الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر –الوادي

كلية العلوم الدقيقة

قسم الفيزياء

رقم الترتيب :

رقم التسلسل:

مذكرة تخرج لنيل شهادة ماستر أكاديمي

مجال : علوم المادة

تخصص فيزياء الإشعاعات

من إعداد الطالب : يزيد ضيف

تحت عنوان:

دراسة حول انتقال الحرارة المقترن بجريان الموائع

نوقشت يوم: 2026/06/06

أمام اللجنة المكونة من:

سهيلة عسكري	أستاذ محاضر - أ -	رئيس
محمد الصالح مفتاح	أستاذ مساعد - أ -	ممتحن
عبد القادر اللبي	أستاذ محاضر - أ -	مشرف ومقرر

السنة الجامعية : 2025-2026

إهـــداء

إلى من كانوا ولا زالوا وسيبقون سندي في هذه الحياة...

أبي وأمي

إلى أفراد عائلتي الكرام، إخوتي وأخواتي، الذين كانوا لي نعم الرفيق والسند في كل خطوة...

إلى رفيقة دربي وشريكة حياتي، التي وقفت بجانبي في كل لحظات التعب والفرح، وكانت نعم العون والصبر والأمان...

زوجتي الغالية

إلى أبنائي الأعزاء (**قاسم** ، **قمر** ، **طه**)، الذين كانوا البسمة في وجهي والدافع الخفي لإتمام هذا العمل...

وإلى من كان قنديلاً ينير دربي الأكاديمي، ونبراساً يهديني في دهاليز البحث...

إلى مشرفي الفاضل الأستاذ

د. عبد القادر اللبي

إلى جميع أساتذتي الكرام الذين تعلمت على أيديهم معنى العلم والخلق والإخلاص...

وإلى كل من كان لي عوناً في هذه الرحلة...

إلى أصدقائي وزملائي الذين شاركوني التعب والفرح، وكانت دعواتهم ومساندتهم نعم العون...

إلى كل من دعا لي بظهر الغيب، أو ساعدني ولو بكلمة...

إلى الجميع... إلى كل من ترك بصمة خير في هذه الحياة...

أهدي ثمرة جهدي هذا المتواضع، راجياً من المولى عز وجل أن يكون خالصاً لوجهه الكريم، نافعاً للعباد والبلاد، وأن يجزيهم عني خير الجزاء

يزيد ضيف

شكر وامتنان

الحمد لله رب العالمين، الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله أتممت هذا العمل، والشكر لله أولاً وآخراً على ما أعان ووفق وسدد.

ثم الشكر إلى من كانوا لي عوناً على طريق العلم والبحث.

إلى مشرفي الفاضل الأستاذ الدكتور **عبد القادر اللبي** الذي كان نعم الموجه والناصح والصابر.

إلى أعضاء لجنة المناقشة الكرام كلا من:

الأستاذ: د. محمد الصالح مفتاح
الأستاذة: د. سهيلة عسكري

على تشريفهم لي، بقبول مناقشة هذا العمل، وأتحفوني بملاحظاتهم القيمة وتوجيهاتهم السديدة التي ساهمت في إثراء البحث وتقويمه

إلى جميع أساتذتي الكرام، وإلى أصدقائي وزملائي، وإلى كل من ساعدني ودعمني ولو بكلمة.

شكراً لكم جميعاً، وجزاكم الله عني خير الجزاء، وجعل هذا العمل في ميزان حسناتي وحسناتكم.

والله ولي التوفيق.

يزيد ضيف

المحتوى	الصفحة
الإهداء	I
التشكرات	II
الفهرس	III
قائمة الجداول	VI
قائمة الأشكال	VII
قائمة الرموز	IX
المصطلحات	XII
المقدمة العامة	1
الفصل الأول: الإطار النظري وأسس انتقال الحرارة في الموائع	
1. مقدمة الفصل	4
1.1. انتقال الحرارة: المفاهيم الأساسية	5
1.1.1. تعريف انتقال الحرارة	5
2.1.1. أنماط انتقال الحرارة	5
2.1. جريان الموائع: الأسس الفيزيائية	8
1.2.1. تعريف المائع	8
2.2.1. التعريف الأكاديمي:	8
3.2.1. أنواع الموائع	10
3.1.جريان الموائع	10
1.3.1.تعريف جريان الموائع	10
2.3.1. تصنيف أنماط الجريان	10
4.1. الأعداد اللابعدية في انتقال الحرارة وجريان الموائع	12
1.4.1. رقم رينولدز(Re)	12
2.4.1. رقم برانتل(Pr)	13
3.4.1. رقم نسلت(Nu)	13
4.4.1. رقم جراشوف	14
5.1. الطبقة المتاخمة (الحدية) الهيدروديناميكية	14
1.5.1. تعريف الطبقة (الحدية) المتاخمة	14
2.5.1. تطور الطبقة (الحدية) المتاخمة	15
3.5.1. سمك الطبقة المتاخمة	15
6.1. الطبقة المتاخمة الحرارية	16
1.6.1. تعريف الطبقة المتاخمة الحرارية	16
2.6.1. العلاقة بين الطبقتين الحرارية والهيدروديناميكية	16
7.1. المعادلات الحاكمة للجريان الموائع	16

1.7.1. معادلة برنولي	**16**
2.7.1. معادلة الاستمرارية	**17**
3.7.1. معادلات الزخم (نافيير–ستوكس)	**19**
8.1. أنبوب فنتوري	**20**
1.8.1. مبد أعمل أنبوب فنتورى	**20**
2.8.1. التطبيقات الصناعية والمخبرية لأنبوب فنتورى	**22**
9.1. الهندسة والأبعاد الرئيسية	**23**
10.1. سلوك الجريان الرقائقي داخل أنبوب فنتوري	**24**
11.1. الشروط الضرورية للحفاظ على الجريان الصفحي(Re < 2300)	**25**
12.1. انتقال الحرارة داخل أنبوب فنتوري	**26**
1.12.1. تأثير تغير المقطع على معامل الحمل الحراري المحلي	**26**
2.12.1. التوزيع غير المنتظم لعدد نسلت على طول الأنبوب	**26**
3.12.1. مناطق تكثّف انتقال الحرارة عند الخنق	**28**
4.12.1. الفرق بين أنبوب فنتوري والأنبوب المستقيم	**28**
13.1. أهمية النمذجة العددية (CFD) في انتقال الحرارة	**29**
1.13.1. مقارنة بين الطرق التقليدية وCFD	**30**
14.1. خاتمة الفصل الأول	**31**
الفصل الثاني : المنهجية العددية وبناء النموذج الحسابي	
2. مقدمة الفصل الثاني	**32**
1.2. طريقة الحل العددي	**33**
1.1.2. طريقة الحجوم المحددة	**33**
2.1.2.خوارزمية SIMPLE لربط الضغط بالسرعة	**35**
3.1.2. معايير التقارب المعتمدة	**36**
2.2. بناء النموذج الهندسي	**37**
1.2.2.تحديد الأبعاد الهندسية المُدخلة	**37**
3.2.رسم هندسة فنتوري في برنامج Gambit 2.3.16	**38**
4.2. المحاكاة بواسطة برنامج fluent 6.3.26	**43**
5.2. خاتمة الفصل الثاني	**54**
الفصل الثالث : تحليل النتائج ومناقشتها	
3. مقدمة الفصل الثالث	**55**
1.3. نتائج المحاكاة	**56**
2.3. تحليل توزيع السرعة داخل أنبوب فنتوري	**56**
1.2.3. النتائج المستخلصة من أجل حقل السرعة	**56**
2.2.3. حساب عدد رينولدز	**58**

3.3. تحليل توزيع الضغط الستاتيكي	**58**
1.3.3. النتائج المستخلصة من الضغط الستاتيكي	**59**
2.3.3. حساب فرق الضغط	**61**
4.3. تحليل توزيع درجة الحرارة داخل أنبوب فنتوري	61
1.4.3. النتائج المستخلصة من درجة الحرارة	61
2.4.2. حساب عدد برانتل	63
5.3. عدد نسلت المتوسط والقارنة مع الأنبوب المستقيم	63
6.3. المقارنة الشاملة بين النموذج والدرسات السابقة	64
7.3. تحديد النموذج الأكثر كفاءة حرارياً في أنبوب فنتوري	65
8.3. حدود صلاحية النتائج والتوصيات التطبيقية	66
9.3. خاتمة الفصل الثالث	67
الخاتمة العامة	68
قائمة المراجع	70

قائمة الجداول

رقم الجدول	عنوان الجدول	الصفحة
	الفصل الأول	
1.1	الأبعاد الهندسية لأنبوب فنتوري	**23**
2.1	**مقارنة بين الطرق التقليدية والنمذجة العددية(CFD)**	**29**
	الفصل الثاني	
1.2	معايير التقارب العددي	**36**
2.2	الأبعاد الهندسية المعتمدة في بناء نموذج فنتوري	**37**
	الفصل الثالث	
1.3	عدد نسلت المتوسط والمقارنة مع الأنبوب المستقيم	**63**

قائمة الأشكال

رقم الشكل	عنوان الشكل	الصفحة
	الفصل الأول	
1.1	آليات انتقال الحرارة (التوصيل، الحمل، الإشعاع)	**07**
2.1	تخطيطي لخصائص المائع (الكثافة، اللزوجة)	**08**
3.1	تصنيف الجريان حسب عدد رينولدز	**10**
4.1	الانتقال من الطبقة الحدودية الصفائحية (الانتظامية) إلى الطبقة الحدودية المضطربة	**14**
5.1	سمك الطبقة الحدودية	**14**
6.1	تمثيل معادلة الاستمرارية في قناة جريان	**17**
7.1	توضيح معادلاتNavier-Stokes	**19**
8.1	توزيع الضغط والسرعة داخل أنبوب فنتوري	**20**
9.1	الهندسة والأبعاد الرئيسة للأنبوب المستعمل	**22**
10.1	مقطعاً طولياً في فوهة متقاربة-متباعدة لأنبوب فنتورى	**24**
	الفصل الثاني	
1.2	مبدأ تقسيم المجال الحسابي بطريقة الحجوم المحددة	**34**
2.2	خطوات تطبيق خوارزمية **SIMPLE** في برنامج Fluent 6.3.26	**36**
3.2	الهيكل الهندسي ثنائي الأبعاد لأنبوب فنتوريالمستخدم في المحاكاة	**38**
4.2	مواضع النقاط الشكل الهندسي لأنبوب فنتورى في برنامج gambit	**39**
5.2	الشكل الهندسي لانبوب فنتوري في برنامج gambit	**40**
6.2	شبكة السطح الخاصة بأنبوب فنتوري	**41**
7.2	لشروط الحدية لانبوب فنتوري في برنامج gambit	42
8.2	تصدير الشبكة الحسابية من برنامج GAMBITإلى برنامج FLUENT	42
9.2	اختيار الدقة في برنامج المحاكاة FLUENT	43
10.2	استراد الشبكة العددية في برنامج المحاكاة FLUENT	44
11.2	فحص الشبكة في برنامج المحاكاة FLUENT	45
12.2	نافذة إعدادات **المحلل العددي (Solver)** في برنامجFLUENT	45
13.2	**نافذة اختيار نموذج اللزوجة**	47

14.2	**نافذة إعداد خصائص المادة (Materials) في برنامجFLUENT**	48
15.2	**نافذة إعداد ظروف التشغيل في برنامجFLUENT**	**49**
16.2	نافذة إعداد الشروط الحدية في برنامج **FLUENT**	**50**
17.2	واجهة إعداد القيم الابتدائية للحل العددي في برنامج المحكاة العددية fluent	**51**
18.2	نافذة إعداد التكرار في برنامج المحكاة العددية fluent	**52**
	الفصل الثالث	
1.3	توزيع السرعة داخل أنبوب فنتوري	56
2.3	تغير السرعة على طول محور أنبوب فنتوري.	57
3.3	توزيع الضغط الستاتيكي داخل أنبوب فنتوري.	59
4.3	تغير الضغط الستاتيكي على طول محور أنبوب فنتوري	60
5.3	توزيع درجة الحرارة داخل محور أنبوب فنتوري.	61
6.3	تغير درجة الحرارة على طول محور أنبوب فنتوري	62

1. قائمة الرموز

الرمز	التسمية	الوحدة
ρ	الكتلة الحجمية	kg/m^3
μ	معامل اللزوجة الديناميكية	$Pa \cdot s$
ν	معامل اللزوجة الحركية	m^2/s
V	السرعة	m/s
u,v,w	مركبات السرعة	m/s
P	الضغط	Pa
T	درجة الحرارة	K
Q	التدفق الحراري	W/m^2
k	الناقلية الحرارية	$W/m \cdot K$
h	معامل انتقال الحرارة بالحمل	$W/m^2 \cdot K$
D	القطر الهيدروليكي	m
L	طول الأنبوب	m
R_e	عدد رينولدز	بدون وحدة
Nu	عدد نوسلت	بدون وحدة
Pr	عدد برانتل	بدون وحدة
λ	معامل التوصيل الحراري	$Wm^{-1}K^{-1}$
φ	متغير عام للنقل	بدون وحدة
ψ	دالة الانسياب	بدون وحدة
σ	الإجهاد	P_a
A	المساحة	m^2
Cp	الحرارة النوعية عند ضغط ثابت	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
D	القطر	m
dh	القطر الهيدروليكي	m
f	معامل الاحتكاك	—
g	تسارع الجاذبية	$m \cdot s^{-2}$
h	معامل انتقال الحرارة بالحمل	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
k	الموصلية الحرارية	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
L	الطول	m
$\dot{m}$	معدل التدفق الكتلي	$kg \cdot s^{-1}$
P	الضغط	Pa
Q	معدل انتقال الحرارة	W
q″	التدفق الحراري السطحي	$W \cdot m^{-2}$
T	درجة الحرارة	K
T_w	درجة حرارة الجدار	K

T_{in}	درجة حرارة الدخول	K
T_{out}	درجة حرارة الخروج	K
α	الانتشارية الحرارية	$m^2 \cdot s^{-1}$
β	معامل التمدد الحراري	K^{-1}
ΔP	فرق الضغط	Pa
ΔT	فرق درجة الحرارة	K

2. قائمة الاختصارات

الإختصار	المعنى الفيزيائي
CFD	ديناميكا الموائع الحسابية
FVM	طريقة الحجوم المحددة(Finite Volume Method)
SIMPLE	خوارزمية الربط بين الضغط والسرعة
ANSYS	برنامج المحاكاة الهندسية
Fluent	محلل الجريان فيANSYS
BC	الشروط الحدّية(Boundary Conditions)
IC	الشروط الابتدائية(Initial Conditions)
2D	ثنائي الأبعاد
3D	ثلاثي الأبعاد
D_1	قطر المدخل
D_2	قطر العنق(Throat)
V_1	سرعة المدخل
V_2	سرعة العنق
P_1	ضغط المدخل
P_2	ضغط العنق

قائمة المصطلحات

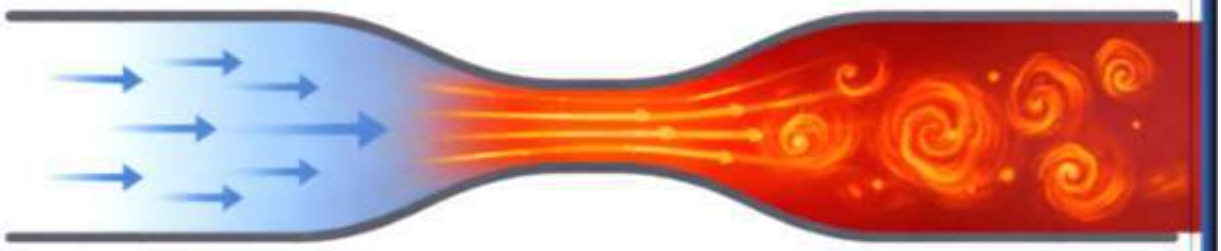
المصطلح بالانجليزية	المصطلح بالعربية
Fluid Flow	جريان الموائع
Heat Transfer	انتقال الحرارة
Numerical Study	الدراسة العددية
Numerical Simulation	المحاكاة العددية
Fluid Dynamics	ديناميكا الموائع
Computational Fluid Dynamics (CFD)	ديناميكا الموائع الحسابية
Navier–Stokes Equations	معادلات نافير–ستوكس
Continuity Equation	معادلة الاستمرارية
Energy Equation	معادلة الطاقة
Laminar Flow	الجريان الصفحي
Turbulent Flow	الجريان المضطرب
Transitional Flow	الجريان الانتقالي
Convection Heat Transfer	الحمل الحراري
Conduction Heat Transfer	التوصيل الحراري
Thermal Radiation	الإشعاع الحراري
Forced Convection	الحمل القسري
Natural Convection	الحمل الطبيعي
Temperature	درجة الحرارة
Thermal Field	المجال الحراري
Temperature Distribution	توزيع درجة الحرارة
Velocity Distribution	توزيع السرعة
Axial Velocity	السرعة المحورية
Pressure	الضغط
Pressure Drop	هبوط الضغط
Pressure Gradient	تدرج الضغط

Dynamic Viscosity	اللزوجة الديناميكية
Kinematic Viscosity	اللزوجة الحركية
Density	الكثافة
Thermal Conductivity	الموصلية الحرارية
Specific Heat Capacity	الحرارة النوعية
Heat Flux	التدفق الحراري
Heat Transfer Rate	معدل انتقال الحرارة
Heat Exchanger	المبادل الحراري
Pipe	الأنبوب
Venturi Tube	أنبوب فنتوري
Throat Region	منطقة الرقبة
Inlet	المدخل
Outlet	المخرج
Boundary Conditions	الشروط الحدية
Initial Conditions	الشروط الابتدائية
Control Volume	حجم السيطرة
Finite Element Method (FEM)	العناصر المحدودة
Finite Volume Method (FVM)	الحجوم المحددة
Finite Difference Method (FDM)	الفروق المحددة
Numerical Mesh	الشبكة العددية
Mesh Generation	توليد الشبكة
Mesh Quality	جودة الشبكة
Grid Independence	استقلالية الشبكة
Numerical Convergence	التقارب العددي
Numerical Stability	الاستقرار العددي
Residuals	البواقي
Numerical Solution	الحل العددي

Algorithm	الخوارزمية
Numerical Solver	المذيب العددي
ANSYS Fluent	برنامج فلوينت
GAMBIT	برنامج جامبيت
Turbulence Model	نموذج الاضطراب
k−εk-\varepsilonk−ε Model	نموذجk−εk-\varepsilonk−ε
k−ωk-\omegak−ω Model	نموذجk−ωk-\omegak−ω
Reynolds Number	عدد رينولدز
Prandtl Number	عدد برانتل
Nusselt Number	عدد نسلت
Grashof Number	عدد غراشوف
Rayleigh Number	عدد رايلي
Friction Factor	معامل الاحتكاك
Heat Transfer Coefficient	معامل انتقال الحرارة
Kinetic Energy	الطاقة الحركية
Thermal Energy	الطاقة الحرارية
Conservation of Mass	حفظ الكتلة
Conservation of Energy	حفظ الطاقة
Conservation of Momentum	حفظ كمية الحركة
Two-Dimensional Flow	الجريان ثنائي الأبعاد
Three-Dimensional Flow	الجريان ثلاثي الأبعاد
Axisymmetric	المحور المتماثل
Model Validation	التحقق من النموذج
Numerical Validation	التحقق العددي
Numerical Results	النتائج العددية
Thermal Analysis	التحليل الحراري
Hydrodynamic Analysis	التحليل الهيدروديناميكي

Streamlines	خطوط الانسياب
Thermal Contours	الكونتور الحراري
Velocity Vectors	متجهات السرعة
Computational Domain	المجال الحسابي
Real Time	الزمن الحقيقي
Steady State	الحالة المستقرة
Unsteady State	الحالة غير المستقرة
Internal Flow	الجريان الداخلي
External Flow	الجريان الخارجي
Diffusion Coefficient	معامل الانتشار
Convective Transport	الانتقال بالحمل
Diffusive Transport	الانتقال بالانتشار
General Transport Equation	المعادلة العامة للنقل

المقدمة



العامة

المقدمة العامة

من المعروف في علوم الميكانيكا الحرارية أن انتقال الحرارة مصحوبًا بحركة الموائع هو أحد المجالات الحيوية التي لا غنى عنها في كثير من التطبيقات التي نلمسها في حياتنا العملية والصناعية ، مثل المبادلات الحرارية، وأنظمة التبريد، والمفاعلات الكيميائية، وحتى أجهزة قياس التدفق [1]. وإذا تحدثنا عن التصاميم الهندسية الأكثر شيوعًا في هذا السياق، فإن "أنبوب فنتوري" يأتي في المقدمة، لما يتمتع به من خصائص جريانية وهندسية تجعله خيارًا ممتازًا في تطبيقات القياس والتحكم.

اليوم، ومع التقدم الكبير في أدوات الحوسبة والطرق العددية، أصبحت المحاكاة العددية أداة أساسية، بل لا غنى عنها، لفهم الظواهر المعقدة التي تحدث عندما يتحرك المائع وتنتقل الحرارة في آنٍ واحد، لا سيما في الأشكال غير المنتظمة مثل أنبوب فنتوري.

في هذا السياق، تناولت دراسات سابقة جوانب متعددة من انتقال الحرارة في القنوات ذات المقاطع المتغيرة، فقد أظهرت دراسة **Bashir et al. [2]** أن المنطقة الانتقالية عند $Re\approx2000$ تؤدي إلى تحسن ملحوظ في انتقال الحرارة بسبب التحول التدريجي من الجريان الرقائقي إلى المضطرب ، كما أكدت دراسة **Hemmat Esfe et al. [3]** أن منطقة الخنق في أنبوب فنتوري تُعد الأكثر فعالية حرارية نتيجة ارتفاع السرعة المحلية وزيادة الاضطراب. من جهة أخرى، أظهرت دراسة **Wang et al. [4]** أن استخدام العناصر الحلزونية الداخلية يحسن انتقال الحرارة عبر توليد دوامات ثانوية ، وعدة دراسات في هذا المجال قدمت إضافات قيمة في إنتقال الحرارة داخل القنوات ذات المقاطع المتغيرة ، ورغم هذه الإسهامات القيمة، لا تزال هناك حاجة لدراسة مقارنة دقيقة لتأثير اختلاف الشروط الحرارية على الجدار (السرعة، الضغط، درجة الحرارة) في نظام الجريان الصفحي داخل أنبوب فنتوري، وهو ما تسعى هذه الدراسة إلى تقديمه.

علميا ، التحليل النظري وحده لا يستطيع أن يصف لنا بدقة كيف تتوزع السرعة والضغط ودرجة الحرارة على طول جدار هذا الأنبوب. وهنا يأتي دور الطرق العددية، كطريقة الحجوم المحدودة، التي تمنحنا القدرة على استكشاف هذه التوزيعات ومقارنة تأثير الشروط الحرارية المختلفة على الجدار بدقة عالية.

السؤال المحوري الذي تدور حوله هذه الدراسة هو:

كيف يتغير انتقال الحرارة في الجريان الرقائقي داخل أنبوب فنتوري عندما نغيّر الشروط الحرارية على جداره؟

وهل يختلف سلوك الحرارة في هذا الأنبوب اختلافًا واضحًا عن سلوكه في أنبوب عادي مستقيم؟

للإجابة على هذين السؤالين، قمنا بإجراء دراسة عددية مع مقارنة شاملة، تناولنا فيها ثلاثة نماذج حرارية مختلفة، مع التحقق الدقيق من صحة نتائجنا العددية بمقارنتها بالحلول التحليلية والدراسات المرجعية السابقة.

