية، لذلك يهدف البحث إلى دراسة نمو الطبقة الحدية الحرارية ودراسة تأثير رقم رينوادز ودرجة حرارة الجريان وزاوية ميل الأنبوب على نمو الطبقة الحدية الحرارية.

٤. المساهمة العلمية للبحث

اقتصرت الأبحاث السابقة على دراسة الطبقة الحدية الحرارية ضمن الأنابيب المتقاربة لجريان مضطرب عند شروط حدية حرارية مختلفة وجريان صفائحي، لذلك يساهم البحث في دراسة تشكّل وتغير الطبقة الحدية الحرارية بالقرب من جدران الأنبوب المتقارب عند تغير درجة الحرارة ورقم رينولدز وزاوية الميل، وذلك لما للطبقة الحدية الحرارية من تأثير على سرعة الجريان للمائع، الأمر الذي ينعكس بدوره على استطاعة العنفة الريحية عند مقطع الخروج للأنبوب والتي تتناسب طرداً مع مكعب سرعة الهواء.

٥. طرائق البحث ومواده

تمّ في هذا البحث تحليل دقيق للطبقة الحدية الحرارية باستخدام علم ديناميك الموائع الحسابي CFD، وهو العلم الذي يختص بالطرق الرياضية العددية المستخدمة في حل معادلات الجريان وانتقال الحرارة والتي تتضمن: معادلة الاستمرار، معادلة الحركة نافييه ستوكس، معادلة الطاقة، إذ تم بناء المجسم الهندسي للأنبوب المتقارب وبناء الشبكة الرقمية Mesh، ومن ثم تحويل جملة المعادلات التفاضلية إلى مجموعة من المعادلات الجبرية الخطية وفق ما يسمى بالتقطيع (Discretization)، ومن ثمّ حل هذه المعادلات لجميع خلايا الشبكة باستخدام برنامج ANSYS FLUENT2021 R2.

٦. المعادلات الناظمة للجريان

تتضمن المعادلات الأساس الواصفة للجريان في ميكانيك الموائع الحاسوبي CFD كما يلي:

- معادلة الاستمرار:

$$\frac{D\rho}{Dt}+\rho\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)=0 \qquad 1)$$

$$\rho=const \Rightarrow \left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)=0 \qquad 2)$$

u, v, w: مساقط السرعة وفق المحاور الإحداثية x, y, z.

- معادلة كمية الحركة المتمثلة بمعادلة نافير ستوكس:

إنّ المعادلات الحاكمة لجريان الموائع الحقيقية (الجريان في الطبقة الحدية) هي معادلات نافير–ستوكس Navier-Stokes والتي تهتم بدراسة جريان الموائع اللزجة (محمود، ٢٠٠٧، ص ٤٩٢):

$$\frac{D\vec{V}}{Dt} = \vec{F}_B - \frac{1}{\rho}\vec{\nabla}P + \frac{\mu}{\rho}\nabla^2\vec{V} \qquad (3)$$

حيث إنّ: $\vec{V}$ متجه السرعة، و $\vec{F}_B$ محصلة القوى الجسمية (كقوى الثقالة) منسوبة لواحدة الكتل x,y,z ، وP: الضغط الستاتيكي، و $\frac{\mu}{\rho}\nabla^2\vec{V}$: يمثل هذا الحد قوى اللزوجة.

- معادلة الطاقة:

$$\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+2\mu\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2+\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2\right]=\rho c_p\left[\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right] \qquad (4)$$

u, v, w: مساقط السرعة وفق المحاور الإحداثية x, y, z.

٧. النتائج والمناقشة

١٠٧ تصميم الأنبوب المتقارب

تمّ اتباع الخطوات التالية في تصميم الأنبوب المتقارب المبين في (الشكل ١):

- حساب السرعة عند مخرج المبادل الحراري V_1 باستخدام معادلة الاستمرار بين مقطعي الدخول والخروج للمبادل الحراري (0,1) كما هو مبيّن في الشكل (١) (على اعتبار أن المبادل الحراري يقوم بتسخين الهواء إلى الدرجة 95°c) إذ يتم الحصول على السرعة عند مخرج المبادل V_1 وفق ما يلي (محمود، ٢٠٠٧):

$$\rho_0 V_0 A_0 = \rho_1 V_1 A_1; A_0 = A_1 \qquad (5)$$
$$\Rightarrow \rho_0 V_0 = \rho_1 V_1$$

حيث: V_0: سرعة الهواء عند مدخل المبادل الحراري وهي تمثل سرعة الهواء الشاقولية عند مدخل المبادل 2m/s.

ρ_0 : كثافة الهواء عند مدخل المبادل الحراري.

ρ_1 : كثافة الهواء عند مخرج المبادل الحراري.

