

دراسة تأثير درجة الحرارة ورقم رينولدز على نمو الطبقة الحدية في الأنابيب المتقاربة عند سرعات جريان منخفضة باستخدام CFD

د. مي نهاد سعيد *

الملخص

تمّ في هذا البحث إجراء نمذجة ومحاكاة لجريان الهواء الساخن ضمن الأنابيب المتقاربة ثلاثية الأبعاد ودراسة نمو الطبقة الحدية عند سرعات جريان منخفضة باستخدام تقنية (CFD) واستخدام برنامج (ANSYS Fluent 2021R1)، وتمّ دراسة تغيير الطبقة الحدية قرب الجدران عند عوامل مختلفة ومتغيرة كدرجة حرارة الجريان وزاوية ميل الأنبوب المتقارب ورقم رينولدز وتبيان تأثير كل من العوامل السابقة على سماكة الطبقة الحدية، لاختيار التصميم الأمثل للأنبوب المتقارب الذي تتحقق عنده السرعة العظمى عند مقطع الخروج.

تشير النتائج إلى أنّ سماكة الطبقة الحدية تصل إلى قيمة أعظمية على ارتفاع 10% من الارتفاع الكلي للأنبوب، ثمّ تعود بالانخفاض تدريجياً حتى مخرجه، كما لوحظ انخفاض سماكة الطبقة الحدية بانخفاض زاوية الميل للفوهة إذ تنخفض سماكة الطبقة الحدية بمقدار 12.5% عند انخفاض زاوية الميل ضمن المجال (68-84) degree، كما تبين أنّ سماكة الطبقة الحدية تنخفض بمقدار 10.7% عند انخفاض درجة الحرارة الهواء ضمن المجال $^{\circ}\text{C}$ (35-95)، كما تُشير النتائج تأثير رقم رينولدز على سماكة الطبقة الحدية إذ تبين انخفاض سماكة الطبقة الحدية بمقدار 50.5% عند ازدياد رقم رينولدز ضمن المجال $(4*10^4-9*10^5)$.

* مدير أعمال – قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة اللاذقية – اللاذقية – سوريا.

الكلمات المفتاحية: الطبقة الحدية، الأنابيب المتقاربة، زاوية الميل، رقم رينولدز، درجة الحرارة.

Study the Effect of Temperature and Reynolds Number on the Boundary Layer Growth in Convergent Pipes at Low Flow Speeds Using CFD

* **Dr. Mai Nuhad Saaed**

Abstract

In the research, the modeling and simulation of flow of hot air within three dimensions convergent pipes was conducted, and studied the boundary layer growth at low flow speeds by using (CFD) technique and (ANSYS Fluent 2021R1) Program, and studied the change of the boundary layer near the walls under variable and different factors as flow temperature and the inclination angle of convergent pipe and Reynolds number, and demonstrate the impact of each of the previous factors on the boundary layer thickness, to choose the optimal design of the convergent pipe which is achieved at it maximum speed at the outlet section.

The results indicate the boundary layer thickness reaches to maximum value at 10% of the total height of the convergent pipe, then

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

decreases gradually up to the outlet section, and was observed the decrease of the boundary layer thickness with decreasing the inclination angle of convergent pipe, the boundary layer thickness decreases such 12.5% at decreasing of the inclination angle within the range (84-68)degree, as was shown that the boundary layer thickness decreases such 10.7% at decreasing of the air temperature within the range (95-35)°c, and the results indicate the effect of Reynolds number on the boundary layer thickness, where it was found that the boundary layer thickness decreased such 50.5% as Reynolds number increased within the range ($4*10^4$ – $9*10^5$).

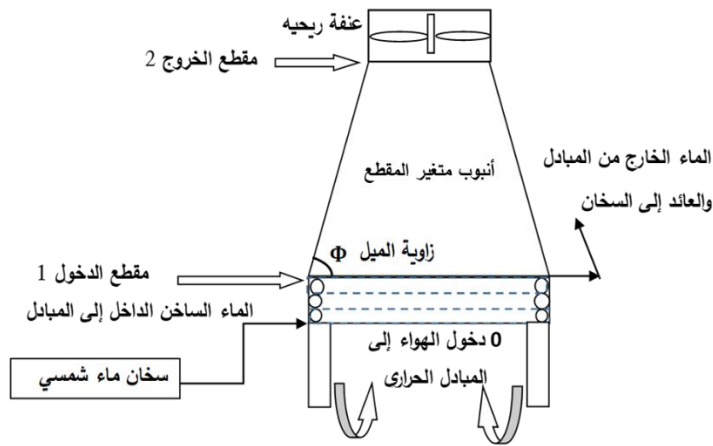
Key Words: Boundary Layer, Convergent Pipes, Inclination Angle, Reynolds Number, Temperature.

1. مقدمة

تستخدم الأنابيب المتقاربة في زيادة سرعة جريان المائع المار عبرها في الجريان التحت صوتي [1]، إلا أنّ تشكل الطبقة الحدية بالقرب من جدار الأنبوب في الجريانات الداخلية ضمن الأقفية والأنابيب يؤثر على سرعة المائع (fluid speed) المار ضمنها، حيث يحدث تدرج بالسرعة عند كل مقطع من مقاطع الأنبوب، وتكون السرعة عند الجدار مساوية للصفر (وفق شرط الالتصاق)، وتزداد تدريجياً لتصل إلى أعلى قيمة لها عند محور الأنبوب [2]، لذلك فإنّ دراسة الطبقة الحدية ونموها أمر بالغ الأهمية في الدراسات الحديثة لما لها من تأثير سلبي على سرعة الجريان وطاقته.

يهدف البحث إلى دراسة نمو الطبقة الحدية وتغيرها على امتداد جدار الأنبوب لجريان الهواء داخل الأنابيب المتقارب، ودراسة تأثير مختلف العوامل عليها كدرجة الحرارة ورقم رينولدز وزاوية الميل وذلك بهدف الحصول على أعلى سرعة عند مقطع الخروج للأنبوب وبالتالي أعلى استطاعة كهربائية للعنفة الريحية.

بناءً على ما تقدم ولتحقيق أهداف البحث تم اعتماد أنبوب متقارب في منشأة تشغيل العنفة الريحية في المناطق ذات سرعة الرياح المنخفضة [3]، كما هو موضح في الشكل (1)، 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)، عنفة ريحية.



الشكل (1) مخطط منظومة تشغيل العنفة الريحية

يتم تسخين الماء بواسطة سخان الماء الشمسي إذ يشكل الماء الوسيط الحراري الساخن حيث يتم إرساله إلى مبادل حراري (ماء-هواء) يقوم بتسخين الهواء المدفوع بواسطة المروحة إلى المبادل الحراري [4]، إذ ترتفع درجة حرارته ويندفع نحو الأعلى باتجاه الأنبوب المتقارب وتزداد سرعته حتى تصل إلى أعلى سرعة عند مخرج الأنبوب، حيث يصطدم بشفرات العنفة الريحية ويؤدي إلى تدويرها وتوليد الطاقة الكهربائية.

