

دراسة عددية لتأثير تسخين الهواء في الأنابيب المتقاربة على السرعة والطبقة الحدية الديناميكية باستخدام CFD

* د. أيوب حسن

** د. محمد علي

*** د. هيثم عيسى

**** مي نهاد سعيد

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٣/١/١٠ . قُبل للنشر في ٢٠٢٣/٥/٢٤)

□ ملخص □

تم في هذا البحث دراسة جريان الهواء في الأنابيب المتقاربة، وتحليل نمو الطبقة الحدية الديناميكية عند سرعة جريان منخفضة باستخدام تقنية (CFD) واستخدام برنامج (ANSYS Fluent 2021R1)، وتم دراسة تأثير مختلف العوامل على سماكة الطبقة الحدية الديناميكية كدرجة الحرارة، وزاوية ميل الأنبوب المتقارب، بهدف اختيار زاوية الميل المثلى التي تتحقق عندها السرعة العظمى عند مقطع الخروج.

أكدت النتائج التي تم الحصول عليها أن سماكة الطبقة الحدية تصل إلى قيمة أعظمية على ارتفاع (20%) من مدخل الأنبوب ثم تتخفف بشكل تدريجي حتى مقطع الخروج، كما لوحظ انخفاض في سماكة الطبقة الحدية الديناميكية بمقدار (34.2%) عند انخفاض زاوية ميل الأنبوب، وعند ارتفاع درجة الحرارة تزداد سماكة الطبقة الحدية عند مختلف زوايا الميل إذ يتراوح مقدار الزيادة ضمن المجال (% ٧٧.٩-٢٠.٣٥) عند تغير زاوية الميل ضمن المجال (82-86) degree بالترتيب، كما أن تأثير زاوية الميل على سماكة الطبقة الحدية طفيف جداً في حالة عدم تسخين الهواء.
الكلمات المفتاحية: سرعة المائع، الطبقة الحدية الديناميكية، الأنابيب المتقاربة، زاوية الميل، درجة الحرارة.

* أستاذ - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهيك - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

** أستاذ مساعد - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهيك - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

*** أستاذ مساعد - قسم الهندسة البحرية - كلية الهيك - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

**** طالبة دراسات عليا (دكتوراة) - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهيك - جامعة تشرين - اللاذقية - سوريا.

Numerical Study of the Effect of Heating the Air in the Convergent Pipes on Speed and Dynamic Boundary Layer Using CFD

* Dr. Ayoub Hasan

**Dr. Mohamed Ali

*** Dr. Heithem Issa

****Eng. Mai Nuhad Saaeed

(Received 10/1/2023 . Accepted 24/5/2023)

□ ABSTRACT

In this research has done study of air flow in the convergent pipes, and analysis for the growth of the dynamic boundary layer at low flow speed by using (CFD) technique and (ANSYS Fluent 2021R1), and it has studied the effect of various factors on the thickness of dynamic boundary layer such as the temperature of air and inclination angle of the convergent pipe, to choose the optimal angle which is achieved at it maximum speed at the outlet section.

The results confirmed which were obtained that the thickness of boundary layer reaches to the maximum value at a height (20%) from the inlet of the pipe then decreases gradually up to the outlet section, and it is also observed decrease in the thickness of boundary layer such (34.2%) at decrease of the inclination angle of the pipe, and when the temperature increases the thickness of boundary layer increases at the different inclination angles which it ranges the amount of the increase within the range (20.35-77.9)% when the inclination angle of the pipe changes within the range ((82-86) degree) respectively, and the effect of the inclination angle on the thickness of boundary layer is very slight at the case of not heating air.

Key Words: Fluid Velocity, Dynamic Boundary Layer, Convergent Pipes, Inclination Angle, Temperature.

*Professor in Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Assistant Professor in Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

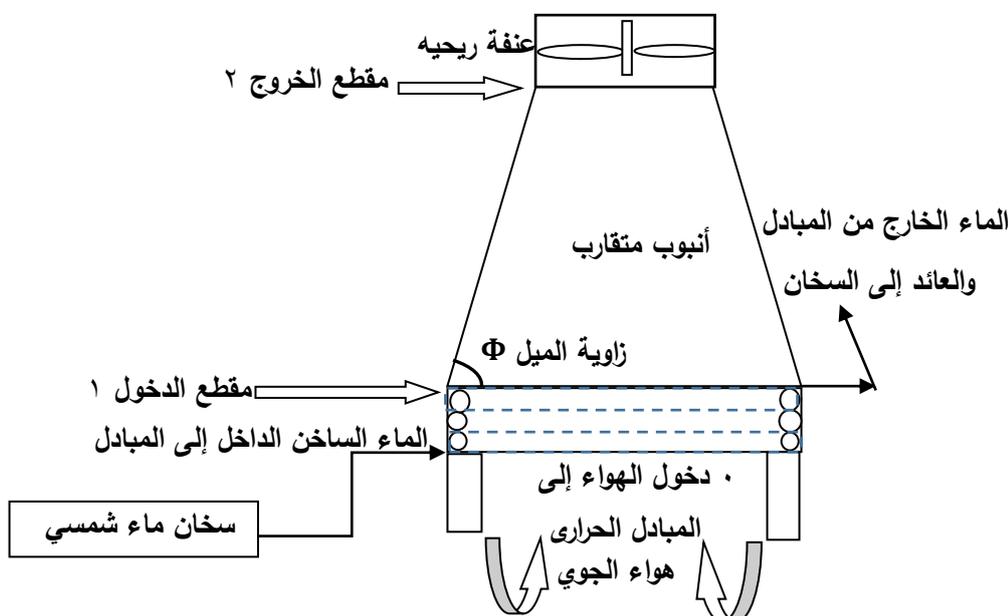
***Assistant Professor in Department of Marine Engineering, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

****Postgraduate student (PhD), Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical & Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

١. مقدمة

إنّ تشكل الطبقة الحدية في الجريانات الداخلية ضمن الأفنية والأنابيب المتغيرة المقطع يؤثر على سرعة المائع (Fluid Velocity) 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 [1]. يهدف البحث إلى دراسة وتحليل الطبقة الحدية الديناميكية (Dynamic Boundary Layer) لجريان الهواء داخل الأنبوب المتقارب، ودراسة تأثير مختلف البارامترات، وذلك بهدف الحصول على أعلى سرعة عند مقطع الخروج للأنبوب وبالتالي أعلى استطاعة كهربائية للعنفة الريحية.

تمّ اعتماد أنبوب متغير المقطع (متقارب) في منظومة تشغيل العنفات الريحية لتحقيق هذا الهدف كما هو مبين في الشكل (١) والمكوّنة من الأقسام التالية: سخان ماء شمسي، مبادل حراري ذي جريان متعاكس (ماء-هواء)، أنبوب متقارب (Convergent Pipe)، عنفة ريحية (Wind Turbine) [2].



الشكل (١) مخطط منظومة تشغيل العنفة الريحية

يقوم سخان الماء الشمسي بتسخين الماء الذي يشكل الوسيط الحراري الساخن إذ يتم إرساله إلى مبادل حراري (ماء-هواء) يقوم بتسخين الهواء الجوي الذي يشكل الوسيط الحراري البارد [3]، وبعد مرور الهواء الجوي عبر المبادل الحراري ترتفع درجة حرارته وتتنخفض كثافته ويرتفع 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.