- حساب قطر مقطع الدخول للأنبوب المتقارب وفق معادلة الاستمرار بين مقطعي الدخول والخروج للأنبوب (على اعتبار جريان الهواء الساخن ضمن الأنبوب غير قابل للانضغاط وبالتالي: $\rho_1 = \rho_2$ ، تصبح معادلة الاستمرار كالتالي:

$$V_1 A_1 = V_2 A_2 \qquad (6)$$

إنّ سرعة العنفة الريحية V_2=10m/sec وقطرها D_2=4 هي القيم الاسمية للعنفة الريحية عند مقطع الخروج لمنشأة تشغيل العنفات الريحية.

إنّ سرعة الرياح الخارجية 2m/s ودرجة حرارة الهواء الجوي 35c° (وفق أطلس الرياح في شهر تموز في المنطقة الساحلية صيفاً في القطر العربي السوري، والجدير بالذكر أنّه تم اختيار بارامترات الرياح عند شهر تمور لأنّ سرعة الرياح منخفضة ودرجة حرارة مرتفعة، حيث تستخدم منشأة تشغيل العنفة الريحية لتشغيل العنفات الريحية عند سرعة رياح منخفضة (حسن وآخرون، ٢٠٢٢، ص٣١).

- حساب ارتفاع الأنبوب وفق العلاقة التالية (حسن، ٢٠١١، ص ٤١-٤٢):

$$H = \left(\frac{D_1 - D_2}{2}\right)\tan\left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right) \qquad (7)$$

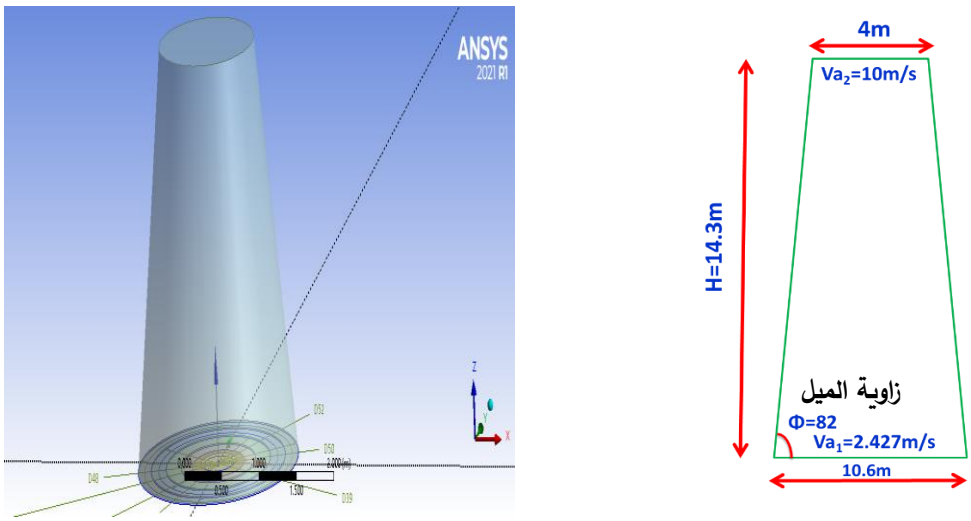
حيث: D_1, D_2: قطري مقطع الدخول والخروج للأنبوب المتقارب بالـ m.

φ : زاوية ميل الأنبوب بالـ degree.

يوضح الشكل (٢) أبعاد الأنبوب المتقارب.