أما الأهداف العلمية التي نسعى لتحقيقها من هذه الدراسة، فيمكن تلخيصها فيما يلي:

1. بناء نموذج عددي دقيق يحاكي الجريان الصفحي وانتقال الحرارة داخل أنبوب فنتوري ثنائي الأبعاد ومتناظر محوريًا، باستخدام برنامج Fluent .
2. دراسة وتحليل ثلاثة نماذج فيزيائية على الجدار (السرعة ، الضغط ، درجة الحرارة) ومقارنة تأثيرها على توزيع الحرارة وعدد نسلت على طول الأنبوب.
3. اكتشاف التوزيعات المكانية للسرعة والضغط ودرجة الحرارة في مناطق الأنبوب الثلاث: الدخول، الخنق، التباعد.
4. مقارنة النتائج العددية مع الحلول التحليلية والدراسات السابقة للتحقق من صحة النماذج.
5. تحديد النموذج الحراري الأكثر كفاءة في تعزيز انتقال الحرارة داخل هندسة فنتوري، وتقديم توصيات تطبيقية.

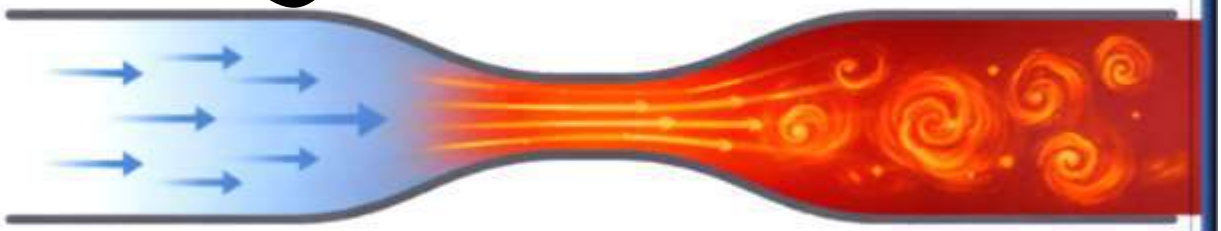
أهمية هذه الدراسة تتبلور في ثلاثة محاور رئيسية:

- **المحور العلمي البحثي** :لأنها تساهم في سد فجوة معرفية موجودة نسبيًا في الأدبيات العلمية عن الجريان الصفحي المقترن بانتقال الحرارة في أنبوب فنتوري، وذلك من خلال المقارنة الثلاثية بين المتغيرات الفيزيائية المختلفة.
- **المحور المنهجي** :حيث تقدم منهجًا عدديًا متقنًا يجمع بين بناء الشبكة الحسابية، واختبار استقلاليتها، والتحقق من صحة النموذج.
- **المحور التطبيقي الصناعي** :لأن الفهم الدقيق لتوزع الحرارة في أنبوب فنتوري يسلط الضوء على إمكانية تحسين تصميم هذه الأنابيب في تطبيقات التبريد وأنظمة قياس التدفق في الصناعات الكيميائية والنفطية.

واعتمادًا على ما سبق، فقد بنيت هذه الدراسة على **ثلاثة فصول متسلسلة**، على النحو الآتي:

- **الفصل الأول: الإطار النظري وأسس انتقال الحرارة في الموائع**، ويشمل عرض المعادلات الحاكمة للظاهرة، واستعراض الأدبيات العلمية ذات الصلة، والمراجع النظرية التي تؤطر المسألة من الناحية الفيزيائية والرياضية.
- **الفصل الثاني: المنهجية العددية وبناء النموذج الحسابي**، وفيه يتم وصف الهندسة، وتوليد الشبكة العددية في بيئة ANSYS Workbench، ثم تفصيل خطوات الحل العددي باستخدام خوارزمية SIMPLE مع تفعيل معادلة الطاقة لكل نموذج حراري.
- **الفصل الثالث: تحليل النتائج ومناقشتها**، وهو الفصل الذي يعرض النتائج العددية بشكل منظم، ويقارنها بالدراسات المرجعية، ويفسرها تفسيرًا علميًا، ويخلص إلى استنتاجات وتوصيات عملية.

الفصل الأول



الإطار النظري وأسس انتقال الحرارة في الموائع

1- مقدمة الفصل

يهدف هذا الفصل إلى تقديم الأسس النظرية والمفاهيم الأساسية التي تحكم ظاهرتي انتقال الحرارة وجريان الموائع، مع التركيز على الأنماط المختلفة لانتقال الحرارة (التوصيل، الحمل، الإشعاع)، وخصائص الموائع، وتصنيفات الجريان، والأعداد اللا بعدية المستخدمة في التحليل الحراري. كما يتناول الفصل دراسة حالة تطبيقية لأنبوب فنتوري، مستعرضاً الأبعاد الهندسية، والشروط الهيدروديناميكية والحرارية، وأهمية النمذجة العددية (CFD) في تحليل مثل هذه الأنظمة.

1.1. انتقال الحرارة: المفاهيم الأساسية

1.1.1.تعريف انتقال الحرارة

انتقال الحرارة هو عملية انتقال الطاقة الحرارية من وسـط ذي درجة حرارة مرتفعة إلى وسـط ذي درجة حرارة منخفضـة نتيجة فرق درجات الحرارة بينهما. وتحدث هذه العملية وفقًا للقانون الثاني للديناميكا الحرارية، الذي ينص على أن الحرارة تنتقل تلقائيًا من الأجسام الساخنة إلى الأجسام الباردة حتى الوصول إلى حالة التوازن الحراري.[5]

2.1.1. أنماط انتقال الحرارة

يتم انتقال الحرارة وفق ثلاثة أنماط رئيسية:

أ. التوصيل الحراري(Conduction)

التوصيل هو آلية انتقال الحرارة عبر الأوساط الصلبة (أو الموائع الساكنة) نتيجة تلامس الجزيئات المجاورة. تخيل ملعقة معدنية في قدح شاي ساخن؛ الحرارة تنتقل عبر الملعقة من الطرف الساخن المغمور إلى الطرف البارد الذي تمسكه. يحدث هذا على المستوى المجهري بسبب اهتزاز الذرات والجزيئات وتصادمها، أو بسبب حركة الإلكترونات الحرة في المعادن ، ويُوصف بقانون فوريه: [6]

$$q = -KA\frac{dT}{dx} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (1.1)$$

حيث:

- q: معدل انتقال الحرارة (الفيض الحراري) بوحدة واط (W)
- k: معامل التوصيل الحراري للمادة (W/m·K)
- A: مساحة المقطع العرضي الذي تنتقل من خلاله الحرارة (m^2)
- $\frac{dT}{dx}$: التدرج الحراري، أي التغير في درجة الحرارة بالنسبة للمسافة (K/m)
- الإشارة السالبة (−): تشير إلى أن الحرارة تنتقل من المنطقة الأعلى حرارة إلى المنطقة الأقل حرارة

ب) الحمل الحراري(Convection)

الحمل هو آلية انتقال الحرارة نتيجة حركة المائع نفسه (سائلاً كان أم غازاً). تنتقل الحرارة عندما تحملها جزيئات المائع المنتقلة من مكان لآخر. هذه الآلية تتضمن مزيجًا من تأثيرين: الانتشار الحراري (التوصيل) وانتقال الطاقة بواسطة حركة المائع العيانية.

ينقسم الحمل الحراري إلى نوعين رئيسيين :

- **الحمل الطبيعي (أو الحر)** : تنشأ حركة المائع نتيجة فروق في الكثافة ناتجة عن فروق في درجات الحرارة داخل المائع. فالهواء الساخن يصبح أقل كثافة فيرتفع لأعلى، ويحل محله هواء بارد، مما يخلق دورة حمل طبيعية. مثال على ذلك تيارات الحمل في الغلاف الجوي أو تسخين الماء في قدر على النار قبل أن يغلي
- **الحمل القسري** : تُولَّد حركة المائع بوسائل خارجية مثل مضخة أو مروحة. المائع يُجبر على الجريان فوق سطح ساخن أو بارد. مثال على ذلك مروحة التبريد داخل الحاسوب، أو مضخة الماء في نظام تبريد السيارة **[7]**

يُحسب معدل انتقال الحرارة بالحمل باستخدام قانون نيوتن للتبريد:

$$q = hA(T_s - T_f) \dots\dots\dots\dots\dots (2.1)$$

- q : معدل انتقال الحرارة (أي كمية الحرارة المنتقلة في الثانية) بوحدة واط (W)
- h: معامل انتقال الحرارة ($W/m^2 \cdot K$).
- A: مساحة السطح المعرضة للوسط المحيط (m^2)
- T_s: درجة حرارة الجسم الصلب (°C أو °K) .
- T_f: درجة حرارة الوسط المحيط (المائع °C أو °K) .

ج) الإشعاع الحراري(Radiation)

الإشعاع هو انتقال الطاقة على شكل موجات كهرومغناطيسية (فوتونات). وجميع الأجسام التي درجة حرارتها أعلى من الصفر المطلق تُصدر إشعاعًا حراريًا. الفرق الجوهري بين الإشعاع والآليتين السابقتين هو أن الإشعاع لا يحتاج إلى وسط مادي لينتقل عبره؛ فهو ينتقل في الفراغ بكفاءة عالية. خذ مثال ذلك وصول حرارة الشمس إلى الأرض عبر الفضاء. **[8]**

يُوصف معدل الإشعاع المنبعث من سطح جسم أسود (جسم مثالي يمتص ويصدر كل الإشعاع) بقانون ستيفان–بولتزمان:

$$q = \varepsilon\, \sigma\, A\, (T_s^4 - T_\infty^4) \dots\dots\dots\dots\dots\dots (3.1)$$

- حيث:
  - صافي معدل انتقال الحرارة بالإشعاع (W) .
  - ε : معامل الانبعاثية للمادة (عدد بين 0 و 1، الجسم الأسود المثالي = 1).
  - σ : ثابت ستيفان–بولتزمان $\sigma = 5{,}67 \times 10^{-8} \left(\frac{w}{m^2 K^4}\right)$
  - A : مساحة سطح الجسم الباعث (m²) .
  - T_s: درجة حرارة السطح الباعث (بالكلفن).
  - T_∞ : درجة حرارة الوسط المحيط أو الأسطح المجاورة (بالكلفن).

الشكل (1.1) يوضح و يلخص آليات انتقال الحرارة (التوصيل، الحمل، الإشعاع).



الشكل (1.1): آليات انتقال الحرارة (التوصيل، الحمل، الإشعاع) **[6]**

2.1. جريان الموائع: الأسس الفيزيائية

1.2.1. تعريف المائع

المائع هو مادة قابلة للانسياب تأخذ شكل الإناء الذي توضع فيه، وتشمل كل من السوائل والغازات، وتتميز بعدم امتلاكها شكلًا ثابتًا وقدرتها على التدفق تحت تأثير القوى الخارجية**[9]**.

2.2.1. التعريف الأكاديمي:

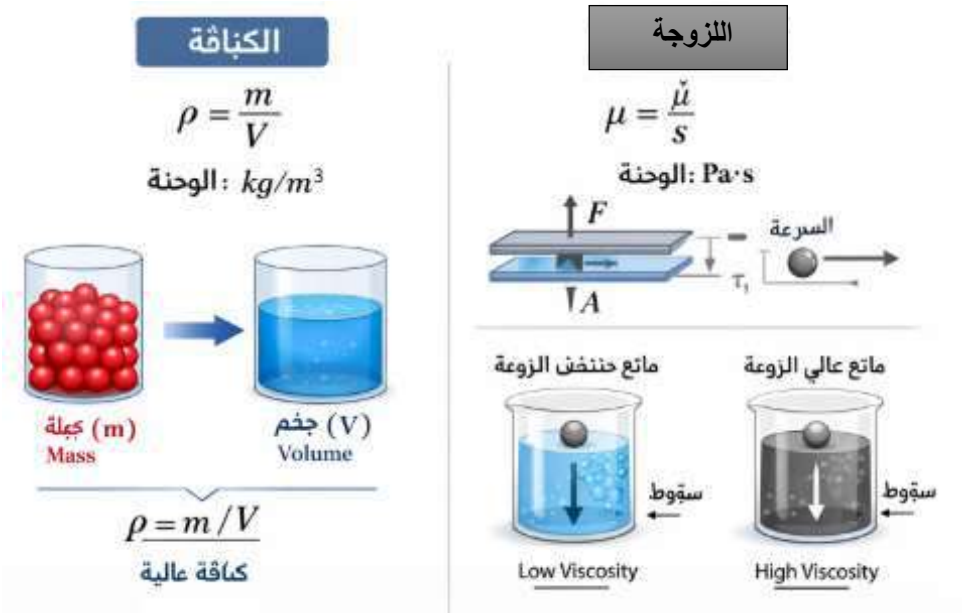
المائع هو مادة لا تستطيع أن تحافظ على شكل ثابت عند تطبيق إجهاد قص مهما كان صغيرًا عليها، وتستمر في التشوه (الجريان) طالما استمر ذلك الإجهاد. **[10]**

يتميز المائع بخصائص فيزيائية أساسية وهي :

- **الكثافة** :(ρ) هي كتلة وحدة الحجوم من المائع، وتُعبر عن مدى تركيز المادة في الفراغ. تلعب دورًا حاسمًا في حساب القصور الذاتي للمائع وفي ظاهرة الحمل الطبيعي حيث تؤدي الفروق في الكثافة الناتجة عن الفروق في درجات الحرارة إلى توليد حركة للمائع.

- **اللزوجة** :(μ) هي مقياس لمقاومة المائع للجريان (أي الاحتكاك الداخلي بين طبقاته). تخيل الفرق بين صب العسل وصب الماء؛ العسل له لزوجة أعلى. تنقسم اللزوجة إلى لزوجة ديناميكية (μ) ولزوجة حركية ($\nu = \mu/\rho$) . اللزوجة هي المسؤولة عن تحول جزء من الطاقة الحركية للجريان إلى حرارة.
- **الضغط** :(P) هو القوة المؤثرة عموديًا على وحدة المساحات داخل المائع. في الموائع الساكنة، ينتقل الضغط بالتساوي في جميع الاتجاهات (مبدأ باسكال). في الموائع المتحركة، يرتبط الضغط ارتباطًا وثيقًا بالسرعة (تأثير برنولي).
- **درجة الحرارة** :(T) هي مقياس للطاقة الحركية للجزيئات. تمثل القوة الدافعة لانتقال الحرارة؛ فالحرارة تنتقل دائمًا من المنطقة ذات درجة الحرارة المرتفعة إلى المنطقة ذات درجة الحرارة المنخفضة .

و الشكل (2.1) يوضح تمثيل تخطيطي لخصائص المائع (الكثافة، اللزوجة).



الشكل (2.1): تمثيل تخطيطي لخصائص المائع (الكثافة، اللزوجة) **[11]**

3.2.1. أنواع الموائع

أ) الموائع النيوتنية

وهي التي تتبع قانون نيوتن للزوجة، حيث يكون التغير في الإجهاد القصي متناسبًا خطيًا مع معدل التغير في السرعة**[11]**

أمثلة:

الماء، الهواء الكحول، **الزيوت المعدنية** (في ظروف معينة)

ب) الموائع غير النيوتنية

المائع غير النيوتني هو مائع لا تكون العلاقة بين إجهاد القص ومعدل التغير في السرعة خطية. أي أن لزوجته تتغير مع معدل القص أو مع الزمن، ولا يمكن وصف سلوكه بقانون نيوتن للزوجة **[12].**

أمثلة:

معجون الأسنان، لكاتشب، الطين، الدم، الطلاء

3.1. جريان الموائع

1.3.1. تعريف جريان الموائع

جريان الموائع هو حركة المائع نتيجة تأثير قوى خارجية مثل فرق الضـغط أو الجاذبية، ويتميز بسـلوك معقد يعتمد على خصائص المائع وشروط الجريان **[13]**

2.3.1. تصنيف أنماط الجريان

أ) حسب الزمن

- جريان مستقر
- جريان غير مستقر

ب) حسب الفضاء

- جريان أحادي البعد
- جريان ثنائي الأبعاد

- جريان ثلاثي الأبعاد

ت) حسب اللزوجة

- جريان لزج
- جريان غير لزج

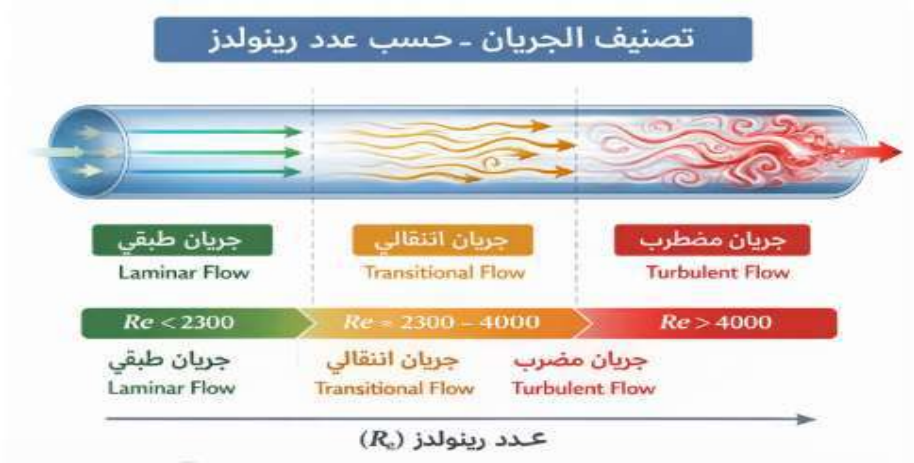
ث) القدرة على الانضغاط

- جريان قابل الانضغاط
- جريان غير قابل لانضغاط

ج) حسب طبيعة الجريان

- جريان طباقي أو رقائقي (Laminar)
- جريان انتقالي
- جريان اضطرابي(Turbulent)
- جريان دوراني
- جريان لا دوراني

ويُحدد هذا التصنيف أساسًا بواسطة **رقم رينولدز**، الشكل (3.1).



الشكل (3.1.): تصنيف الجريان حسب عدد رينولدز **[13]**

4.1. الأعداد اللابعدية في انتقال الحرارة وجريان الموائع

1.4.1. رقم رينولدز (Re)

2.4.1. رقم برانتل (Pr)

يمثل نسبة انتشار الزخم إلى الانتشار الحراري.

يعطي بالعبارة التالية :

$$\Pr = \frac{C_P \mu}{K} = \frac{\left(\frac{U}{\rho}\right)}{\left(\frac{K}{\rho C_P}\right)} = \frac{\nu}{\alpha} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (5.1)$$

حيث:

ν : اللزوجة الحركية (انتشار الزخم) $\nu = \frac{U}{\rho}$

α : الانتشارية الحرارية $\alpha = \frac{C_p \mu}{K}$

c_p: الحرارية النوعية $(J/kg \cdot K)$

k : التوصيلية الحرارية $(W/m \cdot K)$

- إذا كان $\Pr \ll 1$: الانتشار الحراري أسرع بكثير من الانتشار اللزجي (مثل المعادن السائلة).
- إذا كان $\Pr \gg 1$: الانتشار اللزجي أسرع بكثير من الانتشار الحراري (مثل الزيوت).
- إذا كان $\Pr \approx 1$: كلا الانتشارين متقاربان (مثل الغازات) **[10.11]**

3.4.1. رقم نسلت(Nu)

يعبر عن شدة انتقال الحرارة بالحمل مقارنة بالتوصيل.

يعطي بالعبارة التالية :

$$Nu = \frac{h\,L}{K_f} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (6.1)$$

حيث:

h : معامل انتقال الحرارة بالحمل($W/m^2 \cdot K$)

L : الطول المميز(m)

K_f : التوصيلية الحرارية للمائع($W/m \cdot K$)

علما أنه :

- إذا كان :Nu =1 يعني أن انتقال الحرارة يتم فقط بالتوصيل، ولا يوجد تأثير للحمل.
- إذا كان :Nu >1 هناك تعزيز لانتقال الحرارة بسبب الحمل (سواء طبيعي أو قسري).
- كلما زاد رقم نوسلت، زادت كفاءة انتقال الحرارة بالحمل مقارنة بالتوصيل. **[10.11]**

4.4.1. رقم جراشوف

رقم جراشوف يعتبر مقياس للنسبة بين قوة اللزوجة في المنطقة المحددة للسرعة

ويعرف كما يلي:

$$G_{rL} = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\gamma^2} \dots\dots\dots\dots\dots\dots (7.1)$$

ويلعب معامل جراشـوف دورا مهما في حالة الحمل الطبيعي (الحر)مماثلا للدور الذي يلعبه رقم رينولدز في حالة الحمل "الجبري أو القسري **[10.11]**

5.1. الطبقة المتاخمة (الحدية) الهيدروديناميكية

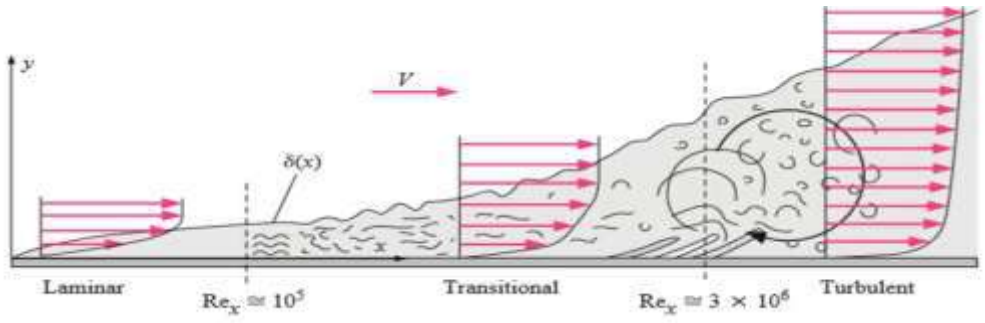
1.5.1. تعريف الطبقة (الحدية) المتاخمة

منطقة رقيقة ملاصقة لسطح جسم صلب مغمور في مائع متحرك، حيث تكون تأثيرات اللزوجة كبيرة ولا يمكن إهمالها، وتحدث فيها تغيرات كبيرة في سرعة المائع ودرجة حرارته من الصفر عند السطح (شرط الالتصاق) إلى قيمها السائدة في الجريان الحر بعيداً عن السطح. **[14]**

2.5.1. تطور الطبقة (الحدية) المتاخمة

الشكل (4.1) يوضح المناطق المختلفة الموجودة في حالة الجريان على صفيحة مثلا:

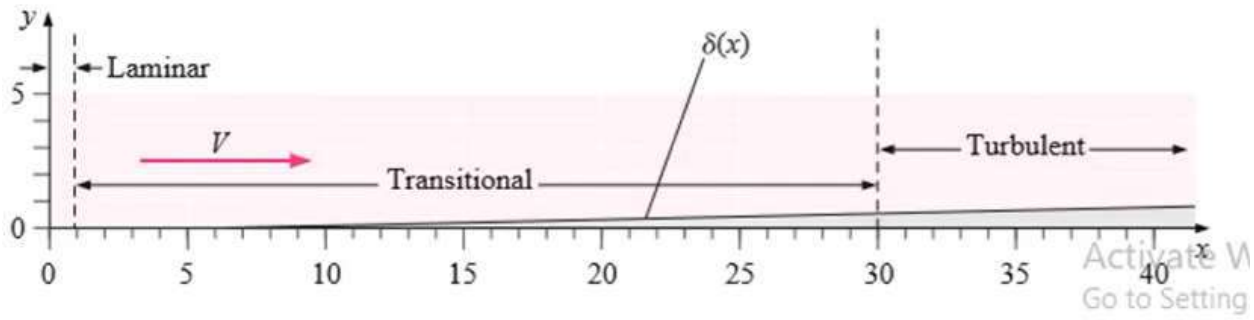
- منطقة طباقية
- منطقة انتقالية
- منطقة اضطرابية



الشكل (4.1): الانتقال من الطبقة الحدودية الصفائحية (الانتظامية) إلى الطبقة الحدودية المضطربة. **[15]**

3.5.1. سمك الطبقة المتاخمة

يزداد سمك الطبقة المتاخمة مع المسافة على طول الجدار، ويتأثر بسرعة الجريان ولزوجة المائع و الشكل (5.1) يوضح ذلك.



