

تحليل عددي وتجريبي لتأثير تسخين الهواء في الأنابيب متغيرة المقطع على السرعة وحقل درجة الحرارة عند سرعات جريان منخفضة

* الدكتور أيوب حسن

** الدكتور محمد علي

*** الدكتور هيثم عيسى

**** مي نهاد سعيد

الملخص

تمّ في هذا البحث دراسة تأثير تسخين الهواء في الأنابيب المتغيرة المقطع على حقل السرعة وتوزع درجة الحرارة تحليلياً وتجريبياً، تمّت الدراسة التحليلية للجريان باستخدام CFD واستخدام برنامج ANSYS FLUENT2021R1 لإجراء نمذجة ومحاكاة عددية لجريان الهواء ضمن الأنابيب المتغير المقطع، وتمّ التحقق من النتائج التحليلية عن طريق مقارنة النتائج التحليلية مع النتائج التجريبية لدرجة الحرارة والسرعة في حالتي تسخين الهواء وعدم التسخين من خلال بناء نموذج تجريبي وإجراء مختلف التجارب بهدف الحصول على أعلى سرعة عند مقطع الخروج.

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

تحليل عددي وتجريبي لتأثير تسخين الهواء في الأنابيب متغيرة المقطع على السرعة وحقل درجة الحرارة عند سرعات جريان منخفضة

أظهرت النتائج تأثير التسخين على السرعة عند مقطع الخروج للأنبوب، إذ تزداد السرعة بمقدار 15% برفع درجة حرارة الهواء بمقدار 45°C ، كما تبين من خلال مقارنة القيم التحليلية لدرجة الحرارة في نقاط مختلفة في حقل درجة الحرارة في نموذج المحاكاة العددية للأنبوب المتقارب والقيم التجريبية لقراءات درجة الحرارة للمزدوجات الحرارية من خلال منصة PLC التوافق بين القيم التحليلية والقيم التجريبية إذ كانت أعلى نسبة خطأ 2.78%، وبمقارنة النتائج التجريبية والعددية لسرعة الهواء عند مخرج الأنبوب في حالتي التسخين وعدم التسخين كان الخطأ النسبي للحالتين بحدود 12.5% عند التسخين و 12.13% بدون تسخين، بالتالي فإنّ نموذج المحاكاة العددية للمنشأة الحقيقية صحيح.

الكلمات المفتاحية: الأنبوب المتغير المقطع، CFD، حقل درجة الحرارة، سرعة الهواء، التسخين.

Numerical and Experimental Analysis of the Effect of Air Heating in Pipes of Variable Cross-Section on the Velocity and Temperature Field at Low Flow Speeds

¹Dr. Ayoub Hasan

**Dr Mohamed Ali

*** Dr Heithem Issa

**** Mai Nuhad Saaeed

Abstract

In this research, the effect of heating the air in the variable-section pipes on the velocity field and temperature distribution was studied analytically and experimentally, the flow was analytically studied by using CFD and the ANSYS FLUENT2021R1 program was used to conduct numerical modeling and simulation of the air flow within the variable-section pipe, and the analytical results were verified by comparing the analytical results with the experimental results for temperature and speed in the cases of air heating and non-heating by building an experimental model and

*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.

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

conducting various experiments for obtaining the highest speed at the exit section.

The results showed the effect of heating on the velocity at the exit section of the pipe, as the velocity increases 15% by raising the air temperature by 45°C, It was also shown by comparing the analytical values of the temperature at different points in the temperature field in the numerical simulation model of the converging tube and the experimental values of the temperature readings for the thermocouples through the PLC platform, that the analytical values and the experimental values were identical, as it was the highest percentage of error to 2.78%, and by comparing the experimental and numerical results of the air velocity at the tube exit in the cases of heating and non-heating, the relative error for the two cases was approximately 12.5% at the heating and 12.13% without heating, Therefore, the numerical simulation model of the real facility is correct.

Key Words: Pipe of Variable Cross-Section, CFD, Temperature Field, Air Velocity, Heating.

فهرس الرموز والوحدات المستخدمة

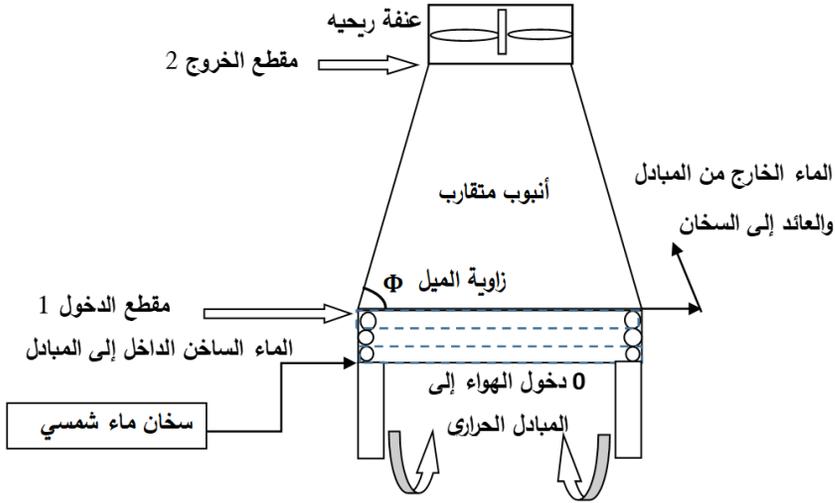
الرمز	المفهوم الفيزيائي والوحدة	الرمز	المفهوم الفيزيائي والوحدة
H_{1P}	ارتفاع الأنبوب المتغير المقطع [m]	Re	رقم رينولدز
H_{1m}	ارتفاع الأنبوب المتغير المقطع في النموذج [m]	Nu	رقم نوسل
H_{2p}	ارتفاع الأسطوانة في المنشأة الحقيقية [m]	Pr	رقم براندل
H_{2m}	ارتفاع الأسطوانة في النموذج [m]	V_a	اللزوجة الحركية للهواء [m ² /s]
V_{1m}	سرعة الهواء عند مدخل الأنبوب في النموذج [m/s]	T_{a1}	درجة حرارة الهواء الجوي [K]
V_{1p}	سرعة الهواء عند مدخل الأنبوب في المنشأة الحقيقية [m/s]	T_{a2}	درجة حرارة الهواء عند مخرج المبادل الحراري [K]
V_{1p}	لزوجة الهواء عند مدخل المنشأة الحقيقية [m ² /s]	D_T	قطر العنفة الريحية [m]
V_{1m}	لزوجة الهواء عند مدخل النموذج [m ² /s]	V_2	سرعة العنفة الريحية عند مقطع الخروج للمنشأة [m/s]
T_{1m}	درجة حرارة الهواء عند مدخل الأنبوب في النموذج [K]	ρ_a	الكثافة النوعية للهواء عند مدخل المبادل [kg/m ³]
r_i	نصف قطر مقطع الدخول للأنبوب المتقارب [m]	ρ_1	الكثافة النوعية للهواء عند مخرج المبادل [kg/m ³]
δ_d	سماكة الطبقة الحدية الديناميكية [mm]	V_a	سرعة الرياح [m/s]
δ_{dm}	سماكة الطبقة الحدية الديناميكية في النموذج [mm]	V_{1p}	سرعة الهواء عند مخرج المبادل الحراري [m/s]
δ_t	سماكة الطبقة الحدية الحرارية [mm]	D_{2P}	قطر مقطع الخروج للأنبوب المتغير المقطع [m]
δ_{tm}	سماكة الطبقة الحدية الحرارية في النموذج [mm]	D_{1P}	قطر مقطع الدخول للأنبوب المتغير المقطع [m]
D_{2m}	قطر مقطع الخروج للأنبوب في النموذج [m]	D_{1m}	قطر مقطع الدخول في النموذج [m]