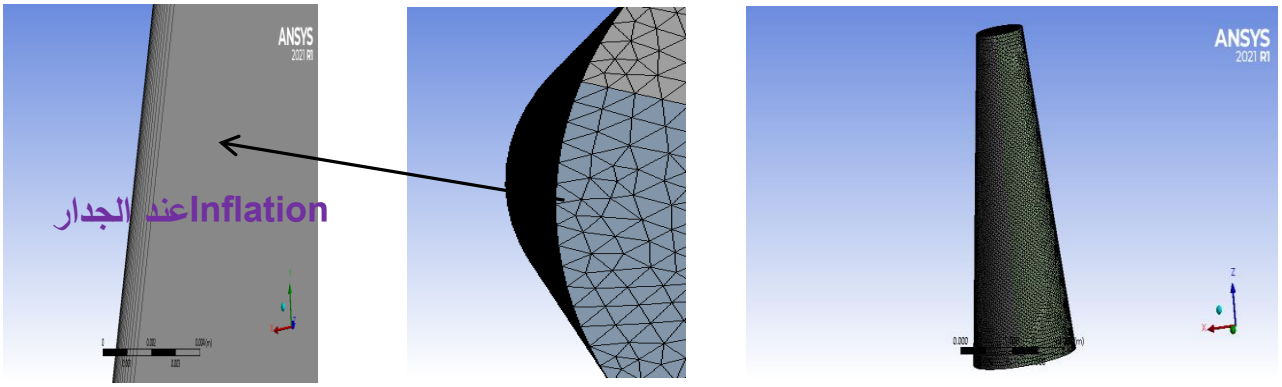
٢٠٧ بناء المجسم الهندسي والشبكة الرقمية

حيث تمّ رسم الأنبوب المتقارب كنموذج ثلاثي الأبعاد (3Dimensions) للنموذج المدروس وفق الأبعاد المبينة في (الشكل ٢) باستخدام تعليمة (Geometry) في برنامج (ANSYS FLUENT2021R1) (Magoulès, 2011)، مع الأخذ بعين الاعتبار وجود المبادل الحراري عند مقطع الدخول للأنبوب، كما هو موضح في (الشكل ٢):



الشكل ٢: أبعاد الأنبوب المتقارب (يميناً) نموذج الأنبوب المتقارب ثلاثي الأبعاد (يساراً)

تمّ تصميم الشبكة الحاسوبية للأنبوب المتقارب باستخدام تعليمة Mesh في برنامج ANSYS FLUENT، وتمّ اختيار الشبكة منتظمة لتحقيق دقة عالية في الحل (MADHU et al., 2017)، وتمّ استخدام تعليمة (inflation) لدراسة الطبقة الحدية عند الجدار، حيث تكون عدد الطبقات الجدارية الأعظمي (Maximum Layers=15) نسبة التنامي (Growth Rate=1.2) كما هو مبين في (الشكل ٣):



الشكل ٣: الشبكة الرقمية للأنبوب المتقارب (يميناً) الطبقات الجدارية عند جدار الأنبوب المتقارب (يساراً)

٣.٧ مرحلة المعالجة

يتم في هذه المرحلة تحديد الشروط الحدية (Boundary Conditions) إذ تمّ اعتبار الجريان غير مستقر لأن سرعة الرياح الخارجية متغيرة مع الزمن (JONES and LAUNDER, 2016)، كما تمّ تحديد نظام الجريان وفق قيمة رقم رينولدز بالاعتماد على القانون التالي (ÇENGEL, 2014):

$$\mathrm{Re}_{crit} = \frac{V_{a1}.r_i}{\nu} \qquad (8)$$

حيث: V_{a1}: سرعة الهواء عند مقطع الدخول للأنبوب المتقارب m/s.

r_i: نصف قطر مقطع الدخول للأنبوب m.

وبالتعويض وفق الحالة المدروسة فإن قيمة رقم رينولدز: $\mathrm{Re}_{crit1} = 9.2*10^5$

نلاحظ أن قيمة رقم رينولدز أكبر من 2300 بالتالي نستنتج أن الجريان مضطرب، لذلك تمّ اختيار نموذج الحل باللزوجة الاضطرابية وهو (k-ε (2eqa) Realiazble)، كما تمّ تحديد عدد التكرارات والشروط الابتدائية ونسبة التقارب للحل 1e-6 والشروط الابتدائية (TU, 2019) ، وتتضمن مدخلات برنامج ANSYS FLUENT ما يلي:

Models: Energy: On- Viscous: (k-ε (2eqa) Realiazble
Boundary Conditions: Inlet: Velocity Inlet
Internal: Interior Surface Body
Outlet: Pressure Outlet
Wall: Walls, Thermal: Heat Flux=0
Residual Monitors: Convergence Absolute Criteria 1e-6
Solution Initialization: Method Initialization: Standard Initialization, Compute from: Inlet.

٤.٧ التحقق من دقة الحل Validation

يهدف التحقق من دقة الحل للحصول على نتائج دقيقة ونسبة خطأ ضئيلة وذلك عند زاوية محددة (82degree) للفوهة ودرجة الحرارة عند مخرج المبادل الحراري 95°c وفق محورين:

١. التحقق وفق دقة الشبكة الرقمية (Mesh Independence) أو استقلالية الشبكة

٢. التحقق عن طريق مقارنة قيم درجة الحرارة عند مقطع الخروج وفق برنامج ANSYS FLUENT مع الحل التحليلي لدرجة الحرارة عند مقطع الخروج أو درجة الحرارة التحليلية عند مقطع الخروج والتي تعطى بالعلاقة التالية:

$$C_p T_1 + \frac{v_1^2}{2} = C_p T_2 + \frac{v_2^2}{2} \Rightarrow T_2 = \frac{1}{C_p}\left(\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2}\right) + T_1 = T_{2(analytical)} \quad (9)$$