الشكل (5.1): سمك الطبقة الحدودية. **[15]**

6.1. الطبقة المتاخمة الحرارية

1.6.1. تعريف الطبقة المتاخمة الحرارية

هي المنطقة التي يحدث فيها تغير ملحوظ في درجة الحرارة بين الجدار والمائع. **[16]**

2.6.1. العلاقة بين الطبقتين الحرارية والهيدروديناميكية

- إذا Pr>1: الطبقة الحرارية أرق
- إذا Pr<1: الطبقة الحرارية أسمك

ملاحظة: هذه العلاقة تؤثر مباشرة على انتقال الحرارة.

7.1. المعادلات الحاكمة للجريان الموائع

1.7.1.معادلة برنولي

تصف نظرية برنولي العلاقة بين السرعة والضغط والارتفاع لسائل متدفق في خط انسيابي. و تنص على أن الضغط الديناميكي بالإضافة إلى الضغط الساكن في التدفق ، نصف الكثافة مضروبة في السرعة، يساوي ثابتًا في جميع أنحاء التدفق. يسمى الثابت بالضغط الكلي للتدفق .

أو بشـــكل أبســـط يمكننا القول أن معادلة برنولي تنص على أن مجموع الطاقات المحتملة والحركية والتدفق للسائل يكون ثابت في خط انسيابي في تدفق ثابت. **[17]**

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g Z_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g Z_2 \dots\dots\dots\dots\dots\dots (8.1)$$

حيث :

- ρ : كثافة المائع(Kg/m^3)
- P : الضغط (P_a)
- $\vec{V}$: حقل السرعة(m/s)
- g : تسارع الجاذبية الأرضية (m/s^2)
- z : *الارتفاع* (m)

2.7.1. معادلة الاستمرارية

الفكرة :الكتلة لا تُخلق ولا تُفنى داخل حجم تحكم ساكن**[18]**.

الصيغة العامة التفاضلية :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}(\rho \vec{V}) = 0 \dots\dots\dots\dots\dots\dots (9.1)$$

الحالات الخاصة

أ. في حالة سريان مستقر (ثابت مع الزمن) تكتب المعادلة الأخيرة بالشكل :

$$\mathrm{div}(\rho \vec{V}) = 0 \dots\dots\dots\dots\dots\dots (10.1)$$

ب. في حالة سريان غير قابل لانضغاط (كثافة ثابتة) تكتب المعادلة الأخيرة بالشكل :

$$\mathrm{div}\, \vec{V} = 0 \dots\dots\dots\dots\dots\dots (11.1)$$

الصيغة التكاملية :

$$\frac{d}{dt}\iiint \rho dV + \iint \rho \vec{V}.\vec{n}.dA = 0 \dots\dots\dots\dots\dots\dots (12.1)$$

حيث :

- ρ : كثافة المائع(Kg/m^3)
- t: الزمن (s)
- $\vec{V}$: حقل السرعة(m/s)
- $\vec{n}$: متجه الوحدة العمودي على السطح
- dA : مساحة عنصر السطح

تفسيرها :

معدل تغير الكتلة داخل حجم معين + صافي تدفق الكتلة للخارج من ذلك الحجم = صفرٍ **[19]**.

الحالات الخاصة

أ. في حالة سريان مستقر (ثابت مع الزمن) تكتب المعادلة الأخيرة بالشكل :

$$\iint \rho\vec{V}.\vec{n}.dA = 0 \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (13.1)$$

هذا يعني :

أن الكتلة الداخلة تساوي الكتلة الخارجة (مقدار التدفق الداخل = التدفق الخارج).

ب. في حالة سريان غير قابل لانضغاط (كثافة ثابتة) تكتب المعادلة الأخيرة بالشكل :

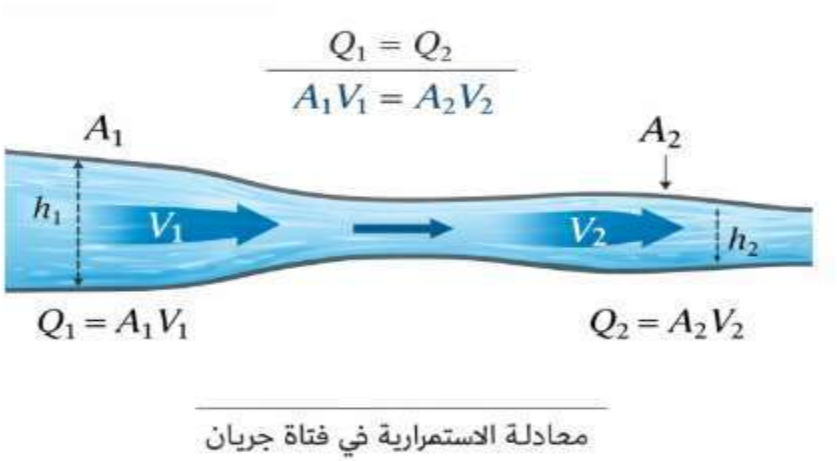
$$\iint \vec{V}.\vec{n}.dA = 0 \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (14.1)$$

هذا يعني أن صافي التدفق الحجمي عبر السطح يساوي الصفر .

لتدفق أحادي البعد وغير قابل لانضغاط عبر مدخل ومخرج تصبح المعادلة ببساطة كالاتي :

$$V_1A_1 = V_2A_2 \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (15.1)$$

و الشكل (6.1) يوضح حالة جريان داخل أنبوب تيار.



الشكل (6.1): تمثيل معادلة الاستمرارية في قناة جريان. **[17]**

3.7.1. معادلات الزخم (نافيير-ستوكس)

تعتبر معادلات نافييه-ستوكس (Navier-Stokes) القلب النابض لميكانيكا الموائع. هي مجموعة من المعادلات التفاضلية الجزئية غير الخطية التي تصف حركة المواد المائعة (سوائل وغازات). هذه المعادلات هي في الأساس تطبيق لقانون نيوتن الثاني للحركة (القوة = الكتلة × التسارع) على عنصر صغير جدًا من المائع.

الفكرة :

قانون نيوتن الثاني $\sum \vec{F} = m\vec{a}$ مُطبق على المائع. **[18]**

معدل تغير زخم المائع يساوي مجموع القوى المؤثرة عليه وهي : **(قوى الضغط + قوى لزوجة + قوى جسم مثل الجاذبية)**

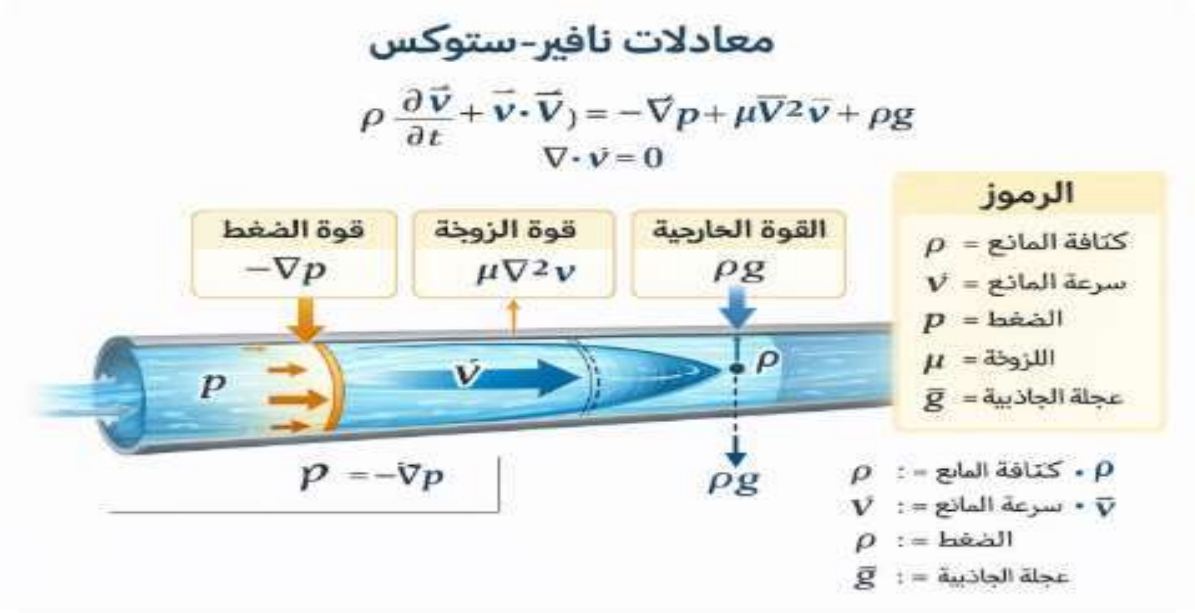
الصيغة العامة (للمائع النيوتوني والقابض للانضغاط):

$$\rho\left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \frac{1}{2}\overrightarrow{grad}\,(V^2) - \vec{V} \times \overrightarrow{rot}\vec{V}\right) = -\overrightarrow{grad}\,p + \mu\,\Delta\vec{V} + \rho\vec{g} \ldots\ldots\ldots (16.1)$$

تفصيل الحدود:

- **الجانب الأيسر (العطالة / التسارع):**
  - $\rho\left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial t}\right)$: التسارع المحلي (غير الدائم).
  - $\rho\left(\frac{1}{2}\overrightarrow{grad}\,(V^2) - \vec{V} \times rot\vec{V}\right)$: التسارع الحملاني (بسبب حركة المائع نفسه).

- **الجانب الأيمن (القوى):**
  - $\overrightarrow{grad\ p}$: قوة تدرج الضغط (يتحرك المائع من الضغط العالي إلى المنخفض).
  - $\mu\ \Delta\vec{V}$: قوى اللزوجة (تأثير الاحتكاك الداخلي، μهي اللزوجة الديناميكية)
  - $\rho\vec{g}$: قوى الحجم (غالبًا الجاذبية).



الشكل (7.1): توضيح معادلاتNavier-Stokes **[18]**

8.1. أنبوب فنتوري

1.8.1. مبد أعمل أنبوب فنتورى

أنبوب فنتوري هو جهاز هيدروديناميكي يُستعمل لقياس **سرعة الجريان أو معدل التدفق** في الموائع (سواء كانت سوائل أو غازات). يعتمد في عمله أساسًا على قانونين مهمين في ميكانيكا الموائع: **[19]**

- **مبدأ برلوني**
- **معادلة الإستمرارية**

التركيب الهندسي لأنبوب فنتوري

يتكون أنبوب فنتوري عادة من ثلاث مناطق رئيسية:

1. **المدخل**

جزء متناقص القطر يؤدي إلى زيادة سرعة المائع تدريجيًا.

2. **منطقة الخنق**

أضيق جزء في الأنبوب، حيث تكون **السرعة أكبر ما يمكن** والضغط أقل ما يمكن.

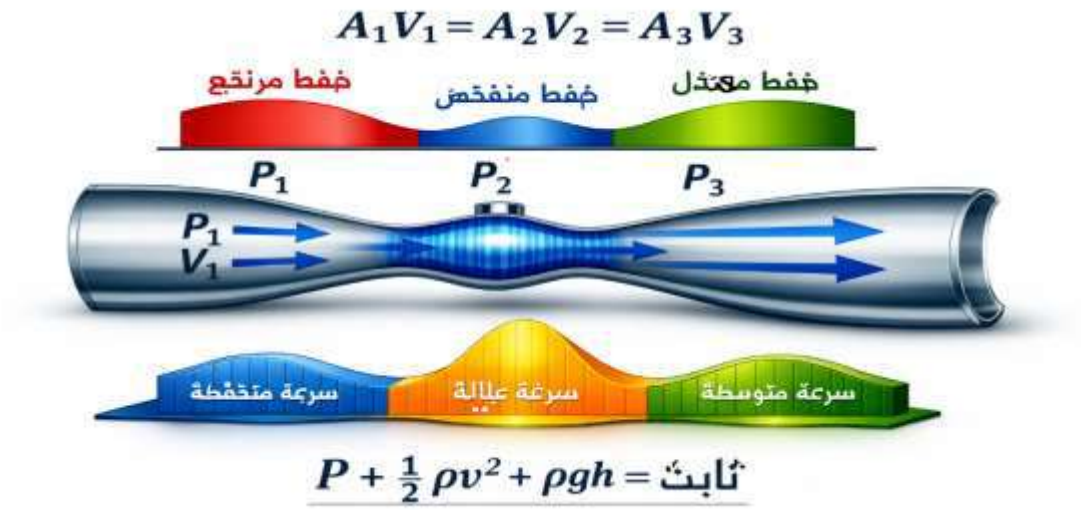
3. **الناشر**

جزء متزايد القطر، حيث تنخفض السرعة ويرتفع الضغط مرة أخرى.

المبدأ الفيزيائي للعمل

عندما يمر المائع داخل الأنبوب:

1. عند **المدخل** تكون السرعة صغيرة نسبيًا والضغط مرتفع.
2. عندما يصل المائع إلى **منطقة الخنق**:
   - تقل مساحة المقطع.
   - تزداد السرعة.
   - ينخفض الضغط.
3. بعد الخنق في **الناشر**:
   - تقل السرعة تدريجيًا.
   - يرتفع الضغط مرة أخرى



الشكل (8.1): توزيع الضغط والسرعة داخل أنبوب فنتوري**[13]**

2.8.1. التطبيقات الصناعية والمخبرية لأنبوب فنتورى

أ. التطبيقات الصناعية

- **قياس تدفق الغازات** :يستخدم في محطات الطاقة، الصناعات البتروكيميائية، وأنظمة الاحتراق لمراقبة تدفق الغاز بدقة.
- **قياس تدفق السوائل** :في الصناعات الكيميائية والغذائية لمعرفة معدل التدفق في خطوط الإنتاج.
- **أنظمة التبريد والتكييف** :لمراقبة تدفق الماء أو المبردات في الدوائر المغلقة.
- **خطوط الأنابيب** :يستخدم في شبكات نقل النفط والغاز لضمان التحكم في التدفق وتقليل الخسائر.
- **محطات معالجة المياه** :للتحكم في تدفق المياه أثناء عمليات الترشيح والمعالجة.

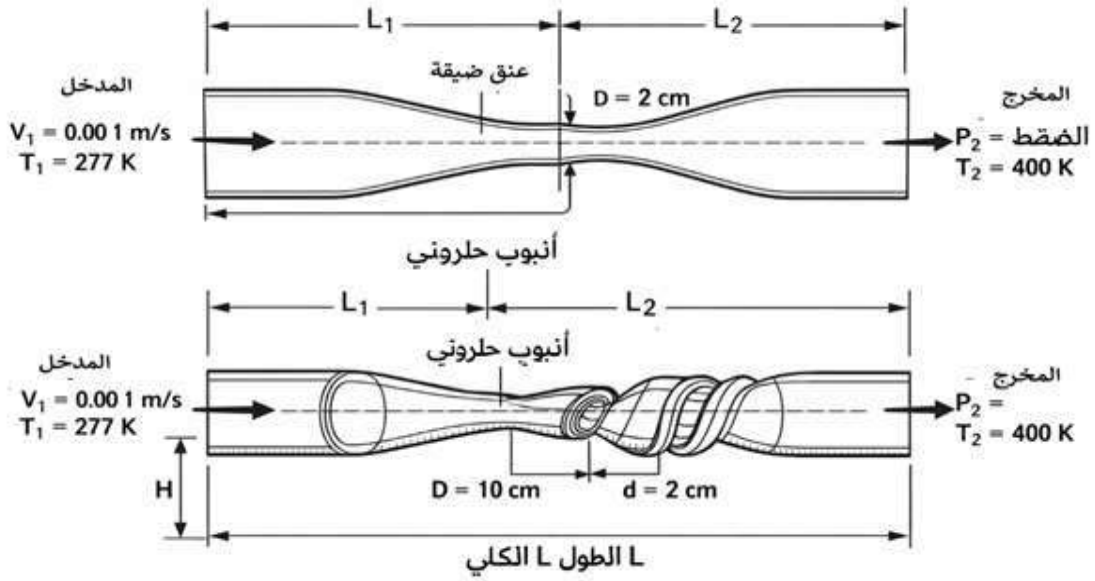
ب. التطبيقات المخبرية

- **التجارب التعليمية** :يستخدم في مختبرات الهندسة الميكانيكية والحرارية لتوضيح مبدأ برنولي وتأثير فنتوري.
- **المختبرات البيولوجية** :في الأنظمة الدقيقة (Micro Venturi) للتحكم في تدفق السوائل الصغيرة جدًا.

- **المعايرة والتحقق** :يستخدم كأداة مرجعية لمعايرة أجهزة قياس التدفق الأخرى.

9.1. الهندسة والأبعاد الرئيسية

نعتبر أنبوب فنتوري و الذي هو أنبوب يحوي رقبة ضيقة بحيث قطره $10cm$ و قطر عنقه $2cm$ و أنبوب آخر مثيل له لكنه حلزوني كما هو موضح في الشكل (9.1) بحيث يجري داخله مائع كتلته الحجمية $998.2kg/m^3$ و سعته الحرارية $4182\ J/(kg\ K)$ و ناقليته الحرارية $0.6\ W/(m\ K)$ و معامل لزوجته الديناميكية $0.001003\ kg/(m\ s)$ مع العلم أن سرعة المائع عند مدخل الأنبوب تساوي $0.001\ m/s$ و الضغط عند مخرج الأنبوب يساوي الضغط الجوي و كذلك درجة حرارة جدار الأنبوب تساوي $400K$ و درجة الحرارة عند مدخل الأنبوب تساوي $277K$ ، الشكل (9.1) يوضح الأبعاد الهندسية لأنبوب فنتوري المستعمل في النمذجة ، حيث يُبين الجدول (1.1) الأبعاد والمعايير الهندسية الرئيسية لنموذج أنبوب فنتوري المُعتمد في هذه الدراسة العددية. تم تحديد هذه القيم بناءً على التصميم القياسي لأنابيب فنتوري وفقاً لمواصفة ISO 5167-4 ، مع مراعاة متطلبات الجريان الرقائقي وانتقال الحرارة المقرر دراستها.



الشكل (9.1): الهندسة والأبعاد الرئيسة للأنبوب المستعمل**[13]**

جدول (1.1) **:** الأبعاد الهندسية لأنبوب فنتوري

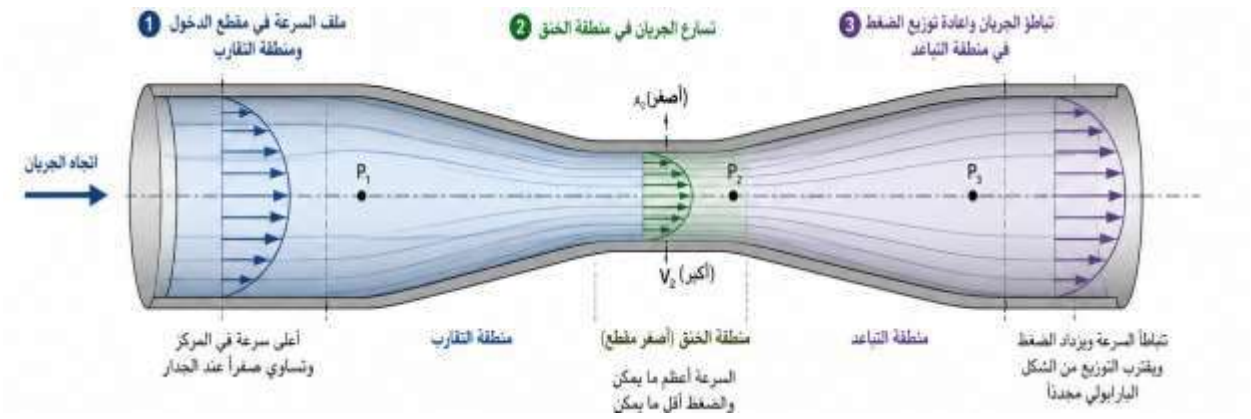
المعيار الهندسي	القيمة/الوصف
قطر المدخل D_1	10سم
قطر الخنق D_2	2سم
نسبة الخنق β	$\beta = D_2 / D_1 = 0.2$
زاوية المخروط المتقارب	21° تقريبًا
زاوية المخروط المتباعد	7° تقريبًا
طول قسم الدخول	$3 \times D_1$ = 30سم
طول قسم الخنق	$1 \times D_2$ = 2سم
طول قسم الخروج	$6 \times D_2 \approx$ 12سم

تم اختيار هذه القيم لتتوافق مع التصاميم القياسية لأنابيب فنتوري الكلاسيكية، مع مراعاة أن الجريان في هذه الدراسة هو جريان رقائقي ($Re \approx 500$) ، مما يجعل تأثير الأطوال المستقيمة قبل وبعد الخنق مهماً لضمان استقرار الحل العددي.

10.1. سلوك الجريان الرقائقي داخل أنبوب فنتوري

الشكل (10.1) يوضح مقطعاً طولياً في فوهة متقاربة- متباعدة ، لأنبوب فنتوري ، يتجه المائع من اليسار إلى اليمين، ويظهر ثلاث مناطق رئيسية ، حيث يتحقق فيها **مبدأ حفظ الكتلة والطاقة** في جريان مائع لزج داخل فوهة متقاربة-متباعد حيث نلاحظ :

- أسرع جريان عند أضيق مقطع.
- أقل ضغط عند أضيق مقطع.
- استعادة جزئية للضغط بعد التوسع.
- تأثير اللزوجة يظهر في شكل توزيع السرعة المكافئي (طبقة حدودية).



الشكل (10.1) مقطعاً طولياً في فوهة متقاربة-متباعدة لأنبوب فنتوري [20]

11.1. الشروط الضرورية للحفاظ على الجريان الصفحي(Re < 2300)

للحفاظ على الجريان الصفيح داخل جهاز فنتوري ، بشرط أن يكون رقم رينولدز أقل من 2300، يجب توفير عدة شروط ضرورية وهي :

- التحكم في رقم رينولدز طوال المسار
- دخول هادئ ومنظم للجريان
- المحافظة على أسطح داخلية ملساء ونظيفة
- تجنب التغيرات المفاجئة في المقطع أو الاتجاه
- نطاق تشغيل مستقر وخالٍ من الاضطربات
- ثبات الخصائص الفيزيائية للمائع

12.1. انتقال الحرارة داخل أنبوب فنتوري

يُعتبر أنبوب فنتوري من أهم الأنظمة المستخدمة لدراسة اقتران **الجريان وانتقال الحرارة**، لأن تغيّر مساحة المقطع يؤدي إلى تغيّر السرعة والضغط وبالتالي تغيّر شدة الحمل الحراري على طول الأنبوب.

1.12.1. تأثير تغير المقطع على معامل الحمل الحراري المحلي

عندما يمر المائع داخل أنبوب فنتوري فإن مساحة المقطع تتغير باستمرار:

- في **منطقة التقارب** تقل مساحة المقطع .
- في **منطقة الخنق** تصبح المساحة أصغر ما يمكن .
- في **منطقة التباعد** تعود المساحة للزيادة .

و حسب معادلة الاستمرارية العلاقة (13.1) ، فإن نقصان المساحة يؤدي إلى زيادة السرعة، ومعامل الحمل الحراري h يرتبط مباشرة بمساحة المقطع ودلك حسب العلاقة (2.1) لدلك فإن معامل الحمل الحراري h:

- يكون صغيرًا نسبيًا عند الدخول .
- يزداد تدريجيًا في منطقة التقارب .
- يصل إلى أكبر قيمة قرب الخنق .
- ثم ينخفض في منطقة التباعد.