1. مقدمة

يقود التوجه العالمي نحو استخدام الطاقات البديلة لتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري والحفاظ على البيئة، باستخدام طاقة الرياح لما تنتجه من ملايين الميغاوات على مدار العام، تساهم منشأة تشغيل العنفة الريحية المقترحة في توليد الطاقة الكهربائية في المناطق منخفضة سرعة الرياح [1]، ويشكل الأنبوب المتقارب العنصر الأساس في المنشأة إذ يساهم في زيادة سرعة الهواء إلى السرعة اللازمة لدوران العنفة الريحية، وتمت الدراسة التحليلية والتجريبية لحقل درجة الحرارة ضمن الأنبوب المتقارب ودراسة تأثير تسخين الهواء على السرعة عند مقطع الخروج، الأمر الذي يؤمن عمل العنفة الريحية وتوليد الطاقة الكهربائية.

تم اعتماد أنبوباً متغير المقطع في منشأة تشغيل العنفات الريحية [1]، كما هو مبين في

الشكل (1):



الشكل (1) مخطط منظومة تشغيل العنفة الريحية

يقوم سخان الماء الشمسي بتسخين الماء الذي يشكل الوسيط الحراري الساخن، ويدخل إلى مبادل حراري (ماء-هواء) لتسخين الهواء الجوي الذي يشكل الوسيط الحراري البارد [2]، عند مرور الهواء الجوي عبر المبادل الحراري ترتفع درجة حرارته، وتخفض كثافته ويرتفع نحو الأعلى باتجاه الأنبوب المتقارب، وتزداد سرعته بطريقتين الأولى من التسخين والثانية من تغير مقطع الأنبوب كون التدفق ثابت حتى تصل إلى أعلى سرعة عند مخرج الأنبوب [3]، حيث يصطدم بشفرات العنفة الريحية ويؤدي إلى تدويرها وتوليد الطاقة الكهربائية.

2. هدف البحث

يهدف البحث إلى دراسة تحليلية وتجريبية لحقل السرعة وحقل درجة الحرارة، ودراسة تأثير درجة الحرارة على السرعة عند مقطع الخروج عن طريق حل معادلات الجريان باستخدام تقنية CFD للحصول على أعلى سرعة عند مقطع الخروج للأنبوب المتقارب (وفق شروط البحث الموجودة)، وتم استخدام نموذج تجريبي للتحقق من صحة النتائج الرقمية، وذلك بهدف الحكم على صحة النتائج التحليلية للمنشأة الحقيقية.

3. مواد وطرق البحث

تم في هذا البحث نمذجة الجريان باستخدام تقنية الـ (Dynamic Fluid CFD Computational) إحدى فروع ديناميك الموائع التي تستخدم الطرق العددية، والخوارزميات لحل المسائل التي تتضمن جريان الموائع [4]، تمت عملية المحاكاة باستخدام الحاسب، وباستخدام برنامج (ANSYS Fluent2021R1) لحل معادلات الجريان (معادلة الاستمرار، معادلة الحركة نافير ستوكس، معادلة الطاقة)، وتم التحقق تجريبياً من صحة النتائج العددية من خلال بناء نموذج تجريبي وإجراء كافة التجارب عليه لقياس درجات الحرارة والسرعة.

تحليل عددي وتجريبي لتأثير تسخين الهواء في الأنابيب متغيرة المقطع على السرعة وحقل درجة الحرارة عند سرعات جريان منخفضة

4. دراسة نظرية

1.4 أبعاد الأنبوب المتقارب في المنشأة الحقيقية

تمّ تصميم الأنبوب المتقارب بناءً على المعطيات التالية الموضحة في الجدول

(1):

الجدول (1) معطيات تصميم الأنبوب المتقارب [5]

35°C	درجة حرارة الهواء الجوي ' T_{a1}
6m/s	سرعة العنفة الريحية عند مقطع الخروج للمنشأة
1.25m	قطر العنفة الريحية
2m/s	سرعة الرياح كقيمة متوسطة
80°C	درجة حرارة الهواء عند مخرج المبادل الحراري
1.14[kg/m ³]	الكتلة النوعية للهواء عند مدخل المبادل الحراري
1.015 [kg/m ³]	الكتلة النوعية للهواء عند مخرج المبادل الحراري

بناءً على المعطيات السابقة تمّ الحصول على أبعاد الأنبوب المتغير المقطع وذلك بتطبيق معادلة الاستمرار بين مقطعي الدخول والخروج للمبادل الحراري وبين مقطعي الخول والخروج للأنبوب المتغير المقطع [6]، نرتّب النتائج التي حصلنا عليها في الجدول (2):

الجدول (2) أبعاد الأنبوب المتغير المقطع وسرعة الهواء عند مدخله [3]

سرعة الهواء عند مدخل الأنبوب المتغير المقطع	2.3[m/s]
قطر مقطع الخروج للأنبوب المتقارب	1.25 [m]
قطر مقطع الدخول للأنبوب المتغير المقطع	2.014[m]
زاوية ميل الأنبوب المتقارب	82[degree]
ارتفاع الأنبوب المتقارب	2.646[m]
ارتفاع الأسطوانة في الأنبوب المتقارب	60[cm]

2.4 النموذج التجريبي

نظراً لصعوبة تصميم المنشأة الأصلية بسبب الكلفة العالية، وصعوبة إجراء مختلف أنواع التجارب عليها كقياس درجات الحرارة والسرع في نقاط مختلفة من الأنبوب المتغير المقطع، تمّ بناء نموذجاً مصغراً Model لمنشأة تشغيل العنفة الريحية Prototype وفق قوانين التشابه، والتي تتضمن [3]:

- التشابه الهندسي.
- التشابه الديناميكي (الحركي).
- التشابه الحراري.