اتجهت مجموعة من الأبحاث نحو إجراء تحليل عددي باستخدام برنامج ANSYS FLUENT لسلك الهواء المتدفق عبر أنبوب متقارب والذي يستخدم لتوجيه الهواء باتجاه شفرات العنفة [5]، وأجرى الباحثون مقارنة بين الاستطاعة الناتجة للعنفة الريحية بوجود وغياب الفوهة المتقاربة، توصل الباحث BAZGIR أنه باستخدام الأنبوب المتقارب تحقق ازدياد في السرعة الأعظمية بمقدار 60% أدى إلى الازدياد في الاستطاعة المنتجة بمقدار 5 أضعاف، تناولت أبحاث أخرى نمذجة حقل الجريان باستخدام (ANSYS FLUENT) ضمن الفوهات عند سرعات جريان مرتفعة [6]، وتطوّرت إلى دراسة عدد تقسيمات الشبكة الرقمية (Mesh) في نموذج المحاكاة على حقل الجريان، توصل الباحث SURYA وآخرون أنه بزيادة عدد تقسيمات الشبكة الرقمية (مع الأخذ بعين الاعتبار ارتفاع أول خلية في الشبكة الرقمية) يزداد رقم ماخ وينخفض رقم رينولدز، واتجه الباحث KEBRIAEE وآخرون نحو دراسة تأثير تدرج الضغط على نمو الطبقة الحدية لجريان ضمن أنبوب [7]، إذ تبيّن من خلال الدراسة انخفاض سماكة الطبقة الحدية اللابعدية δ_z / D (وهي تمثل نسبة سماكة الطبقة الحدية إلى قطر الأنبوب) بوجود تدرج في الضغط في الأنبوب على كامل طول الأنبوب.

تناول الباحثون WITT و RUZICKA وآخرون دراسة الطبقة الحدية باستخدام ANSYS FLUENT وتمت دراسة تأثير ارتفاع أول خلية في الشبكة الرقمية وعدد الطبقات الجدارية على سماكة الطبقة الحدية [9] [8]، أظهرت النتائج أنه 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 وبازدياد عدد الطبقات الجدارية حتى 15 يؤدي للحصول على نتائج أدق منها في حال عدد طبقات جدارية منخفض، ألفت أبحاث أخرى الضوء على دراسة الطبقة الحدية المضطربة في الفوهات المتقاربة، وتمت دراسة تأثير رقم رينولدز على سماكة الطبقة الحدية [10]، إذ توصل الباحث BROUGERDI وآخرون أنه بزيادة رقم رينولدز تتخفض سماكة الطبقة الحدية عند زاوية مخروط محددة (40 degree)، واتجهت أبحاث أخرى نحو دراسة الطبقة الحدية المضطربة لجريان انضغاطي عالي السرعة في الفوهات المتقاربة الثلاثية الأبعاد، وتمّ من خلالها دراسة نمو الطبقة الحدية وتأثير مختلف البارامترات [11]، إذ توصل الباحث BROUGERDI وآخرون أنه بانخفاض زاوية

المخروط تزداد سماكة الطبقة الحدية عند قيمة محددة لرقم رينولدز ($Re=5*10^4$)، وقامت أبحاث أخرى بدراسة سلوك الطبقة الحدية بالقرب من جدران الأنبوب المتقارب [12] ، توصل الباحث FARHANIEH وآخرون 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.

تناولت الدراسات السابقة نمذجة الجريانات ضمن الفوهات ثنائية وثلاثية الأبعاد ودراسة سلوك الطبقة الحدية لجريانات قابلة للانضغاط عالية السرعة وتأثير مختلف العوامل على سلوك الطبقة الحدية، إلا أنّها لم تتطرق إلى دراسة عديدة لتأثير درجة الحرارة ورقم رينولدز للجريان وزاوية الميل للفوهة على نمو الطبقة الحدية 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) [13] إذ أنّ أعلى قيمة تصل لها سرعة الهواء لدوران العنفة الريحية عند مقطع الخروج (10m/sec).

2. هدف البحث

يهدف البحث إلى دراسة نمو الطبقة الحدية ودراسة تأثير درجة حرارة الجريان ورقم رينولدز وزاوية ميل الأنبوب المتقارب على نمو الطبقة الحدية، عن طريق حل معادلات الجريان (معادلة الاستمرار، معادلة الحركة نافييه ستوكس، معادلة الطاقة) باستخدام تقنية CFD للحصول على أعلى سرعة عند مقطع الخروج للأنبوب المتقارب.

3. مواد وطرق البحث

تمّ في هذا البحث التحليل الدقيق للطبقة الحدية باستخدام علم ديناميك الموائع الحسابي CFD، وهو العلم الذي يختص بالطرق الرياضية العددية المستخدمة في حل معادلات الجريان وانتقال الحرارة، إذ تم إجراء عملية المحاكاة العددية اللازمة حيث تم بناء النموذج الهندسي وبناء الشبكة الرقمية Mesh، ومن ثم تحويل جملة المعادلات التفاضلية النازمة للجريان إلى جملة من المعادلات الجبرية الخطية، ويتم حلها بالطرق الرياضية المختلفة بشكل تكراري باستخدام برنامج ANSYS FLUENT2021 R1.

4. النتائج والمناقشة

تمّ تصميم الأنبوب المتقارب المبين في الشكل (1) وذلك وفق القيم الاسمية للعنفة الريحية عند مقطع الخروج لمنشأة تشغيل العنفات الريحية، والتي تتضمن سرعة العنفة الريحية $V_2=10\text{m/sec}$ وقطرها $D_2=4\text{m}$ ، سرعة الهواء الشاقولية الصادرة عن المروحة عند مدخل المبادل 2m/s ، وبالعودة إلى أطلس الرياح في شهر تموز في المنطقة الساحلية صيفاً في القطر العربي السوري [14] تم اختيار سرعة الرياح الخارجية 2m/s ودرجة حرارة الهواء الجوي 35°C (والجدير بالذكر أنه تم اختيار بارامترات الرياح عند شهر تموز لأنّ سرعة الرياح منخفضة ودرجة حرارة مرتفعة، حيث تستخدم منشأة تشغيل العنفة الريحية لتشغيل العنفات الريحية عند سرعة رياح منخفضة [3]).

ويتطبيق معادلة الاستمرار بين مقطعي الدخول والخروج للمبادل الحراري (0,1) (المبادل الحراري المتوضع عند مدخل الأنبوب المتقارب، وعلى اعتبار أن المبادل الحراري يقوم بتسخين الهواء إلى الدرجة 95°C) يتم الحصول على السرعة عند مخرج المبادل الحراري V_1 [15]:

$$\rho_0.V_0.A_0 = \rho_1.V_1.A_1; A_0 = A_1$$

$$\Rightarrow \rho_0.V_0 = \rho_1.V_1$$

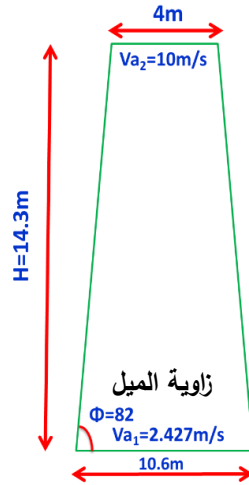
كما تمّ حساب قطر مقطع الدخول للأنبوب المتقارب وفق معادلة الاستمرار بين مقطعي الدخول والخروج للأنبوب (على اعتبار جريان الهواء الساخن ضمن الأنبوب غير قابل للانضغاط وبالتالي: $\rho_1 = \rho_2$)، تصبح معادلة الاستمرار كالتالي: $V_1.A_1 = V_2.A_2$ ، أما ارتفاع الأنبوب يعطى

$$H = \left(\frac{D_1 - D_2}{2} \right) \tan \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) \quad [16]:$$

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

φ : زاوية ميل الأنبوب المتقارب بالـ degree.