2.12.1. التوزيع غير المنتظم لعدد نسلت على طول الأنبوب

من العلاقة (6.1) نلاحظ أن عدد نسلت يمثل شدة انتقال الحرارة بالحمل مقارنة بالتوصيل الحراري ، داخل أنبوب فنتوري لا يبقى عدد نسلت ثابتًا كما في الأنبوب المستقيم، بل يتغير محليًا بسبب تغير السرعة والضغط حيث يكون على طول الأنبوب :

أ. منطقة الدخول

- الطبقة الحرارية ما تزال في طور التشكل .
- قيم Nu مرتفعة نسبيًا .

ب. منطقة التقارب

- تزداد السرعة تدريجيًا .
- يرتفع القص عند الجدار .
- يبدأ عدد نسلت بالارتفاع .

ت. منطقة الخنق

- السرعة تبلغ أقصاها .
- الطبقة الحدية تصبح رقيقة جدًا .
- يحدث أعلى انتقال حراري .
- يسجل عدد نسلت أكبر قيمة .

ث. منطقة التباعد

- السرعة تنخفض .
- الطبقة الحدية تعود للنمو .
- ينخفض عدد نسلت تدريجيًا .

3.12.1. مناطق تكثّف انتقال الحرارة عند الخنق

منطقة الخنق هي أهم منطقة حراريًا داخل أنبوب فنتوري لانها تجمع بين:

- أعلى سرعة للجريان .
- أكبر تدرج في السرعة قرب الجدار .
- أرق طبقة حدية حرارية .
- أكبر قص لزج .

هذا يؤدي إلى:

- زيادة الفيض الحراري المحلي .
- تكثيف التبادل الحراري .
- رفع فعالية الحمل الحراري .

ورغم أن الجريان قد يبقى رقائقي ، فإن التسارع القوي يرفع انتقال الحرارة بشكل واضح.

4.12.1. الفرق بين أنبوب فنتوري والأنبوب المستقيم

أ. الأنبوب المستقيم

- السرعة شبه ثابتة .
- عدد نسلت يتغير ببطء .
- انتقال الحرارة أكثر انتظامًا .
- لا توجد مناطق تسارع قوية .

ب. أنبوب فنتوري

- السرعة متغيرة مكانيًا .
- الضغط يتغير باستمرار .
- انتقال الحرارة غير منتظم .
- توجد منطقة تعزيز حراري قوية عند الخنق

13.1. أهمية النمذجة العددية (CFD) في انتقال الحرارة

الفهم والتحليل

- **CFD يتيح تصور حركة الموائع وتوزيع الحرارة** داخل الأنظمة مثل المبادلات الحرارية، أنظمة التبريد، والمجففات الشمسية
- يمكن دراسة **التفاعل بين الموائع والمواد الصلبة** بدقة عالية، وهو أمر يصعب تحقيقه بالتجارب التقليدية.

تحسين الأداء

- يساعد على **تحسين كفاءة أنظمة التبريد والتدفئة** عبر تحديد مناطق فقدان الحرارة أو تراكمها.
- يمكن استخدامه لتطوير **تصاميم أكثر فعالية** في الصناعات مثل الطيران، السيارات، والطاقة المتجددة.

تقليل التكلفة والوقت

- **التجارب العملية مكلفة وبطيئة**، بينما المحاكاة العددية توفر نتائج سريعة بتكلفة أقل.
- يتيح للباحثين اختبار عدة سيناريوهات دون الحاجة لبناء نماذج فعلية**[21].**

التطبيقات العملية

- **المبادلات الحرارية** :تحسين توزيع الحرارة وتدفق الموائع.
- **المجففات الشمسية** :دراسة توزيع الهواء والحرارة داخل المجفف لزيادة الكفاءة.
- **الهندسة الهوائية** :تحسين أداء التبريد في الطائرات والمركبات.

1.13.1. مقارنة بين الطرق التقليدية وCFD

"يُظهر الجدول (2.1) مقارنة بين الطرق التقليدية والنمذجة العددية (CFD) من حيث الدقة، الزمن، التكلفة، المرونة، وإمكانية التصور".

الجدول (2.1) : مقارنة بين الطرق التقليدية والنمذجة العددية(CFD) [21]

الجانب	الطرق التقليدية	النمذجة العددية (CFD)
الدقة	محدودة بسبب صعوبة القياس	عالية بفضل الحسابات التفصيلية
الزمن والتكلفة	مرتفعة	أقل بكثير
المرونة	صعوبة تغيير الظروف	إمكانية تعديل المعلمات بسهولة
التصور	يعتمد على القياسات فقط	يوفر صور ثلاثية الأبعاد لتوزيع الحرارة

ويُعد برنامج **ANSYS Fluent** من أقوى الأدوات المعتمدة في هذا المجال.

خاتمة الفصل الأول

تناول هذا الفصل الإطار النظري الشامل الذي يُشكّل الأساس العلمي لدراسة انتقال الحرارة في الموائع المتدفقة عبر أنبوب فنتوري، إذ استُعرضت المفاهيم الجوهرية في ثلاثة محاور مترابطة.

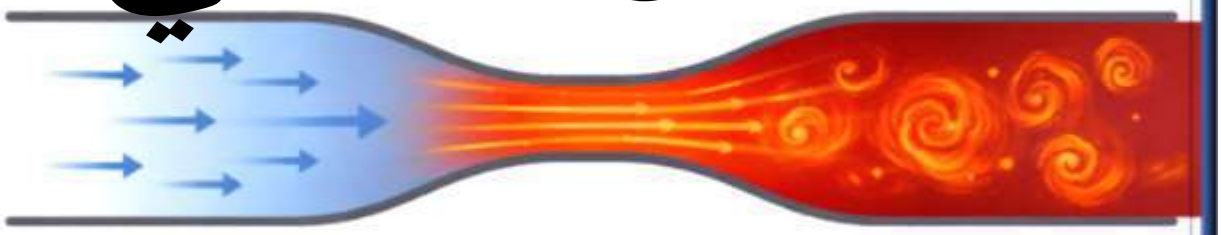
في المحور الأول، تم تناول آليات انتقال الحرارة الثلاث — التوصيل والحمل والإشعاع — من خلال قوانينها الرياضية الحاكمة، وهي قانون فوريه، وقانون نيوتن للتبريد، وقانون ستيفان-بولتزمان، والتي تُمثّل الأدوات التحليلية الأساسية لفهم آليات نقل الطاقة الحرارية.

في المحور الثاني، استُعرضت الأسس الفيزيائية لجريان الموائع، بما تشمله من خصائص الموائع النيوتونية وغير النيوتونية، وتصنيف أنماط الجريان، والأعداد اللابعدية الحاكمة كرقم رينولدز وبرانتل ونسلت وجراشوف، فضلاً عن مفهوم الطبقة الحدية الهيدروديناميكية والحرارية وتطورها على طول السطح.

في المحور الثالث، قُدّمت المعادلات الحاكمة للجريان — معادلة برنولي، معادلة الاستمرارية، ومعادلات نافيير-ستوكس — التي تُشكّل معاً المنظومة الرياضية الكاملة لوصف سلوك الموائع، ثم طُبّقت هذه الأسس على أنبوب فنتوري بوصفه نظاماً هندسياً دقيقاً يجمع بين قياس التدفق وانتقال الحرارة في آنٍ واحد.

وقد تبيّن من خلال هذا الفصل أن التفاعل بين تغيّر المقطع العرضي وتطور الطبقة الحدية وتوزيع عدد نسلت على طول الأنبوب يُفضي إلى ظاهرة انتقال حراري غير منتظمة ذات طابع معقد، لا يمكن دراستها بدقة إلا باللجوء إلى النمذجة العددية(CFD) ، التي ستُشكّل محور الفصل القادم.

الفصل الثاني



المنهجية العددية وبناء النموذج الحسابي

2. مقدمة الفصل الثاني

يمثل التحليل العددي أداة بحثية لا غنى عنها عندما يتعذر الوصـــول إلى حلول تحليلية عملية دقيقة للظواهر الفيزيائية المعقدة، خاصة تلك التي تجمع بين تغير المقطع العرضي وانتقال الحرارة.

يهدف هذا الفصل إلى بناء منهجية عددية شاملة لمحاكاة انتقال الحرارة المقترن بجريان الموائع داخل أنبوب فنتوري، مع إمكانية دراسة تأثير إضافة خاصية حلزونية على الأداء الحراري.

تعتمد الدراسـة على برنامج Gambit 2.3.16 لإنشـاء الهندسـة والشـبكة العددية، وبرنامج Fluent 6.3.26 لإجراء المحاكاة العددية بطريقة الحجوم المحددة.(FVM)

سيتناول الفصل بالتفصيل خطوات بناء النموذج بدءاً من وصف هندسة فنتوري العادي وتحديد أبعادها كما وردت في الشكل (9.1) المرجعي، مروراً بتوليد شبكة عددية محكمة واختبار استقلاليتها، ثم إعداد النموذج الفيزيائي بخواص المائع المعطاة والشروط الحدية المحددة، وانتهاءً بالتحقق من صحة النموذج .

1.2. طريقة الحل العددي

1.1.2 طريقة الحجوم المحددة

اعتمدت هذه الدراســـة على طريقة الحجوم المحددة كأســـاس للحل العددي، وهي الطريقة المعتمدة في برنـامج Fluent6.3.26. تقوم هذه الطريقة على تكامل المعادلات الحاكمة (الاسـتمرارية، الزخم، الطاقة) على كل حجم تحكم في النطاق الحسـابي، ثم تحويل التكاملات السـطحية إلى تدفقات عبر وجوه الحجم، مما يؤدي إلى نظام من المعادلات الجبرية التي تحل بتقنيات تكرارية، حيث يُقسَّم المجال الفيزيائي إلى عدد من الحجوم الصغيرة (خلايا)، ويُطبَّق قانون حفظ الكتلة أو الطاقة أو الزخم على كل حجم منها.

بهذه الطريقة، تُحوَّل المعادلات التفاضلية إلى معادلات جبرية يمكن حلّها عدديًا [22]

يتمثل التكامل العام لمعادلة النقل لأي كمية في العلاقة التالية :

$$\iiint \frac{\partial(\rho\emptyset)}{\partial t}\,dv + \oiint \frac{\partial(\rho\vec{V}\emptyset)}{\partial t}\,d\vec{A} = \oiint (\Gamma_\phi \nabla\emptyset)d\vec{A} + \iiint S_\emptyset\,dv \dots\dots\dots (1.2)$$

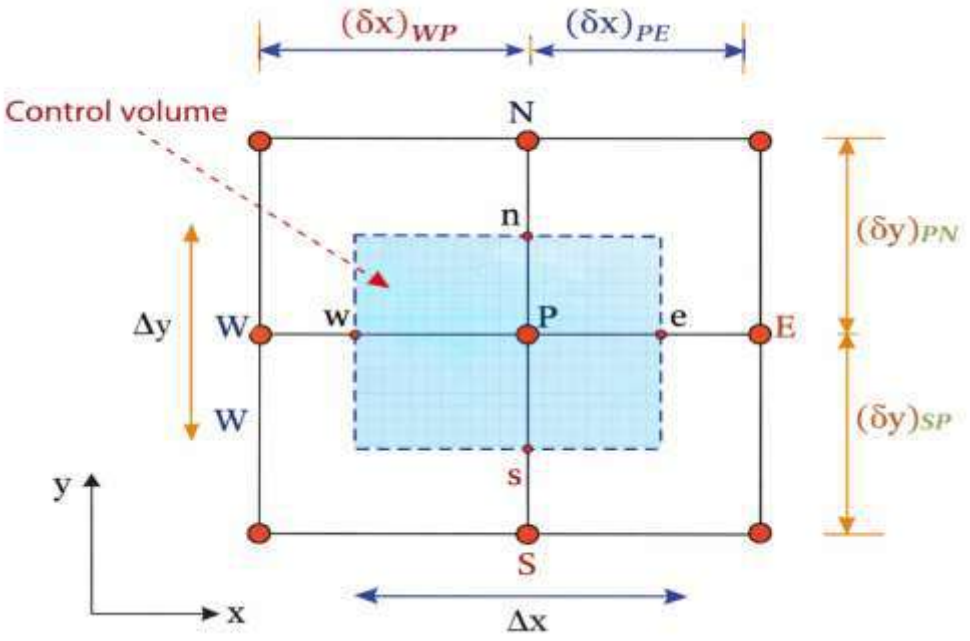
حيث :

- $\emptyset$: هي الكمية المنقولة (سرعة، درجة حرارة، إلخ)
- Γ_ϕ :عامل الانتشار
- $S_\emptyset$: حد المصدر.

يُمثّل الشكل (1.2) **مبدأ تقسيم المجال الحسابي بطريقة الحجوم المحددة (Finite Volume Method)** في التحليل العددي أو ديناميكا الموائع الحسابية.(CFD)

حيث :

- **Volume de contrôle**:هو الحجم المحدد أو الخلية العددية التي تُجرى عليها الحسابات.
- **النقطة P**: تمثل مركز الخلية أو العقدة التي تُحسب عندها القيم (مثل الضغط أو السرعة).
- **النقاط N, S, E, W**: تمثل المراكز المجاورة شمالًا، جنوبًا، شرقًا، وغربًا.
- **المسافات** :$(\delta x)_{WP}$, $(\delta x)_{PE}$, $(\delta y)_{PN}$, $(\delta y)_{SP}$ هي المسافات بين النقطة المركزية P والنقاط المجاورة، وتُستخدم لحساب التدفقات عبر حدود الخلية.
- **Δx و Δy** تمثل أبعاد الخلية في الاتجاهين الأفقي والرأسي.
- **المحاور x و y** تُظهر الاتجاهات في المجال الحسابي.



الشكل (1.2) : مبدأ تقسيم المجال الحسابي بطريقة الحجوم المحددة**[22]**

2.1.2 خوارزمية SIMPLE لربط الضغط بالسرعة

نظراً لعدم وجود معادلة مستقلة للضغط في معادلات نافييه-ستوكس، تم استخدام خوارزمية **SIMPLE** (Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations) التي طورها Patankar و Spalding . تعتمد الخوارزمية على الخطوات التالية :[23]

1. **تخمين** مجال الضغط p^* .
2. حل معادلات الزخم للحصول على حقول السرعة التقريبية u^*,v^*

3. **حساب معادلة تصحيح الضغط:**

$$\nabla\left(\frac{1}{aP}\nabla P'\right)=\frac{\rho}{\Delta t}\nabla\vec{u}^* \dots\dots\dots\dots\dots\dots(2.2)$$

4. **تصحيح الضغط والسرعات:**

$$P=P^*+\alpha P' \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots(3.2)$$

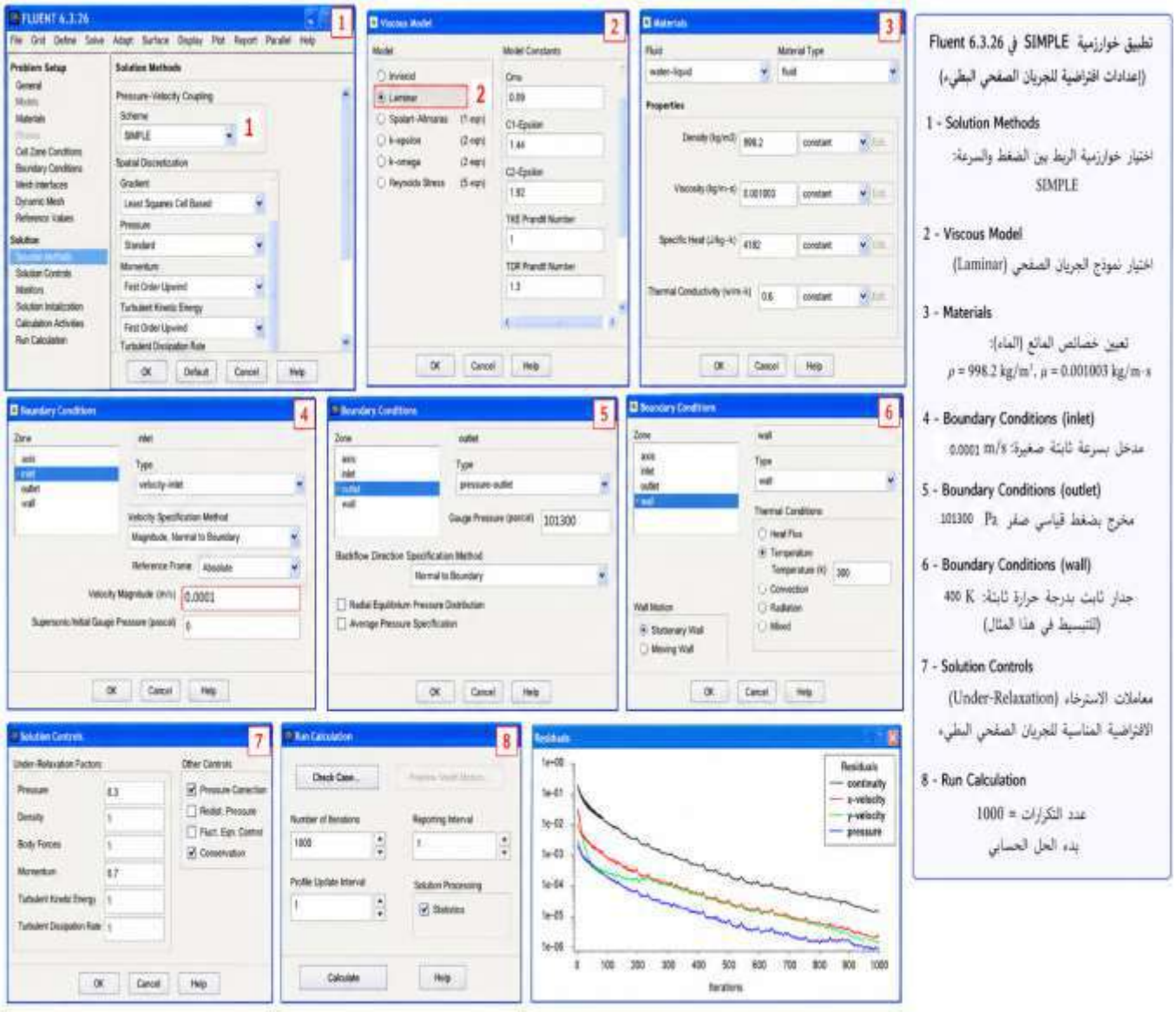
$$\vec{u}=\vec{u}^*-\frac{V}{\alpha P}\nabla P' \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots(4.2)$$

حيث $\alpha P=0.3$ عامل استرخاء الضغط.

5. **التكرار حتى تحقيق معايير التقارب.**

طبقت هذه الخوارزمية في Fluent 6.3.26 مع إعدادات افتراضية مناسبة للجريان الصفحي البطيء.

الشكل (2.2) يوضح الخطوات من 1 إلى 8 عند تطبيق هده الخوارزمية في برنامج Fluent 6.3.26



الشكل (2.2) خطوات تطبيق خوارزمية **SIMPLE** في برنامج Fluent 6.3.26

3.1.2. معايير التقارب المعتمدة

لتحديد وصول الحل إلى حالة مستقرة، تم اعتماد البقايا المطلقة (Absolute Residuals) التالية لكل معادلة، مع مراقبة استقرار رقم نسلت المحلي عند المخرج، حيث يمثل الجدول (1.2) معايير التقارب المعتمدة في المحاكاة العددية، حيث تم تحديد البقايا المطلقة لكل من معادلات الاستمرارية والزخم والطاقة. تم إجراء 1500 تكرار كحد أقصى لكل محاكاة، مع تحقيق التقارب الفعلي بعد 800-1000 تكرار في معظم الحالات .

جدول (1.2) :معايير التقارب العددي[24]

المعادلة	البقية المطلقة	ملاحظات
الاستمرارية	10^{-6}	مع مراقبة التوازن الكتلي
الزخم في الاتجاه المحوري	10^{-6}	عند المدخل والمخرج
الزخم في الاتجاه القطري	10^{-6}	للمقاطع العرضية
الطاقة	10^{-8}	لدقة انتقال الحرارة

2.2. بناء النموذج الهندسي

تم اعتماد هندسة مرجعية متمثلة في أنبوب فنتورى لدراسة سلوك الجريان وانتقال الحرارة داخله، حيث يوضح الشكل (9.1)الأبعاد الهندسية المختلفة للأنبوب، بينما يبيّن الجدول (1.1) القيم الهندسية المعتمدة في المحاكاة العددية.

بالنسبة للنموذج المدروس، تم افتراض أن تدفق الماء داخل أنبوب الفنتوري يتم وفق الشروط التالية:

- الجريان ثنائي الأبعاد وفق المحورين X و Y
- الجريان حالة مستقرة
- يعتبر الماء مائعًا غير قابل للانضغاط ومتساوي الخواص .
- الخواص الفيزيائية للمائع ثابتة أثناء الجريان .
- تأثير الضغط على الخواص الحرارية مهمل .
- انتقال الحرارة يتم بالحمل الحراري داخل الأنبوب .

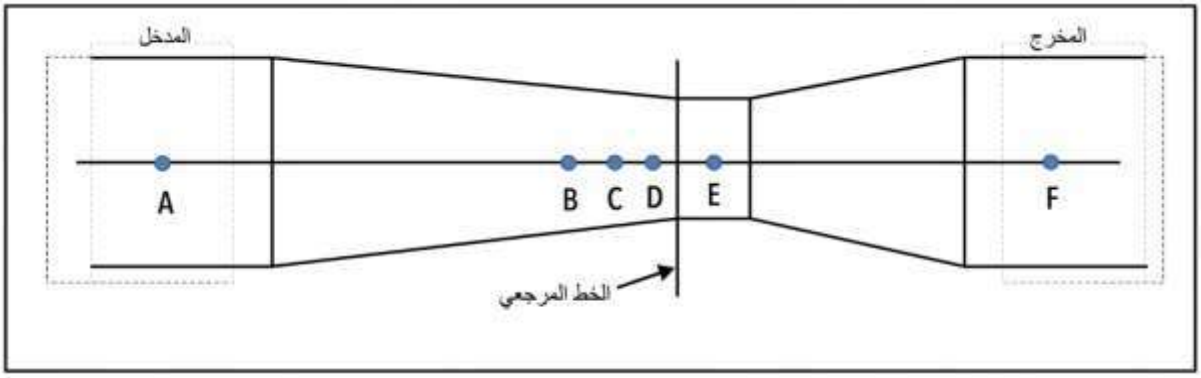
1.2.2. تحديد الأبعاد الهندسية المُدخلة

بناءً على الأبعاد الكلية لأنبوب فنتوري والمبيّنة في الجدول (2.1)، تم تحديد النقاط الهندسية المميزة على طول النموذج ثنائي الأبعاد المتماثل محورياً تمهيداً لإنشاء الهندسة في برنامج Gambit 2.3.16. نظراً لأهمية منطقة العنق في دراسات انتقال الحرارة والجريان، حيث تشهد أعلى التدرجات في السرعة ودرجة الحرارة، فقد تم اختيار **منتصف العنق** كنقطة مرجعية للإحداثيات المحورية .(x=0) هذا الاختيار يسمح بتمثيل متماثل للمناطق الواقعة قبل وبعد العنق، ويسهل عملية تكثيف الشبكة العددية حول هذه المنطقة الحرجة. القيم السالبة للإحداثيات تشير إلى نقاط تقع في اتجاه مجرى المدخل (أي قبل العنق)، بينما القيم الموجبة تشير إلى نقاط تقع في اتجاه المخرج (أي بعد **العنق)**

جدول (2.2) : الأبعاد الهندسية المعتمدة في بناء نموذج فنتوري

النقطة	الوصف	القطر (cm)	x(cm) الإحداثي	y(cm) الإحداثي
A	المدخل	10.0	0	5
B	بداية التقارب	10.0	10	5
C	بداية العنق	2.0	20	1
المرجع	منتصف العنق	2.0	25	1
D	نهاية العنق	2.0	30	1
F	المخرج	10.0	50	5

يُظهر الشكل (3.2) أدناه الهيكل الهندسي ثنائي الأبعاد لأنبوب فنتوري المستخدم في المحاكاة، والذي تم إعداده بناءً على الأبعاد القياسية المحددة للتصميم. يعتمد الرسم على تحديد الإحداثيات بالنسبة لـــ **)الخط المرجعي (**الواقع في منتصف العنق لتسهيل عمليات الحساب والربط بين أجزاء الأنبوب المختلفة.