تتاولت العديد من الأبحاث السابقة نمذجة (Simulation) الفوهات المتقاربة المتباعدة (Convergent-Divergent Nozzles) ثنائية الأبعاد عند سرعات جريان مرتفعة (فوق صوتية) قابلة للانضغاط غير مستقرة باستخدام (CFD) [4,5]، منها من اتجه نحو دراسة حقل السرعة حيث تبين تزايد السرعة إذ تزداد السرعة في المقطع المتقارب حتى تصل إلى قيمة أعظمية عند الاختناق، ثم تزداد في المقطع المتباعد حتى تصل إلى أعلى قيمة عند مخرج الفوهة [4]، كما تمّت دراسة تأثير شكل المقطع على حقل السرعة، إذ تبين أنّ ازدياد السرعة في الفوهات ذات المقطع الدائري حوالي (١٦.٧٥%) أعلى من معدل ازديادها في الفوهات ذات المقطع المستطيل والتي تبلغ (14.89%) [5]، كما تمّ تحليل

وإدارة مختلف البارامترات كالضغط ودرجة الحرارة [6-7]، من خلال إلقاء الضوء على حقول جريان الضغط، ودرجة الحرارة، حيث لوحظ انخفاض درجة الحرارة، والضغط على امتداد محور الفوهة حتى تصل إلى قيمة أصغر عند مقطع الخروج، وأبحاث أخرى تناولت تأثير زاوية الفوهة بهدف تحسين فعاليتها وتطوير تصميمها [8]، إذ تمت دراسة تأثير زوايا التباعد للفوهة على السرعة عند الزوايا (9, 12, 15, 18)، وتوصل الباحث من خلال نتائج (CFD) أنّ السرعة تزداد بزيادة زاوية التباعد وأن الزاوية المثلى التي يتحقق عندها أعلى سرعة (15 degree)، وأبحاث اتجهت نحو دراسة حقل الجريان ضمن الفوهات المستخدمة في الصواريخ بغية الحصول على أعلى تحويل للطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية [9-11]، إذ تطرقت إلى دراسة تأثير نموذج الاضطراب في برنامج (ANSYS Fluent)، وعدد تقسيمات الشبكة الرقمية (Mesh) في نموذج المحاكاة للفوهة على حقل الجريان، إذ قام الباحث باستخدام نموذجي الاضطراب (k- ω) و(k- ϵ) والمقارنة بينهما [9]، وتشير النتائج إلى أنّ القيم الوسطية للسرعة في نموذج الاضطراب (k- ω) أعلى بالمقارنة مع نموذج الاضطراب (k- ϵ)، وبزيادة عدد تقسيمات الشبكة الرقمية (Mesh) تبين ازدياد رقم ماخ وانخفاض رقم رينولدز [10-11]، ودراسات أخرى ألفت الضوء على نمذجة الفوهات التي يتم تركيبها في مجرى الرياح في مقدمة العنفات الريحية بهدف زيادة سرعة الهواء بغية تحسين أداء العنفة وزيادة الطاقة الكهربائية الناتجة [12-13]، إذ توصل الباحث إلى ضرورة تركيب فوهة متقاربة بين العنفة الريحية ومسار الرياح لزيادة سرعة الرياح المتدفقة على شفرات العنفة، حيث لوحظ ازدياد في السرعة الأعظمية بمقدار ٢.٥ مرة، واتجهت أبحاث أخرى نحو تحليل الجريان من جانب آخر، ألا وهو دراسة الطبقة الحدية في الفوهات المتقاربة ثلاثية الأبعاد لجريان عالي السرعة، ذو دوامات، وتأثيرها على الجريان، وتم من خلالها دراسة نمو الطبقة الحدية وتأثير مختلف البارامترات عليها، كرقم رينولدز وزاوية المخروط [14-15-16]، توصل الباحث أنّه بزيادة رقم رينولدز تتخفض سماكة الطبقة الحدية عند زاوية مخروط محددة (40 degree) [14]، وبانخفاض زاوية ميل الفوهة تتخفض سماكة الطبقة الحدية عند قيمة محددة لرقم رينولدز ($Re=5*10^4$)، كما تشير النتائج أن 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 [15-16].

نستنتج مما سبق أنّ الدراسات السابقة لم تتطرق إلى نمذجة الجريانات ودراسة الطبقة الحدية الديناميكية باستخدام (CFD) ضمن الفوهات المتقاربة ثلاثية الأبعاد ذات الأبعاد الكبيرة عند سرعات جريان منخفضة، وغير انضغاطية (non-compressible)، حيث تأتي صفة عدم الانضغاطية لأنّ رقم ماخ ($M<0.3$) عند رقم ماخ منخفض يكون الجريان غير قابل للانضغاط) أو سرعة الهواء أصغر من (100m/sec) [١٧]، لأنّ أعلى قيمة تصل لها سرعة الهواء لدوران العنفات الريحية عند مقطع الخروج (15m/sec).

٢. أهمية البحث وأهدافه

تكمن أهمية البحث في تحليل وتحسين حقل الجريان، ودراسة تأثير درجة الحرارة وزاوية ميل الأنبوب المتغير المقطع على نمو الطبقة الحدية الديناميكية عند جدران الأنبوب باستخدام (CFD) للحصول على أعلى سرعة عند مقطع الخروج للأنبوب المتقارب.

٣. طرائق البحث ومواده

تمّ في هذا البحث نمذجة الجريان باستخدام تقنيات الـ CFD (Dynamic Fluid Computational)، وهي إحدى فروع ديناميك الموائع التي تستخدم الطرق العددية، والخوارزميات لحل المسائل التي تتضمن جريان الموائع، حيث يتم إجراء عملية محاكاة باستخدام الحاسب، وتمّ استخدام طريقة الحجم المنتهية (Finite Volume) FV، والتي تعتبر في الوقت الحالي من أهم التقنيات المستخدمة في الكثير من المجالات الهندسية، وتمّ استخدام برنامج (ANSYS Fluent2021R1) لحل معادلات الجريان (معادلة الاستمرار، معادلة الحركة نافير ستوكس، معادلة الطاقة).

٤. الدراسة النظرية

بناءً على مخطط توزع المناخ، وسرعة الرياح، ودرجة الحرارة، في المنطقة الساحلية صيفاً في القطر العربي السوري في شهر تموز [18] (تمّ أخذ القيم الوسطية لسرعة الرياح في شهر تموز لأن سرعة الرياح منخفضة في هذا الشهر في المنطقة الساحلية، ومنظومة تشغيل العنفات الريحية الموضحة في الشكل (١) تستخدم لتشغيل العنفات الريحية عند سرعة رياح منخفضة [2])، فكانت بارامترات الهواء عند مدخل المبادل الحراري كما هو مبين في الجدول التالي:

الجدول (١) بارامترات الهواء الجوي عند مدخل المبادل الحراري

30 c°	درجة حرارة الهواء الجوي (t ₀)
1.01325*10 ⁵ Pa	ضغط الهواء عند الشروط النظامية (P ₀)
3 m/sec	سرعة الرياح المتوسطة صيفاً (V ₀)

لذلك بناءً على ما تقدّم (وبفرض سرعة الهواء اللازمة لتدوير العنفة الريحية V₂=15m/sec وقطر العنفة D₂=1m) تمّ تحديد أبعاد الأنابيب المتقارب، وحساب مختلف البارامترات للهواء الساخن عند مدخل ومخرج الأنابيب، لذلك نرتب النتائج التي حصلنا عليها في الجدول (٢):

الجدول (٢) بارامترات الهواء عند مخرج المبادل وأبعاد البرج المتقارب [2]

85 c°	درجة حرارة الهواء عند مخرج المبادل الحراري (t ₁)
0.96 kg/m ³	كثافة الهواء عند مخرج المبادل (ρ ₁)
3.6 kg/m ³	سرعة الهواء الساخن عند مدخل الأنابيب المتقارب (V ₁)
2.041 m	قطر مقطع الدخول للبرج المتقارب (D ₁)
86 degree	زاوية ميل الأنابيب (Φ)
7.3 m	ارتفاع الأنابيب (H ₀)

- نوضح فيما يلي طريقة حساب القيم السابقة:

- حساب كثافة الهواء الجوي وفق معادلة الحالة للغازات المثالية [17]:

$$\rho_0 = \frac{P_0}{R \times T_0} \quad (1)$$

حيث: P₀: ضغط الهواء عند الشروط النظامية بالـ Pa، (وهو يساوي: 1.01325.10⁵Pa)

T₀: درجة حرارة الهواء الجوي بالـ K، (وهي تساوي: T₀=35+273=308K)

نعوض القيم السابقة في العلاقة (١)، تصبح قيمة الكثافة: ρ₀ = 1.1465 kg / m³

يتم تسخين الهواء عن طريق المبادل الحراري فترتفع درجة حرارته إلى 85c°، لذلك تكون كثافة الهواء عند مخرج المبادل

الحراري (بالعودة إلى جداول الخواص الفيزيائية والحرارية للهواء): ρ₁=0.96kg/m³

- حساب سرعة الهواء عند مدخل الأنبوب المتقارب ومقطع الخروج للمبادل الحراري (V_1)، نطبق معادلة الاستمرار بين مقطعي الدخول والخروج للمبادل الحراري (0,1) [17]:

$$\rho_0 V_0 A_0 = \rho_1 V_1 A_1 \quad (2)$$

حيث:

A_0 : مساحة مقطع الدخول للمبادل الحراري بالـ m^2

A_1 : مساحة مقطع الخروج للمبادل الحراري بالـ m^2

ρ_0 : كثافة الهواء الجوي عند مدخل المبادل الحراري بالـ kg/m^3

ρ_1 : كثافة الهواء عند مدخل الأنبوب المتقارب بالـ kg/m^3

بما أن مساحة مقطعي الدخول والخروج للمبادل متساويتين: $A_0 = A_1$ ، لذلك تؤول العلاقة (٢) إلى الشكل التالي:

$$\rho_0 V_0 = \rho_1 V_1 \quad (3)$$

نعوض القيم السابقة في العلاقة (٣) تصبح السرعة عند مخرج المبادل الحراري:

$$V_1 = \frac{\rho_0 V_0}{\rho_1} = \frac{1.1465 \times 3}{0.96} = 3.6m / sec$$

- حساب قطر مقطع الدخول D_1 للأنبوب المتقارب، نطبق معادلة الاستمرار بين مقطعي الدخول والخروج للأنبوب المتقارب كما يلي:

$$\rho_1 V_1 A_1 = \rho_2 V_2 A_2 \quad (4)$$

حيث: V_1 : سرعة الهواء الساخن عند مدخل الأنبوب المتقارب وهي تساوي: $V_1 = 3.6m/sec$ (وفق العلاقة (٣)).

V_2 : سرعة الهواء عند مقطع الخروج للأنبوب المتقارب وهي تساوي السرعة اللازمة لتدوير العنفة الريحية ($15m/sec$).

A_2 : مساحة مقطع الخروج للأنبوب المتقارب بالـ m^2 .

ρ_2 : كثافة الهواء عند مقطع الخروج للأنبوب المتقارب (وبما أن سرعة الهواء أقل من ($100m/sec$) لذلك يعتبر الجريان

غير قابل للانضغاط [١٧]) بالتالي: $\rho_1 = \rho_2$ ، لذلك تؤول العلاقة (٤) إلى الشكل التالي:

$$\Rightarrow V_1 A_1 = V_2 A_2 \quad (5)$$

- وفقاً للمعطيات السابقة فإن قطر العنفة عند مقطع الخروج $1m$ ، وبإضافة الخلوص بين نهاية شفرات العنفة وجدار الأنبوب: $b=10mm$ فيكون قطر مقطع الخروج من القانون التالي:

$$D_2 = D_T + (2 \times b) \quad (6)$$

حيث: D_T : قطر العنفة وهو يساوي $1m$.

يصبح قطر مقطع الخروج للأنبوب المتقارب (بالتعويض في العلاقة (٦)) كالتالي: $D_2 = 1.02m$

نعوض القيم السابقة في العلاقة (٥)، تصبح مساحة مقطع الدخول، وقطر مقطع الدخول كالتالي:

$$A_1 = \frac{V_2 A_2}{V_1} = \frac{15 \cdot \left(\frac{\pi \cdot (1.02)^2}{4} \right)}{3.6} = 3.272m^2 \Rightarrow D_1 = \sqrt{\frac{A_1 \cdot 4}{\pi}} = 2.041m$$

- حساب ارتفاع الأنبوب يعطى بالعلاقة التالية [19]:

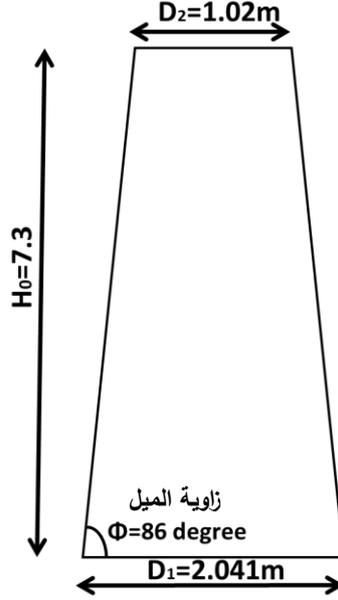
$$H_0 = \left(\frac{D_1 - D_2}{2} \right) \tan \left(\frac{\pi}{2} - \varphi \right) \quad (7)$$

حيث: φ : زاوية ميل الأنبوب المتقارب بالـ degree.

نوجد ارتفاع الأنبوب المتقارب، إذا كانت زاوية الميلان $\varphi = 86 \text{ deg}$ (بالتعويض في العلاقة (7)):

$$H_0 = \left(\frac{2.041 - 1.02}{2} \right) \tan(86) = 7.3 \text{ m}$$

بناءً على ما تقدّم نوضح أبعاد الأنبوب المتقارب، كما هو مبين في الشكل (٢):



الشكل (2) أبعاد الأنبوب المتقارب

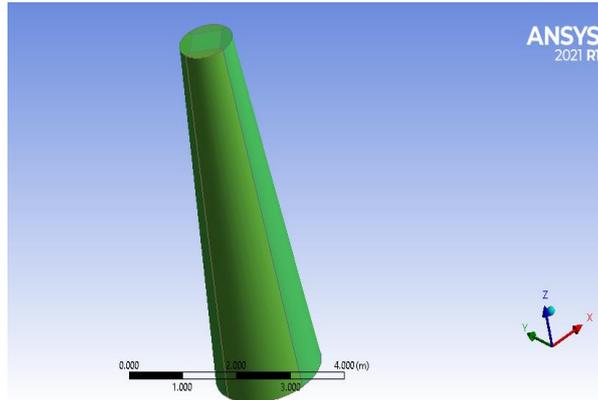
١.٤ - نمذجة الأنبوب المتقارب

تمّ رسم الأنبوب المتقارب كنموذج ثلاثي الأبعاد (3Dimensions) باستخدام تعليمة (Geometry) في برنامج

(Ansys Fluent) وفق الخطوات التالية:

أولاً: رسم الأنبوب المتقارب وفق الأبعاد السابقة وعند زوايا ميلان مختلفة ضمن المجال (82÷86) degree) كما هو

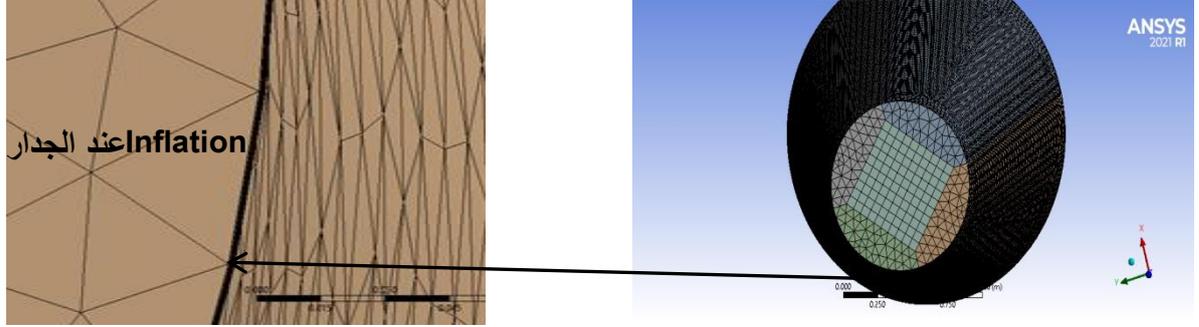
مبين في الشكل (٣):



الشكل (٣) نموذج البرج المتقارب ثلاثي الأبعاد

٢.٤ - إنشاء الشبكة الرقمية

تمّ تصميم الشبكة الرقمية من نوع (structure grid)، وتمّ اختيار هذا النوع من الشبكات للحصول على شبكة منتظمة بهدف الحصول على دقة عالية في الحل، كما تمّ تحقيق سماكة عند الجدار بواسطة تعليمة (inflation) لدراسة الطبقة الحدية كما هو مبين في الشكل (4):



الشكل (٤) الشبكة الرقمية للبرج المتقارب

تمّ نمذجة الجريان باستخدام (CFD Solver Level2-CFD Solver-Level1)، وتحديد الشروط الحدية (Boundary Conditions) وعدد التكرارات والشروط الابتدائية ونسبة التقارب للحل ($1e-6$) ونموذج الاضطراب، كما هو مبين في الجدول (٣):

الجدول (٣) مدخلات برنامج Ansys Fluent

Boundary Conditions	Inlet: Velocity Inlet Internal: Interior Surface Body Outlet: Pressure Outlet Wall: Walls
Monitors	Residual: Convergence Absolute Criteria $1e-6$
Run Calculation	Number of iterations: 10000000

٣.٤ - التحقق من صحة النتائج (Validation)

تمّ التحقق من دقة الحل وذلك عند زاوية محددة (86 degree) وفق محورين:

- ١- التحقق وفق دقة الشبكة الرقمية (Mesh Independence).
- ٢- التحقق عن طريق مقارنة النتائج لـ CFD مع النتائج التحليلية (النظرية).