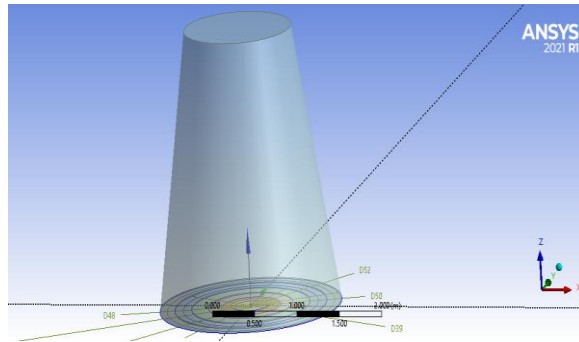
يوضح الشكل (2) أبعاد الأنبوب المتقارب:



الشكل (2) أبعاد الأنابيب المتقارب

1.4 المجسم الهندسي

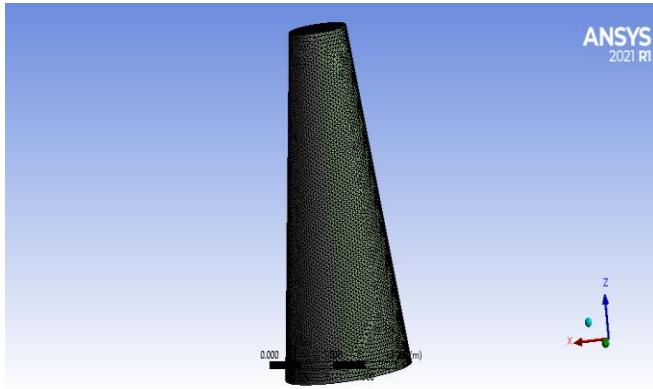
هو الحيز الذي يشغله المائع ضمن حسابات الـ CFD [17]، حيث تمّ رسم الأنابيب المتقارب كنموذج ثلاثي الأبعاد (3Dimensions) للنموذج المدروس وفق الأبعاد المبينة في الشكل (2) باستخدام تعليمة (Geometry) في برنامج (Ansys Fluent) مع الأخذ بعين الاعتبار وجود المبادل الحراري عند مقطع الدخول للأنبوب، كما هو موضح في الشكل (3):



الشكل (3) نموذج الأنابيب المتقارب ثلاثي الأبعاد

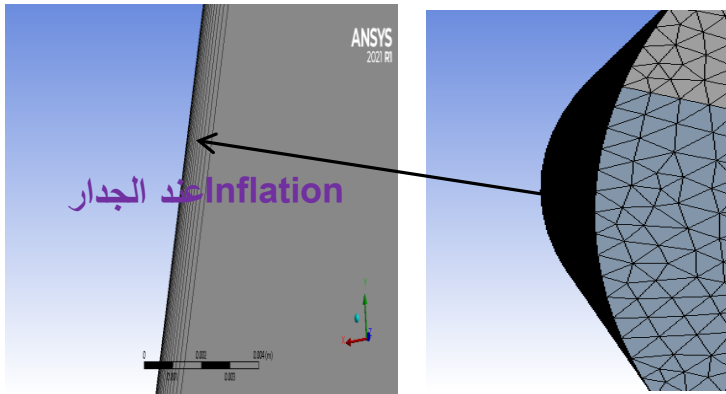
2.4 الشبكة الرقمية

يتطلب الحل باستخدام الـ CFD بناء شبكة من الخلايا تغطي كامل المجال المدروس، ويتم إجراء الحل الرقمي لمعادلات الجريان ضمن هذه الخلايا، وتمّ تصميم الشبكة الحاسوبية للأنبوب المتقارب باستخدام تعليمة Mesh في برنامج Ansys Fluent، وتمّ اختيار الشبكة منتظمة لتحقيق دقة عالية في الحل [18] كما هو مبين في الشكل (4):



الشكل (4) الشبكة الرقمية للأنبوب المتقارب

تمّ 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 (5):



الشكل (5) الطبقات الجدارية عند جدار الأنبوب المتقارب

3.4 مرحلة المعالجة

يتم في هذه المرحلة تحويل جملة المعادلات التفاضلية الحاكمة للجريان إلى جملة من المعادلات الجبرية الخطية تعرف هذه العملية بالتقطيع (Discretization) ويتم حلها بالطرق الرياضية المختلفة بشكل تكراري، وهذا يعود إلى الطبيعة غير الخطية للمعادلات [19]، وتم تحديد الشروط الحدية (Boundary Conditions) إذ تم اعتبار الجريان غير مستقر لأن سرعة الرياح الخارجية متغيرة مع الزمن، وتم تعريف السرعة عند مقطع الدخول للفوهة ومقطع الخروج للمبادل الحراري (مع الأخذ بعين الاعتبار أن الجريان قسري بسبب وجود مروحة عند مقطع الدخول للمنشأة كما ذكر في المقدمة)، كما تم تحديد عدد التكرارات والشروط الابتدائية ونسبة التقارب للحل $1e-6$ ونموذج الاضطراب والشروط الابتدائية [20]، يبين الجدول (1) مدخلات برنامج ANSYS FLUENT:

الجدول (1) مدخلات برنامج ANSYS FLUENT

Models	Energy: On Viscous: (k-ε (2eqa) Realizable)
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

4.4 التحقق من دقة الحل Validation

تم التحقق من دقة الحل بهدف الحصول على نتائج دقيقة ونسبة خطأ ضئيلة وذلك عند زاوية محددة (82degree) للفوهة ودرجة الحرارة عند مخرج المبادل الحراري 95°C وفق محورين:
1. التحقق وفق دقة الشبكة الرقمية (Mesh Independence)

2. التحقق عن طريق مقارنة النتائج لـ CFD للسرعة عند مقطع الخروج مع السرعة التحليلية (النظرية) عند مقطع الخروج وهي سرعة دوران العنفة، وإيجاد نسبة الخطأ.