1.2.4 التشابه الهندسي

يجب أن تكون النسب بين أبعاد الأنبوب المتقارب في المنشأة (الأصل) Prototype، وأبعاد الأنبوب المتقارب في النموذج Model مساوية نسبة التشابه C [7]:

$$C = \frac{D_{1P}}{D_{1m}} = \frac{D_{2P}}{D_{2m}} = \frac{H_{1P}}{H_{1m}} = \frac{H_{2P}}{H_{2m}}$$

2.2.4 التشابه الديناميكي

يتحقق التشابه الديناميكي عندما يتساوى رقم رينولدز للجريان عند مدخل الأنبوب المتقارب للمنشأة ورقم رينولدز عند مدخل الأنبوب المتقارب للنموذج:

$$\begin{aligned} \text{Re}_m &= \text{Re}_p \\ \Rightarrow \frac{V_{1m} \cdot D_{1m}}{V_{1m}} &= \frac{V_{1P} \cdot D_{1P}}{V_{1P}} \end{aligned}$$

نستنتج من العلاقة السابقة سرعة الهواء عند مدخل النموذج [8]:

$$V_{1m} = V_{1P} \cdot \frac{V_{1m}}{V_{1P}} \cdot \frac{D_{1P}}{D_{1m}} = V_{1P} \cdot \frac{V_{1m}}{V_{1P}} \cdot C$$

3.2.4 التشابه الحراري:

لتحقيق التشابه الحراري بين المنشأة المدروسة والنموذج يجب أن يتساوى رقم نوسل للمنشأة ورقم نوسل للنموذج، لذلك يجب أن يكون رقم رينولدز ورقم براندل واحد للمنشأة والنموذج [9]، ولكن بما أن المائع المدروس هو الهواء (ثنائي الذرة) فرقم براندل $Pr \approx 0.7$ لذلك أصبح:

$$Nu = f(Re)$$

وبالتالي يتحقق التشابه الحراري عندما: $Re_m = Re_p$ (وهذا محقق في النموذج التجريبي).

بناءً على ما سبق تم إيجاد أبعاد الأنبوب المتقارب في النموذج وبارامترات الهواء عند مقطع الدخول للأنبوب المتقارب في النموذج وفق قوانين التشابه آنفة الذكر (نفرض نسبة التشابه $C=2$) كما هو مبين في الجدول (3):

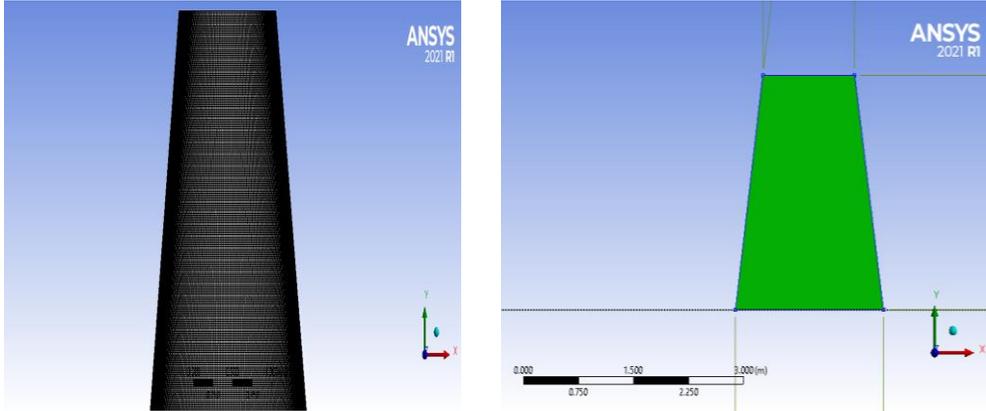
الجدول (3) بارامترات الهواء عند مدخل الأنبوب المتغير المقطع في النموذج وأبعاده

سرعة الهواء عند مدخل الأنبوب المتقارب	3.1 [m/s]
درجة حرارة الهواء عند مدخل الأنبوب في النموذج	35°C
قطر مقطع الخروج للأنبوب المتقارب	0.635 [m]
قطر مقطع الدخول للأنبوب	1.007[m]
زاوية ميل الأنبوب المتقارب	82[degree]
ارتفاع الأنبوب المتقارب	1.323[m]
ارتفاع الأسطوانة في النموذج	30[cm]

5. النتائج والمناقشة

1.5 المحاكاة العددية للأنبوب المتغير المقطع في المنشأة والنموذج

تمت نمذجة الجريان للهواء الساخن ضمن الأنبوب المتغير المقطع باستخدام برنامج (Ansys Fluent2021R1) لحل معادلات الجريان [10]، حيث تم رسم نموذج ثنائي الأبعاد للأنبوب المتغير المقطع وفق الأبعاد الموضحة في الجدول (2)، وتم إنشاء شبكة ثنائية الأبعاد [11]، كما هو مبين في الشكل (2):



الشكل (2) نموذج الأنبوب المتقارب ثنائي الأبعاد (يميناً) والشبكة الرقمية (يساراً)

تم نمذجة الجريان باستخدام (CFD Solver Level2-CFD Solver- باستخدام Level1) وتحديد الشروط الحدية (Boundary Conditions) وعدد التكرارات والشروط الابتدائية ونسبة التقارب للحل ($1e-6$) ونموذج الاضطراب وذلك وفق حالتين تسخين الهواء وعدم التسخين [12]، كما هو مبين في الجدول (4) والجدول (5) على التوالي:

تحليل عددي وتجريبي لتأثير تسخين الهواء في الأنايبب متغيرة المقطع على السرعة وحقل درجة الحرارة عند سرعات جريان منخفضة

الجدول (4) مدخلات برنامج Ansys Fluent (مع التسخين)

models	Energy on Viscous: (SST k-omega)
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

الجدول (5) مدخلات برنامج Ansys Fluent (عدم التسخين)

models	Energy off Viscous: (SST k-omega)
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