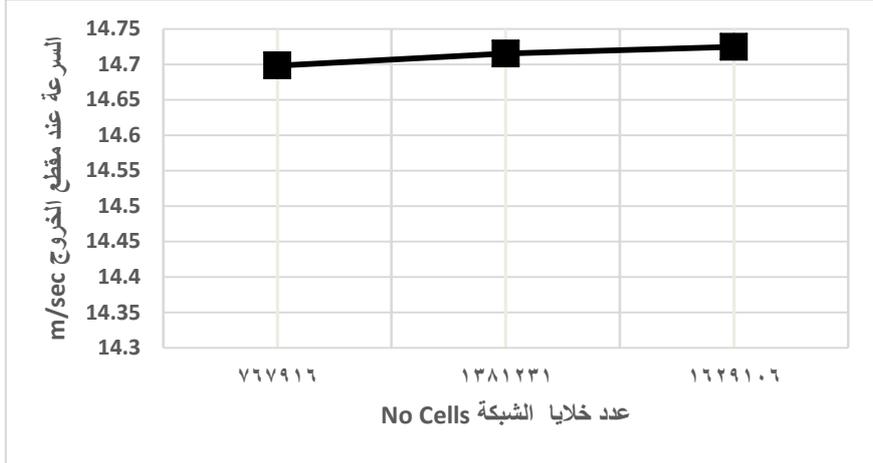
١) اختبار دقة الشبكة Mesh independence

تمّ اختبار دقة الشبكة عند ثلاثة أنواع من الشبكات باختلاف عدد الخلايا والعقد (شبكة ناعمة، شبكة متوسطة الخشونة، شبكة خشنة) [20]، وتمّ إيجاد سرعة الهواء عند مقطع الخروج باستخدام برنامج (Ansys Fluent)، كما هو مبين في الجدول التالي:

الجدول (٤) قيم السرعة عند مقطع الخروج مع تغير عدد الخلايا

عدد خلايا الشبكة	السرعة عند مقطع الخروج وفق (CFD) (m/sec)
767916	14.69827
1381231	14.71508
1629106	14.72454

والتمثيل البياني للعلاقة بين السرعة وعدد الخلايا الشكل (٥):



الشكل (٥) علاقة السرعة عند مقطع الخروج مع تغير عدد الخلايا

نلاحظ تقارب الحل بشكل كبير عند ازدياد عدد الخلايا من الشبكة المتوسطة الخشونة إلى الشبكة الخشنة، وبالتالي تم تحقيق اختبار الشبكة.

٢) التحقق وفق دقة الحل

تم التحقق من دقة الحل عن طريق مقارنة النتائج ل (CFD)، مع النتائج التحليلية (النظرية). للتحقق تمت المقارنة بين السرعة الناتجة عند مقطعي الدخول والخروج من (CFD) والسرعة النظرية التحليلية (إذ تمثل السرعة التحليلية عند مقطع الدخول للأنبوب المتقارب: $V_1=3.6\text{m/sec}$ (وفق العلاقة (3))، والسرعة النظرية التحليلية عند مقطع الخروج هي السرعة اللازمة لدوران العنفة الريحية: $V_2=15\text{m/sec}$ ، كما هو مبين في الجدول (٥):

الجدول (٥) مقارنة النتائج التحليلية ونتائج (CFD)

المقطع Section	النظري Theoretical	CFD
الدخول inlet	٣.٦	٣.٦
الخروج outlet	١٥	14.72454

حساب نسبة الخطأ بين القيمة التحليلية للسرعة والقيمة عند مقطع الخروج الناتجة عن (CFD) وفق القانون (8) [21]:

$$error \% = \left(\frac{V_{2(analytical)} - V_{2(CFD)}}{V_{2(analytical)}} \right) * 100 \quad (8)$$

حيث: $V_{2(analytical)}$: السرعة النظرية عند مقطع الخروج، وهي تساوي السرعة اللازمة لدوران العنفة:

$$V_{2(analytical)} = V_2 = 15m / sec$$

$V_{2(CFD)}$: سرعة الهواء عند مقطع الخروج لنموذج المحاكاة في برنامج (Ansys Fluent) وهي تساوي:

$$V_{2(CFD)} = 14.72454m / sec$$

نعوض القيم السابقة في العلاقة (8)، تصبح نسبة الخطأ: $error\% = 1.83\%$

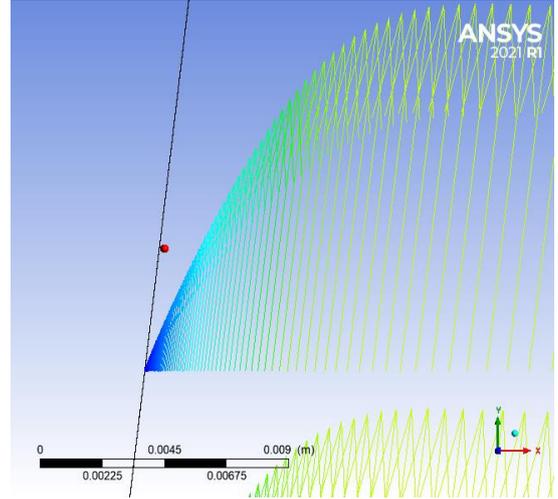
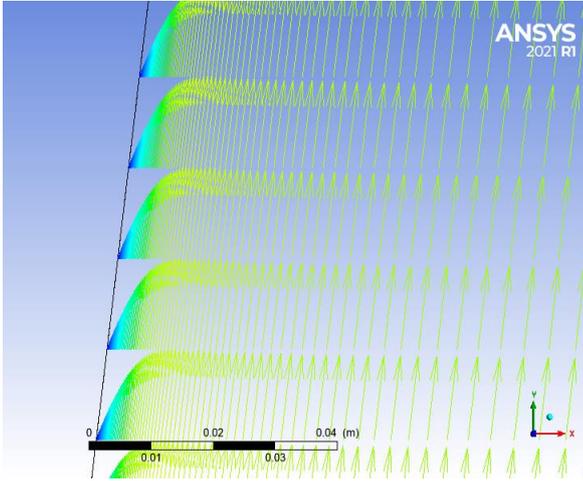
نلاحظ أن قيمة الخطأ ضئيلة جداً وهي أصغر من 5% فالتطابق مقبول [22].