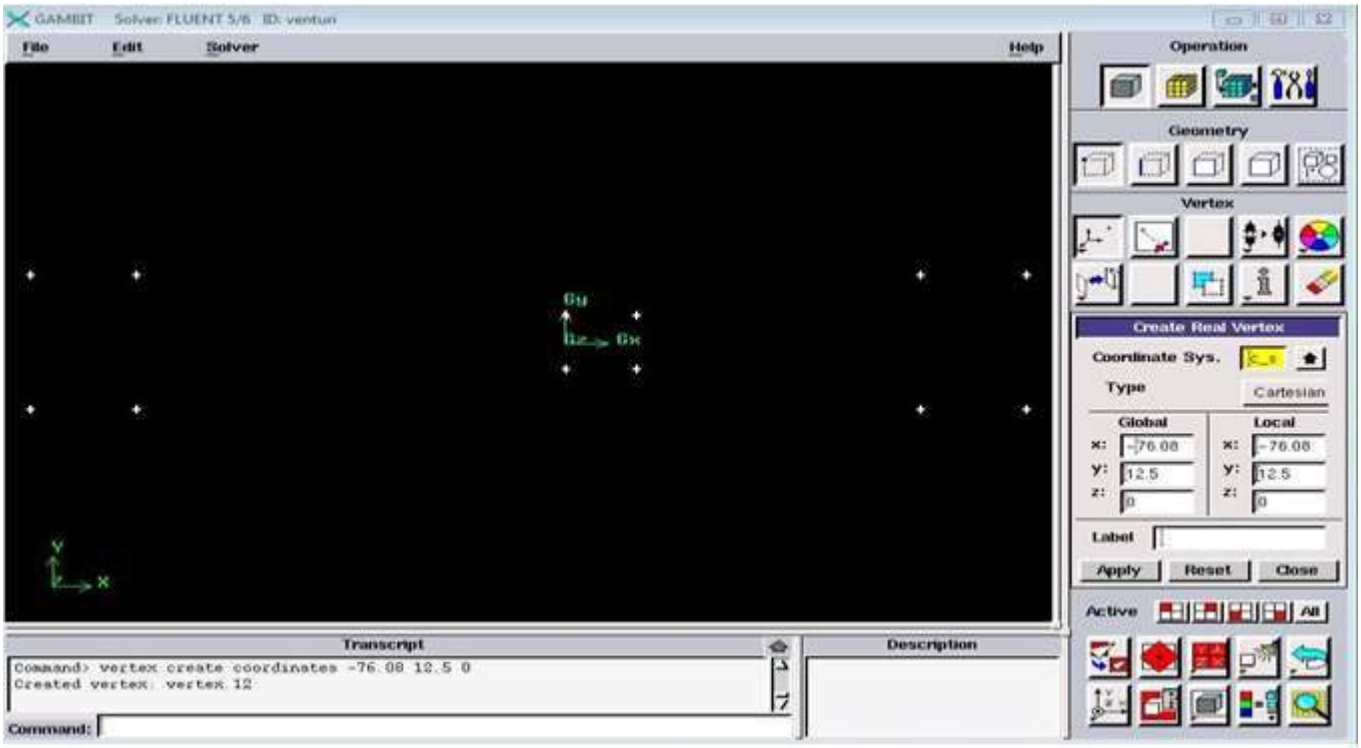
الشكل (3.2) : الهيكل الهندسي ثنائي الأبعاد لأنبوب فنتوري المستخدم في المحاكاة

3.2. رسم هندسة فنتوري فيGambit 2.3.16

تم إنشـاء النموذج الهندسـي باسـتخدام برنامج Gambit 2.3.16 الذي يتيح رسـم مقاطع ثنائية الأبعاد متماثلة محورياً أو ثلاثية الأبعاد حسـب الحاجة. في هذه الدراسـة، اعتمد المقطع **ثنائي الأبعاد المتماثل محورياً** للنموذج العادي لتقليل الوقت الحسابي ، والشكل الموالي يوضح خطوات رسم أنبوب فنتوري في برنامج **Gambit 2.3.16** ، حيث تم تنفيذ الخطوات التالية لإنشاء النموذج العادي:

أ. **إنشاء النقاط** على المستوى (x, r) وفق ابعاد الجدول (2.2)

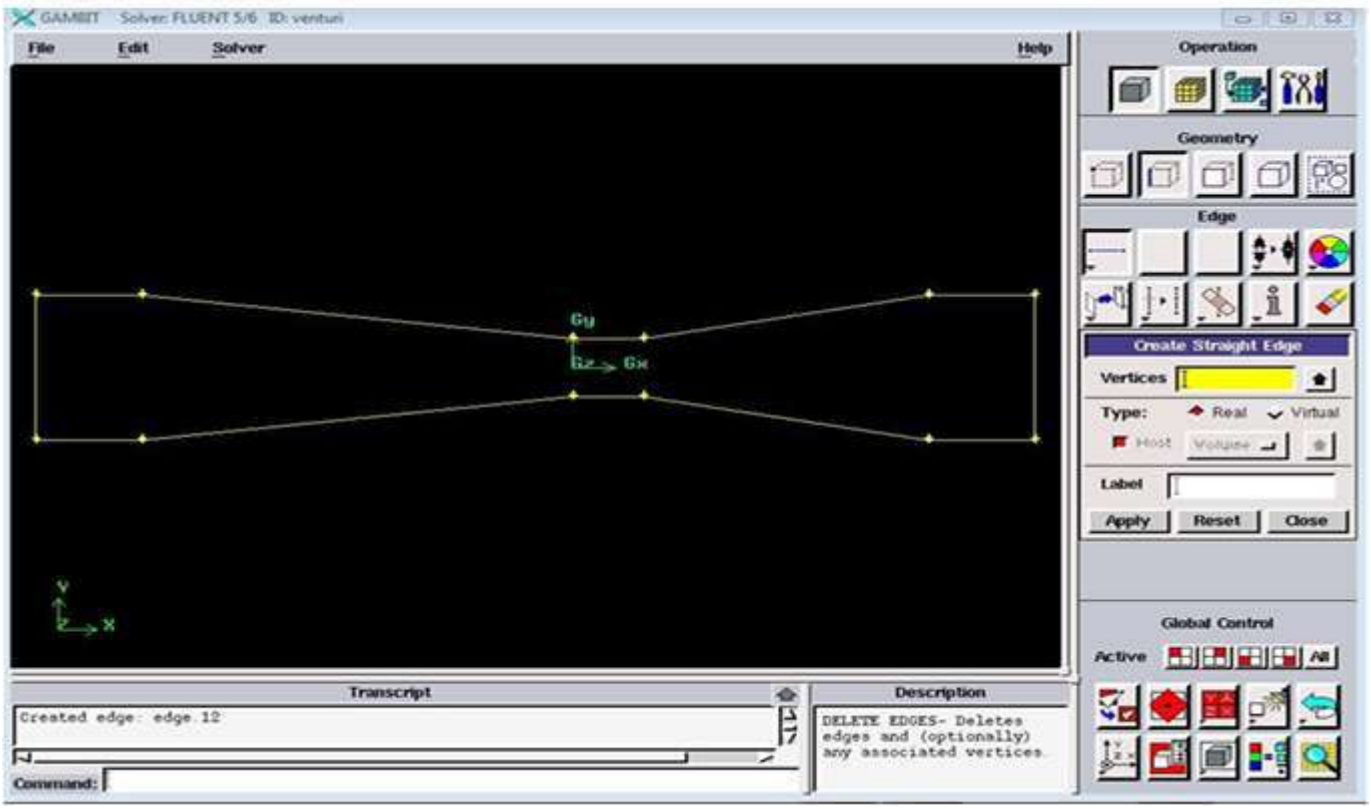
تمثل الشكل (4.3) أدناه مرحلة بناء الهيكل الأساسي لأنبوب فنتوري داخل بيئة برنامج **GAMBIT** الخاص بإنشاء الشبكات والتهيئة لبرنامج .FLUENT في هذه الخطوة، تم إسقاط النقاط المرجعية للأنبوب وتحديد مواضعها بدقة استناداً إلى نظام الإحداثيات الديكارتية **(Cartesian Coordinates System)**، حيث اعتُمدت نقطة أصل المحاور (0,0)لتكون في **منتصف عنق الأنبوب** لتسهيل تماثل بقية الأبعاد



االشكل (4.2) : مواضع النقاط الشكل الهندسي لأنبوب فنتورى في برنامج gambit

ب. **ربط النقاط بخطوط** لتشكيل الجدار السفلي والعلوي (مع ترك خط التماثل).

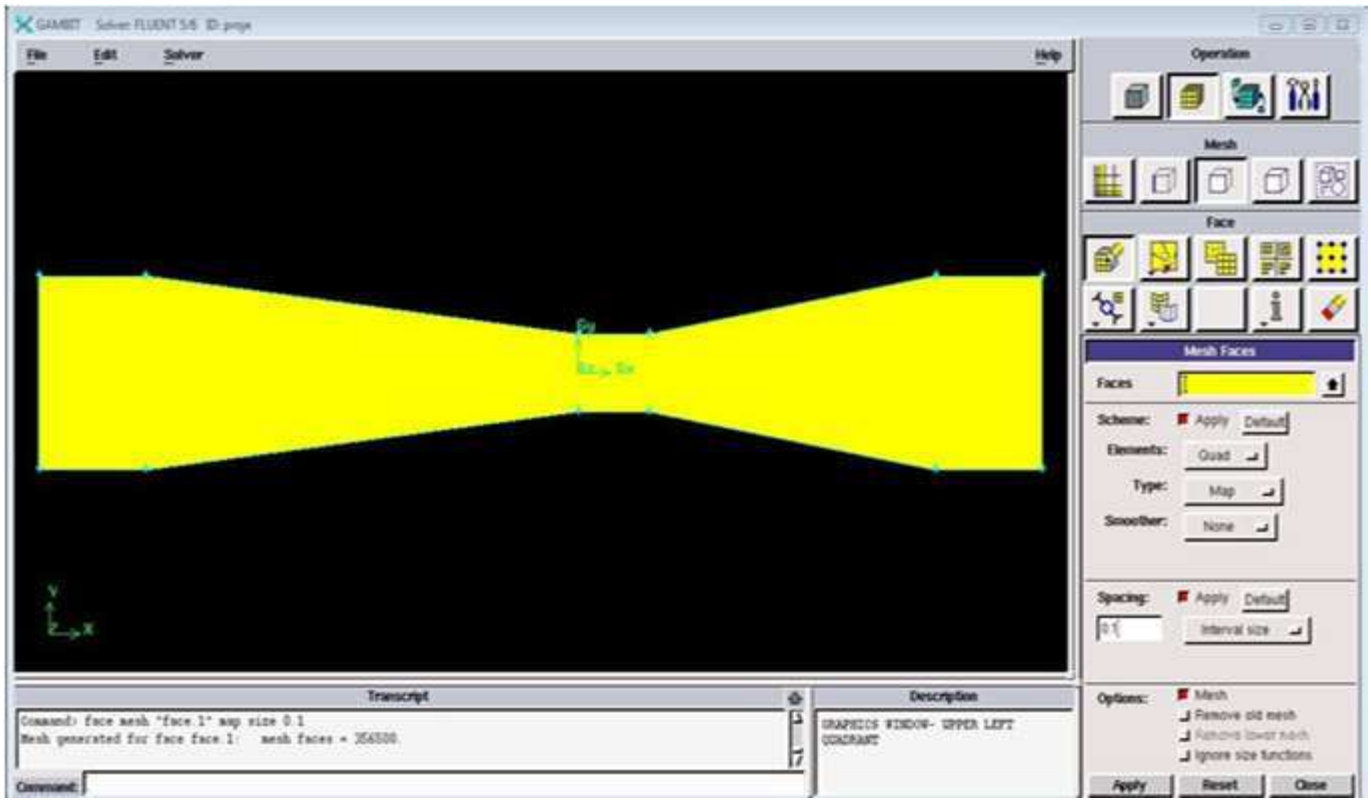
يوضح الشكل (5.3) المرحلة الثانية من بناء النموذج الهندسي لأنبوب فنتوري داخل برنامج **GAMBIT**، وهي مرحلة الانتقال من النمذجة بنقاط منفصلة إلى تكوين الهيكل الخارجي .(Wireframe) في هذه الخطوة، تم استخدام أداة **(Create Straight Edge)**لتوصيل النقاط (Vertices) التي جرى إنشاؤها مسبقاً ببعضها البعض عبر خطوط مستقيمة متتابعة.



الشكل (5.2) : الشكل الهندسي لانبوب فنتوري في برنامج gambit

ت. إنشاء سطح الشبكة

يوضح الشكل (6.3) التالي شبكة السطح الخاصة بأنبوب فنتوري والمولدة باستخدام برنامج GAMBIT، حيث تم تقسيم المجال الهندسي إلى عناصر شبكية منتظمة بهدف تحسين دقة الحسابات العددية أثناء المحاكاة. تُظهر الشبكة تكثف العناصر في منطقة العنق بسبب التغير الكبير في السرعة والضغط، مما يساعد على الحصول على نتائج أكثر دقة في دراسة خصائص الجريان داخل أنبوب فنتوري



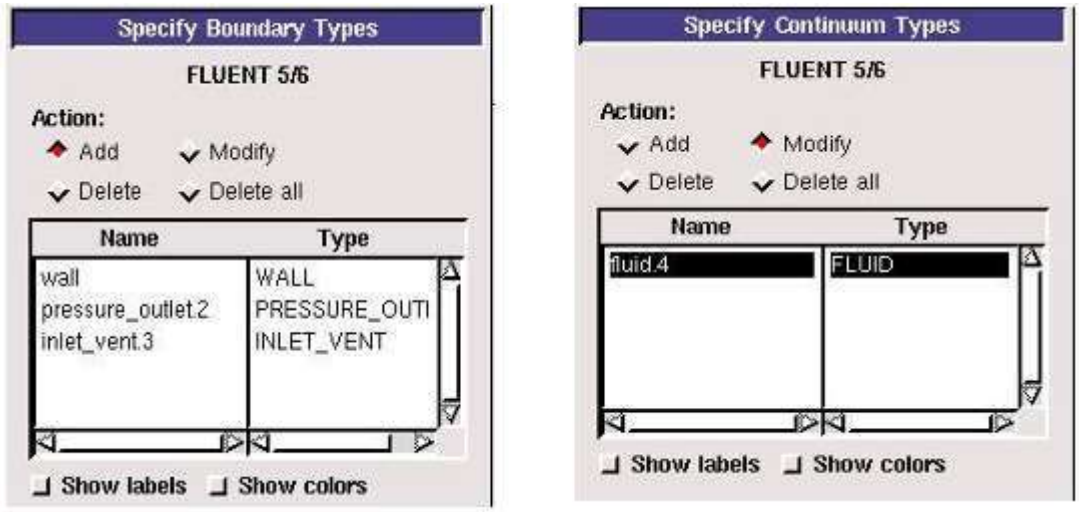
الشكل (6.2): شبكة السطح الخاصة بأنبوب فنتوري

ث. **تحديد الشروط الحدية**

يوضح الشكل (7.2) مرحلة تحديد الخصائص الفيزيائية وشروط الحدود داخل برنامج FLUENT وهذا بعد الانتهاء من إنشاء النموذج الهندسي والشبكة الحسابية، حيث تم تعريف :

- نوع المائع المستخدم داخل المجال الحسابي
- تحديد شروط الدخول والخروج والجدران

وذلك لضمان إعداد نموذج عددي صحيح يسمح بمحاكاة جريان المائع داخل أنبوب فنتوري بدقة وواقعية.



الشكل (7.2) الشروط الحدية لانبوب فنتوري في برنامج gambit

ج. تصدير الشبكة الحسابية

بعد القيام بالخطوات السابقة تأتي الخطوة الأخيرة في برنامج GAMBIT ألا وهي تصدير الملف بصيغة "msh " والتي يتم استيرادها بواسطة برنامج المحاكاة الرقمية "fluent6.3.26 " حيث يبين الشكل (8.2) مرحلة تصدير الشبكة الحسابية من برنامج GAMBITإلى برنامج FLUENT، حيث يتم حفظ ملف الشبكة من أجل متابعة دراسة جريان المائع داخل أنبوب فنتوري وإجراء الحسابات العددية المختلفة.



الشكل (8.2) تصدير الشبكة الحسابية من برنامج GAMBITإلى برنامج FLUENT

4.2. المحاكاة بواسطة برنامج fluent 6.3.26

بعد إنشاء الشبكة (Mesh) في برنامج GAMBITوتصديرها بصيغةmsh. ، تبدأ مرحلة المحاكاة داخل برنامج Fluent الإصدار 6.3.26.

الخطوات الأساسية تكون كالتالي:

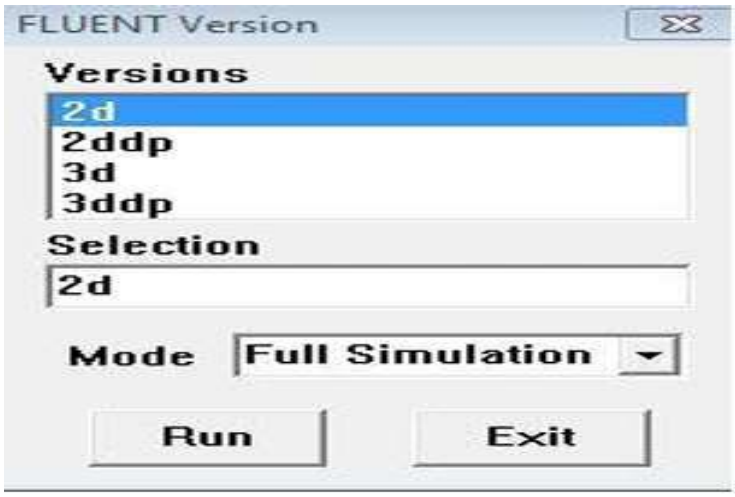
أ. تشغيل برنامجFluent

عند فتح Fluent تظهر نافذة الاختيار:

- 2Dأو 3 D
- Single Precisionأو Double Precision

حيث : Double Precision يعطي دقة عددية أفضل .

الشكل (9.2) يوضح محاكاة ثنائية الأبعاد 2D مع نمط Full Simulation ، وذلك قبل البدء في استيراد الشبكة العددية المنجزة بواسطة برنامج GAMBIT .



الشكل (9.2) اختيار الدقة في برنامج المحاكاة FLUENT

ب. استيراد الشبكةMesh

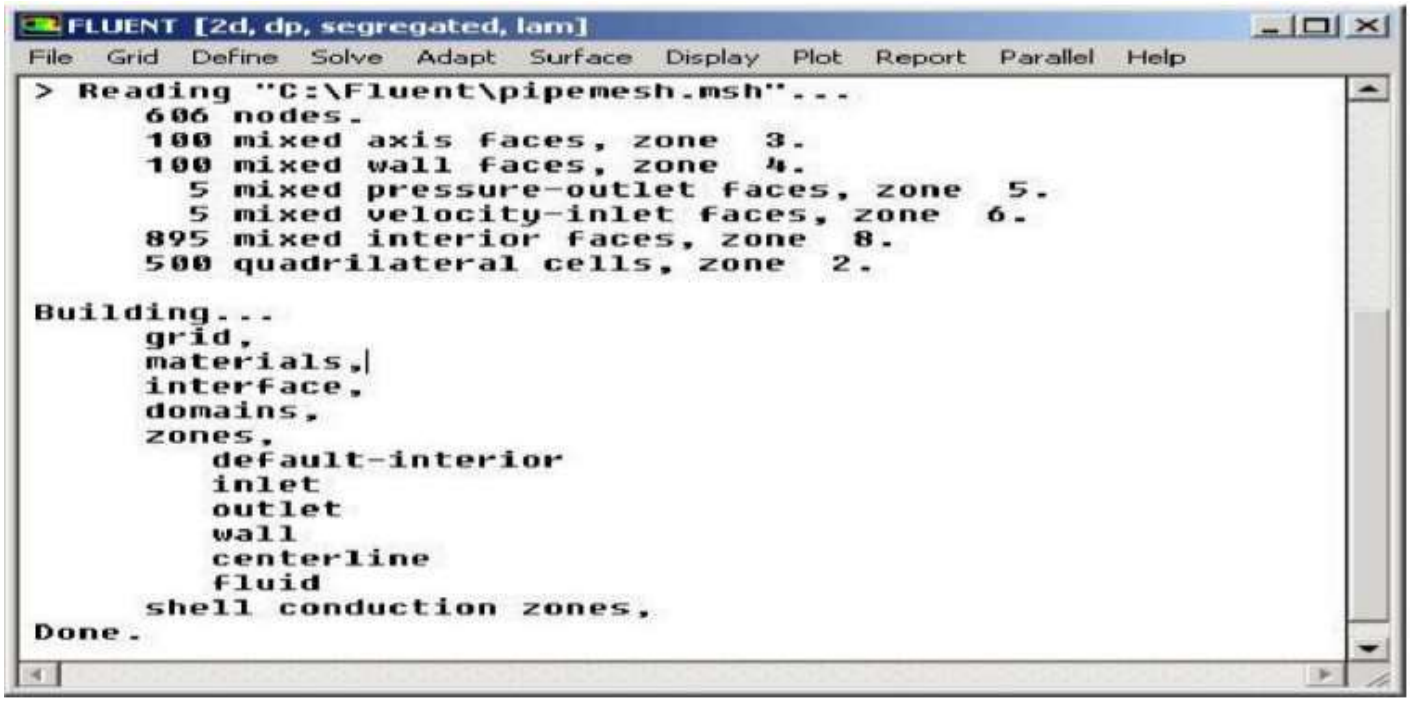
من القائمة: **File → Read → Case**

ثم اختيار ملف الذي تم توليده بواسطة.Gambit : nom_du_maillage.msh

برنامج Fluent يعرض مباشرة:

- عدد العقد Nodes
- عدد الخلايا Cells
- مناطق الحدودZones

الشكل (10.3) يوضح مرحلة استيراد الشبكة العددية (.msh) الناتجة من برنامجGambit ، **حيث قام Fluent بقراءة الملف وإظهار معلومات الشبك**



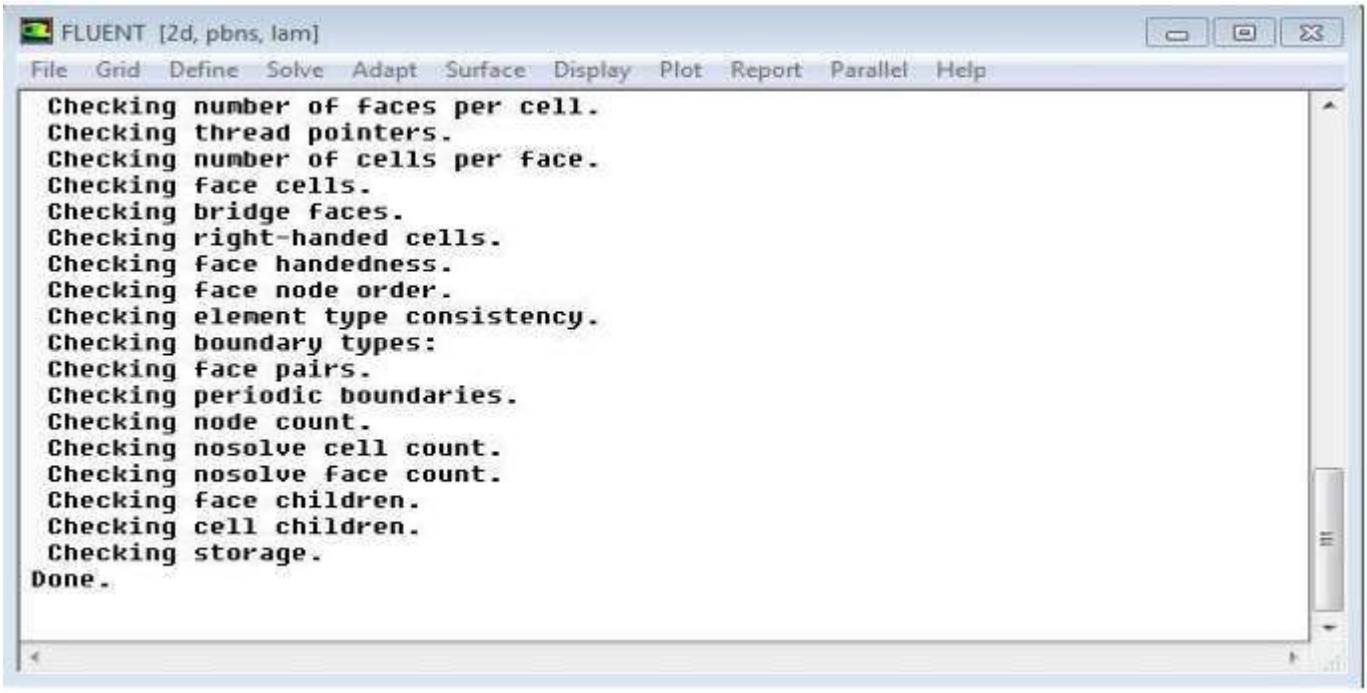
الشكل (10.2) استراد الشبكة العددية في برنامج المحاكاة FLUENT

ت. فحص الشبكة

بعد الاستيراد يجب التأكد من سلامة الشبكة من القائمة : **Grid → Check**

تظهر الرسالة : Grid check complete ، في حالة ظهور رسالة أخرى فهذا يعني أن الشبكة بها عيب يجب تصحيحه في برنامج gambit

الشكل (11.3) يوضح نافذة برنامج FLUENT أثناء تنفيذ عملية **فحص الشبكة(Mesh Check)** ، حيث يقوم البرنامج بالتحقق من عدد الوجوه والعُقد لكل خلية، واتساق نوع العناصر، والحدود الدورية، وترتيب العقد، للتأكد من سلامة الشبكة واستعدادها للحل العددي.