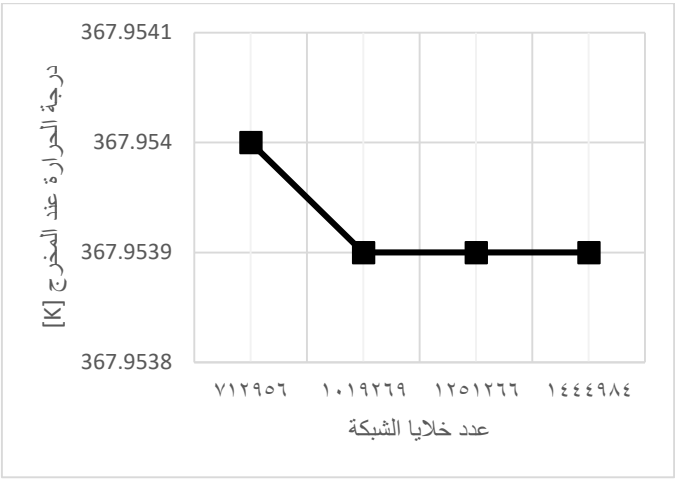
أولاً: اختبار دقة الشبكة Mesh independence

تمّ اختبار دقة الشبكة عند أربعة أنواع من الشبكات (SRINIVAS and RAKHAM, 2017) باختلاف عدد الخلايا والعقد (شبكة خشنة، وشبكة متوسطة الخشونة، وشبكة ناعمة، وشبكة عالية النعومة)، وتمّ إيجاد درجة الحرارة عند مقطع الخروج باستخدام برنامج ANSYS FLUENT، كما هو مبين في (الجدول ١):

الجدول ١: قيم درجات الحرارة مع تغير عدد خلايا الشبكة

عدد خلايا الشبكة	درجة الحرارة عند مقطع الخروج وفق (CFD) [K]
712956	367.954
1016296	367.9539
1251266	367.9539
1444984	367.9539

يوضح (الشكل ٤) العلاقة بين درجة الحرارة عند مقطع الخروج وعدد الخلايا الشبكية:



الشكل ٤: العلاقة بين درجة الحرارة وعدد خلايا الشبكة

نلاحظ من (الشكل ٤) أنّ الحل يصبح مستقراً جداً عند زيادة عدد خلايا الشبكة من الشبكة الناعمة إلى عالية النعومة.

ثانيا: اختبار دقة الحل Validation

تمّ التحقق من دقة الحل عن طريق مقارنة درجة الحرارة الناتجة من CFD عند مقطع الخروج للأنبوب المتقارب مع النتائج التحليلية والتي تمثل قيمة درجة الحرارة عند مقطع الخروج للأنبوب المتقارب (خلوف وآخرون، 2021)، والناتجة وفق القانون التالي:

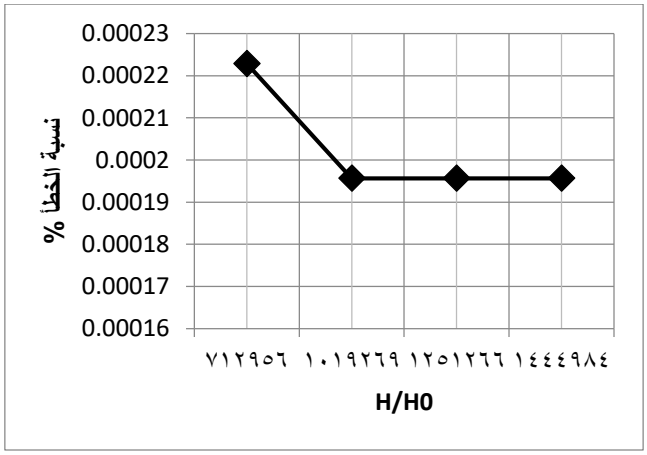
$$C_p T_1 + \frac{v_1^2}{2} = C_p T_2 + \frac{v_2^2}{2} \Rightarrow T_2 = \frac{1}{C_p}\left(\frac{v_1^2}{2} - \frac{v_2^2}{2}\right) + T_1 = 267.95318K = T_{2(analytical)}$$

يبين (الجدول ٢) نسبة الخطأ المئوية بين القيمة التحليلية لدرجة الحرارة عند المخرج والقيمة العددية:

الجدول ٢: قيم درجة الحرارة مع تغير عدد خلايا الشبكة

عدد خلايا الشبكة	درجة الحرارة العددية وفق(CFD)	درجة الحرارة التحليلية عند مخرج الأنبوب المتقارب [K]	نسبة الخطأ %
712956	367.954	367.95318	0.000223
1019269	367.9539	367.95318	0.000196
1251266	367.9539	367.95318	0.000196
1444984	367.9539	367.95318	0.000196

يبين (الشكل ٥) علاقة عدد خلايا الشبكة مع نسبة الخطأ المئوية:



الشكل ٥: علاقة نسبة الخطأ مع عدد خلايا الشبكة

نلاحظ من (الشكل ٥) تقارُب نسبة الخطأ عند الانتقال من الشبكة الناعمة إلى الشبكة الأكثر نعومة كما أن نسبة الخطأ ضئيلة جداً لم تتجاوز ١% وبذلك يمكن الاعتماد على نتائج النموذج العددي.