٥. النتائج والمناقشة

١.٥ - دراسة الطبقة الحدية

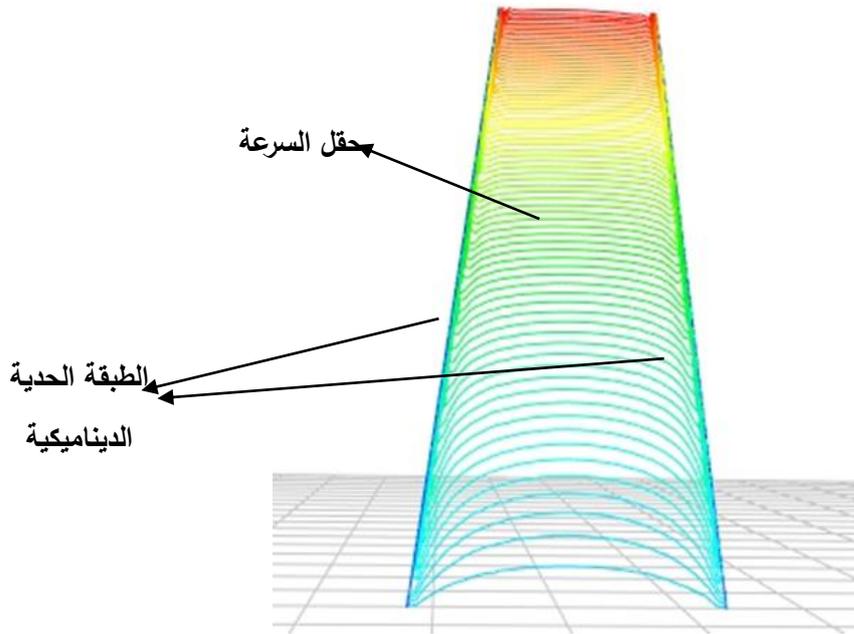
إن سرعة الجريان عند الجدار تساوي الصفر نتيجة شرط عدم الانزلاق، وتزداد تدريجياً حتى تصل إلى السرعة

العظمى عند محور الأنبوب، كما هو مبين في الشكل (٦):



الشكل (٦) أشعة السرعة بالقرب من الجدار

نتيجة ذلك تتكون الطبقة الحدية الديناميكية قرب جدار الأنبوب كما هو مبين في الشكل (٧):



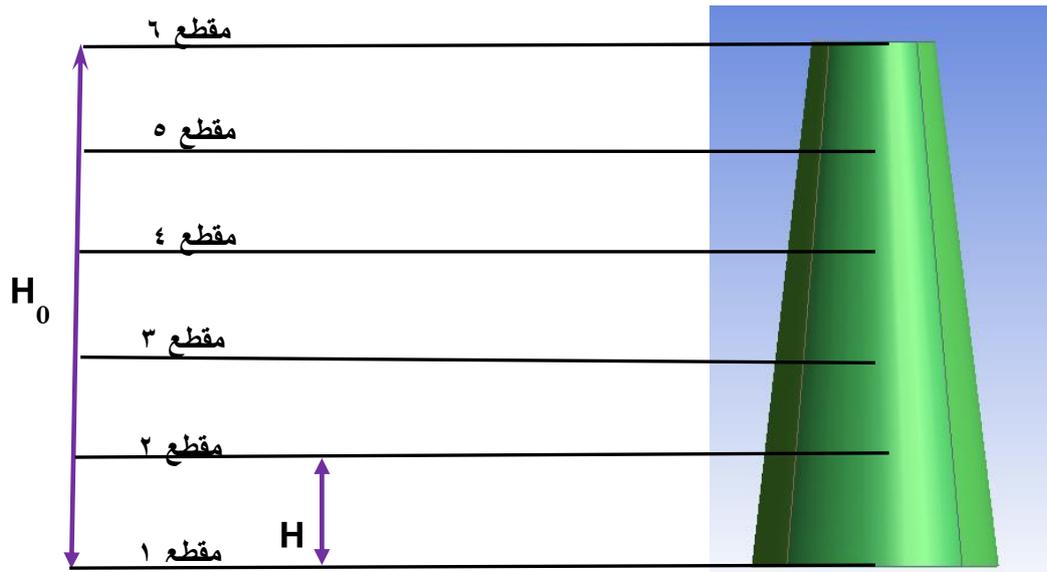
الشكل (٧) حقل السرعة في الأنبوب المتقارب والطبقة الحدية الديناميكية عند الجدران

أولاً: حالة تسخين الهواء

تم استخدام برنامج (Ansys Fluent) لدراسة تغير سماكة الطبقة الحدية بالقرب من جدار الأنبوب عند زوايا ميل مختلفة:

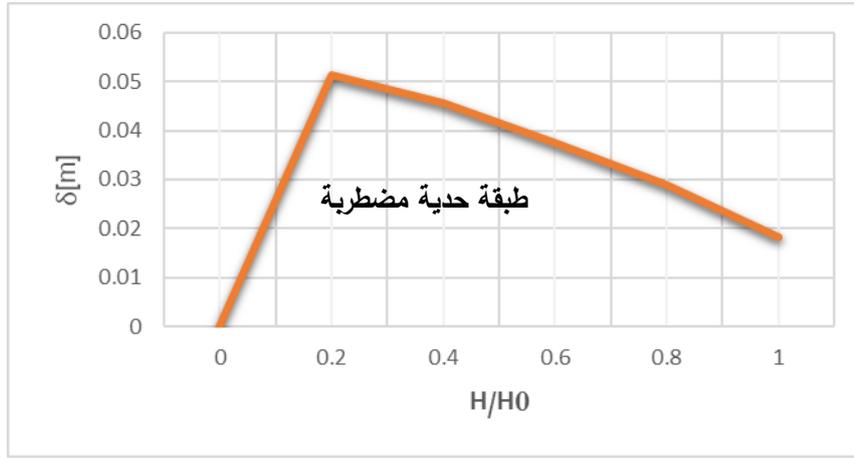
١- عند زاوية الميل (86 degree):

لتمثيل الطبقة الحدية بالقرب من جدار الأنبوب المتقارب، تم أخذ عدة مقاطع للبرج ابتداءً من المدخل (inlet) حتى مقطع الخروج (outlet)، كما هو مبين في الشكل (٨):



شكل (٨) المقاطع المأخوذة من الأنبوب

تمّ حساب سماكة الطبقة الحدية عند كل مقطع باستخدام (Ansys Fluent)، ويرسم التغيرات النسبية لسماكة الطبقة الحدية (δ) على كامل جدار الأنبوب، كما هو مبين في الشكل (٩):



الشكل (٩) تغير سماكة الطبقة الحدية النسبية عند الزاوية 86degree

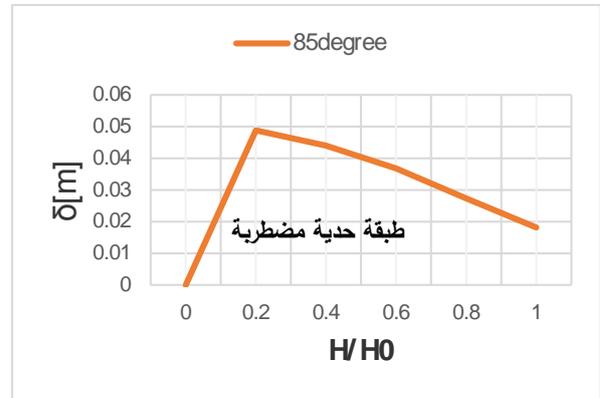
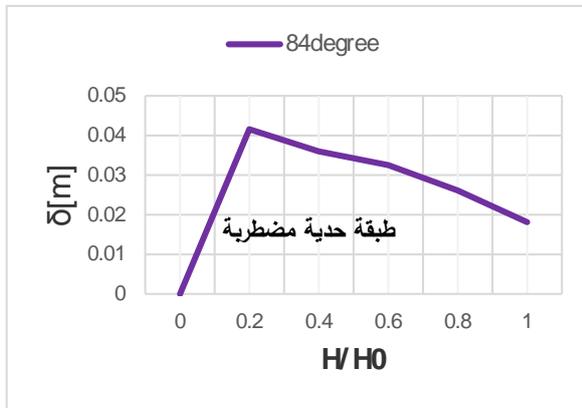
تمّ أخذ تنسيق المحاور في المخطط السابق (الشكل (٩)) كما يلي:

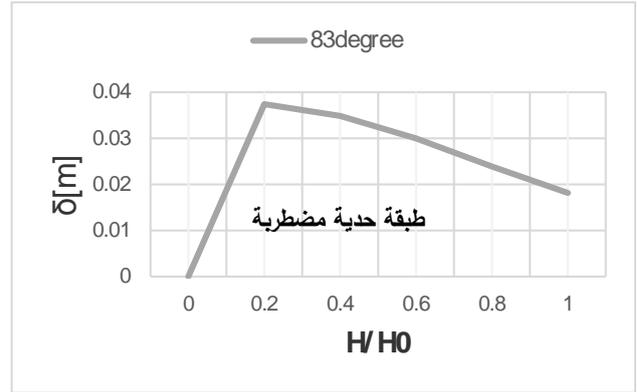
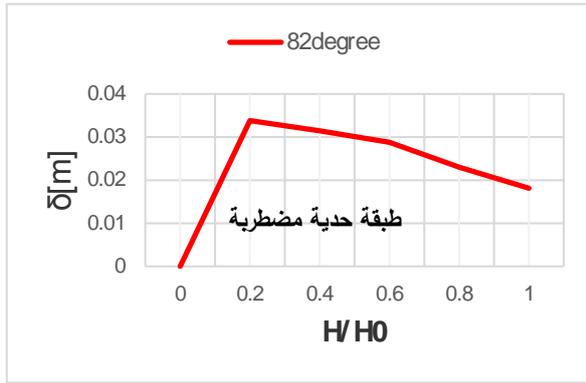
– **المحور الأفقي:** تمّ تنسيق المحور الأفقي بشكل لا بعدي، إذ يمثل نسبة بُعد كل مقطع من المقاطع السابقة الموضحة في الشكل (٨) عن مقطع الدخول H إلى كامل ارتفاع الأنبوب H_0 حيث: H_0 : ارتفاع الأنبوب عند الزاوية (86 degree)، وهو يساوي: $H_0=7.3$ كما هو مبين في الشكل (٢)؛ H : ارتفاع متغير ضمن المجال $[H_0-0]$ ؛