2.5 التحقق من دقة الحل (Validation)

تمّ التحقق من دقة الحل للحصول على نتائج دقيقة وبنسبة خطأ ضئيلة جداً، وفقاً

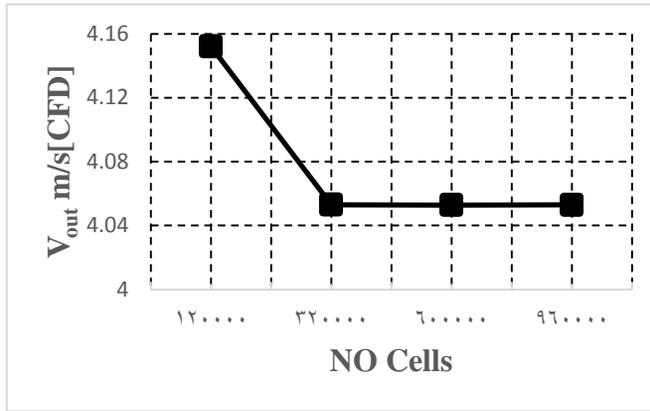
لما يلي [13]:

1.2.5 التحقق وفق دقة الشبكة الرقمية (Mesh Independence).

2.2.5 التحقق من صحة الحل.

1.2.5 اختبار دقة الشبكة Mesh independence

تم اختبار دقة الشبكة باستخدام أربعة أنواع مختلفة من الشبكات [14] (شبكة خشنة، وشبكة متوسطة الخشونة، وشبكة ناعمة، وشبكة عالية النعومة) عند زاوية معينة، وتم إيجاد سرعة الهواء عند مخرج المقطع العرضي للأنبوب باستخدام برنامج ANSYS FLUENT، وتم رسم العلاقة بين السرعة عند مقطع الخروج وعدد الخلايا الشبكية (الشكل (3)):

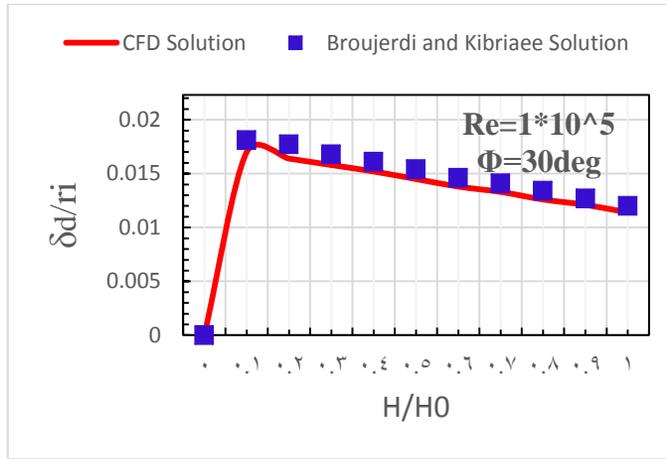


الشكل (3) علاقة السرعة عند مقطع الخروج مع عدد خلايا الشبكة

نلاحظ من الشكل (3) أن الحل يصبح مستقرًا جدًا عند زيادة عدد الخلايا من الشبكة متوسطة الخشونة إلى الشبكة الناعمة والشبكة عالية النعومة، وبذلك تم تحقيق اختبار الشبكة.

2.2.5 التحقق من صحة النتائج العددية

تم التحقق من صحة نتائج نموذج المحاكاة عن طريق مقارنة تغير سماكة الطبقة الحدية الناتجة باستخدام CFD [12] مع البيانات الرقمية المتوفرة في الدراسات السابقة، والتي تمثل تغير سماكة الطبقة الحدية وفق معطيات سابقة والتي تم الحصول عليها من قبل Brougerdi and Kebriaee [15]، كما هو مبين في الشكل (4):

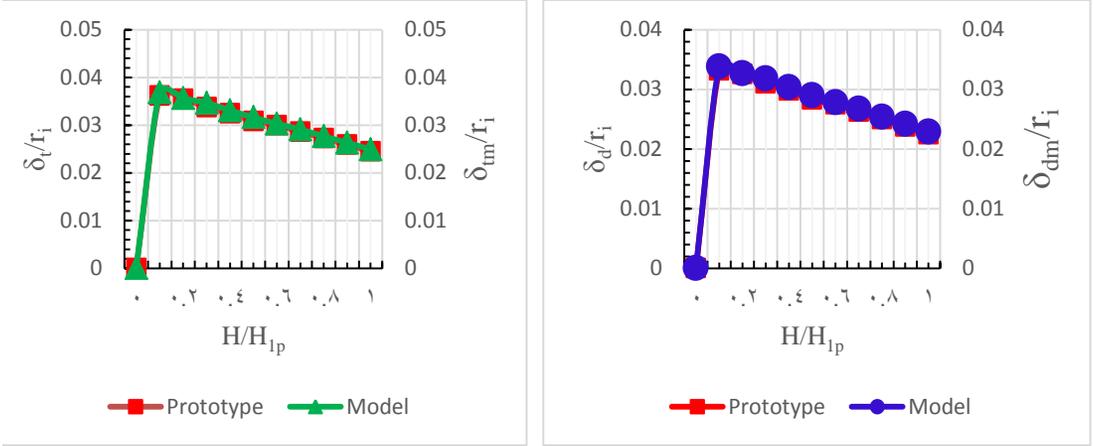


الشكل (4) مقارنة سماكة الطبقة الحدية

يتضح من الشكل (4) مقدار التطابق الجيد جداً إذ تبلغ أعلى نسبة خطأ 7.3% وهذا يؤكد مدى دقة الـ CFD، وهذا يشير إلى أنّ نموذج المحاكاة العددية صحيح بعد اختبار دقة الشبكة ودقة الحل.