الشكل (11.2) فحص الشبكة في برنامج المحاكاة FLUENT

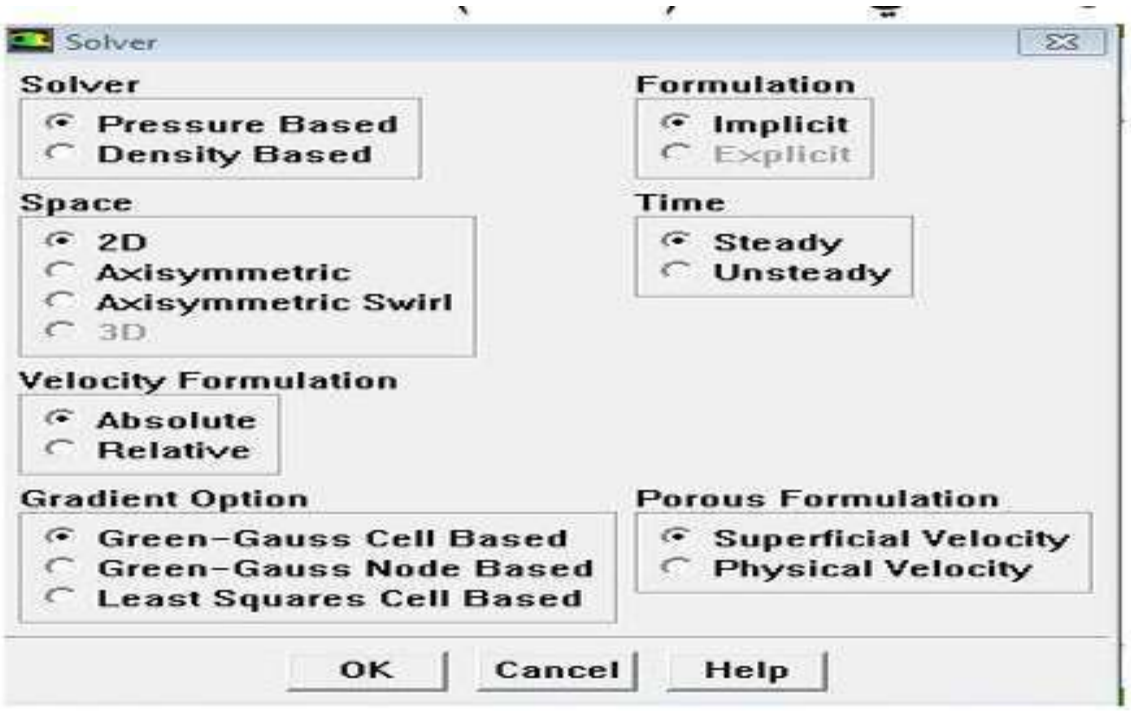
ث. اختيار نوع Solver

من القائمة : **Define → Models → Solver**

اختيار للجريان غير القابل للانضغاط:

- **Pressure Based**
- **اعتماد الصيغة** Implicit **للحل**
- نظام الفضاء **ثنائي الأبعاد 2D**
- زمن الحل **Steady للدراسة المستقرة**

شكل :(12.2) يوضح نافذة إعدادات **المحلل العددي (Solver)** في برنامجFLUENT ، حيث يتم اختيار نوع الحل العددي **Pressure Based**المناسب لتدفق غير قابل للانضغاط، مع اعتماد الصيغة **Implicit**للحل، ونظام الفضاء **ثنائي الأبعاد (2D)**، وزمن الحل **Steady**للدراسة المستقرة



شكل :(12.2) نافذة إعدادات **المحلل العددي (Solver)** في برنامجFLUENT

ج. اختيار النظام الفيزيائي

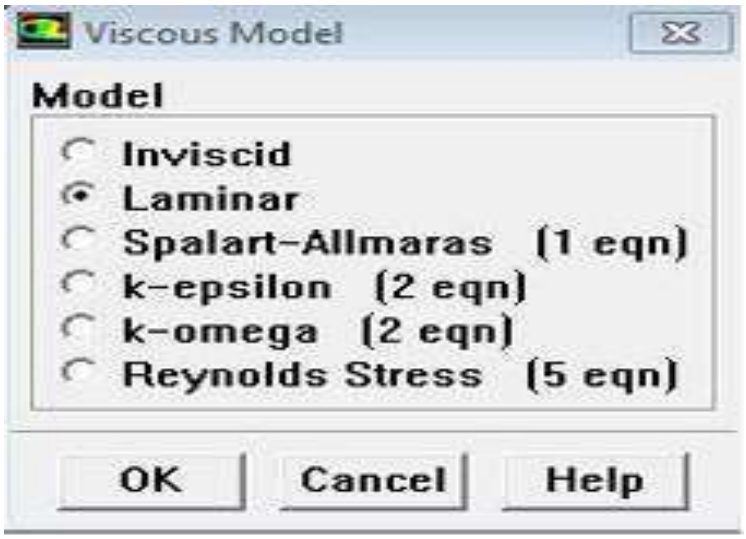
من القائمة : **Define → Models → viscous**

نحدد نوع الجريان :

للجريان الصفحي الذي يتميز بـ : Re < 2300

نختار: **Laminar**

شكل :(14.3) يوضح نافذة اختيار **نموذج اللزوجة (Viscous Model)** في برنامجFLUENT ، حيث يتم تحديد نوع النموذج المستخدم في المحاكاة. في هذا المثال تم اختيار النموذج **Laminar** لتمثيل التدفق المنتظم غير المضطرب،



شكل :(13.2) نافذة اختيار **نموذج اللزوجة**

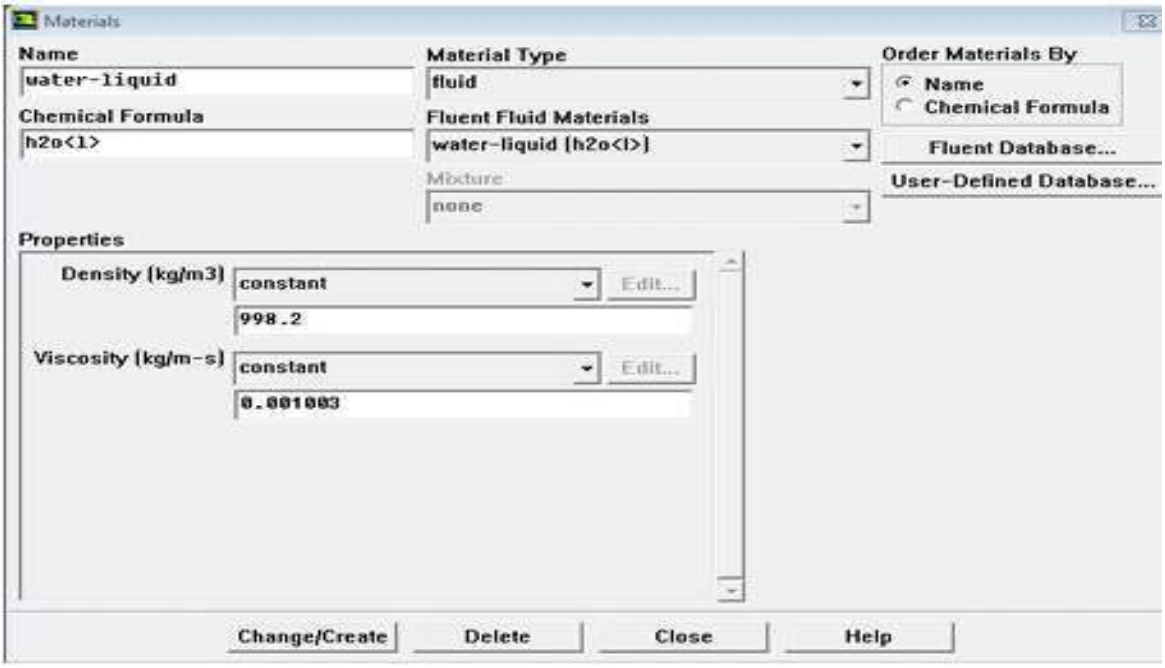
ح. تعريف المادة

من القائمة : **Define → Materials**

ندخل خصائص المائع: مثلاً الماء:

الخاصية	**القيمة**
الكتلة الحجمية	998.2Kg/m^3
اللزوجة	o.oo1m/s

شكل :(14.2) يوضح نافذة إعداد **خصائص المادة (Materials)** في برنامجFLUENT ، حيث تم اختيار المادة **water-liquid**من قاعدة بيانات المواد السائلة. تُظهر النافذة القيم الفيزيائية الأساسية للماء عند درجة حرارة الغرفة، وهي الكتلة الحجمية **998.2 kg/m³** واللزوجة الديناميكية **0.001003 kg/m·s**، مع تحديدهما كقيم ثابتة

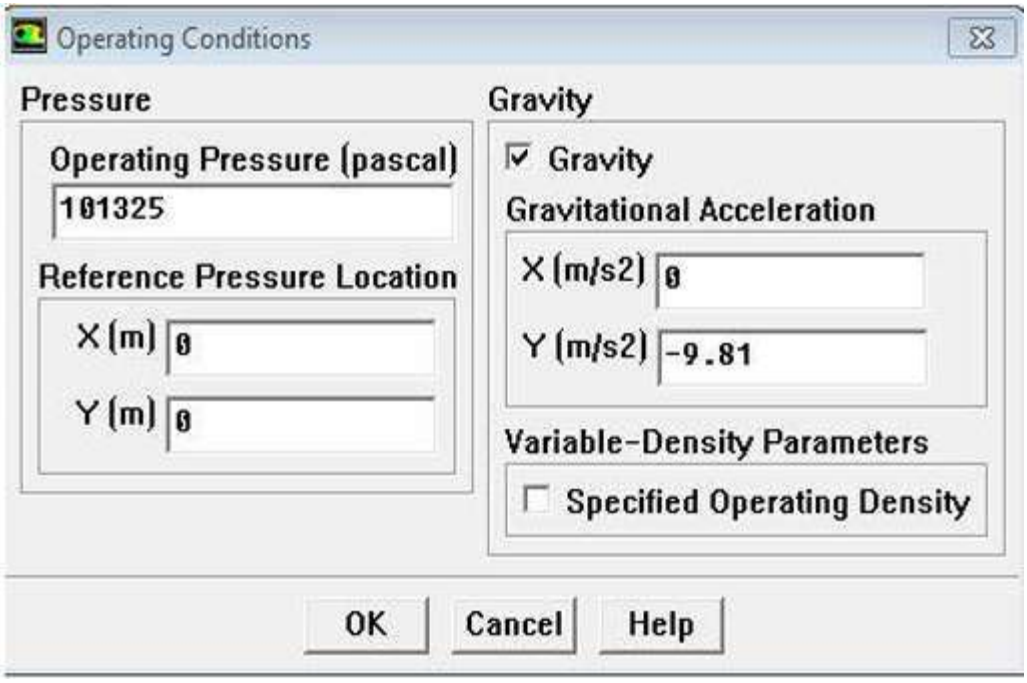


شكل :(14.2) نافذة إعداد **خصائص المادة (Materials)** في برنامجFLUENT

خ. إعادة ظروف التشغيل

من القائمة : **Define → Operating Conditions** نحدد الجاذبية والضغط الجوي

شكل :(15.2) يوضح نافذة إعداد **ظروف التشغيل (Operating Conditions)** في برنامجFLUENT ، حيث يتم تحديد الضغط التشغيلي بقيمة **101325 Pa** وهو الضغط الجوي القياسي، مع تفعيل خيار **Gravity** لتضمين تأثير الجاذبية الأرضية في الاتجاه.Y = −9.81 m/s2

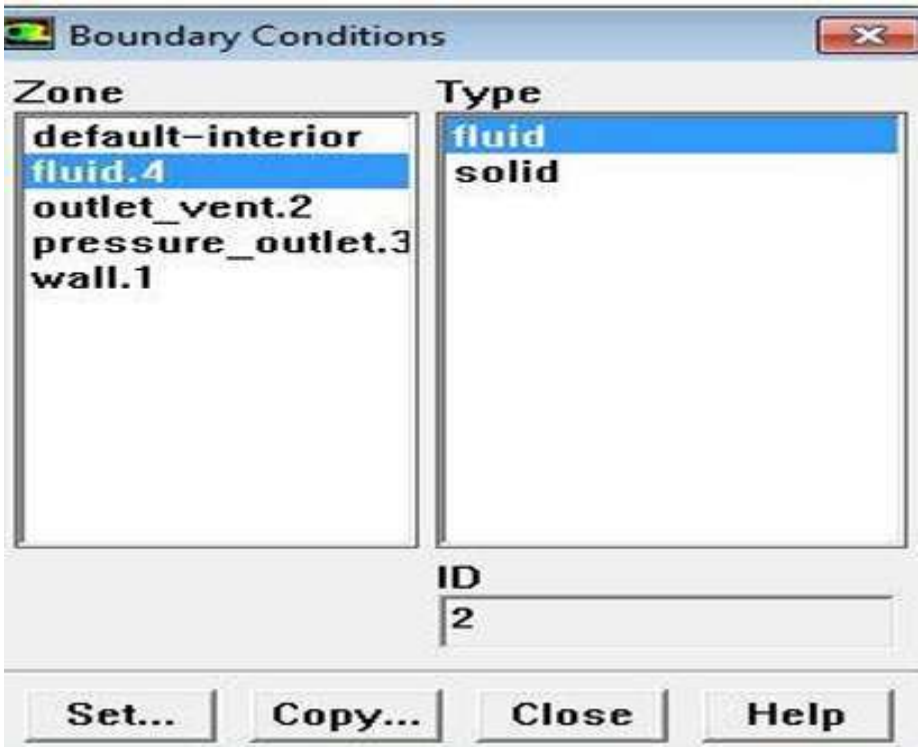


الشكل(15.2): **نافذة إعداد** ظروف التشغيل **في برنامجFLUENT**

د. تحديد شروط الحدود Boundary Conditions

من القائمة : Define → Boundary Conditions

الشكل (16.2) يوضح واجهة إعداد الشروط الحدية المستخدمة لتحديد نوع المنطقة في النموذج العددي، حيث يمكن اختيار نوع المنطقة كـ **fluid** لان المائع المستخدم هو الماء سائل .

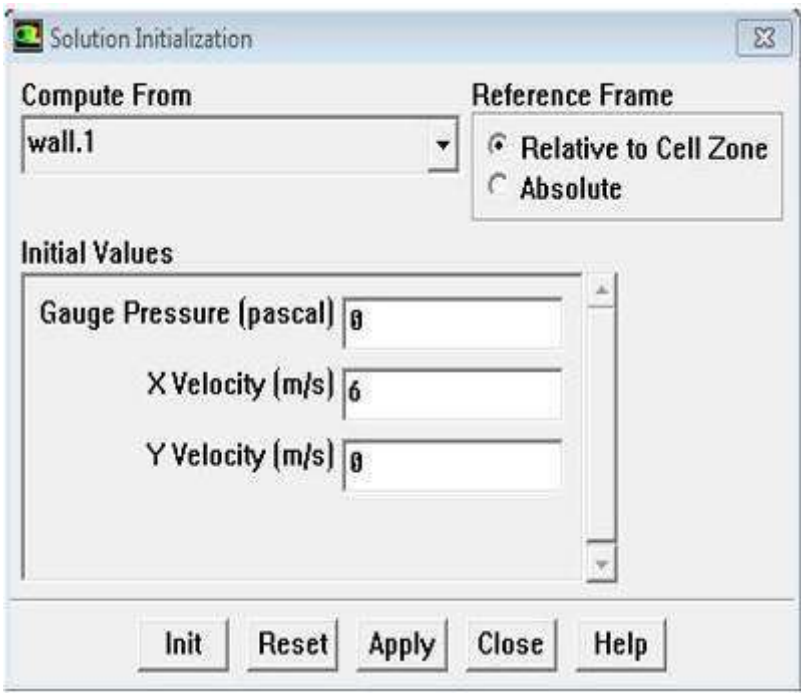


الشكل (16.2) نافذة إعداد الشروط الحدية في برنامج **FLUENT**

ذ. تهيئة الحلInitialization

من القائمة : **Solve → Initialize → Initialize**

يوضح الشكل (17.2) واجهة إعداد القيم الابتدائية للحل العددي، حيث يتم تحديد منطقة الحساب (**Compute From**) والإطار المرجعي (**Reference Frame**) سواء كان نسبيًا أو مطلقًا. كما تُضبط القيم الابتدائية مثل الضغط المقاس، وسرعتي الجريان في الاتجاهين XوY، وهي خطوة أساسية لضمان استقرار الحل العددي ودقته في المحاكاة.

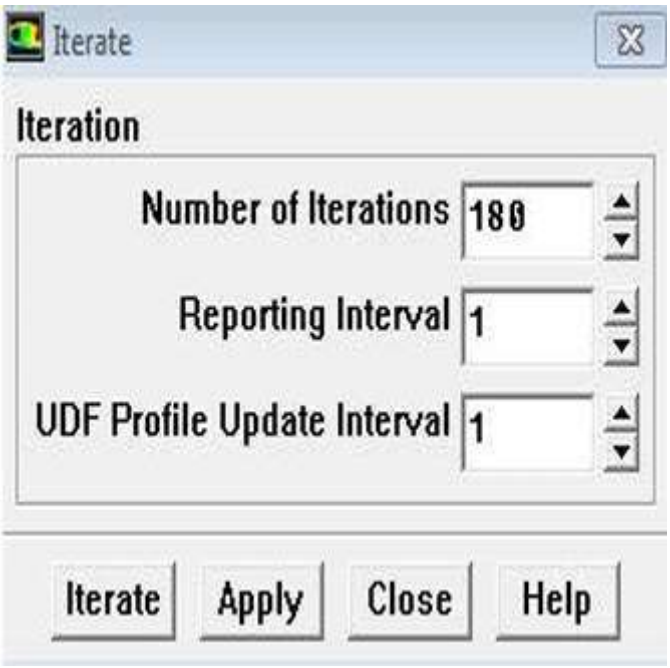


الشكل (17.2) واجهة إعداد القيم الابتدائية للحل العددي في برنامج المحكاة العددية fluent

ر. تشغيل الحسابIterations

من: Solve → Iterate

لتحقيق التقارب في الحل العددي، تم إجراء عملية التكرار وفق الإعدادات الموضحة في الشكل (18.2)، حيث بلغ عدد التكرارات الكلية **180**تكراراً، وقد اعتُمدت قيمة 1 لكل من فترة الإبلاغ وفترة تحديث ملف الدوال المعرّفة من قِبَل المستخدم (UDF).



الشكل (18.2): نافذة إعداد التكرار في برنامج المحكاة العددية fluent

ز. استخراج النتائج

من القائمة : Display → Contours

لعرض:

- السرعة Velocity
- الضغط Pressure
- درجة الحرارة Temperature

ومن القائمة : **Plot → XY Plot**

لاستخراج:

- تغير الضغط
- تغير السرعة
- معامل الاحتكاك

و من القائمة : **File → Write → Case & Data**

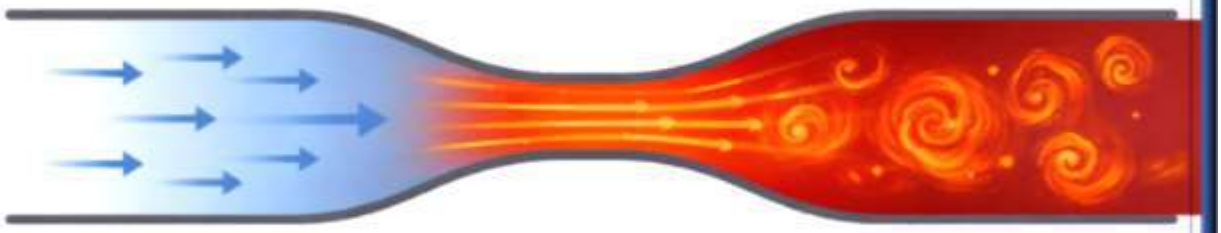
لحفظ:

- ملف الإعدادات cas.
- ملف النتائج dat.

5.2. خاتمة الفصل الثاني

تناول هذا الفصل المراحل المنهجية المختلفة التي اتُّبعت في عملية النمذجة العددية، بدءاً من رسم الهندسة الحسابية وتوليد الشبكة العددية باستخدام برنامج **Gambit**، وصولاً إلى تنفيذ عمليات المحاكاة الحسابية وحل المعادلات الحاكمة بالاستعانة ببرنامج **Fluent 6.3.26**. وقد أسهمت هذه المراحل المتكاملة في بناء نموذج عددي دقيق يعكس الظروف الفعلية للمسألة المدروسة. وفي ضوء ما تم التوصل إليه، سيُخصَّص الفصل التالي لمناقشة وتحليل النتائج واستخلاص الاستنتاجات العلمية الدقيقة منها.

الفصل الثالث



تحليل النتائج ومناقشتها

3. مقدمة الفصل الثالث

يهدف هذا الفصـــل إلى عرض وتحليل النتائج العددية التي تم الحصـــول عليها من المحاكاة باســـتخدام برنامجFluent 6.3.26 ، وذلك لدراســـة توزيع الســـرعة والضـــغط ودرجة الحرارة داخل أنبوب فنتوري، بالإضافة إلى تحليل انتقال الحرارة المقترن بجريان المائع. وقد اعتمد التحليل على مقارنة النتائج المستخرجة مع النظريات الفيزيائية الأســـاســـية (مثل معادلة الاســـتمرارية وقانون برنولي) وكذلك مع دراســـات ســـابقة منشورة في هذا المجال، بهدف التحقق من صحة النموذج العددي المستخدم.