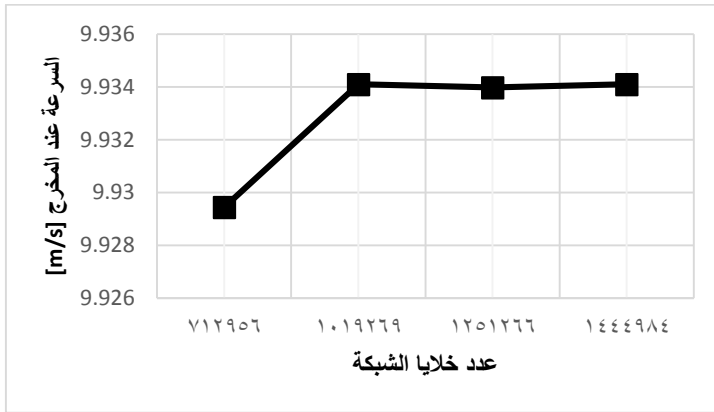
أولاً: اختبار دقة الشبكة Mesh independence

تمّ اختبار دقة الشبكة عند أربعة أنواع من الشبكات [21] باختلاف عدد الخلايا والعقد (شبكة خشنة، وشبكة متوسطة الخشونة، وشبكة ناعمة، وشبكة عالية النعومة)، وتم إيجاد السرعة عند مقطع الخروج باستخدام برنامج ANSYS FLUENT، كما هو مبين في الجدول (2):

الجدول (2) قيم السرعة مع تغير عدد خلايا الشبكة

عدد خلايا الشبكة	السرعة عند مقطع الخروج وفق (CFD) [m/s]
712956	9.929435
1019269	9.9341
1251266	9.93398
1444984	9.9341

يوضح الشكل (6) العلاقة بين السرعة عند مقطع الخروج وعدد الخلايا الشبكية:



الشكل (6) علاقة السرعة عند مقطع الخروج مع عدد خلايا الشبكة

نلاحظ من الشكل (6) أن الحل يصبح مستقراً جداً عند زيادة عدد خلايا الشبكة الرقمية من الشبكة الناعمة إلى الشبكة عالية النعومة.

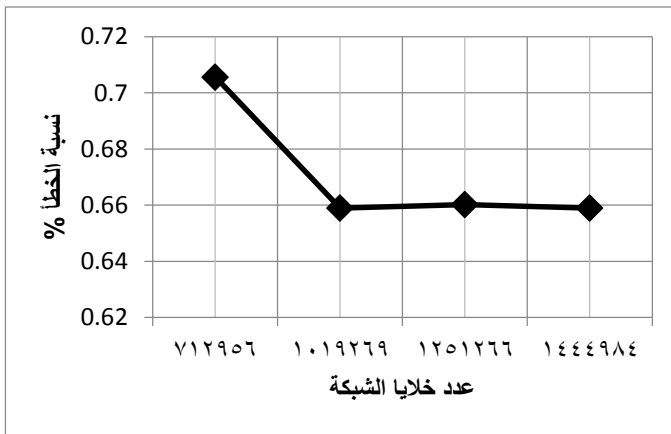
ثانياً: اختبار دقة الحل Validation

تم التحقق عن طريق المقارنة بين السرعة الناتجة عند مقطع الخروج وفق CFD والسرعة النظرية التحليلية [22]، كما هو مبين في الجدول (3) إذ يبين الجدول نسبة الخطأ المئوية بين القيمة النظرية والتحليلية للسرعة عند مقطع الخروج:

الجدول (3) قيم السرعة مع تغير عدد خلايا الشبكة

عدد خلايا الشبكة	السرعة عند مقطع الخروج وفق (CFD) [m/s]	السرعة التحليلية عند مخرج الأنابيب المتقارب [m/s]	نسبة الخطأ %
712956	9.929435	10	0.70565
1019269	9.9341	10	0.659
1251266	9.93398	10	0.6602
1444984	9.9341	10	0.659

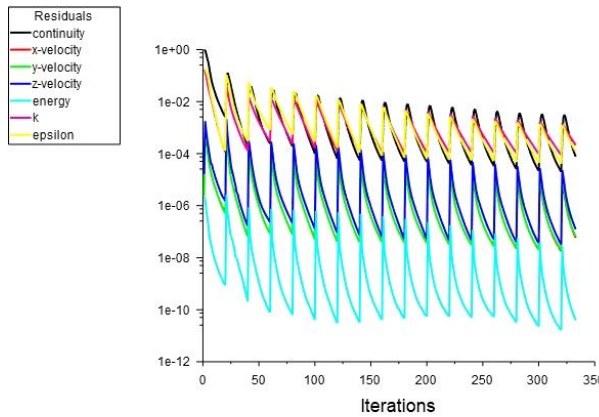
يبين الشكل (7) علاقة عدد خلايا الشبكة مع نسبة الخطأ المئوية:



الشكل (7) علاقة نسبة الخطأ مع عدد خلايا الشبكة

نلاحظ من الشكل (7) عند مقارنة قيمة السرعة عند مقطع الخروج وفق CFD والسرعة التحليلية 10m/s تقارب نسبة الخطأ عند الانتقال من الشبكة الناعمة إلى الشبكة الأكثر نعومة كما أن نسبة الخطأ ضئيلة لم تتجاوز 1% وبذلك تم تحقيق اختبار الحل. لذلك نستنتج مما سبق أنه تم اختبار الشبكة كما تم التحقق من دقة الحل وفق CFD لذلك فإن نموذج المحاكاة والشبكة صحيح.

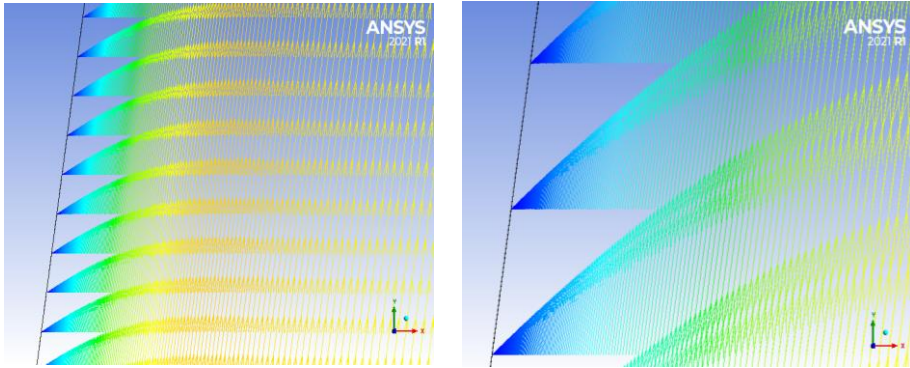
5.4 مخططات تقارب الحل: يبين الشكل (8) مخططات تقارب الحل لمعادلات الجريان:



الشكل (8) مخططات تقارب الحل

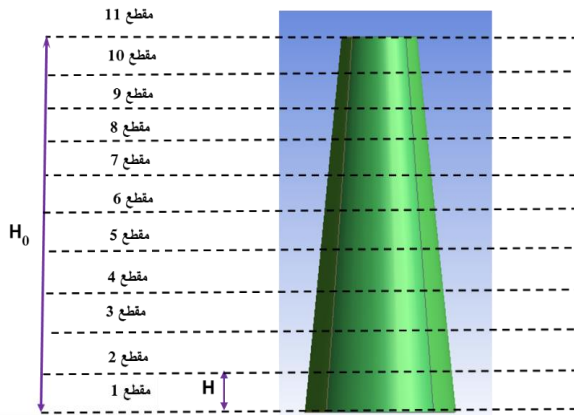
6.4 دراسة الطبقة الحدية

تتكون الطبقة الحدية قرب جدار الأنبوب نتيجة تدرج السرعة عند كل مقطع من مقاطع الأنبوب إذ تبدأ السرعة عند الجدار صفر (نتيجة شرط الالتصاق) ثم تزداد تدريجياً حتى تصل إلى قيمة أعظمية (كما هو مبين في الشكل (9)) [2]:



الشكل (9) تغير أشعة السرعة ضمن الأنابيب المتقارب وعند الجدار

وتمّ رسم التغيرات اللابعدية لسماكة الطبقة الحدية (δ) على كامل جدار الأنابيب المتغير المقطع باستخدام (Ansys Fluent)، إذ تمّ تمثيل الطبقة الحدية بالقرب من جدار الأنابيب المتقارب، وتمّ أخذ عدة مقاطع للأنبوب ابتداءً من مقطع الدخول (inlet) حتى مقطع الخروج (outlet)، كما هو مبين في الشكل (10) [23]:

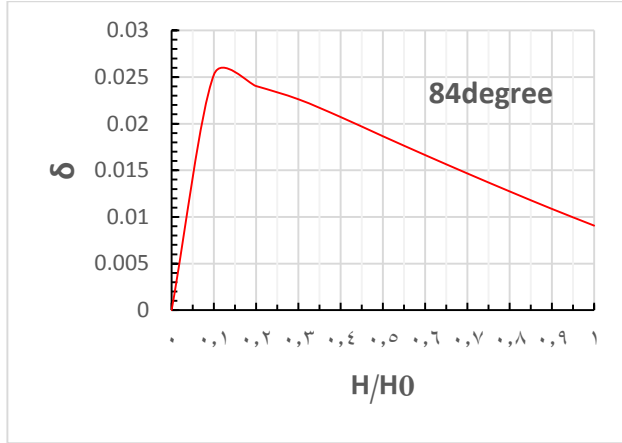


الشكل (10) المقاطع المأخوذة من الأنابيب المتقارب

1.6.4 دراسة الطبقة الحدية عند زوايا مختلفة

تمّ رسم التغيرات اللابعدية لسماكة الطبقة الحدية (δ) على كامل جدار الأنابيب باستخدام (ANSYS FLUENT) عند زوايا ميل مختلفة: (84-78-72-68)degree وعند قيمة محددة

لرقم رينولدز 4.3×10^5 ودرجة الحرارة عند مخرج المبادل الحراري 95°C ، كما هو موضح في الأشكال (11-12):

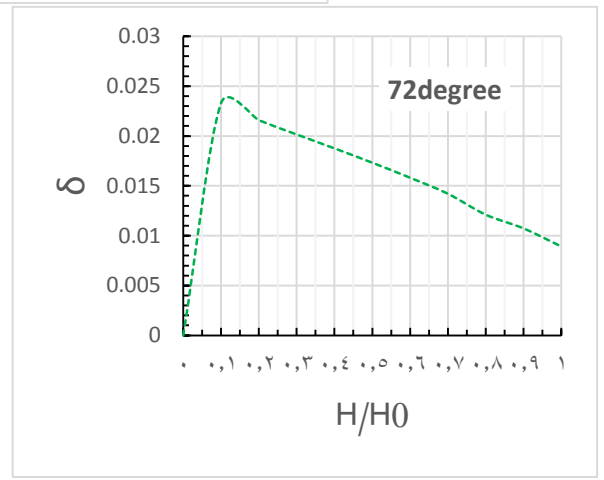
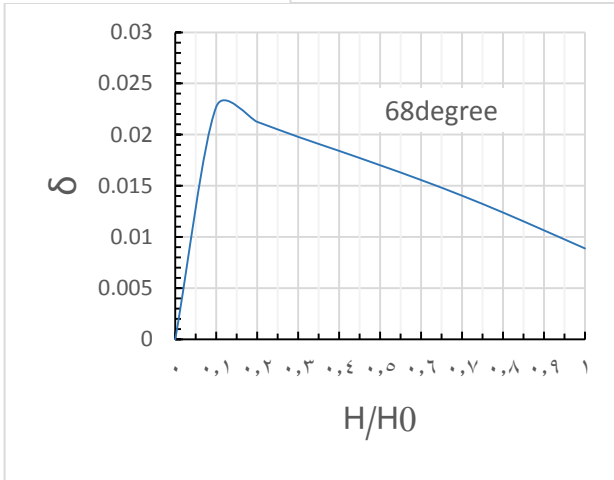
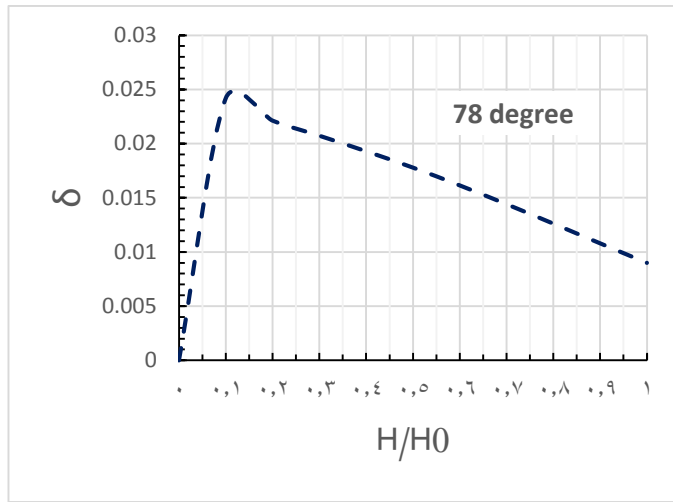


الشكل (11) تغير سماكة الطبقة الحدية اللاحقة عند الزاوية 84degree

تمّ تمثيل محور الإحداثيات الأفقي بشكل لا بعدي، إذ يمثل نسبة بُعد كل مقطع من المقاطع السابقة (الموضحة في الشكل (10)) H عن مقطع الدخول إلى كامل ارتفاع الأنبوب H_0 مع العلم أنّ H هو ارتفاع متغير ضمن النطاق $[0 - H_0]$ ، وأما بالنسبة للمحور الشاقولي يمثل سماكة الطبقة الحدية اللاحقة وهي سماكة الطبقة الحدية منسوبة إلى نصف قطر مقطع الدخول للأنبوب.

بناءً على ما تقدم تم إيجاد تغير سماكة الطبقة الحدية عند زوايا ميلان مختلفة كما هو مبين في الشكل (12):

دراسة تأثير درجة الحرارة ورقم رينولدز على نمو الطبقة الحدية في الأنابيب المتقاربة عند سرعات جريان منخفضة باستخدام CFD