3.5 التحقق من التشابه بين النموذج والمنشأة الحقيقية

للتحقق من التشابه بين المنشأة الحقيقية والنموذج باستخدام ANSYS Fluent تمّت المقارنة بين تغير سماكة الطبقة الحدية الديناميكية اللابعدية للنموذج وتغير سماكة الطبقة الحدية الديناميكية اللابعدية في المنشأة الحقيقية [12]، كما تمت المقارنة بين سماكة الطبقة الحدية الحرارية اللابعدية للنموذج وتغير سماكة الطبقة الحدية الحرارية اللابعدية في المنشأة الحقيقية [16]، كما هو مبين في الشكل (5):



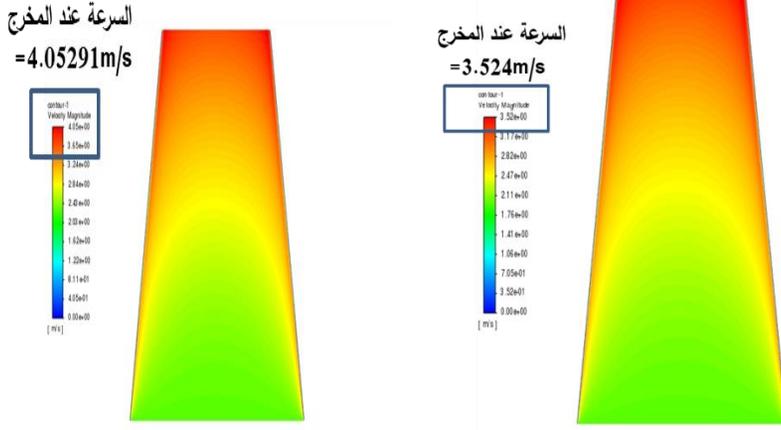
الشكل (5) مقارنة تغير سماكة الطبقة الحدية الديناميكية والحرارية اللابعدية للأصل والنموذج

نلاحظ من المخططات السابقة (الشكل (5)) مدى التطابق بين سماكة الطبقة الحدية الديناميكية للنموذج والمنشأة الحقيقية ومدى التطابق بين سماكة الطبقة الحدية الحرارية اللابعدية للنموذج والمنشأة الحقيقية، بالتالي نستنتج أن النموذج والمنشأة الحقيقية متشابهان.

4.5 دراسة تأثير تسخين الهواء على السرعة في المنشأة الحقيقية

لدراسة تأثير تسخين الهواء على السرعة باستخدام ANSYS Fluent، يتم أخذ حالتين: حالة عدم التسخين للهواء وحالة التسخين، وتم الحصول على حقل جريان السرعة في الأنبوب المتقارب، باستخدام برنامج ANSYS Fluent كما هو موضح في الشكل (6):

تحليل عددي وتجريبي لتأثير تسخين الهواء في الأنابيب متغيرة المقطع على السرعة وحقل درجة الحرارة عند سرعات جريان منخفضة

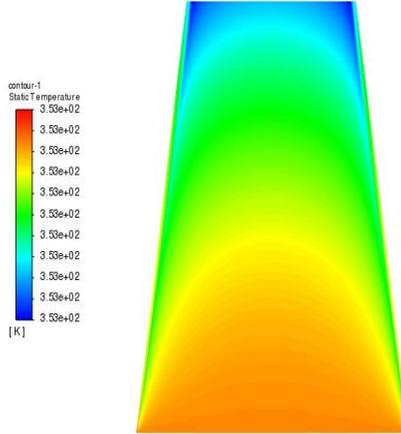


الشكل (6) حقل جريان السرعة في الأنبوب المتقارب بدون تسخين (يمينا) مع تسخين (يسارا)

نلاحظ من حقول السرعة في الأنبوب المتغير المقطع في حالتي التسخين وعدم التسخين (الشكل (6)) ازدياد السرعة بشكل تدريجي من مقطع الدخول للأنبوب المتغير المقطع حتى يصل إلى قيمة عظمى عند مقطع الخروج [17]، كما نلاحظ أنه في حالة تسخين الهواء فإن سرعة الهواء عند مقطع الخروج للأنبوب المتغير المقطع تصل إلى 4.05291m/s، أما في حالة عدم التسخين فإن السرعة عند مقطع الخروج تصل إلى 3.524m/s، نستنتج أنه بارتفاع درجة حرارة الهواء إلى الدرجة 80°C، يزيد في سرعة الهواء بحدود 15%.

5.5 حقل درجة الحرارة

تم الحصول على حقل جريان درجة الحرارة في الأنبوب المتقارب في المنشأة الحقيقية كما هو مبين في الشكل (7):



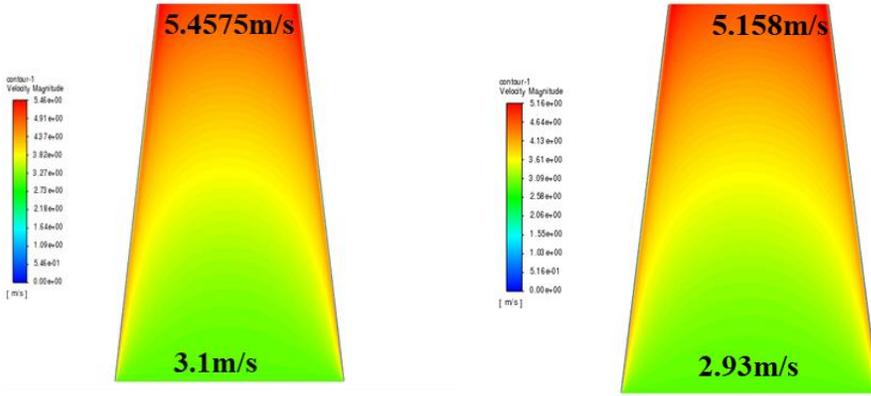
الشكل (7) حقل درجة الحرارة في الأنبوب المتغير المقطع

نلاحظ من حقل درجة الحرارة (الشكل (7)) أن درجة الحرارة تنخفض تدريجياً وبشكل طفيف ابتداءً من مدخل الأنبوب المتغير المقطع حتى مقطع الخروج [18].

6.5 دراسة تأثير تسخين الهواء على السرعة في النموذج

لدراسة تأثير تسخين الهواء على السرعة باستخدام ANSYS Fluent، يتم أخذ حالتين: حالة عدم التسخين للهواء، وحالة التسخين، تم الحصول على حقل جريان السرعة في الأنبوب المتقارب باستخدام برنامج ANSYS Fluent، كما هو موضح في الشكل (8):

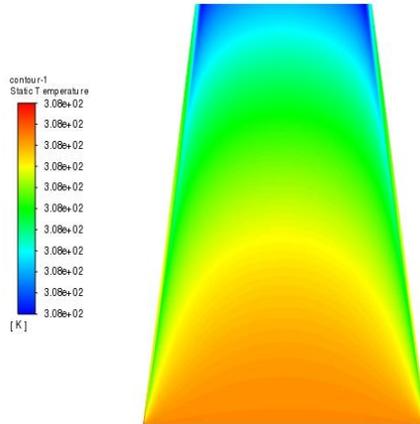
تحليل عددي وتجريبي لتأثير تسخين الهواء في الأنابيب متغيرة المقطع على السرعة وحقل درجة الحرارة عند سرعات جريان منخفضة



الشكل (8) حقل جريان السرعة في الأنبوب المتقارب بدون تسخين (يميناً) مع تسخين (يساراً) نلاحظ من المخططات السابقة في حالتَي التسخين وعدم التسخين أنه في حالة تسخين الهواء فإن سرعة الهواء عند مقطع الخروج للأنبوب المتغير المقطع هي 5.4575m/s، أما في حالة عدم تسخين الهواء فإن السرعة عند مقطع الخروج 5.158m/s، لذلك نستنتج أن مقدار الزيادة في سرعة الهواء حوالي 5.8%.

