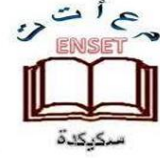




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
المدرسة العليا لأساتذة التعليم التكنولوجي
-سكيدة-



قسم التكنولوجيا

التخصص: هندسة ميكانيكية

مذكرة التخرج لنيل شهادة أستاذ التعليم الثانوي

بعنوان

محاكاة عددية لأداء مبادل حراري: تحليل التفاعل بين الهيكل الصلب وجريان المائع مع
تأثير درجة الحرارة

**Numerical Simulation of Heat Exchanger Performance: Analysis of the
Interaction Between Solid Structure and Fluid Flow with Temperature
Effects**

من إعداد الطلبة:

- ❖ غضبان حسام
- ❖ بوغابة شهاب الدين

تحت إشراف الاستاذ:

- ❖ اساسفة إبراهيم

لجنة المناقشة:

- ❖ خريف نصر الدين محمد - أستاذ محاضر - أ - رئيسا - المدرسة لأساتذة التعليم التكنولوجي سكيدة
- ❖ اساسفة إبراهيم - أستاذ محاضر - أ - مؤطرا - المدرسة لأساتذة التعليم التكنولوجي سكيدة
- ❖ بن ساسي محمود - أستاذ محاضر - أ - مناقشا - المدرسة لأساتذة التعليم التكنولوجي سكيدة

السنة الجامعية 2025/2024

شكر وعرفان

الحمد لله الذي بنعمته تتمّ الصالحات، وبفضله تتدلل الصعوبات، وبتوقيه تشرق دروب النجاح وتثمر الجهود. نحمده تعالى ونشكره على أن منّ علينا بالقوة والعزيمة لإتمام هذا العمل، وأن وفقنا لإنجاز هذا المشروع الذي يمثل ثمرة مسار علمي حافل بالتحديات والتطلعات.

نتقدم بأسمى عبارات الشكر والامتنان إلى الأستاذ الفاضل ابراهيم إسافه، المشرف الذي لم يبخل علينا بتوجيهاته السديدة ونصائحه القيّمة، فكان لنا نعم الداعم والموجه. نشكره جزيل الشكر على كرم عطائه لوقته لنا، لقد كان لتكوينه العلمي والأخلاقي الأثر البالغ، سواء داخل القسم، أو في إطار إعداد هذه المذكرة.

كما لا يفوتنا أن نعرب عن شكرنا العميق لأعضاء لجنة المناقشة الأفاضل الأستاذ خريف نصر الدين محمد رئيسا والأستاذ بن ساسي محمود مناقشا، على قبولهم مناقشة هذا العمل، وتخصيص وقتهم الثمين للاطلاع عليه وتقييمه، وهو ما نعدّه تشريفا لنا.

ولا يسعنا في هذا المقام إلا أن نكنّ كل الامتنان والعرفان إلى جميع أساتذتنا الأجلاء الذين ساهموا في تكويننا بإخلاص طيلة سنوات دراستنا، ووهبونا من علمهم ووقتهم ما لا يقدر بثمن، فكانوا بحق مشاعل هداية في مسيرتنا الجامعية.

إلى أمي

لمن غرسا في قلبي معنى العطاء، وكانا لي نورا في طريق الحياة...

إلى أمي الحبيبة،

إلى من كانت أنفاسها دعاء، وصبرها طريقا، وحنانها وطنا...

يا من كانت دعواتك سر توفيقِي، وحنانك ملاذِي في كل الأوقات،

يا من سهرت من أجلي، وتحملت الكثير بصمت،

لك كل الحب، وكل الفخر، وكل هذا الجهد هو ثمرة من غرس يديك، ولأجلك أزهر هذا الحلم.

وإلى والدي العزيز،

يا من علمتني كيف أواجه الحياة بقوة وصبر،

يا من كنتَ السند والعون والمثل الأعلى،

إليك يا من أفتخر بانتمائي إليك، وأستمد منك العزم والثبات في كل خطوة.

لك كل الامتتان على دعمك اللامحدود، وثقتك التي منحنتي الأمل دوما.

وإلى إخوتي رفاق دربي منذ الطفولة،

أنتم الأمان حين يهتز كل شيء، والفرح الذي لا يكتمل إلا بوجودكم،

كنتم الرفقة الصادقة، واليد التي تمتد في الخفاء لتدفعني إلى الأمام،

شكراً لكونكم دائماً هناك...

إليكم،

أهدي هذا الإنجاز، لا كتكريم لي، بل كعرفان بسيط لكم،

لأن كل حرف فيه كتب من نور حبيكم، وصدى دعائكم.