على سبيل المثال: عند مدخل الأنبوب: $H=0$ فإنّ النسبة: $\frac{H}{H_0}=0$ ؛ وعند المخرج إنّ: $H=H_0$ فالنسبة: $\frac{H}{H_0}=1$ ؛ عند

$$\frac{H}{H_0} = 0.2 \Rightarrow H_{(section 2)} = 0.2 * H_0 = 0.2 * 7.3 = 1.46m \text{ : فإنّ 2 المقطع}$$

حيث: $H_{(section 2)}$: يمثل بعد المقطع (٢) عن مقطع الدخول، والذي يشكل بدوره مقدار (٢٠%) من الارتفاع الكلي للأنبوب وهكذا بالنسبة لباقي المقاطع، وأما بالنسبة للمحور الشاقولي يمثل سماكة الطبقة الحدية الديناميكية. بناء على ما تقدم تمّ إيجاد تغير سماكة الطبقة الحدية عند زوايا ميلان مختلفة كما هو مبين في الشكل (١٠):





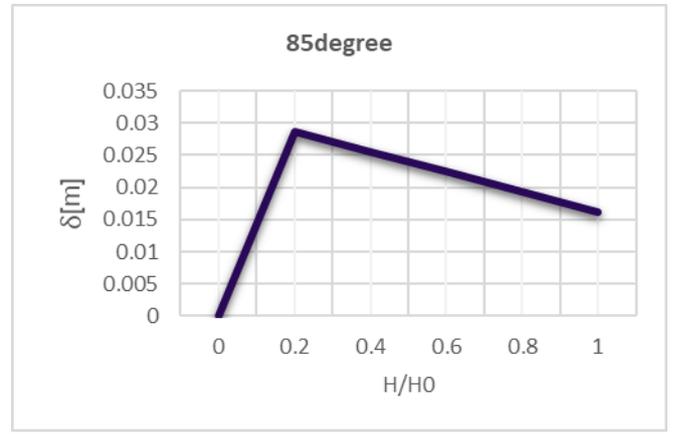
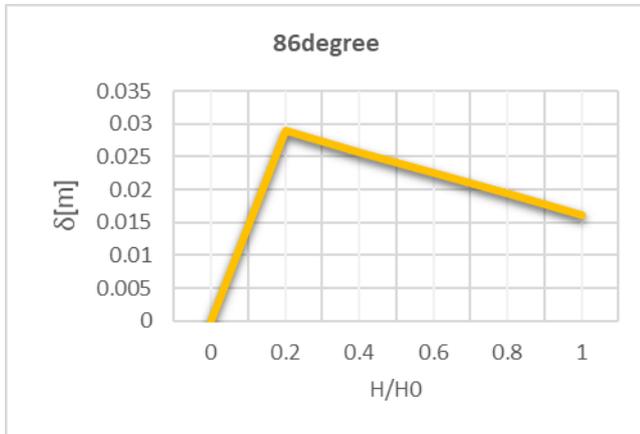
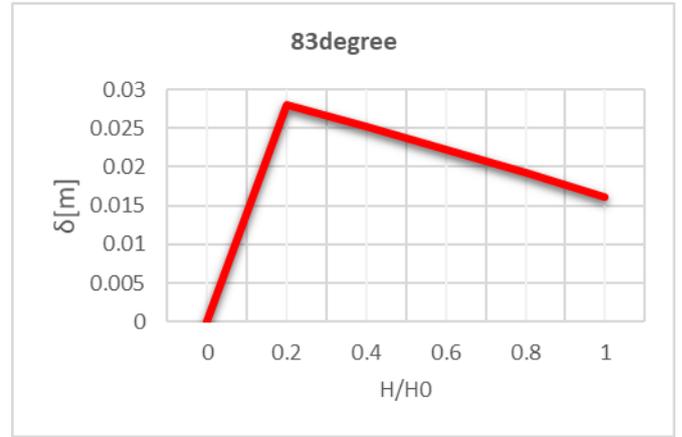
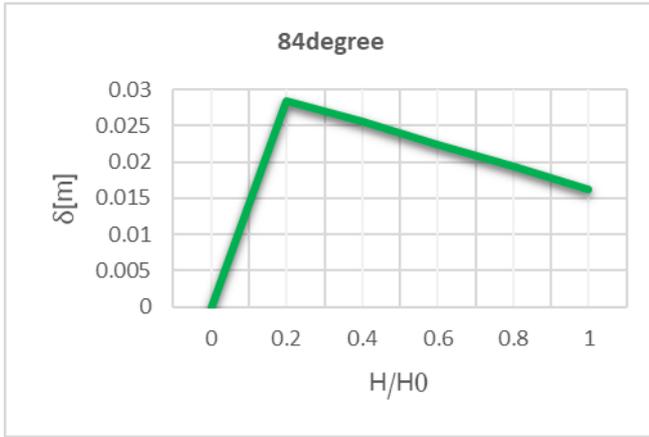
الشكل (١٠) تغير سماكة الطبقة الحدية النسبية عند زوايا ميل مختلفة عند تسخين الهواء

نلاحظ من المخططات السابقة أنّ سماكة الطبقة الحدية الديناميكية تصل إلى أعلى قيمة لها على ارتفاع (٢٠%) من الارتفاع الكلي للبرج ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى أخفض قيمة عند مقطع الخروج للأنبوب، وهذا محقق وفق معادلة الاستمرار: $\rho V A = const$ بسبب زيادة السرعة نتيجة تضيق المقطع (إذ يوجد تناسب عكسي بين مساحة مقطع الأنبوب والسرعة) [23].

ثانياً: حالة عدم تسخين الهواء:

تمّ وباستخدام برنامج (Ansys Fluent) الحصول على مخططات نمو الطبقة الحدية عند جدار الأنبوب دون

إجراء عملية تسخين للهواء الجوي عند زوايا ميل مختلفة (86-82) degree) كما هو مبين في الشكل (١١):



الشكل (١١) تغير سماكة الطبقة الحدية عند زوايا ميل مختلفة عند عدم تسخين الهواء

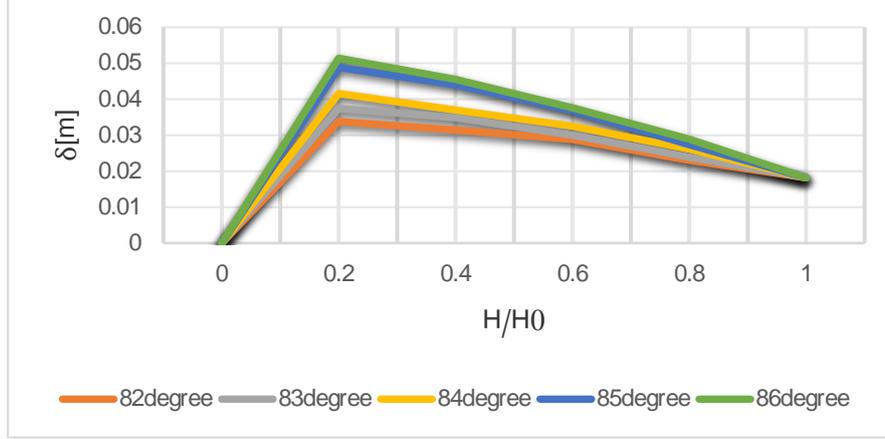
٢.٥ - مناقشة تأثير زاوية الميل:

لدراسة تأثير زاوية ميل الأنبوب تمت مقارنة النتائج التي حصلنا عليها عند زوايا الميل المختلفة في حالتنا التسخين

وعدم التسخين، كما يلي:

أولاً: حالة التسخين:

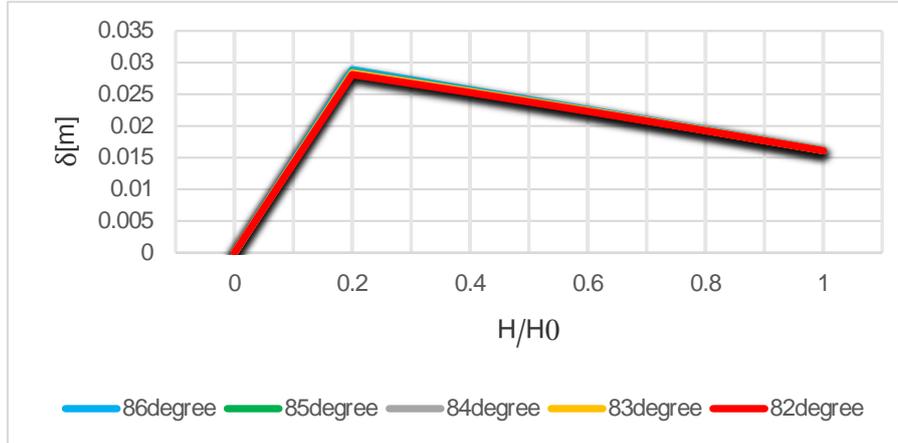
لتبيان علاقة زاوية الميل مع سماكة الطبقة الحدية عند منطقة الجدار في حالة تسخين الهواء الجوي، تمّ رسم مخطط تغير سماكة الطبقة الحدية عند زوايا ميل مختلفة، كما هو مبين في الشكل (١٢):



الشكل (١٢) تغير سماكة الطبقة الحدية عند زوايا ميل مختلفة للبرج المتقارب (حالة التسخين)

نلاحظ من الشكل (١٢) أنه عند تغير الزاوية ضمن المجال [82-86]، فإن سماكة الطبقة الحدية تصل إلى أعلى قيمة لها على ارتفاع (٢٠%) من مدخل الأنبوب ثم تبدأ السماكة بالانخفاض باتجاه مقطع الخروج حتى تصل إلى أخفض قيمة لها عند مقطع الخروج، وهذا الانخفاض بسبب زيادة السرعة عند مقطع الخروج بسبب معادلة الاستمرار: $\rho V A = const$ (إذ يحدث تسارع في جريان المائع بسبب تناقص مساحة المقطع)، كما نلاحظ من المخطط أنه بانخفاض زاوية ميل الأنبوب تنخفض سماكة الطبقة الحدية.

ثانياً: حالة عدم التسخين: يوضح الشكل (١٣) تغير سماكة الطبقة الحدية بدون تسخين الهواء تبعاً لزاوية الميل:



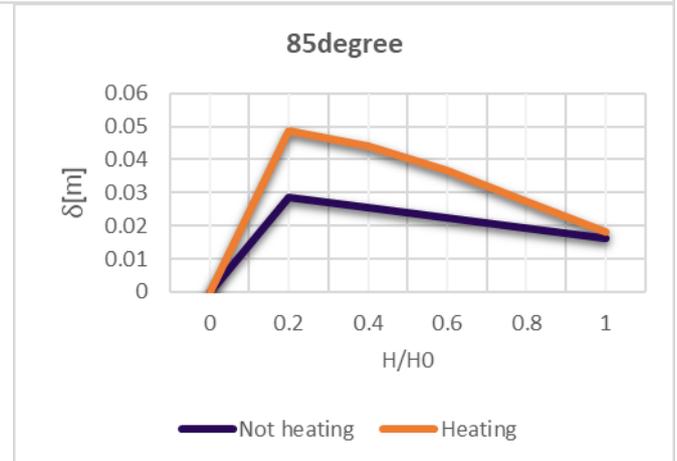
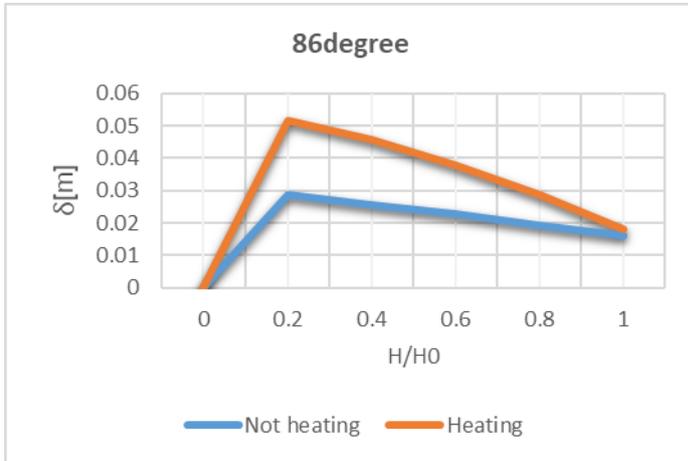
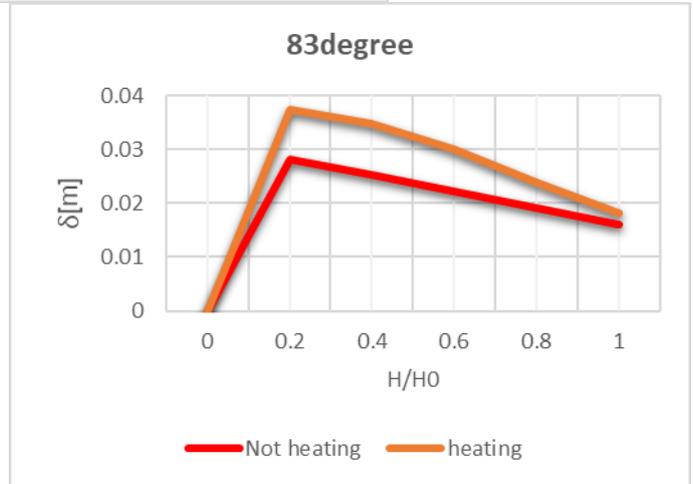
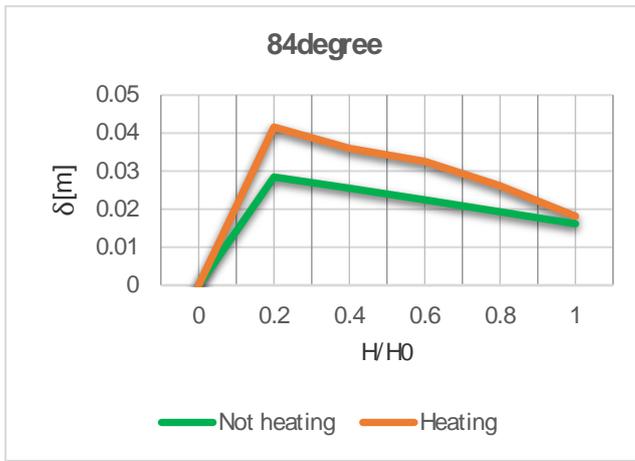
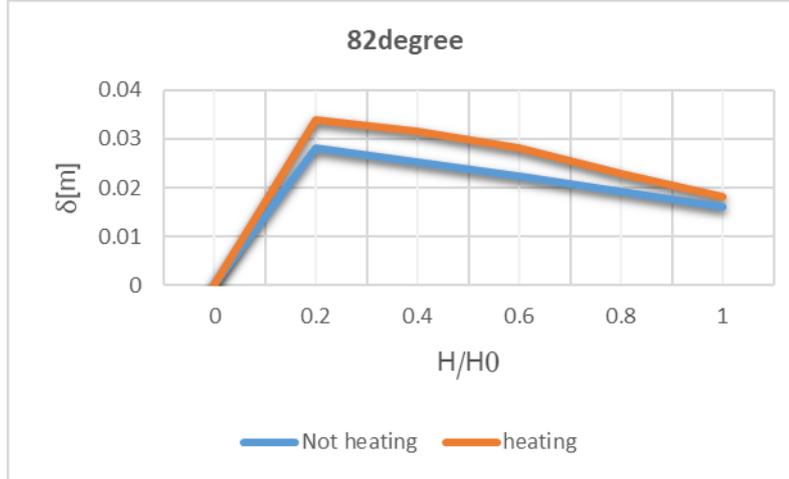
الشكل (١٣) تغير سماكة الطبقة الحدية عند زوايا ميل مختلفة للبرج المتقارب (عدم التسخين)

نلاحظ من المخططات السابقة في حال عدم تسخين الهواء فإن التغيرات في سماكة الطبقة الحدية على كامل ارتفاع الأنبوب مع تغير زاوية الميل طفيفة جداً تكاد تكون مهملة.