7.5 حقل درجة الحرارة

تم الحصول على حقل جريان درجة الحرارة في الأنبوب المتغير المقطع في النموذج كما هو مبين في الشكل (9):



الشكل (9) حقل درجة الحرارة في الأنبوب المتغير المقطع للنموذج

نلاحظ من الشكل (9) أن درجة الحرارة تتخفض بشكل طفيف وتدرجي من مدخل الأنبوب المتغير المقطع حتى تصل إلى أخفض قيمة عند مقطع الخروج.

8.5 النموذج التجريبي

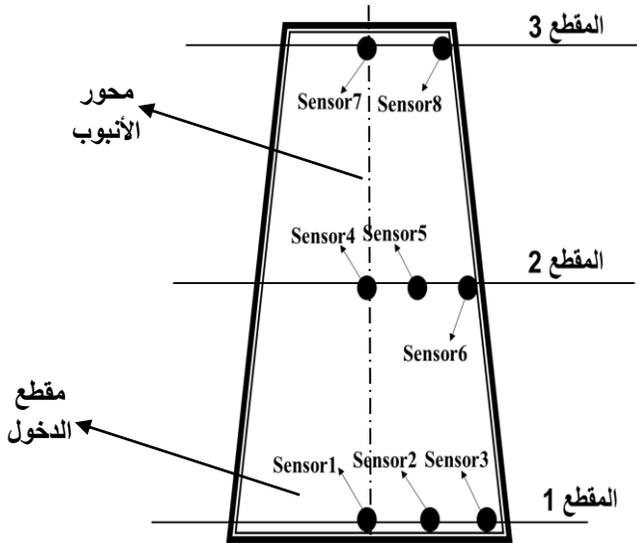
تم بناء نموذج تجريبي لمنشأة تشغيل العنفة الريحية، إذ يتكون من الأقسام التالية: سخان ماء شمسي، مضخة تسريع، أنبوب الماء الساخن القادم من السخان الشمسي، أنبوب الماء البارد العائد إلى السخان الشمسي، مبادل حراري (ماء-هواء)، أنبوب متغير المقطع، كما هو مبين في الشكل (10):



الشكل (10) النموذج التجريبي لمنشأة تشغيل العنفة الريحية

ولإجراء قياس درجات الحرارة في نقاط مختلفة من حقل الجريان تم تثبيت مزدوجات حرارية حساسات (Sensors) في مقاطع مختلفة ونقاط مختلفة من الأنبوب المتغير المقطع في النموذج التجريبي، كما هو مبين في الشكل (11):

تحليل عددي وتجريبي لتأثير تسخين الهواء في الأنابيب متغيرة المقطع على السرعة وحقل درجة الحرارة عند سرعات جريان منخفضة



الشكل (11) مخطط توزيع المزدوجات الحرارية (Sensors) ضمن الأنبوب المتغير المقطع

يوضح الجدول (6) موقع كل مزدوجة حرارية وفق البعد الأفقي الذي يمثل البعد عن محور الأنبوب والبعد الشاقولي الذي يمثل البعد عن مقطع الدخول:

الجدول (6) موقع المزدوجات الحرارية الأفقي والعمودي

رقم المقطع	رقم المزدوجة الحرارية	البعد عن مقطع الدخول [m]	البعد عن محور الأنبوب [m]
مقطع 1	1	0.1	0
	2	0.1	0.2517
	3	0.1	0.5
مقطع 2	4	0.6615	0
	5	0.6615	0.205
	6	0.6615	0.408
مقطع 3	7	1.223m	0
	8	1.223m	0.3125

تمت قراءة درجات الحرارة للمزدوجات الحرارية عبر منصة PLC وذلك بتثبيت المآخذ الموصولة مع المزدوجات الحرارية عن طريق أسلاك وذلك تبعاً لرقم المزدوجة الحرارية في مقاطع الأنبوب ويتم وضعها في النقاط المناسبة في منصة PLC، كما هو مبين في الشكل (12):



الشكل (12) منصة PLC (يميناً) مآخذ موصولة مع المزدوجات الحرارية (يساراً)

تم قياس سرعة الهواء عند مقطع الخروج باستخدام جهاز قياس سرعة الهواء من نوع (CEMDT-619) المكوّن من مروحة بمثابة حساس يتم وضعها في مجرى الهواء، وموصولة مع جهاز رقمي وشاشة رقمية تظهر عليها قراءة سرعة الهواء بالـ m/s كما هو مبين في الشكل (13):



الشكل (13) جهاز قياس سرعة الهواء (CEMDT-619)

9.5 النتائج التجريبية لدرجة الحرارة والسرعة عند نقطة عمل محددة

تم اختيار نقطة تشغيل محددة هي شهر تموز الساعة الحادية عشرة ظهراً يوم الخميس بتاريخ (2024/4/25) (حالة التسخين) بحيث يتحقق التوافق بين الشروط الحدية للأنبوب المتقارب في نموذج المحاكاة العددية للنموذج والشروط الحدية في النموذج التجريبي، وتم إيجاد النتائج التجريبية لقراءات درجة الحرارة لمنصة PLC عند نقطة العمل المختارة، وقراءة جهاز قياس سرعة الهواء (في حالتي التسخين وعدم التسخين).