إهداء

الحمد لله أولاً وآخراً، ظاهراً وباطناً،
الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، وبفضله تنال الغايات،
لك الشكر يا رب عدد ما كان وما يكون، أن وقّعتني وبلغتني هذا المقام.

إلى من كانا بعد الله عز وجل سبباً في كل نجاح،
إلى من غرسا في قلبي الصبر، وزرعا في طريقي الثبات،
إلى والدي العزيزين.
يا من كانت دعواتكما الزاد، وتضحياتكما الجسر، وعطفكما المأوى،
أهدي إليكما هذه المنكرة، عرفانا بجميلكما، وامتنانا لا نقيه كلمات.

وإلى عائلتي الكريمة، من كانوا لي ووطناً صغيراً يحتوي قلبي ويشدّ أزرِي،
أهديكم جزءاً من هذا الجهد، فلکم في كل خطوة من خطواته نصيب.

اللهم كما أنعمت، فأتمم، وكما وقّعت، فبارك، واجعل هذا العمل خالصاً لوجهك الكريم.

شباب
الكتاب

الفهرس

I.....الفهرس

X.....قائمة الأشكال

XIV.....قائمة الرموز

XVII.....الملخص

1.....مقدمة عامة:

2.....الفصل الأول:

3.....1.1 مقدمة :

3.....2.1لمحة تاريخية عن المبادلات الحرارية:

4.....3.1تصنيفات المبادلات الحرارية :

4.....1.3.1التصنيف وفقاً لعمليات انتقال الحرارة :

1.1.3.1المبادلات الحرارية ذات الاتصال غير المباشر (Indirect-Contact Heat

4.....(Exchangers):

4.....أ-المبادلات من النوع ذو النقل المباشر (Direct-Transfer Type Exchangers):

5.....ب-مبادلات الحرارة التخزينية (Storage Type Exchangers) :

2.1.3.1المبادلات الحرارية ذات الاتصال المباشر (Direct-Contact Heat

6.....(Exchangers):

6.....أ-مبادلات السوائل غير القابلة للامتزاج (Immiscible Fluid Exchangers) :

- 6 : (Gas-Liquid Exchangers) ب-مبادلات الغاز-السائل
- 7: (Liquid-Vapor Exchangers) ج- مبادلات السائل-البخار
- 7.....:التصنيف حسب اتجاه تدفق السوائل:2.3.1
- 7 : (Parallel flow) 1.2.3.1-التدفق المتوازي
- 8: (Counterflow) 2.2.3.1-التدفق المعاكس
- 9 : (Cross-flow) 3.2.3.1-التدفق العرضي
- 3.3.1-التصنيف وفقاً للخصائص البنوية (CLASSIFICATION ACCORDING TO)
- 10..... : (CONSTRUCTION FEATURES)
- 10 : (tubular heat exchangers) 1.3.3.1-مبادلات الحرارة من النوع الأنبوبي
- 10 : (Double-pipe heat exchangers) أ-مبادلات الحرارة ذات الأنبوب المزدوج
- 12: (Shell-and-tube heat exchangers) ب-مبادلات الحرارة ذات أنبوب وغطاء
- 13 : (Plate Heat Exchangers) 2.3.3.1-مبادلات الحرارة من نوع الألواح
- 13: (Gasketed Plate Heat Exchanger) أ-مبادل الحرارة من نوع الألواح المحكمة
- 14: (Spiral Plate Heat Exchangers) ب-مبادلات الحرارة ذات الألواح الحلزونية
- 3.3.3.1-المبادلات الحرارية ذات الأسطح الممتدة (Extended Surface Heat)
- 14:(Exchangers)
- 16 : (Plate-Fin Heat Exchangers) أ-المبادلات الحرارية ذات الصفائح والزعانف
- 18 : (Tubular-Fin Heat Exchangers) ب-مبدلات الحرارة ذات الأنابيب والزعانف
- 19..... : (Heat Transfer Mechanisms) 4.3.1-التصنيف وفقاً لآليات نقل الحرارة

19	1.4.3.1-الحمل الحراري أحادي الطور على الجانبين (Single-phase convection)
20	2.4.3.1-الحمل الحراري أحادي الطور على جانب واحد، والحمل الحراري ثنائي الطور على الجانب الآخر:
20	3.4.3.1-الحمل الحراري ثنائي الطور على الجانبين:
21	4.1-المشعاع (Radiator) :
21	1.4.1-مكونات المشعاع (Components of a Radiator) :
22	2.4.1-إتماءات مشعاع السيارة ضمن تصنيفات المبادلات الحرارية :
22	1.2.4.1-وفقا لعملية إنتقال الحرارة :
22	2.2.4.1-وفقا لإتجاه تدفق الموائع :
22	3.2.4.1-التصنيف وفقاً للخصائص البنيوية :
22	4.2.4.1-تصنيف وفقاً لألية نقل الحرارة :
22	3.4.1-مبدأ عمل المشعاع (Radiator Working Principle) :
23	4.4.1-البناء والمواد المستخدمة في تصنيع الرادياتور (Construction And Material) :
24	5.1-سوائل التبريد (Heat transfer fluids) :
24	1.5.1- أنواع سوائل التبريد :
25	2.5.1-العوامل المؤثرة في اختيار السائل الحراري :