٣.٥ - تأثير التسخين على نمو الطبقة الحدية:

لتبيان تأثير التسخين على سماكة الطبقة الحدية نرسم تغير سماكة الطبقة الحدية في حالتي التسخين وعدم التسخين

عند كل زاوية ميل للأنبوب كما هو مبين في الشكل (١٤):



الشكل (١٤) تغير سماكة الطبقة الحدية في حالتي التسخين وعدم التسخين عند كل زاوية ميل للأنبوب

نلاحظ من الشكل (١٤) أن سماكة الطبقة الحدية في حالة تسخين الهواء عند مختلف مقاطع الأنبوب أكبر من سماكة الطبقة الحدية في حالة عدم التسخين، وهذا محقق نظراً لأن لزوجة الهواء (ν) تزداد عند ارتفاع درجة حرارته [24]، وبالتالي فإن سماكة الطبقة الحدية تكون أكبر في حال تسخين الهواء الجوي عند مختلف زوايا ميلان الأنبوب.

٦. الاستنتاجات

- من خلال ما تقدّم خلص الباحث إلى مجموعة من الاستنتاجات التالية:
١. إنّ استخدام تقنية CFD مكّن من الحصول على نتائج دقيقة، إذ تبين أنّه من خلال تحليل ومقارنة نتائج المحاكاة الرقمية مع القيم النظرية وجود تطابق كبير بينهما، وبالتالي فإنّ نموذج المحاكاة صحيح.
 ٢. إنّ عملية تسخين الهواء الجوي ذي السرعة المنخفضة أدت إلى زيادة سرعته إلى السرعة (3.6m/sec)، بالتالي تمّ من خلال التسخين تحقيق أمرين هامين هما زيادة سرعة الهواء هذا من جانب، ومن جانب آخر تحفيز الهواء ليندفع نحو الأعلى (بسبب انخفاض كثافته) باتجاه الأنبوب المتقارب.
 ٣. إنّ استخدام المقطع المتقارب أدى إلى زيادة سرعة الهواء من مدخل الأنبوب المتقارب (3.6m/sec) إلى السرعة (15m/s).
 ٤. تبين من خلال حقل السرعة وجود تدرج سرعة داخل الأنبوب المتقارب حيث تبدأ السرعة من قيمة الصفر عند الجدران، ثمّ تزداد تدريجياً حتى تصل إلى أعلى قيمة عند محور الأنبوب.
 ٥. تبين وجود تأثير لزاوية ميل الأنبوب على سماكة الطبقة الحدية الديناميكية، حيث تتخفّف سماكة الطبقة الحدية بمقدار 34.2% بانخفاض زاوية الميل.
 ٦. تصل سماكة الطبقة الحدية (في حالتي التسخين وعدم التسخين) إلى قيمة أعظمية على ارتفاع (٢٠%) من مدخل الأنبوب المتقارب، ثم تعود بالانخفاض تدريجياً حتى تصل إلى قيمة أصغر عند مقطع الخروج.
 ٧. تبين تأثير تسخين الهواء على سماكة الطبقة الحدية الديناميكية، إذ تزداد سماكة الطبقة الحدية عند ارتفاع درجة الحرارة عند مختلف زوايا ميل الأنبوب، حيث يتراوح مقدار الزيادة ضمن المجال (٧٧.٩-٢٠.٣٥) عند تغيير زاوية الميل ضمن المجال (86-82) degree بالترتيب.
 ٨. إنّ تأثير زاوية الميل على سماكة الطبقة الحدية في حالة عدم تسخين الهواء طفيف جداً ويكاد يكون مهملاً.

التوصيات:

١. بناء نموذج تجريبي وإجراء كافة القياسات للسرع في نقاط مختلفة من حقل الجريان بهدف دراسة الطبقة الحدية تجريبياً وإجراء مقارنة بين نتائج المحاكاة والنتائج التجريبية.

المراجع

- [1] محمود، حبيب، محمد. ٢٠٠٧، *ديناميك الغازات*. مديرية الكتب والمطبوعات جامعة تشرين، الجمهورية العربية السورية، ٦١٩.
- [2] 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 ٤٤، العدد ٢، ٤٢-٢٩.
- [3] حسن، أيوب، عيسى، ٢٠٠٨، *انتقال الحرارة والكتلة*. مديرية الكتب والمطبوعات جامعة تشرين، الجمهورية العربية السورية، ٧٨٩.
- [4] SHARMA, N, K; KUMAR, A; SHARMA, A; SINGH, B, P. 2020, *CFD Analysis of Convergent-Divergent Nozzle*. *Aegaeum Journal*, Vol.8, No.6, 1359-1372.
- [5] KHAN, S, A; ABID, A; IBRAHIM, O, M. 2021, *CFD Analysis of Compressible Flows in A Convergent-Divergent Nozzle*. *Elsevier ScienceDirect*, U.S.A, Vol.46, 2835-2842.
- [6] VENKATESH, V; JAYA, C. 2015, *Modeling and Simulation of Supersonic Nozzle Using Computational Fluid Dynamics*. *International Journal of Novel Research in Interdisciplinary Studies*, Vol. 2, No.6, 16-27.
- [7] MOHAN, N, P. 2016, *Modeling and Simulation of Convergent-Divergent Nozzle Using Computational Fluid Dynamics (CFD)*. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, India, Vol.3, No.8, 346-350.
- [٨] ANDE, R; VENKATA, N; YERRABOINA, K. 2018, *Numerical Investigation on Effect of Divergent Angle in Convergent-Divergent Rocket Engine Nozzle*. *Chemical Engineering transactions*, Vol.66, 787-792.
- [9] KABIR, A; HAFIZ, A. 2019, *Modeling and Simulation of Supersonic Convergent-Divergent Nozzle Using Computational Fluid Dynamics (CFD)*. *International Conference on Engineering Research, Innovation and Education*, SUST SYLHET, Vol.5, 7.
- [10] 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, 58-65.
- [11] SHAHIN, A; ELATTAR, A. 2017, *Numerical Simulation of a Rocket Propulsion Nozzle During the Startup Condition*. *ResearchGate*, 7.
- [12] 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.
- [13] CHAUDHARI, C; WAGHMARE, S, A; ASHISH, K. 2013, *Numerical Analysis of Venturi Ducted Horizontal Axis Wind Turbine for Efficient Power Generation*. *International Journal of Mechanical Engineering and Computer Applications*, India, Vol.1, No.5, 90-93.
- [14] 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, 258-265.
- [15] 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.
- [16] 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.

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

[18] أطلس الرياح في القطر العربي السوري.

[19] حسن، أيوب. ٢٠١١، تحسين أداء عمل العنفة الريحية في المنطقة الساحلية. مجلة جامعة تشرين العلوم

الهندسية، الجمهورية العربية السورية، المجلد ٣٣، العدد ٦، ١٦.

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

[21] خلوف، علي؛ محمد، نسرين؛ محمد، علي؛ ٢٠٢١، حساب مقاومة السفينة DTMB 54151 باستخدام

ديناميك الموائع الحاسوبي CFD. مجلة جامعة تشرين العلوم الهندسية، الجمهورية العربية السورية، المجلد ٤٣، العدد ٢،

٧٧-٨٧.

[22] 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.

حسن، أيوب، عيسى. الترموديناميك /٢/. ٢٠١٣، منشورات جامعة تشرين، الجمهورية العربية السورية،

[23] ٧٣٠.

[24] ROGERS, G; MAYHEW, Y. 2014, *Engineering Thermodynamics Work and Heat Transfer*. Fourth Edition , PEARSON, 711.