٥,٧ دراسة الطبقة الحدية الحرارية

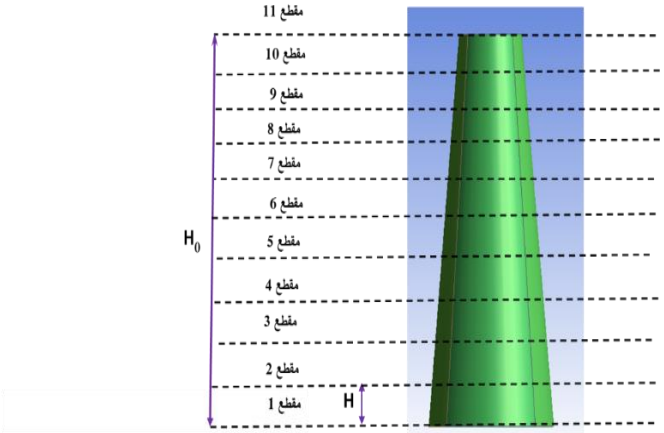
تتكون الطبقة الحدية الحرارية نتيجة التدرج في درجة الحرارة والناشئ عن الاختلاف بين درجة حراة الهواء الساخن ودرجة حرارة الجدار، إذ تبدأ هذه الطبقة بالتشكل والنمو بالقرب من الجدران ابتداء من مقطع الدخول للأنبوب المتقارب حتى مقطع الخروج.

– تعريف سماكة الطبقة الحدية الحرارية:

هي المسافة العمودية من جدار الأنبوب إلى النقطة التي تصل عندها درجة حرارة المائع إلى 99% من درجة حرارة التيار الحر.

تمّت دراسة نمو الطبقة الحدية الحرارية باستخدام ANSYS FLUENT وذلك باتباع ما يلي:

أولاً: تمّ أخذ عدة مقاطع للأنبوب ابتداءً من مقطع الدخول (inlet) حتى مقطع الخروج (outlet)، كما هو مبين في (الشكل ٦):

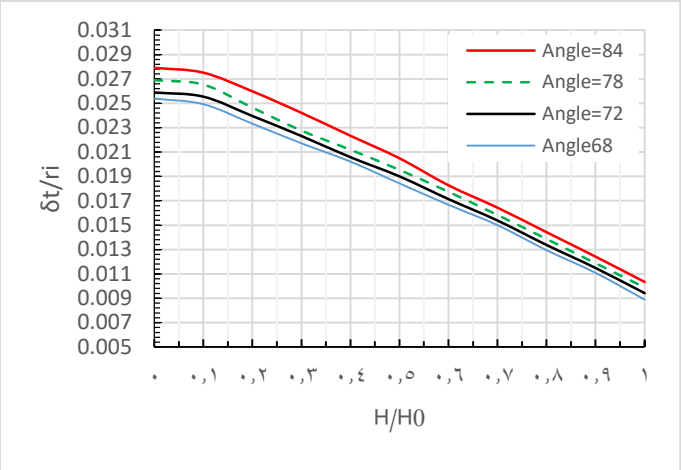


الشكل ٦: المقاطع المأخوذة من الأنبوب المتقارب

ثانياً: تمّ رسم التغيرات اللابعدية لسماكة الطبقة الحدية الحرارية (δt) على كامل جدار الأنبوب المتغير المقطع باستخدام (ANSYS FLUENT2021 R1)، إذ تمّ حساب سماكة الطبقة الحدية الحرارية عند كل مقطع وفق قانون الطبقة الحدية الحرارية: $\delta_t = \frac{0.37*r}{1.026*\sqrt[5]{\mathrm{Re}}}.\mathrm{Pr}^{\frac{-1}{3}}$، وتمّ تمثيل الطبقة الحدية الحرارية بالقرب من جدار الأنبوب المتقارب، وذلك عند المتغيرات السابقة.