25	6.1- طرق الحساب النظرية (Theoretical Calculation Methods)
26	1.6.1- طريقة العناصر المنتهية (Finite Element Method)
29	1.1.6.1- العناصر ودوال الشكل (Elements and Shape Functions)
29	أ- طريقة جاليركن (Galerkin Approach)
31	2.6.1- الطريقة التحليلية (Analitical method)
31	1.2.6.1- أسلوب فصل المتغيرات:
	أ- بفرض قيمة ثابتة لدرجة الحرارة عند الحدود (Method of Separation of
31	(Variables: Given Temperature BC
	ب- معطى تدفق حراري وشروط حدية الحمل الحراري (Method of Separation of
34	(Variables: Given Heat Flux and Convection BCs
36	ج- معطى شرط حدي للحمل الحراري السطحي (Given Surface Convection BC)
	د- مبدأ التراكب للشروط الحدية غير المتجانسة (Principle of Superposition
37	(Nonhomogeneous BCs
38	7.1- خاتمة :
39	الفصل الثاني:
40	1.2- مقدمة :
40	2.2- إنتقال الحرارة (Heat Transfer)
41	1.2.2- إنتقال الحرارة والترموديناميك (THERMODYNAMICS AND HEAT TRANSFER)

42.....: (Heat Transfer Modes) طرق إنتقال الحرارة -2.2.2

42 : (Conduction) التوصيل -1.2.2.2

45: (Multidimensional Heat Transfer) انتقال الحرارة متعدد الأبعاد أ-

46 : (Thermal Resistance) المقاومة الحرارية ب-

47: (Convection) الحمل -2.2.2.2

48 : (Radiation) الإشعاع -3.2.2.2

50 : (Types of Fluid Flow) تدفق الموائع -3.2

51 ..:(Laminar, Transition, and Turbulent Flows) المضطربة، الانتقالية، والتدفقات الطبقيّة، -1.3.2

1.1.3.2 - نموذج الاضطراب ذو المعادلتين k, ε turbulence) The two equations

53.....: (model

55..... : (Steady Flow) التدفق الثابت -2.3.2

55.....: (Unsteady Flow) التدفق غير الثابت -3.3.2

55.....:(Compressible Flow) التدفق الانضغاطي -4.3.2

56.....:(Incompressible Flow) التدفق غير الانضغاطي -5.3.2

56 : (CFD) ديناميكا الموائع الحسابية -4.2

56..... : (CFD) مزايا استخدام ديناميكا الموائع الحسابية -1.4.2

57.....: المعادلات الحاكمة لحركة السوائل -2.4.2

- 57: (Continuity Equation) معادلة الاستمرارية (1.2.4.2)
- 57: (Momentum Equations) معادلات الزخم (2.2.4.2)
- 57: (Energy Equation) معادلة الطاقة (3.2.4.2)
- 57: (Equation of State) معادلة الحالة (4.2.4.2)
- 57: (Internal Energy) الطاقة الداخلية (5.2.4.2)
- 57: (Enthalpy) الأنتالبي (6.2.4.2)
- 57: (Ideal Gas) الغاز المثالي (7.2.4.2)
- 8.2.4.2 معادلات نافير-ستوكس غير القابلة للانضغاط (Incompressibl Navier-)
- 58: (Stokes Equations)
- 58: (General Transport Equation) المعادلة العامة للنقل (9.2.4.2)
- 5.2 - التفاعلات بين الهيكل والمائع (Structure-Fluide Interactions) : 59
- 1.5.2 - الصياغة الرياضية لتفاعل المائع-الهيكل (Mathematical formulation of FSI) : 60
- 1.1.5.2 - مجالات المائع (Fluid Domains) : 60
- 2.1.5.2 - مجال الصلب (Solid Domain) : 62
- أ- معادلة توصيل الحرارة (Heat conduction equation) : 62
- ب- معادلة ديناميكا الهيكل (Equation of structural dynamics) : 62
- 2.5.2 - تحليل مشاكل تفاعل المائع-الهيكل (Analysis Fluid-Structure Interaction Problems) : 63 ..
- 6.2 - خاتمة : 64