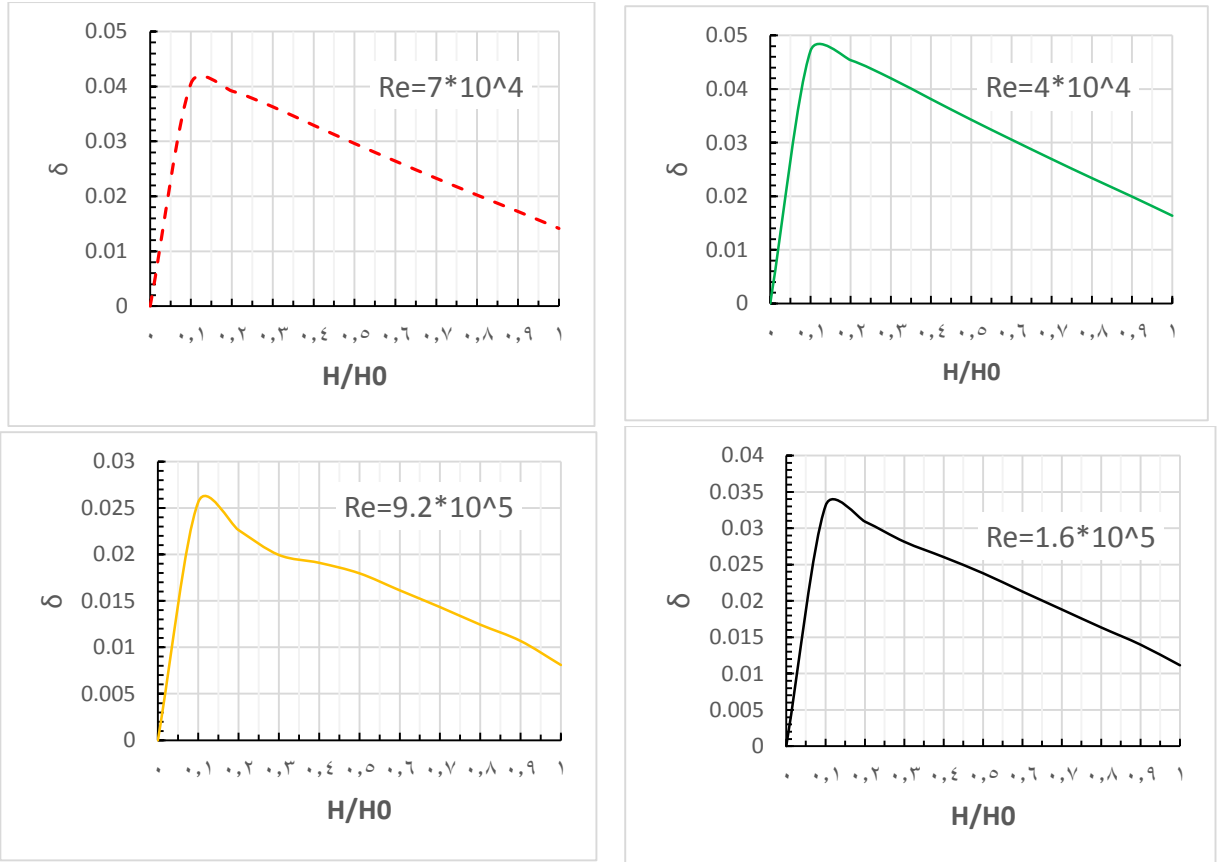


الشكل (12) تغير سماكة الطبقة الحدية اللابعدية عند زوايا ميل مختلفة

نلاحظ من المخططات السابقة أنّ سماكة الطبقة الحدية اللابعدية عند زوايا الميل المختلفة تصل إلى أعلى قيمة لها على ارتفاع (10%) من الارتفاع الكلي للأنبوب، ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى أخفض قيمة عند مقطع الخروج، وهذا محقق لأن سماكة الطبقة الحدية تتناسب عكساً مع سرعة الجريان، وبالتالي كلما اتجه تيار الهواء الساخن باتجاه مقطع الخروج ازدادت قيمة السرعة نتيجة تضيق المقطع وبالتالي تتخفض سماكة الطبقة الحدية [13].

2.6.4 دراسة الطبقة الحدية عند قيم مختلفة لرقم رينولدز

تم رسم التغيرات اللابعدية لسماكة الطبقة الحدية (δ) على كامل جدار الأنبوب عند قيم مختلفة لرقم رينولدز وذلك عند زاوية ميل محددة للفوهة 82° ، كما هو موضح في الشكل (13):



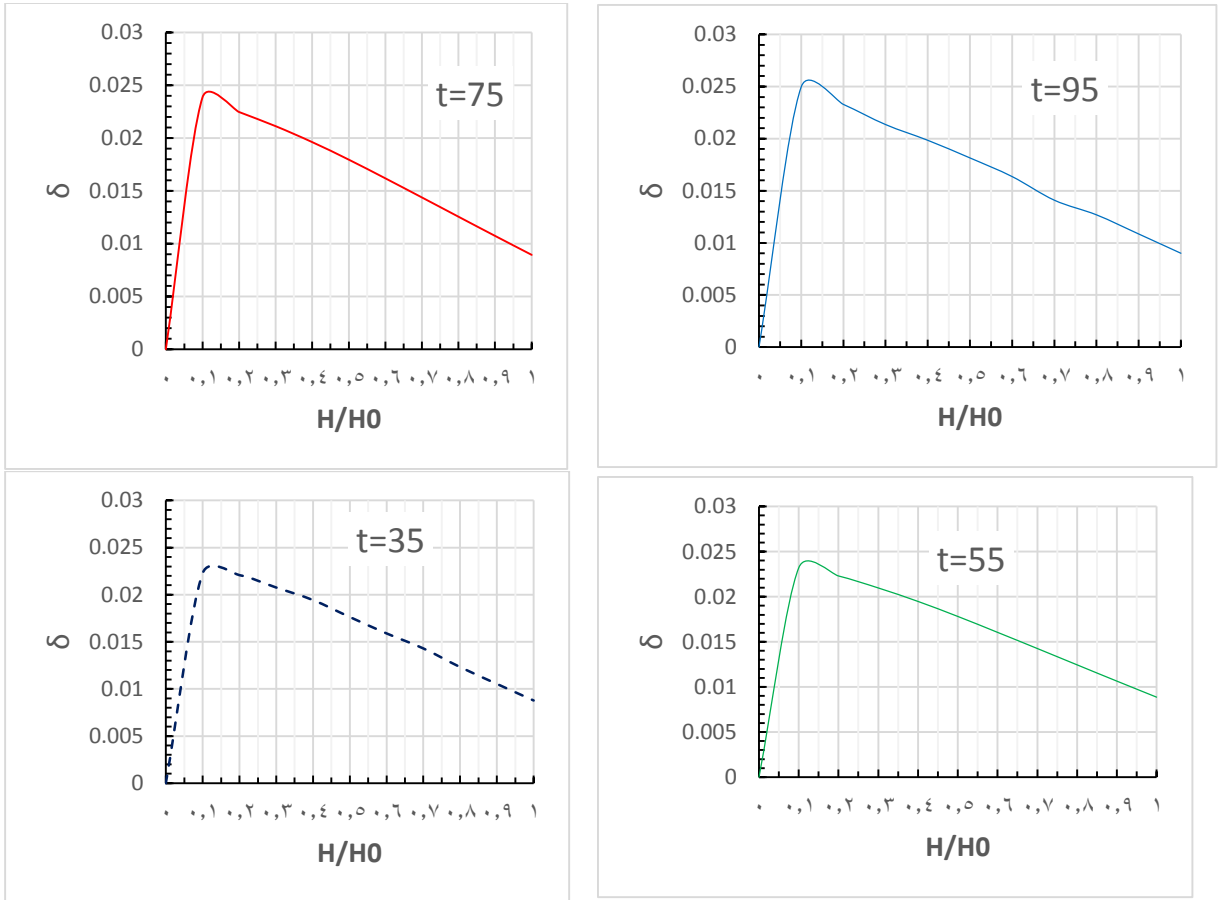
الشكل (13) تغير سماكة الطبقة الحدية عند أرقام رينولدز مختلفة

نلاحظ من الشكل (13) الذي يضم مخططات تغير سماكة الطبقة الحدية عند قيم مختلفة لرقم رينولدز أن سماكة الطبقة الحدية تبلغ أعلى قيمة على ارتفاع 10% من الأنبوب ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى قيمة صغرى عند مقطع الخروج.