١,٥,٧ دراسة الطبقة الحدية الحرارية عند زوايا مختلفة

تمّ رسم التغيرات اللابعدية لسماكة الطبقة الحدية الحرارية باستخدام (ANSYS FLUENT) عند زوايا ميل مختلفة: degree(68-72-78-84) وعند قيمة محددة لرقم رينولدز $4.3*10^5$ ودرجة الحرارة عند مخرج المبادل الحراري 95°c، إذ تمّ تمثيل محور الإحداثيات الأفقي بشكل لا بعدي، إذ يمثل نسبة بُعد كل مقطع من المقاطع السابقة (الموضحة في (الشكل ٦)) H عن مقطع الدخول إلى كامل ارتفاع الأنبوب H0، وأما بالنسبة للمحور الشاقولي يمثل سماكة الطبقة الحدية الحرارية اللابعدية وهي سماكة الطبقة الحدية الحرارية منسوبة إلى نصف قطر مقطع الدخول للأنبوب ri، كما هو مبين في (الشكل ٧):

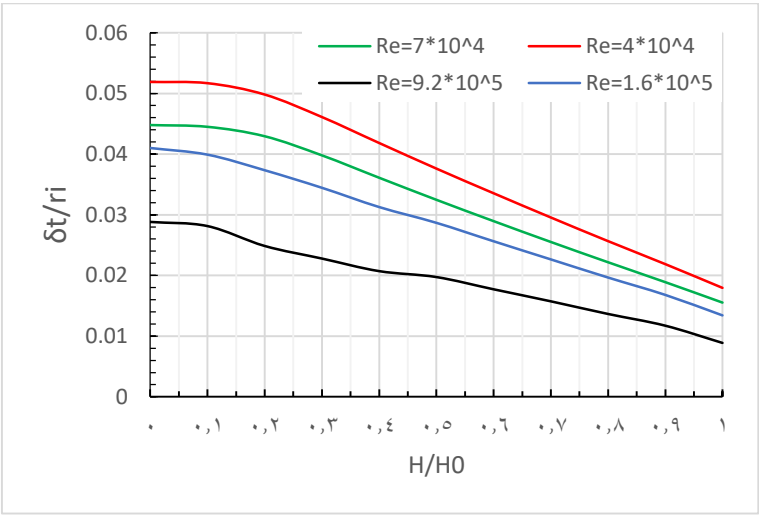


الشكل ٧: تغير سماكة الطبقة الحدية الحرارية عند زوايا ميل مختلفة

نلاحظ من (الشكل ٧) انخفاض سماكة الطبقة الحدية الحرارية مع انخفاض زاوية الميل، وهذا محقّق لأنّ زاوية الميل تؤثر على معدل التغير في مساحة المقطع في الأنبوب بالتالي فإنّ الزاوية الأقل تعني تقارباً أكثر وتضيق أكبر في المقطع ابتداءً من مدخل الأنبوب حتى مخرجه مما يؤدي إلى ازدياد السرعة وفق معادلة الاستمرار إذ تتناسب السرعة عكساً مع مساحة المقطع وبالتالي تنخفض سماكة الطبقة الحدية الحرارية لأنها تتناسب عكساً مع السرعة، كما نلاحظ أنّ سماكة الطبقة الحدية الحرارية تبدأ من قيمة أعظمية عند مدخل الأنبوب ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى قيمة أصغرية عند مخرج الأنبوب، وهذا محقق لأن سرعة الجريان تزداد ابتداءً من مدخل الأنبوب حتى مخرجه وبالتالي تنخفض سماكة الطبقة الحدية الحرارية لأنها تتناسب عكساً مع سرعة الجريان.

٢,٥,٧ دراسة الطبقة الحدية عند قيم مختلفة لرقم رينولدز

تمّ رسم التغيرات اللابعدية لسماكة الطبقة الحدية الحرارية على كامل جدار الأنبوب عند قيم مختلفة لرقم رينولدز وذلك عند زاوية ميل محددة للفوهة 82degree، إذ يوضح (الشكل ٨) تغير سماكة الطبقة الحدية الحرارية مع تغير رقم رينولدز للجريان:



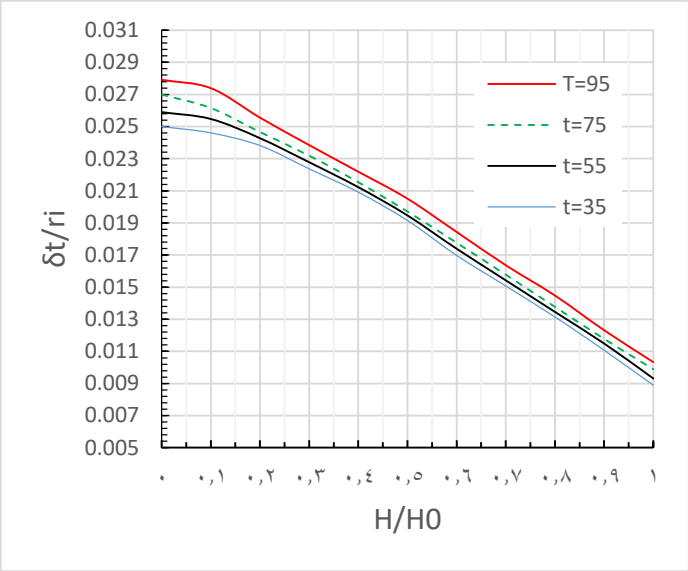
الشكل ٨: تغير سماكة الطبقة الحدية الحرارية اللابعدية مع تغير رقم رينولدز