تم إجراء المحاكاة باستخدام الخصـائص الفيزيائية للماء عند درجة حرارة 20°C، مع تطبيق شـروط حدودية مناسبة كما هو موضح في الفصل الثاني. وبعد معالجة البيانات العددية، تم استخراج ستة أشكال بيانية رئيسية تعرض توزيع السرعة والضغط ودرجة الحرارة داخل الأنبوب، وذلك ضمن نطاق أعداد رينولدز التي تثبت الجريان في النظام الرقائقي.

1.3. نتائج المحاكاة العددية

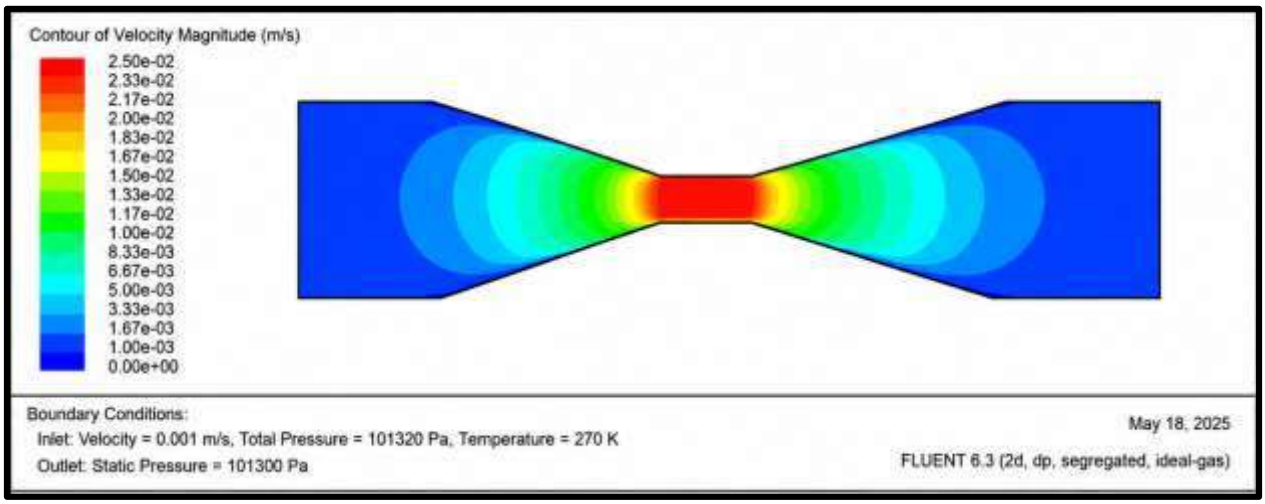
تم إجراء المحاكاة باستخدام برنامج **Fluent 6.3.26** ، مع الأخذ بعين الاعتبار الخصائص الفيزيائية للمائع (الماء) وشروط الحدود المحددة وذلك بنفس الخطوات المذكورة في الفصل الثاني ، وبعد إتمام معالجة البيانات العددية نتج عن ذلك ستة (6) أشكال بيانية رئيسية مبينة في الأشكال من (1.3) إلى غاية (6.3).

انطلاقا من المعالجة البيانية والدراسة النظرية سنقوم بتفسير هذه النتائج في ضوء المبادئ الفيزيائية الأساسية، مع التركيز على تأثير منطقة الرقبة (العنق) في تغير كل من السرعة والضغط ودرجة الحرارة، ومدى انطباق النتائج على ظاهرة فنتوري الشهيرة، بالإضافة إلى تحليل انتقال الحرارة داخل الأنبوب، ومقارنتها بنتائج دراسات سابقة .

2.3. تحليل توزيع السرعة داخل أنبوب فنتوري

1.2.3. النتائج المستخلصة من أجل حقل السرعة

أ. توزيع السرعة داخل أنبوب فنتوري:



الشكل (1.3) : توزيع السرعة داخل أنبوب فنتوري

يوضح الشكل (1.3) توزع السرعة داخل أنبوب فنتوري، حيث تزداد السرعة تدريجيًا عند الانتقال من منطقة المدخل نحو منطقة العنق نتيجة تناقص مساحة المقطع، لتبلغ قيمتها العظمى داخل منطقة الخنق، ثم تنخفض تدريجيًا بعد منطقة التوسع. ويُظهر الشكل توافقًا واضحًا مع معادلة الاستمرارية :

$A_1V_1=A_2V_2$.

إذ يؤدي نقصان مساحة المقطع إلى زيادة السرعة للحفاظ على معدل التدفق الكتلي ثابتاً. كما تُلاحظ السرعة المنعدمة تقريباً عند الجدران نتيجة شرط عدم الانزلاق، مما يدل على تشكل طبقة حدية لزجة. بعد تجاوز الرقبة، تنخفض السرعة مرة أخرى بسبب توسع المقطع وتحول جزء من الطاقة الحركية إلى ضغط.

وعليه يكون تدفق المائع :

$$Q_{in} = Q_{neck} = AV_{in} = 3.14 \times \frac{0.1^2}{4} \times 0.001 = 7.85x10^{-6} \quad m^3/s$$

حيث :

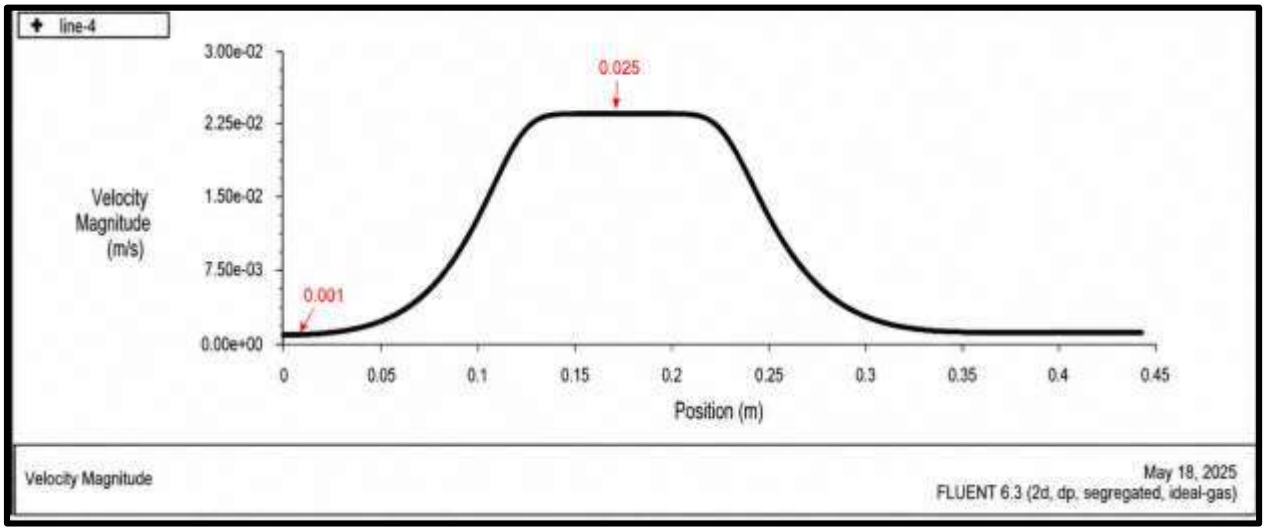
$\mathbf{Q_{in}}$: التدفق عند المدخل بـ : m^3/s

$\mathbf{Q_{neck}}$: التدفق عند الخنق بـ : m^3/s

التفسير الفيزيائي:

وفقاً لمعادلة الاستمرارية، فإن تناقص مساحة المقطع من قطر قدره 10 cm إلى قطر قدره 2 cm يؤدي إلى زيادة سرعة الجريان بشكل يتناسب عكسياً مع المساحة. كما يُلاحظ من الشكل (3.1) أن السرعة تكون أعظمية عند محور الأنبوب وتتناقص باتجاه الجدار نتيجة تأثير اللزوجة، مما يظهر شكل الملف السرعي المكافئ للجريان الرقائقي.

ب. تغير السرعة على طول محور الأنبوب:



الشكل (2.3): تغير السرعة على طول محور أنبوب فنتوري.

يبين الشكل (3.2) تطور السرعة المحورية على طول محور أنبوب فنتوري، حيث تسجل السرعة ارتفاعًا تدريجيًا في منطقة التقارب، ثم تبلغ قيمة عظمى عند العنق نتيجة تسارع الجريان، قبل أن تنخفض تدريجيًا في منطقة التوسع بسبب زيادة مساحة المقطع وانخفاض تأثير التسارع.

2.2.3. حساب عدد رينولدز

من الشكل (2.3) السرعة العظمى عند العنق تساوي تقريبا $V_{max} = 0.025$ m/s، إذن يمكن حساب عدد رينولدز باستعمال العلاقة (4.1) كالاتي :

$$R_{e-in} = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{998.2x0.001x0.02}{0.001003} \approx 20$$

$$R_{e-neck} = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{998.2x0.025x0.02}{0.001003} \approx 500$$

حيث :

R_{e-in} :عدد رينولدز عند المدخل ، R_{e-neck} **:** عدد رينولدز عند الخنق

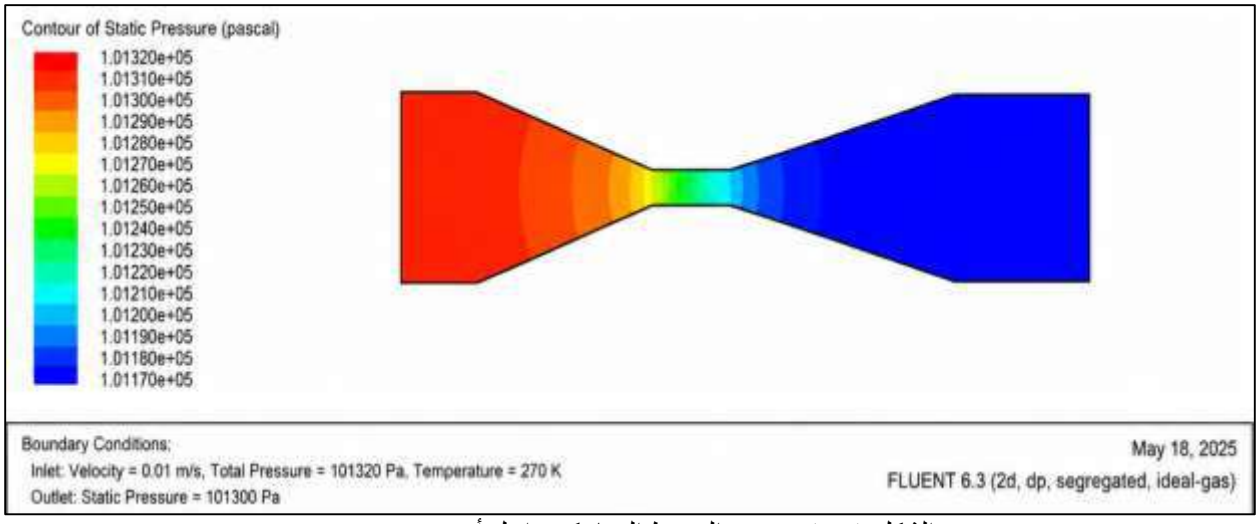
الاستنتاج :

بما أن قيم Re≈20 و Re≈500 أقل بكثير من R_{ecrit} ≈2300 ، فإن الجريان يقع في **النظام الرقائقي الخالص**، وهذا يبرر استخدام نموذج الجريان الرقائقي في المحاكاة العددية التي تم إجراؤها.

3.3. تحليل توزيع الضغط الستاتيكي

1.3.3. النتائج المستخلصة من الضغط الستاتيكي

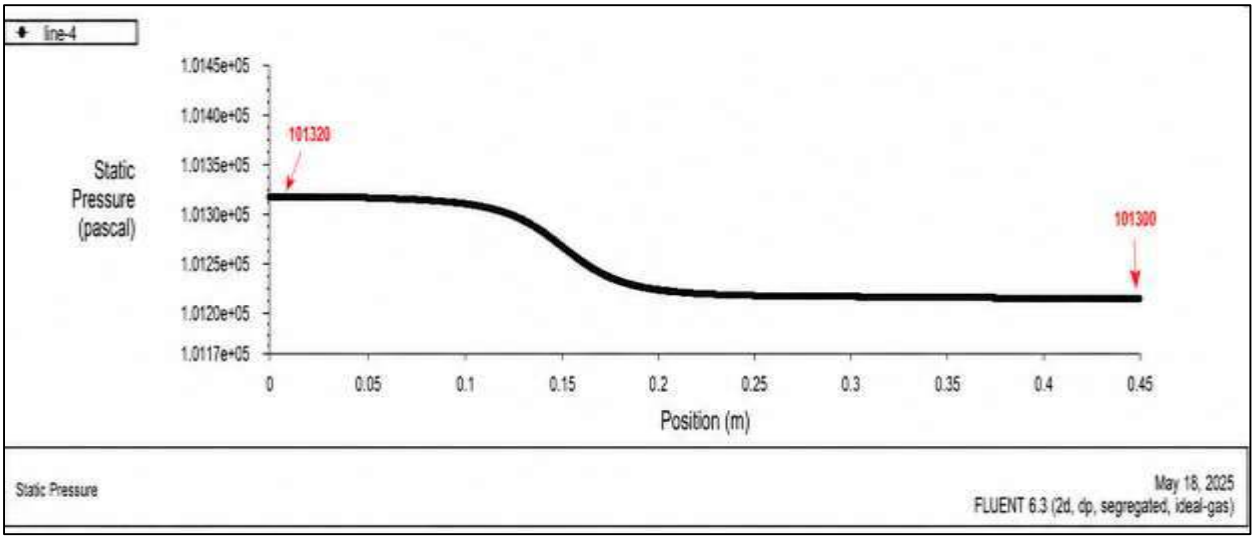
أ. توزيع الضغط الستاتيكي داخل أنبوب فنتوري:



الشكل (3.3): توزيع الضغط الستاتيكي داخل أنبوب فنتوري.

من خلال توزيع الضغط داخل أنبوب الفنتوري نلاحظ أن الضغط يكون مرتفعًا نسبيًا عند المدخل، وذلك بسبب انخفاض سرعة الجريان في المنطقة العريضة، وهو ما يتوافق مع مبدأ برنولي الذي يربط بين انخفاض السرعة وارتفاع الضغط. وعند انتقال المائع نحو الرقبة، حيث يضيق المقطع بشكل كبير، تنخفض قيمة الضغط إلى أدنى مستوى نتيجة الارتفاع الكبير في السرعة وتحول جزء من طاقة الضغط إلى طاقة حركية. أما بعد منطقة الرقبة وعند المخرج، فإن الضغط يبدأ بالارتفاع من جديد بصورة جزئية بسبب توسع المقطع وانخفاض السرعة، إلا أن قيمته لا تعود بالكامل إلى قيمة المدخل بسبب الخسائر الهيدروليكية الناتجة عن الاحتكاك والاضطرابات داخل الجريان.

ب. تغير الضغط الستاتيكي على طول المحور:



الشكل (4.3): تغير الضغط الستاتيكي على طول محور أنبوب فنتوري.

يبين منحنى الشكل (4.3) تغير الضغط أن الضغط يكون مرتفعًا عند المدخل بسبب انخفاض السرعة، ثم ينخفض تدريجيًا في منطقة التقارب ليصل إلى أدنى قيمة عند العنق نتيجة ازدياد سرعة الجريان. بعد ذلك يبدأ الضغط بالارتفاع تدريجيًا في منطقة التوسع بسبب انخفاض السرعة واسترجاع جزء من الطاقة الضغطية، إلا أنه لا يعود إلى قيمته الابتدائية بسبب الفواقد الناتجة عن الاحتكاك واللزوجة.

التفسير الفيزيائي :

يرجع انخفاض الضغط داخل منطقة التقارب إلى زيادة سرعة الجريان الناتجة عن تناقص مساحة المقطع، حيث تتحول الطاقة الضغطية إلى طاقة حركية وفق معادلة برنولي. وعند العنق يصل الضغط إلى أدنى قيمة بسبب بلوغ السرعة قيمتها العظمى. أما في منطقة التوسع فيرتفع الضغط تدريجيًا نتيجة انخفاض السرعة، غير أنه لا يسترجع قيمته الأصلية بالكامل بسبب الفواقد اللزجة والاحتكاك داخل الأنبوب.

هذا السلوك يفسره قانون برنولي إذا اعتبرنا حالة الموائع المثالية :

$$P + \frac{1}{2}\rho V^2 + \rho g Z = \text{ثابت}$$

والتي تنص على أن **مجموع الضغط الستاتيكي والضغط الناتج عن الطاقة الحركية و الضغط الناتج عن طاقة الوضع يبقى ثابتًا على طول خط الجريان، مما يعني أن انخفاض الضغط يقابله ارتفاع في السرعة.**

2.3.3. حساب فرق الضغط:

بالنسبة للفرق في الضغط الديناميكي بين مدخل و عنق أنبوب فنتوري فهو يحسب كالآتي :

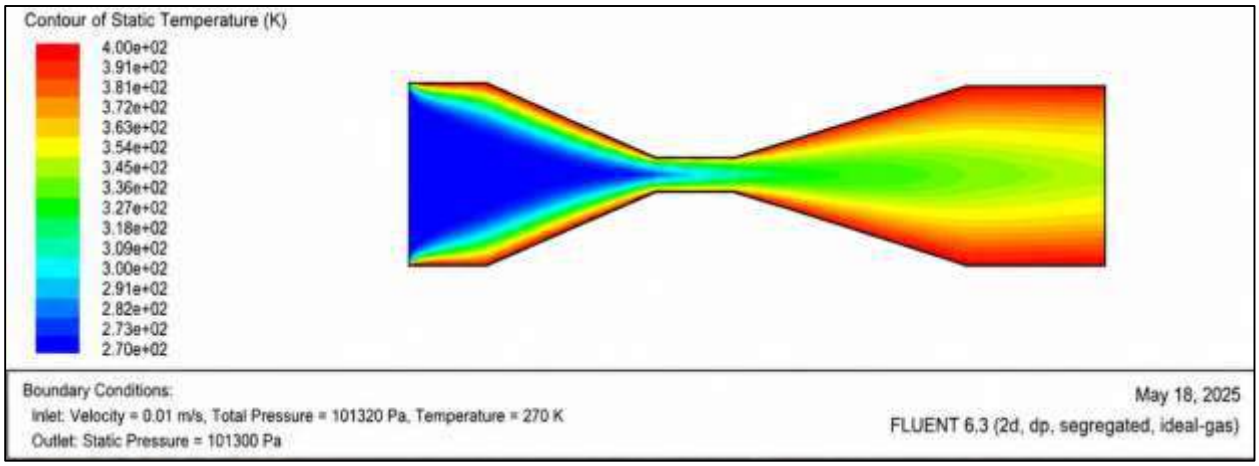
$$\Delta P = P_2 - P_1 = \frac{1}{2} 998.2((0.025)^2 - (0.001)^2) = 0.312\ P_a$$

هذا الفرق صغير بسبب السرعات المنخفضة جداً في نظام الجريان الرقائقي. في الواقع، توجد خسائر إضافية لم نتطرق لها هنا مثل الهبوط في الضغط الستاتيكي و الذي يقدر بحوالي $20\ P_a$ حسب الشكل (4.3).

4.3. تحليل توزيع درجة الحرارة:

1.4.3. النتائج المستخلصة من أجل درجة الحرارة:

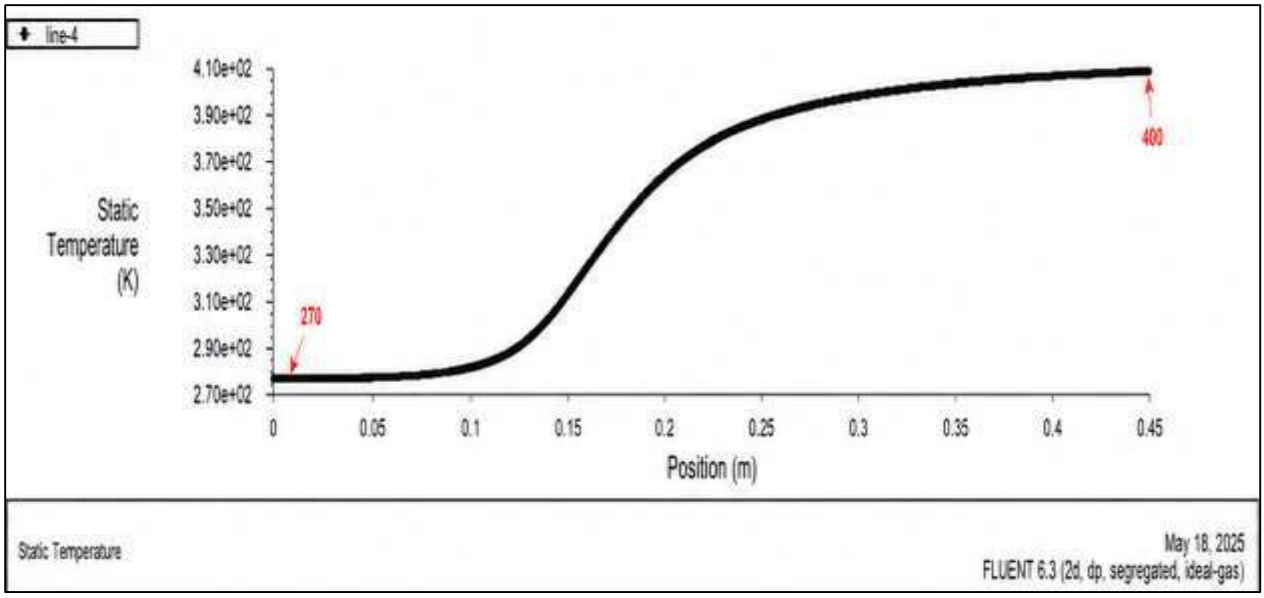
أ. **توزيع درجة الحرارة :**



الشكل (5.3): توزيع درجة الحرارة داخل أنبوب فنتوري.

يُظهر الشكل (5.3) توزيع درجة الحرارة داخل أنبوب فنتوري. مع اعتماد المحاكاة على جريان رقائقي، حيث نلاحظ تأثير تسخين المائع واضحا للعيان، وتكون درجة الحرارة متزايدة على طول الأنبوب.

ب. تغير درجة الحرارة على طول المحور:



الشكل (6.3): تغير درجة الحرارة على طول محور أنبوب فنتوري.

الشكل (6.3) يبين:

- ارتفاعاً خطيا لدرجة الحرارة على طول محور الأنبوب.
- ميل أكبر في منطقة الرقبة (بسبب زيادة السرعة مما يعزز الانتقال الحراري).
- استقراراً تدريجياً نحو المخرج مع اقتراب درجة حرارة المائع من درجة حرارة الجدار.

2.4.3. حساب عدد برانتل:

من العلاقة (5.1) نجد : $$Pr = \frac{0.001003 \times 4182}{0.6} = 6.99 \approx 7$$

قيمة $Pr \approx 7$ للماء عند 20 درجة مئوية تعني أن الانتشارية الحرارية (α) أقل من اللزوجة الحركية(ν) ، وبالتالي فإن الطبقة الحدية الهيدروديناميكية تكون أكثر سمكاً من الطبقة الحدية الحرارية. هذا السلوك نموذجي للسوائل، ويؤدي إلى وجود منطقة يكون فيها انتقال الزخم (الإجهادات) سائداً على انتقال الحرارة بالقرب من الجدار.