3.6.4 سماكة الطبقة الحدية عند درجات حرارة مختلفة

دراسة تأثير درجة الحرارة ورقم رينولدز على نمو الطبقة الحدية في الأنابيب المتقاربة عند سرعات جريان منخفضة باستخدام CFD

تم رسم التغيرات اللابعدية لسماكة الطبقة الحدية (δ) على كامل جدار الأنبوب عند درجات حرارة مختلفة $(35-55-75-95)^{\circ}\text{C}$ وعند قيمة محددة لزواوية ميل الفوهة 82° ، كما هو موضح في الشكل (14):

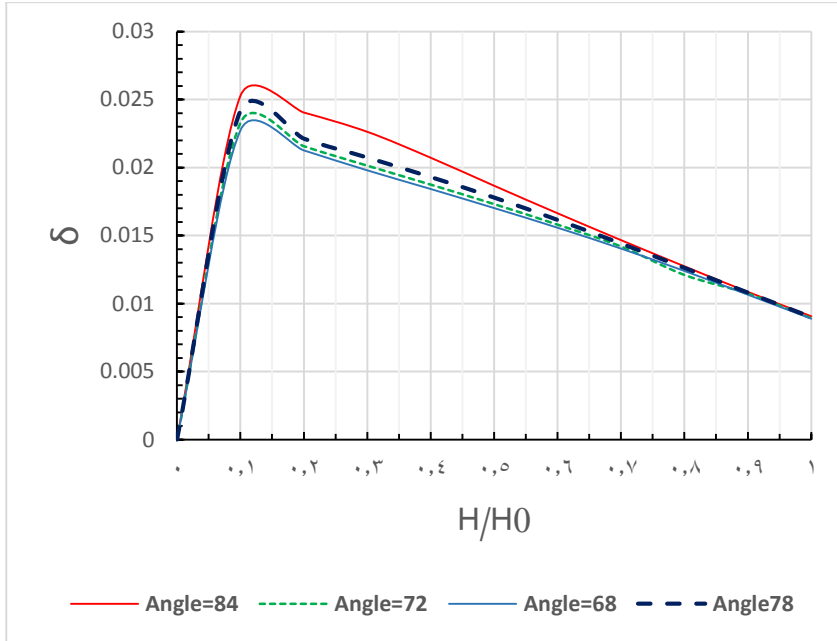


الشكل (14) تغير سماكة الطبقة الحدية عند درجات حرارة مختلفة

نلاحظ من الشكل (14) أن سماكة الطبقة الحدية تصل إلى قيمة أعظمية بالقرب من مدخل الأنبوب ثم تعود بالانخفاض تدريجياً.

4.6.4 مناقشة تأثير زاوية الميل

لتبيان تأثير زاوية الميل على سماكة الطبقة الحدية عند منطقة الجدار، تمّت مقارنة النتائج التي حصلنا عليها عند زوايا ميل مختلفة، إذ تمّ رسم مخطط تغير سماكة الطبقة الحدية عند زوايا ميل مختلفة وعند قيمة محددة لرقم رينولدز 4.3×10^5 ودرجة الحرارة عند مخرج المبادل الحراري 95°C ، كما هو مبين في الشكل (15):

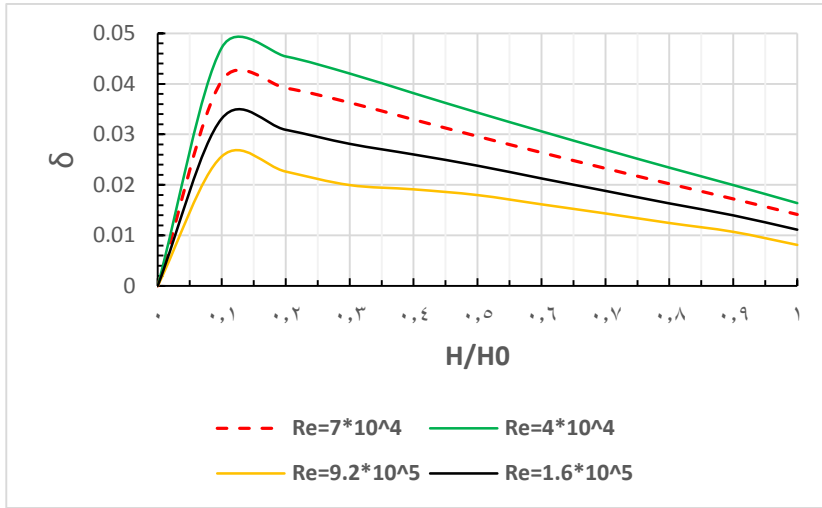


الشكل (15) تغير سماكة الطبقة الحدية عند زوايا ميل مختلفة

نلاحظ من الشكل (15) أنه بانخفاض زاوية ميل الأنبوب تتخفّض سماكة الطبقة الحدية، كما نلاحظ أنّ سماكة الطبقة الحدية تصل إلى أعلى قيمة على ارتفاع 10% من الارتفاع الكلي للأنبوب ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى أخفض قيمة عند مخرج الأنبوب وذلك عند قيم مختلفة لزوايا الميل.

5.6.4 مناقشة تأثير رقم رينولدز

لدراسة تأثير رقم رينولدز على سماكة الطبقة الحدية تمّت مقارنة النتائج التي حصلنا عليها عند قيم مختلفة لرقم رينولدز عند زاوية ميل محددة للفوهة 82° ، إذ يوضح الشكل (16) تغير سماكة الطبقة الحدية تبعاً لرقم رينولدز للجريان:

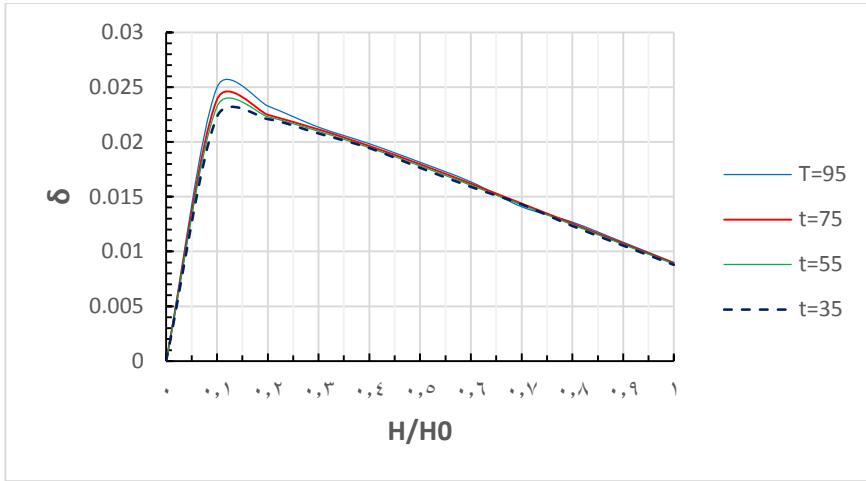


الشكل (16) تغير سماكة الطبقة الحدية مع تغير رقم رينولدز

نلاحظ من المخطط أنه بزيادة رقم رينولدز تنخفض سماكة الطبقة الحدية بالقرب من جدار الأنبوب، وهذا محقق بسبب التناسب العكسي بين سماكة الطبقة الحدية ورقم رينولدز.