نلاحظ من(الشكل ٨) أنّ سماكة الطبقة الحدية الحرارية تتناقص بزيادة رقم رينولدز بالقرب من جدار الأنبوب، وهذا محقق بسبب التناسب العكسي بين سماكة الطبقة الحدية الحرارية ورقم رينولدز وفق العلاقة:

$$\delta_t = \frac{0.37*r}{1.026*\sqrt[5]{\mathrm{Re}}}.\mathrm{Pr}^{\frac{-1}{3}}$$

٣,٥,٧ سماكة الطبقة الحدية الحرارية عند درجات حرارة مختلفة

تم رسم التغيرات اللابعدية لسماكة الطبقة الحدية الحرارية عند درجات حرارة مختلفة (35−55−75−95)°c وعند قيمة محددة لزاوية الميل 82degree، كما هو مبين في (الشكل ٩):



الشكل ٩: تغير سماكة الطبقة الحدية الحرارية مع تغير درجة حرارة الجريان

نلاحظ من (الشكل ٩) أنّ سماكة الطبقة الحدية الحرارية تبدأ من قيمة أعظمية عند مقطع الدخول للأنبوب ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى مقطع الخروج للأنبوب، كما نلاحظ أنّ سماكة الطبقة الحدية الحرارية تنخفض بانخفاض درجة حرارة الجريان، وهذا محقق نظراً أنّ اللزوجة الحركية للهواء تنخفض بانخفاض درجة الحرارة إذ أنّ سماكة الطبقة الحدية الحرارية تزداد بزيادة اللزوجة الحركية للمائع وفق العلاقة:

$$\delta_t = \frac{0.37*r}{1.026*\sqrt[5]{\frac{V_a.r}{\nu}}}.\mathrm{Pr}^{\frac{-1}{3}}$$ ، وبالتالي تنخفض سماكة الطبقة الحدية الحرارية بانخفاض اللزوجة الحركية.

٨. الاستنتاجات والتوصيات

من خلال ما تقدّم خلص الباحث إلى مجموعة من الاستنتاجات التالية:

١. تبيّن من خلال تحقق اختبار دقة الشبكة واختبار دقة الحل التحقق من نموذج المحاكاة العددية للأنبوب المتقارب الذي تمّ بناؤه عن طريق برنامج ANSYS FLUENT.

٢. تبيّن أنّ سماكة الطبقة الحدية الحرارية اللابعدية تبدأ عند قيمة أعظمية عند مقطع الدخول للأنبوب، ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى قيمة أصغرية عند مقطع الخروج للأنبوب، وذلك عند تغير درجة حرارة الجريان وعند قيم مختلفة لرقم رينولدز وعند زوايا ميل مختلفة.

٣. تبيّن وجود تأثير لزاوية ميل الأنبوب على سماكة الطبقة الحدية الحرارية عند قيمة محددة لرقم رينولدز $4.3*10^5$ ودرجة الحرارة عند مخرج المبادل الحراري 95°c، حيث لوحظ انخفاض سماكة الطبقة الحدية بمقدار (11.44%) عند انخفاض زاوية ميل الأنبوب بمقدار 16°.

٤. تبيّن وجود تأثير واضح لرقم رينولدز على سماكة الطبقة الحدية الحرارية، حيث لوحظ ازدياد سماكة الطبقة الحدية الحرارية بمقدار 100.5% عند انخفاض رقم رينولدز ضمن المجال ($4*10^4$–$9.2*10^5$).

٥. إنّ درجة حرارة الهواء المار ضمن الأنبوب المتقارب تؤثر على سماكة الطبقة الحدية الحرارية، إذ تنخفض سماكة الطبقة الحدية بمقدار 12.033% عند انخفاض درجة الحرارة ضمن المجال (35–95)°c.

٦. تبين من خلال البحث واستخدام تقنية CFD في النمذجة والمحاكاة للأنبوب ودراسة نمو الطبقة الحدية الحرارية وتأثير مختلف العوامل عليها مدى أهمية هذه التقنية وذلك في إعطاء تصوراً مسبقاً عن سلوك المنظومة الأمر الذي يوفر الجهد والمال.

المراجع

١. حسن، أيوب. ٢٠١١، *تحسين أداء عمل العنفة الريحية في المنطقة الساحلية. مجلة جامعة تشرين العلوم الهندسية*، الجمهورية العربية السورية، المجلد ثلاثٌ وثلاثون، العدد السادس، ٣١–٤٤.