1.9.5 حالة التسخين

تم اعتماد الشروط الحدية للأنبوب المتقارب في النموذج التجريبي مع التسخين (الجدول (3))، وتم تحقيقها في النموذج التجريبي إذ يتم رفع درجة الحرارة إلى الدرجة 35°C عن طريق تركيب المبادل الحراري عند مقطع الدخول للنموذج، ولتأمين السرعة $V_{1m}=3.1\text{m/s}$ عند مدخل النموذج التجريبي تم تركيب مراوح عند مقطع الدخول للنموذج التجريبي (والجدير بالذكر أنه تم تركيب المراوح للحصول على السرعة المطلوبة عند مقطع الدخول للأنبوب المتقارب في النموذج التجريبي بغية تحقيق التشابه بين النموذج التجريبي والمنشأة الحقيقية، إذ سيتم تركيب المراوح في النموذج التجريبي فقط ولن يتم تركيبها في المنشأة الحقيقية، لأن تسخين الهواء في المنشأة الحقيقية إلى درجة الحرارة 80°C (الجدول 1) يساهم في تحفيز الهواء ودفعه نحو الأعلى بسبب انخفاض الكثافة وفرق الارتفاع في الأنبوب المتقارب بسبب الأبعاد الكبيرة، أما في النموذج التجريبي درجة الحرارة 35°C منخفضة والأبعاد صغيرة، بالتالي وللتعويض عن التسخين الحاصل في المنشأة الأصل تم تركيب مراوح في النموذج الذي يحاكي المنشأة الأصلية، إذ أنه من الصعب بناء المنشأة الحقيقية بسبب الأبعاد الكبيرة ودرجة الحرارة المرتفعة عند مدخل الأنبوب المتقارب، لذلك تم اللجوء إلى بناء النموذج التجريبي واستخدام قوانين

التشابه في تصميمه)، أما بالنسبة لقيمة السرعة عند مقطع الخروج للنموذج التجريبي فقد تم أخذ قيمة وسطية للسرعة عند مقطع الخروج لمجموعة من القراءات لجهاز قياس سرعة الهواء، كما هو موضَّح في الجدول (7):

الجدول (7) القراءات المسجلة للسرعة عند مقطع الخروج (التسخين)

رقم القراءة	1	2	3	4	5	6	7	8	9	القيمة الوسطية
القيمة المسجلة [m/s]	5.05	5.00	4.7	4.5	4.8	3.75	5.12	5.22	5.52	4.8511

تم ترتيب النتائج التجريبية لدرجات الحرارة المقاسة بواسطة المزدوجات الحرارية ومنصة PLC في الجدول (8):

الجدول (8) درجات الحرارة المسجلة عن طريق منصة PLC

رقم المقطع	رقم المزدوجة الحرارية	درجة الحرارة المسجلة [C°] PLC
مقطع 1	1	36
	2	35.6
	3	35.8
مقطع 2	4	35.4
	5	35.4
	6	35.6
مقطع 3	7	35
	8	35.2

تم ترتيب النتائج الرقمية لدرجات الحرارة الناتجة في برنامج ANSYS FLUENT في نقاط مختلفة من حقل الجريان والمطابقة لمواقع المزدوجات الحرارية في النموذج التجريبي في الجدول (9):

تحليل عددي وتجريبي لتأثير تسخين الهواء في الأنابيب متغيرة المقطع على السرعة وحقل درجة الحرارة عند سرعات جريان منخفضة

الجدول (9) قيم درجات الحرارة الرقمية في نقاط موافقة للحساسات في النموذج (حالة التسخين)

رقم المقطع	رقم المزدوجة الحرارية	درجة الحرارة وفق CFD [C°]
مقطع 1	1	34.99988
	2	34.99988
	3	34.99976
مقطع 2	4	34.99786
	5	34.99747
	6	34.99469
مقطع 3	7	34.99231
	8	34.9899

2.9.5 حالة عدم التسخين

إن سرعة الهواء في حالة عدم تسخين الهواء عند مقطع الدخول للنموذج هي 2.93m/s، أما السرعة عند مقطع الخروج فقد تم أخذ قيمة وسطية للسرعة عند مقطع الخروج لعدد من القراءات للسرعة والموضحة في الجدول (10):

الجدول (10) القراءات المسجلة لسرعة الهواء عند مقطع الخروج (عدم التسخين)

رقم القراءة	1	2	3	4	5	6	7	8	9	القيمة الوسطية
القيمة المسجلة [m/s]	3.8	3.93	5.15	4.7	5.07	4.68	3.86	5.18	4.96	4.6

3.9.5 مقارنة النتائج التجريبية مع النتائج الرقمية

تمت مقارنة النتائج التجريبية مع القيم الرقمية، وحساب نسبة الخطأ بينهما في

حالتي التسخين وعدم التسخين كما يلي:

1.3.9.5 حالة التسخين

يبين الجدول (11) قيم درجات الحرارة الرقمية والتجريبية وقيمة الخطأ:

الجدول (11) درجات الحرارة الرقمية والتجريبية ونسبة الخطأ بينهما

رقم الحساس	درجة الحرارة CFD	درجة الحرارة التجريبية	نسبة الخطأ %
1	34.99988	36	%2.78
2	34.99988	35.6	%1.69
3	34.99976	35.8	%2.24
4	34.99786	35.4	%1.135
5	34.99747	35.4	%1.137
6	34.99469	35.6	%1.7
7	34.99231	35	%0.021
8	34.9899	35.2	%0.59

نلاحظ من الجدول (11) مدى التطابق بين القيم الرقمية لدرجات الحرارة وقيم درجات الحرارة التجريبية التي تم الحصول عليها عن طريق المزدوجات الحرارية إذ تصل أعلى نسبة خطأ إلى %2.78.

كما يبين الجدول (12) مقارنة قيمة السرعة التجريبية والرقمية عند المخرج للأنبوب المتغير المقطع في النموذج في حالة التسخين، وإيجاد نسبة الخطأ بينهما:

الجدول (12) مقارنة السرعة التجريبية والرقمية (مع التسخين)

4.8511	سرعة الهواء الوسطية عند مقطع الخروج التجريبية
5.4575m/s	سرعة الهواء الوسطية عند مقطع الخروج الرقمية
%12.5	نسبة الخطأ %

تحليل عددي وتجريبي لتأثير تسخين الهواء في الأنابيب متغيرة المقطع على السرعة وحقل درجة الحرارة عند سرعات جريان منخفضة

نلاحظ أنّ نسبة الخطأ بين القيمة الرقمية والتجريبية للسرعة هي 12.5% وذلك بسبب وجود ضياعات أيروديناميكية بسبب وجود المبادل الحراري وضياعات الاحتكاك مع جدار الأنبوب ووجود المزدوجات الحرارية في النموذج التجريبي والتي تشكل عائق في طريق الجريان، بالتالي التطابق مقبول بينهما.