6.6.4 مناقشة تأثير درجة الحرارة

لتبيان تأثير درجة الحرارة على سماكة الطبقة الحدية، نرسم تغير سماكة الطبقة الحدية عند زاوية ميل للفوهة 82degree وقيم درجات الحرارة (35-55-75-95)°c كما هو مبين في الشكل (17):



الشكل (17) تغير سماكة الطبقة الحديدية مع تغير درجة حرارة الجريان

نلاحظ من المخططات أن سماكة الطبقة الحديدية تتخفف بانخفاض درجة حرارة الجريان، وهذا محقق نظراً أنّ اللزوجة الحركية للهواء تتخفف بانخفاض درجة الحرارة وبالتالي تتخفف سماكة الطبقة الحديدية [24].

5. الاستنتاجات والتوصيات

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

1. تمّ التحقق من نموذج المحاكاة العددية للأنبوب المتقارب الذي تمّ إنشاؤه عن طريق برنامج ANSYS FLUENT بسبب تحقق اختبار دقة الشبكة واختبار دقة الحل بسبب وجود تطابق كبير بين القيم النظرية (التحليلية) والقيم الناتجة من الـ CFD.
2. تبين من خلال حقل أشعة السرعة أن السرعة تبدأ من الصفر عند جدران الأنبوب ثم تزداد تدريجياً حتى تصل إلى قيمة أعظمية عند محور الأنبوب.
3. تبين من المخططات السابقة التي تُظهر سلوك الطبقة الحديدية على كامل جدار الأنبوب المتقارب عند قيم مختلفة لزاوية ميل الفوهة وقيمة محددة لرقم رينولدز 4.3×10^5 ودرجة الحرارة عند مخرج المبادل الحراري 95°C ، أنّ سماكة الطبقة الحديدية تصل إلى قيمة أعظمية على ارتفاع (10%) من الارتفاع الكلي للأنبوب، ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى قيمة أصغر عند مقطع الخروج للأنبوب.

4. تبين أنّ سماكة الطبقة الحدية تصل إلى قيمة أعظمية على ارتفاع (10%) من الارتفاع الكلي للأنبوب، ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى قيمة أصغر عند مقطع الخروج للأنبوب، وذلك عند قيم مختلفة لرقم رينولدز وعند قيم مختلفة لدرجة الحرارة وقيمة محددة لزواوية الميل 82degree،
5. تبين وجود تأثير لزواوية ميل الأنبوب على سماكة الطبقة الحدية عند قيمة محددة لرقم رينولدز 4.3×10^5 ودرجة الحرارة عند مخرج المبادل الحراري 95°C ، حيث لوحظ انخفاض سماكة الطبقة الحدية بمقدار (12.5%) عند انخفاض زواوية ميل الأنبوب بمقدار 16degree.
6. تبين وجود تأثير لرقم رينولدز على سماكة الطبقة الحدية، حيث لوحظ انخفاض سماكة الطبقة الحدية بمقدار 50.5% عند ازدياد رقم رينولدز ضمن المجال $(4 \times 10^4 - 9.2 \times 10^5)$.
7. إنّ درجة حرارة الهواء المار ضمن الأنبوب المتقارب تؤثر على سماكة الطبقة الحدية، إذ تنخفض سماكة الطبقة الحدية بمقدار 10.7% عند انخفاض درجة الحرارة ضمن المجال $(95-35)^\circ\text{C}$.
8. تبين من خلال البحث أهمية تقنية الـ CFD في إعطاء تصوراً مسبقاً عن سلوك المنظومة، والتي تمثل في البحث منشأة تشغيل العنفات الريحية من خلال دراسة تأثير مختلف العوامل على نمو الطبقة الحدية والذي ينعكس بدوره على السرعة عند مقطع الخروج للمنظومة، والتي تؤثر بدورها على الاستطاعة الكهربائية الناتجة للعنفة الريحية عند مقطع الخروج.

6. المراجع

- [1] POTTER, M. WIGGERT, D 1991-MECHANICS OF FLUIDS. Prentic-Hall International Editions, UK London, 692p.
- [2] Çengel, Y. A 2014- FLUID MECHANICS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, THIRD EDITION, McGraw-Hill, New York, 776p.
- [3] HASAN, A. ALI, M. ISSA, H. SAAEED, M 2022 An Analytical Study of Construction for Working Wind Turbines in the Areas of Low Speed of

- the Wind, Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series, Vol. 44, No. 2, 29-42. (In Arabic)
- [4] HASAN, A 2008-Heat and Mass Transfer. Tishreen University, Syrian Arab Republic, 789p. (In Arabic)
- [5] 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, United States, 5.
- [6] SURYA, K, P. SADHASHIVA, K 2016 Simulation of Convergent Divergent Rocket Nozzle using CFD Analysis, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, India, Vol.13 NO.4, 58-65.
- [7] KEBRIAEE, A. FARHANIEH, B. FIROOZABADI, B 2011 Analytical investigation of boundary layer growth and swirl intensity decay rate in a pipe, Arch Appl Mech, Iran, 14p.
- [8] 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, 11.
- [9] 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, Vol. 2047, No.1, 12.
- [10] BROUGERDI, A. N. KEBRIAEE, A 2012 Simulation of Turbulent Swirling Flow in Convergent Nozzles, Scientia Iranica Sharif University of Technology, Vol.19, No. 2, 258-265.
- [11] 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.
- [12] FARHANIEH, B. FIROOZABADI, B 2011 Turbulent flow in converging nozzles part one: boundary layer solution, Applied Mathematics and Mechanics (English Edition), Berlin Heidelberg, 645-662.
- [13] Mahmoud, H 2007- Gas Dynamics. Tishreen University, Syrian Arab Republic, 619p. (In Arabic)
- [14] Wind Atlas in Syrian Arab Country.
- [15] HASAN, A 2013-Thermodynamic /2/. Tishreen University Publications, Syrian Arab Republic, 730p. (In Arabic)

- [16] HASAN, A 2011 Improving the Effectiveness of Wind Turbine Performance on the Coast, Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series, Vol. 33, No. 6, 16. (In Arabic)
- [17] Magoulès, F 2011 Computational Fluid Dynamics, CHAPMAN & HALL/CRC, France, 407.
- [18] 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, 670-677.
- [19] Jones, W, P. Launder, B 2016 The prediction of linearization with a two-equation model of turbulence, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 15, 301-314.
- [20] Tu, J. Yeoh, G. Liu, C 2019 Computational fluid dynamics: A practical approach, Elsevier, Third Edition, 978.
- [21] SRINIVAS, G, RAKHAM, B 2017 Experimental and numerical analysis of convergent nozzle, Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering, India, 14.
- [22] Khallouf, A. Mohamad, N. al-Muhammad. A 2021 Computation Ship Resistance Using Computational Fluid Dynamics (CFD), Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series, Vol. 43, No. 2, 77-87. (In Arabic)
- [23] HASAN, A. ALI, M. ISSA, H. SAAEED, M 2023 Numerical Study of Thermal Boundary Layer of the Hot Air Flow in Convergent Pipes Using Computational Fluid Dynamics CFD, journal of Al Baath University-Syria-Homs, 23. (In Arabic)
- [24] ROGERS, G. MAYHEW, Y 2014-Engineering Thermodynamics Work and Heat Transfer. PEARSON, Fourth Edition, 711p.