٢. حسن، أيوب؛ علي، محمد؛ عيسى، هيثم؛ سعيد، مي. ٢٠٢٢، *دراسة تحليلية لمنشأة تشغيل العنفات الريحية في المناطق منخفضة سرعة الرياح. مجلة جامعة تشرين العلوم الهندسية*، الجمهورية العربية السورية، المجلد الأربع والأربعون، العدد الثاني، الصفحات ٢٩–٤٢.

٣. حسن، أيوب؛ علي، محمد؛ عيسى، هيثم؛ سعيد، مي. ٢,٢٣، *دراسة عددية للطبقة الحدية الحرارية لجريان الهواء الساخن ضمن أنبوب متقارب باستخدام ديناميك الموائع الحسابية CFD. مجلة جامعة البعث*، سوريا–حمص، ٢٣.

٤. حسن، أيوب. عيسى. ٢٠٠٨، *انتقال الحرارة والكتلة*. مديرية الكتب والمطبوعات جامعة تشرين، الجمهورية العربية السورية، ٧٨٩.

٥. خلوف، علي؛ محمد، نسرين؛ المحمد، علي؛ 2021، *حساب مقاومة السفينة DTMB 54151 باستخدام ديناميك الموائع الحاسوبي CFD. مجلة جامعة تشرين العلوم الهندسية*، الجمهورية العربية السورية، المجلد ثلاثٌ وأربعون، العدد الثاني، الصفحات ٧٨–٧٧.

٦. محمود، حبيب. محمد. ٢٠٠٧، *ديناميك الغازات*. مديرية الكتب والمطبوعات جامعة تشرين، الجمهورية العربية السورية، ٦١٩.

7. BAZGIR, A. S. 2017, *Theoretical Results for Utilizing Nozzle Between the Wind-Way and Wind Turbine in Roof of the Buildings-Wind Speed Increase for Wind*

Turbine to Produce Electricity. Journal of Applied Mechanical Engineering, Russia, Vol. 6, No.2, 5.

8. BROUGERDI, A. N; KEBRIAEE, A. 2010, *Pressure Loss of Turbulent Swirling Flow in Convergent Nozzles. International Conference on Mechanical Engineering ISME2010 -3101*, Iran, Vol. 18, 6.

9. BROUGERDI, A. N; KEBRIAEE, A. 2012, *Simulation of Turbulent Swirling Flow in Convergent Nozzles. Scientia Iranica Sharif University of Technology*, Iran, Vol.19, No.2, pp 258-265.

10. ÇENGEL, Y. A. 2014, *FLUID MECHANICS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS*. THIRD EDITION, McGraw-Hill, New York, 776.

11. FARHANIEH, B; FIROOZABADI, B. 2011, *Turbulent flow in converging nozzles part one: boundary layer solution*. *Applied Mathematics and Mechanics (English Edition)*, Berlin Heidelberg, pp 645-662.

12. JONES, W, P; LAUNDER, B. 2016, *The prediction of linearization with a two-equation model of turbulence. Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 15, pp 301-314.

13. KASHIWAGI, T; SUGU, N. 1978, *Heat transfer of the critical air flow in a nozzle. Bulletin of the JSME*, Vol. 22, No. 169, pp 944-951.

14. MADHU, B. P; SAMEER, S; KUMAR, M. K; MANI, G. M. 2017, *Cfd Analysis of Convergent-Divergent and Contour Nozzle*. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology*, Vol.8, No.8, pp 670-677.

15. MAGOULÈS, F. 2011, *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS*. CHAPMAN & HALL/CRC, France, 407.

16. POTTER, M; WIGGERT, D. 1991, *MECHANICS OF FLUIDS*. Prentic-Hall International Editions, UK London, 692.

17. RUZICKA, P. 2018, *modeling of boundary layer and the influence on heat transfer with help of CFD. 17th Conference of Power System Engineering, Thermodynamics and Fluid Mechanics*, pp 1-12.

18. SHIMURA, K; ASAKO, Y; LEE, J. H. 1994, *Numerical analysis for supersonic flows in a cooled nozzle*. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications Taylor & Francis*, Vol. 26, No. 6, pp 631-641.

19. SRINIVAS, G; RAKHAM, B. 2017, *Experimental and numerical analysis of convergent nozzle*. *Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering*, India, 14.

20. SURYA, K. P; SADHASHIVA, K. 2016, *Simulation of Convergent Divergent Rocket Nozzle Using CFD Analysis*. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol.13 No.4, pp 58-65.

21. TU, J; YEOH, G; LIU, C. 2019, *COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS: A practical approach*. Elsevier, Third Edition, 978.

22. WITT, P; KHAN, M; BROOKS, G. 2007, *CFD modelling of heat transfer in supersonic nozzles for magnesium production. JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, pp 1-11.