5.3. عدد نسلت المتوسط والمقارنة مع الأنبوب المستقيم:

بالنسبة للجريان الرقائقي المكتمل التطور في أنبوب مستقيم (تحت شرط درجة حرارة جدار ثابتة) رقم نسلت يتغير من $N_u=3.66$ إلى $N_u=4.36$ **[14]**

من خلال هذه القيم يمكن وضع المقارنة التالية في الجدول الموالي :

جدول (1.3) عدد نسلت المتوسط والمقارنة مع الأنبوب المستقيم**[14]**

نسبة التحسين	Nu أنبوب مستقيم	Nu أنبوب فنتوري	المنطقة
%50_25	8_4	12_8	المدخل
%90_60	4.36_3.66	10_7	الرقبة
%60_30	4.36_3.66	7_5	المخرج
%85_65	4.36_3.66	8_6	المتوسط على كامل الطول

التفسير :

يظهر أنبوب فنتوري **تحسناً حرارياً ملحوظاً** مقارنة بالأنبوب المستقيم بسبب:

1. زيادة السرعة في الرقبة مما يعزز الحمل الحراري

2. وجود اضطرابات محلية (حتى في الجريان الرقائقي) تحسن الخلط الحراري
3. زيادة مساحة السطح مقابل نفس الحجم (للهندسة المخروطية)

6.3. المقارنة الشاملة بين النماذج والدراسات السابقة

من أجل تقييم دقة النموذج العددي المستخدم وموثوقية النتائج المتحصل عليها، تمت مقارنة نتائج هذه الدراسة بعدد من الدراسات السابقة المنشورة في مجال انتقال الحرارة والجريان داخل الأنابيب والفنتوري. وقد أظهرت المقارنة وجود توافق واضح مع أغلب الأعمال المرجعية، خاصة فيما يتعلق بسلوك الجريان في المنطقة الانتقالية وتأثيره على تعزيز انتقال الحرارة.

أوضحت دراسة Bashir (2019) وآخرون [2] بعنوان دراسة تجريبية لخصائص انتقال الحرارة وانخفاض الضغط في نظام الجريان الانتقالي ، أن المنطقة الانتقالية، عند عدد رينولدز يقارب $Re\approx2300$، تمثل مرحلة حساسة يحدث فيها تغير تدريجي من الجريان الرقائقي إلى الجريان المضطرب، مما يؤدي إلى تحسن ملحوظ في انتقال الحرارة. وتتفق هذه النتيجة مع نتائج المحاكاة الحالية التي أظهرت أن الجريان عند $Re\approx500$ يقع ضمن المجال الانتقالي، مع تسجيل زيادة في شدة الخلط الحراري وتحسن في معامل انتقال الحرارة.

كما بينت دراسة Hemmat Esfe et al. (2019) [3] بعنوان دراسة تحسين الخصائص الحرارية وذلك باستخدام المحاكاة العددية ببرنامجFluent ، أن منطقة الخنق في أنبوب الفنتوري تُعد من أكثر المناطق فعالية حرارية بسبب ارتفاع السرعة المحلية وزيادة اضطراب الجريان، وهو ما يتوافق بصورة كبيرة مع نتائج الدراسة الحالية التي أظهرت ارتفاع السرعة القصوى داخل منطقة الرقبة وما نتج عنه من تعزيز لانتقال الحرارة.

من ناحية أخرى، **أظهرت دراسة Zhang et al. (2018)** [27] بعنوان دراسة تجريبية وعددية مقارنة لأداء الزعانف المموجة والزعانف المسطحة ، أن استخدام الزعانف الحلزونية داخل الأنابيب يؤدي إلى تحسين كبير في انتقال الحرارة نتيجة توليد دوامات ثانوية وزيادة الخلط بين طبقات المائع. ورغم أن الدراسة الحالية لم تعتمد عناصر داخلية معقدة، إلا أن النتائج أظهرت سلوكًا مشابهًا من حيث تحسن الأداء الحراري مع زيادة شدة الجريان، مع وجود اختلاف نسبي يعود إلى اختلاف الهندسة المستعملة وظروف التشغيل.

أما دراسة **Promvonge et al. (2015)** [28] بعنوان دراسة عددية وتجريبية لانتقال الحرارة في أنبوب دائري مزود بحواجز حدوة حصان مائلة، فقد أكدت أهمية النمذجة ثلاثية الأبعاد في تمثيل البنى الدوامية المعقدة داخل الأنابيب، بينما اعتمدت الدراسة الحالية نموذجًا ثنائي الأبعاد، وهو ما قد يفسر بعض الفروقات الطفيفة في توزيع السرعة وشدة الاضطراب مقارنة بالنتائج المرجعية. ومع ذلك، بقي الاتجاه العام للنتائج متوافقًا مع السلوك الفيزيائي المتوقع.

كذلك، أشارت دراسة **Manglik و Bergles (1989)** [29] إلى أن تحسين انتقال الحرارة في الجريان الرقائقي يمكن تحقيقه من خلال زيادة اضطراب الجريان أو استخدام عناصر محفزة داخلية، وهي نتائج تنسجم مع ما توصلت إليه الدراسة الحالية من أن زيادة عدد رينولدز تؤدي مباشرة إلى تحسين انتقال الحرارة.

وبشكل عام، تؤكد المقارنة مع الدراسات السابقة أن النموذج العددي المستخدم في هذه الدراسة قادر على تمثيل الظواهر الحرارية والهيدروديناميكية بدقة مقبولة، خاصة في المنطقة الانتقالية، مما يعزز من موثوقية النتائج المتحصل عليها وإمكانية الاعتماد عليها في تحليل وتحسين أداء أنابيب الفنتوري وانتقال الحرارة داخلها.

7.3. تحديد النموذج الأكثر كفاءة حرارياً في أنبوب فنتوري

أظهرت نتائج الدراسة أن النموذج الأكثر كفاءة حرارياً في أنبوب فنتوري هو النموذج الذي يعمل ضمن المنطقة الانتقالية للجريان، حيث سُجلت أفضل قيم لانتقال الحرارة عند عدد رينولدز يقارب $Re \approx 500$ ويُفسَّر ذلك بارتفاع سرعة المائع داخل منطقة الخنق، مما يؤدي إلى زيادة شدة الخلط بين طبقات الجريان وتقليل سمك الطبقة الحرارية الحدية، وبالتالي تحسين معدل انتقال الحرارة. كما بينت المحاكاة العددية أن منطقة الرقبة تمثل الجزء الأكثر فعالية حرارياً داخل الأنبوب نتيجة تسارع الجريان وارتفاع تدرج السرعة. وتتفق هذه النتائج مع العديد من الدراسات السابقة التي أكدت أن الأنظمة الانتقالية وشبه المضطربة توفر توازناً جيداً

بين تعزيز انتقال الحرارة وتقليل الفواقد في الضـغط مقارنة بالجريان المضـطرب الكامل. لذلك يمكن اعتبار النموذج الانتقالي في أنبوب الفنتوري الأنسب لتحقيق كفاءة حرارية مرتفعة مع استهلاك طاقي مقبول.

8.3. حدود صلاحية النتائج والتوصيات التطبيقية

رغم أن النتائج المتحصـل عليها أظهرت توافقًا جيدًا مع الدراسـات السـابقة وأكدت فعالية النموذج العددي المستخدم في دراسة انتقال الحرارة داخل أنبوب الفنتوري، إلا أن صلاحية هذه النتائج تبقى مرتبطة بمجموعة من الفرضيات والشروط المعتمدة أثناء المحاكاة. فقد تم اعتماد نموذج ثنائي الأبعاد لتبسيط الحسابات العددية وتقليل زمن المحاكاة، في حين أن الجريان الحقيقي داخل الأنابيب قد يتأثر ببنى دوامية ثلاثية الأبعاد لا يمكن تمثيلها بالكامل بهذا النموذج. كما أن الدراسـة افترضـت خواص فيزيائية ثابتة للمائع وإهمال تأثيرات الانضغاط والإشعاع الحراري، وهو ما قد يحد من دقة النتائج عند العمل في ظروف تشغيل صناعية معقدة أو عند درجات حرارة مرتفعة.

إضـافة إلى ذلك، اقتصـرت الدراسـة على مجال محدد من أعداد رينولدز ضـمن الجريان الرقائقي والانتقالي، لذلك لا يمكن تعميم النتائج مباشـرة على الجريان المضـطرب الكامل أو على الموائع ذات الخصـائص غير النيوتونية دون إجراء دراسات إضافية. كما أن دقة النتائج العددية تبقى مرتبطة بجودة الشبكة العددية ومعايير التقارب المستعملة في برنامج المحاكاة.

أما من الناحية التطبيقية، فإن النتائج المتوصـل إليها تشـير إلى إمكانية تحسـين كفاءة انتقال الحرارة داخل أنابيب الفنتوري من خلال التحكم في عدد رينولدز واسـتغلال المنطقة الانتقالية للجريان، باعتبارها توفر توازنًا جيدًا بين تحسـين الأداء الحراري وتقليل فقدان الضـغط. ويمكن الاسـتفادة من هذه النتائج في تصـميم المبادلات الحرارية وأنظمة التبريد الصـناعية وأجهزة القياس المعتمدة على أنابيب الفنتوري. كما توصـي الدراسـة مسـتقبلاً بإجراء محاكاة ثلاثية الأبعاد ودراسـة تأثير أشـكال هندسـية مختلفة للفنتوري، إضـافة إلى اختبار موائع نانوية أو تقنيات تعزيز حراري أخرى بهدف الوصـول إلى أداء حراري أعلى وكفاءة تشـغيلية أفضل.

9.3. خاتمة الفصل

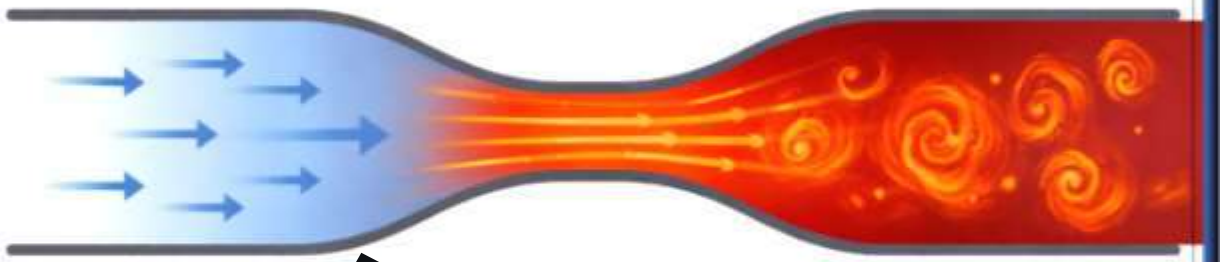
في هذا الفصـــل تم عرض وتحليل نتـائج المحاكاة العددية الخاصـــة بانتقال الحرارة والجريان داخل أنبوب الفنتوري، مع التركيز على تـأثير عـدد رينولـدز وطبيعـة الجريـان على الأداء الحراري والهيـدروديـنـاميكي للنظام. وقد أظهرت النتائج أن منطقة الخنق تمثل الجزء الأكثر نشـــاطًا من الناحية الحرارية بســـبب الزيادة الكبيرة في سرعة المائع وما يرافقها من تعزيز لعملية الخلط الحراري وتقليل سمك الطبقة الحدية الحرارية.

كما بينت الدراسة أن الجريان في المنطقة الانتقالية، عند عدد رينولدز يقارب Re≈500، يحقق أفضل توازن بين تحســين انتقال الحرارة وتقليل الفواقد الطاقوية، مما يجعله النظام الأكثر كفاءة حرارية ضـــمن شـــروط الدراســـة الحالية. وقد تم التأكد من موثوقية النتائج من خلال مقارنتها بعدة دراســـات ســـابقة، حيث أظهرت المقارنة توافقًا جيدًا مع النتائج المنشـــورة في الأدبيات العلمية، ســـواء من حيث ســـلوك الجريان أو من حيث تأثيره على انتقال الحرارة.

كذلك، ساهمت المحاكاة العددية باستعمال برنامج Fluent في فهم التوزيع الحراري وتغيرات السرعة داخل الأنبوب، مما أبرز أهمية النمذجة العددية كوســـيلة فعالة لتحليل الظواهر الفيزيائية المعقدة وتقليل الحاجة إلى التجارب المكلفة. ورغم بعض الحدود المرتبطة بفرضـيات النمذجة المعتمدة، فإن النتائج المتوصـل إليها توفر أساسًا علميًا يمكن الاعتماد عليه في تحسين تصميم أنابيب الفنتوري والمبادلات الحرارية.

وفي الأخير، تفتح هذه الدراســـة المجال أمام أبحاث مســـتقبلية أكثر تطورًا، خاصـــة من خلال اعتماد نماذج ثلاثية الأبعاد، ودراسة تأثير الموائع النانوية أو التعديلات الهندسية المختلفة، بهدف رفع كفاءة انتقال الحرارة وتحسين الأداء الطاقوي للأنظمة الحرارية الصناعية.

الخاتمة



العامة

الخاتمة العامة

تناولت هذه الدراسة التحليل العددي لانتقال الحرارة والجريان داخل أنبوب فنتوري باستخدام المحاكاة العددية ببرنامجFluent ، وذلك ضمن نطاق **الجريان الرقائقي** (Laminar Flow) ولعدد رينولدز مختلف يقع ضمن المنطقة الرقائقية. هدفت الدراسة إلى فهم تأثير طبيعة الجريان الرقائقي وزيادة عدد رينولدز (ضمن حدوده الرقائقية) على الأداء الحراري والهيدروديناميكي للنظام. وقد أتاحت المحاكاة العددية القائمة على ديناميكا الموائع الحسابية (CFD) فهماً تفصيلياً لسلوك المائع في جميع مناطق الأنبوب الثلاث: المنطقة المتقاربة، منطقة الخنق (الرقبة)، والمنطقة المتباعدة.

أظهرت النتائج أن منطقة الخنق تمثل الجزء الأكثر تأثيراً في تعزيز انتقال الحرارة، حيث يؤدي التسارع المحلي للمائع إلى تقليص سمك الطبقة الحدية الحرارية رغم بقاء الجريان في النظام الرقائقي. كما تبين أن **زيادة عدد رينولدز** ضمن النطاق الرقائقي تؤدي إلى تحسن ملحوظ في معامل انتقال الحرارة، ولكن على حساب زيادة طفيفة في الفواقد الضغطية، وهذا التوازن يجعل من الممكن اختيار نقطة تشغيل مثلى حتى ضمن حدود الجريان الرقائقي حسب متطلبات التطبيق.

من أهم الإسهامات العلمية لهذه الدراسة تقديم تحليل عددي دقيق لسلوك الجريان الرقائقي وانتقال الحرارة داخل أنبوب فنتوري، مع إبراز دور منطقة الخنق كمعزز حراري حتى في غياب الاضطراب. كما أثبتت الدراسة موثوقية النموذج العددي المستخدم عبر المقارنة مع دراسات سابقة (حيثما توفرت)، وأظهرت قدرة المحاكاة العددية على تقليل الحاجة إلى التجارب المعملية المكلفة.

وبناءً على النتائج المتوصّل إليها، توصي الدراسة باعتماد أنابيب فنتوري ضمن نظام الجريان الرقائقي في التطبيقات الحرارية التي تتطلب كفاءة حرارية مقبولة مقابل استهلاك طاقوي منخفض، مثل المبادلات الحرارية الصغيرة أو أنظمة التبريد منخفضة التدفق. كما توصي بتحسين التصميم الهندسي لمنطقة الخنق (مثل تنعيم الانتقالات) واستخدام شبكات عددية أكثر دقة حول الطبقة الحدية للحصول على نتائج أكثر واقعية.

أمـــا آفـــاق البحـــث المســـتقبلية، فتشـــمل توســـيع الدراســـة لتشـــمل **نطاقـــات الجريـــان الانتقـــالي والمضـــطرب** ومقارنـــة أدائهـــا مـــع النتـــائج الحاليـــة للجريـــان الرقـــائقي، وكـــذلك اســـتخدام نمـــاذج ثلاثيـــة الأبعـــاد لدراســـة البنـــى الدواميـــة، ودراســـة تـــأثير إضـــافة الموائـــع النانويـــة أو الزعـــانف الحلزونيـــة كتقنيـــات لتعزيـــز انتقـــال الحـــرارة. كمـــا يُوصـــى مســـتقبلاً بـــإجراء دراســـات تجريبيـــة باســـتخدام تقنيـــات مثـــل التصـــوير الحـــراري للتحقـــق مـــن النتـــائج العدديـــة فـــي ظـــروف تشـــغيل حقيقيـــة، ممـــا يســـهم فـــي تطـــوير أنظمة حرارية أكثر كفاءة واستدامة.

مراجع الدراسة

1. Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). Fundamentals of Heat and Mass Transfer (Chapter 1). John Wiley & Sons.

2. Bashir, A. I., Everts, M., & Meyer, J. P. (2019). Influence of inlet contraction ratios on the heat transfer and pressure drop characteristics of single-phase flow in smooth circular tubes in the transitional flow regime. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 109, 109892, 1-16.
3. Hemmat Esfe, M., Kiannejad Amiri, M., & Bahiraei, M. (2019). Optimizing thermophysical properties of nanofluids using response surface methodology and particle swarm optimization in a non-dominated sorting genetic algorithm. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*.
4. Wang, W., Zhang, Y., Liu, J., Wu, Z., Li, B., & Sundén, B. (2018). *Entropy generation analysis of fully-developed turbulent heat transfer flow in inward helically corrugated tubes*. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 71(11), 788-805.

5. ثامر، حبيب. (2007). *انتقال الحرارة*. المكتبة الأكاديمية.
6. خليل، السيد.(1999). *Energy Future*. القاهرة.Academic Bookshop Publishers. :
7. عبد الفتاح، السيد. (2008). *انتقال الحرارة*. المكتبة الأكاديمية.
8. ونترتن، ر. هـ. س. (2010). *انتقال الحرارة* (حامد بن عبد الرزاق السويدان، مترجم). الرياض: جامعة الملك سعود، النشر العلمي والمطابع.
9. إسماعيل، زكي. (د.ت.). *جريان الموائع اللزجة*. الإسكندرية: منشأة المعارف.
10. النجار، محمد يوسف. (2010). *ميكانيكا الموائع وتطبيقاتها الهندسية*. عمان: دار صفاء للنشر والتوزيع.
11. الشيخ، صبري محمد. (2009). *مبادئ ميكانيكا الموائع* (الطبعة الثانية). القاهرة: دار الكتب العلمية.

12.جايلز، ر.، إيفيت، ج.، وليو، ج. (2005). *ميكانيكا الموائع* (د. محمود كامل خليل، مترجم). القاهرة: دار ميريت للنشر والتوزيع.

13. Al Mehrej, M. A. A., & El Sayed, M. F. (2015). *Recent Development in Fluid Mechanics * , ElQassim university.

14. Cebeci, T., & Cousteix, J. (2005). *Modeling and Computation of Boundary-Layer Flows: Laminar, Turbulent and Transitional Boundary Layers in Incompressible and Compressible Flows* (2nd ed.). Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-27624

15. Patankar, S. V., & Spalding, D. B. (1968). *Heat and Mass Transfer in Boundary Layers*. Cleveland: C.R.C. Press.

16. Schlichting, H., & Gersten, K. (2017). *Boundary-Layer Theory*. Berlin: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-52919-5

17. Rapp, C. (2024). Basic equations. In *Hydraulics in Civil Engineering*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54860-4_5

18. Moukalled, F., Mangani, L., & Darwish, M. (2016). Mathematical Description of Physical Phenomena. In *The Finite Volume Method in Computational Fluid Dynamics*. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16874-6_3

19. Powers, J. M. (2023). *Mechanics of Fluids*. Cambridge: Cambridge University Press.

20. Rennels, D. C., & Hudson, H. M. (2012). Flow Meters. In: Pipe Flow: A Practical and Comprehensive Guide. Wiley.

21. ScienceDirect. (n.d.). Venturi Meter. In *Topics in Engineering*. Elsevier. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/venturi-meter

22.Lach, L., & Svyetlichnyy, D. (2025). *Advances in numerical modeling for heat transf er and thermal management: A review of computational approaches and environmental impacts*. Energies, 18(5), 1302, 1-60. https://doi.org/10.3390/en18051302

23. Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2nd ed.). Pearson Education.

24.Patankar, S. V., & Spalding, D. B. (1972). A calculation procedure for heat, mass and momentum transfer in three-dimensional parabolic flows. International Journal of Heat and Mass Transfer, *15(10), 1787-1806.*

25.ANSYS Fluent User's Guide (Version 6.3). (2006). ANSYS Inc., Chapter 25: Solution Convergence.

26.Manglik, R. M., & Bergles, A. E. (1993). *Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes*: Part I—Laminar flows. ASME Journal of Heat Transfer, 115(4), 881-889. https://doi.org/10.1115/1.2911383

27.Manglik, R. M., & Bergles, A. E. (1993). *Heat transfer and pressure drop correlations for twisted-tape inserts in isothermal tubes*: Part II—Transition and turbulent flows. ASME Journal of Heat Transfer, 115(4), 890-896. https://doi.org/10.1115/1.2911384

الملخص بالعربية

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل انتقال الحرارة بالحمل القسري داخل أنبوب فنتوري باستخدام المقاربة العددية، وذلك لفهم تأثير التغير في المقطع العرضـــي على الخصـــائص الهيدروديناميكية والحرارية للجريان الرقائقي ، تم اعتماد نموذج رياضـــي يعتمد على معادلات الاســـتمرارية، ومعادلات نافييه–ستوكس، ومعادلة الطاقة لوصف سلوك المائع داخل الأنبوب.

تم إجراء المحاكاة العددية باستخدام برنامج Fluent، حيث تم تحليل توزيع السرعة والضغط ودرجة الحرارة داخل أنبوب فنتوري، مع دراسة تأثير عدد رينولدز والأبعاد الهندسية، خاصة منطقة الخنق، على كفاءة انتقال الحرارة.

أظهرت النتائج أن زيادة عدد رينولدز تؤدي إلى تحسين انتقال الحرارة نتيجة زيادة شدة السرعة في منطقة العنق أثناء الجريان، كما أن منطقة الخنق تلعب دورًا مهمًا في تعزيز انتقال الحرارة بسبب تسارع المائع وانخفاض الضغط. إضافة إلى ذلك، تم التوصل إلى أن تحسين التصميم الهندسي لأنبوب فنتوري يمكن أن يساهم بشكل فعال في رفع كفاءة الأنظمة الحرارية.

تُبرز هذه الدراسة أهمية استخدام ديناميكا الموائع الحسابية كأداة فعالة لتحليل الظواهر المعقدة، وتفتح آفاقًا مستقبلية لتحسين تصميم الأنظمة الصناعية الحرارية.

الكلمات المفتاحية:

أنبوب فنتوري، انتقال الحرارة، الحمل القسري، CFD، عدد رينولدز، Fluent

Abstract (English)

This study aims to investigate forced convection heat transfer inside a Venturi tube using a numerical approach, in order to understand the influence of variable cross-sectional geometry on the hydrodynamic and thermal behavior of the flow. A mathematical model based on the continuity equation, the Navier–Stokes equations, and the energy equation was employed to describe the fluid flow and heat transfer phenomena.

Numerical simulations were performed using Fluent. The distributions of velocity, pressure, and temperature inside the Venturi tube were analyzed, with particular attention to the effects of Reynolds number and geometric parameters, especially the throat region, on heat transfer performance.

The results showed that increasing the Reynolds number enhances heat transfer due to increased turbulence intensity. Furthermore, the throat region plays a significant role in improving heat transfer as a result of fluid acceleration and pressure drop. It was also found that optimizing the geometric design of the Venturi tube can significantly improve the efficiency of thermal systems.

This study highlights the importance of Computational Fluid Dynamics as a powerful tool for analyzing complex physical phenomena and provides perspectives for improving industrial thermal system design.

Keywords:

Venturi tube, heat transfer, forced convection, CFD, Reynolds number, Fluent