2.3.9.5 حالة عدم التسخين

تمّت مقارنة قيمة السرعة عند مقطع الخروج في حالة عدم التسخين، وإيجاد نسبة الخطأ كما هو مبين في الجدول (13):

الجدول (13) مقارنة السرعة التجريبية والرقمية (دون تسخين)

4.6m/s	سرعة الهواء الوسطية عند مقطع الخروج التجريبية
5.158m/s	سرعة الهواء الوسطية عند مقطع الخروج الرقمية
%12.13	نسبة الخطأ %

نلاحظ نسبة الخطأ بين القيم التجريبية والقيم الرقمية 12.13% بين السرع في حالة عدم التسخين بسبب وجود ضياعات الاحتكاك مع جدار الأنبوب ووجود المزدوجات الحرارية في النموذج التجريبي والتي تشكل عائق في طريق الجريان، وبالتالي فالتطابق مقبول بينهما.

6. الاستنتاجات

يمكن الخلوص إلى الاستنتاجات الآتية:

1. تبين من حقل جريان السرعة ضمن الأنبوب المتغير المقطع للمنشأة الحقيقية في حالتها التسخين وعدم التسخين (الشكل (6)) تأثير التسخين على السرعة عند مقطع الخروج، إذ أنّه في حالة تسخين الهواء فإنّ سرعة الهواء عند مقطع الخروج للأنبوب هي 4.05291m/s، أمّا في حالة عدم تسخين الهواء فإنّ السرعة عند مقطع الخروج 3.524m/s، لذلك نستنتج أنّه بارتفاع درجة حرارة

الهواء إلى الدرجة 80°C ، فإنّ مقدار الزيادة في السرعة عند مقطع الخروج حوالي 15%.

2. تبيّن التشابه رقمياً بين النموذج Model والمنشأة الحقيقية Prototype وذلك من خلال التطابق بين سماكة الطبقة الحدية الديناميكية اللابعدية للنموذج والمنشأة المدروسة، والتطابق بين سماكة الطبقة الحدية الحرارية اللابعدية للنموذج والمنشأة المدروسة.

3. تبيّن من خلال مقارنة القيم الرقمية لدرجة الحرارة في نقاط مختلفة في الأنبوب المتقارب لنموذج المحاكاة العددية للنموذج والموافقة لمواقع المزدوجات الحرارية في النموذج التجريبي مع القيم التجريبية لقراءات درجة الحرارة للمزدوجات الحرارية من خلال منصة PLC مدى التطابق بين القيم الرقمية والقيم التجريبية إذ تصل أعلى نسبة خطأ إلى 2.78%.

4. تبيّن من خلال مقارنة القيم الرقمية للسرعة عند مقطع الخروج والقيم التجريبية في حالتي تسخين الهواء وعدم التسخين إذ تصل نسبة الخطأ 12.5% و12.13% على الترتيب، وذلك بسبب الضياعات بسبب وجود المبادل الحراري وضياعات الاحتكاك مع جدار الأنبوب ووجود المزدوجات الحرارية ضمن الأنبوب والتي تشكل بدورها عوائق في طريق الجريان والتي تؤثر بشكل سلبي على سرعة الجريان وبالتالي التطابق مقبول بينهما.

5. نستنتج من خلال التطابق بين القيم الرقمية لدرجات الحرارة والسرعة والقيم التجريبية أنّ نموذج المحاكاة المدروس صحيح، وبالتالي فإنّ نموذج المحاكاة العددية للمنشأة الحقيقية صحيح.

6. من خلال هذه الدراسة يمكننا التأكيد على أهمية تقنية الـ CFD في إعطاء تصوراً مسبقاً عن سلوك المنظومة الحقيقية، والتي تمثل في البحث منشأة تشغيل العنفات الريحية من خلال معرفة كافة البارامترات ومن أهمها سرعة الهواء عند مقطع الخروج للأنبوب المتغير المقطع التي تؤثر بدورها على الاستطاعة الكهربائية الناتجة للعنفة الريحية، حيث ستصل السرعة عند مقطع الخروج في المنشأة الحقيقية إلى 4.05291m/s (وفق الشكل 6) وذلك مع تسخين الهواء فقط (دون استخدام مراوح) إلى الدرجة 80°C لأنه عند ارتفاع درجة الحرارة للهواء تنخفض كثافته ويصعد الهواء نحو الأعلى باتجاه الأنبوب المتقارب بسبب الحمل الحر و فرق الارتفاع في الأنبوب ليصل للسرعة 4.05291m/s وهي كفيلة في تدوير العنفة الريحية وتوليد الطاقة الكهربائية.

7. المراجع

- [1] 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)
- [2] HASAN, A 2008-Heat and Mass Transfer. Tishreen University, Syrian Arab Republic, 789p. (In Arabic)
- [3] POTTER, M. WIGGERT, D 1991-MECHANICS OF FLUIDS. Prentic-Hall International Editions, UK London, 692p.
- [4] 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)
- [5] Wind Atlas in Syrian Arab Country. (In Arabic)
- [6] HASAN, A 2013-Thermodynamic /2/. Tishreen University Publications, Syrian Arab Republic, 730p. (In Arabic)
- [7] NAJARAJAN, R 2008 Similitude Analysis: Dimensional Analysis, iitmadras CELEBRATING TECHNOLOGY, 31.
- [8] TOON, H 2014 Similarity and Model Testing, IIHR-Hydrosience & Engineering, 33.
- [9] ROGERS, G. MAYHEW, Y 2014 -Engineering Thermodynamics Work and Heat Transfer. PEARSON, Fourth Edition, 711p.
- [10] TU, J. YEOH, G. LIU, C 2019-Computational fluid dynamics: A practical approach, Elsevier, Third Edition, 978.
- [11] SRINIVAS, G, RAKHAM, B 2017 Experimental and numerical analysis of convergent nozzle, Frontiers in Automobile and Mechanical Engineering, India, 14.
- [12] HASAN, A. ALI, M. ISSA, H. SAAEED, M 2023 Numerical Study of the Effect of Heating the Air in the Convergent Pipes on Speed and Dynamic Boundary Layer Using CFD, Tartous university journal for research and scientific studies, Tartous, university, Vol. 7, No. 4, 19. (In Arabic)
- [13] MOHAN, N. P 2016 Modeling and Simulation of Convergent-Divergent Nozzle Using Computational Fluid Dynamics (CFD),

International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), Vol.3, No.8, 346-350.

[14] KHAN, S. A. ABID, A. IBRAHIM, O. M.2021 CFD analysis of compressible flows in a convergent-divergent nozzle, Elsevier Science Direct, U.S.A, Vol.46, 2835-2842.

[15] 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.

[16] 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)

[17] 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.

[18] 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.