65	الفصل الثالث:
66	1.3 - مقدمة :
66	2.3 - أهداف التصميم والقيود Design objectives and constraints :
67	3.3 - لمحة عامة عن برنامج SolidWorks ودوره في التصميم الهندسي :
68	4.3 - وصف لأجزاء المبادل الحراري Heat Exchanger Geometry Description :
68	1.4.3 - الغطاء الثابت Stationary Head :
69	2.4.3 - القشرة Shell :
71	3.4.3 - الأنابيب Tubes :
72	4.4.3 - الحواجز (Baffles) :
73	5.3 - خاتمة :
74	الفصل الرابع:
75	1.4 - مقدمة :
75	2.4 - البرنامج المستخدم في المحاكات The software used in simulation :
76	3.4 - مراحل محاكاة ديناميكا الموائع الحسابية (CFD) باستخدام Ansys Fluent :
76	1.3.4 - إعداد الشكل الهندسي (Geometry) :

78.....	2.3.4 - مرحلة إنشاء الشبكة (Mesh) :
81.....	3.3.4 - مرحلة الإعداد (Setup):
81	1.3.3.4 - المرحلة الأولى General :
82	2.3.3.4 - المرحلة الثانية Models :
84	3.3.3.4 - المرحلة الثالثة Materials :
86	4.3.3.4 - المرحلة الرابعة Cell Zone Conditions :
88	5.3.3.4 - المرحلة الخامسة Boundary Conditions :
90.....	4.3.4 - الحل (Solution) :
90	1.4.3.4 - المرحلة الأولى Methods :
91	2.4.3.4 - المرحلة الثانية Initialization :
91	3.4.3.4 - المرحلة الثالثة Run Calculation :
93.....	5.3.4 - النتائج (Results) :
93	1.5.3.4 - النتائج العامة :
	2.5.3.4 - تحليل توزيع الضغط والتغيرات الحرارية في جريان الماء Pressure and
95	Thermal Distribution Analysis in Water Flow :
	3.5.3.4 - تحليل توزيع الضغط والتغيرات الحرارية للغاز Pressure and Thermal
97	Distribution Analysis of gas :
98	4.4 - خاتمة :

99	الفصل الخامس:
100	1.5- مقدمة :
100	2.5- أهمية محاكاة FSI :
	3.5- أهمية دمج نتائج CFD السابقة مع تحليل بنية المادة The Importance of
101	Integrating Previous CFD Results with Structural Analysis :
101	4.5- مراحل المحاكاة FSI Simulation Stages :
101	1.4.5- استيراد نتائج محاكاة CFD إلى إعداد محاكاة FSI:
102	2.4.5- النموذج Model :
104	3.4.5- التحليل الهيكلي الثابت Static Structural :
105	4.4.5- تحديد المتغيرات وتحليل النتائج Defining Variables and Analyzing Results ..:
110	5.5- خاتمة :
111	خاتمة عامة.

قائمة الأشكال

- الشكل 1.1: الجريان المتوازي (متجهان في نفس الاتجاه)7.
- الشكل 2.1: الجريان المعاكس (تياران في اتجاهين متعاكسين)8.
- الشكل 3.1: مقارنة بين الجريان المتوازي والجريان المعاكس8.
- الشكل 4.1: الجريان المتقاطع9.
- الشكل 5.1: مبادل حراري من نوع الأنبوب المزدوج11.
- الشكل 6.1: مبادل حراري من نوع الأنبوب المزدوج11.
- الشكل 7.1: مبادل حراري من نوع غطاء وأنايب12.
- الشكل 8.1: مخطط يوضح مسارات الجريان في مبادل حراري صفيحي13.
- الشكل 9.1: مبادل حراري من نوع الألواح الحلزونية14.
- الشكل 10.1: المكونات الأساسية لمبادل حراري من نوع الألواح والزعانف16.
- الشكل 11.1: أشكال الزعانف المموجة لمبادل حراري من نوع الألواح والزعانف17.
- الشكل 12.1: أنبوب مسطح مزود بشبكة وزعانف متعددة (مشعاع السيارة)18.
- الشكل 13.1: مبادل حراري من نوع الأنبوب والزعانف: (a) أنبوب مسطح مع زعانف؛ (b) أنبوب دائري مع زعانف19.
- الشكل 14.1: آليات انتقال الحرارة20.
- الشكل 15.1: الأجزاء الرئيسية لرادياتور السيارة21.
- الشكل 16.1: مبدأ عمل الرادياتور23.
- الشكل 17.1: شبكة العناصر المحدودة النموذجية. العناصر، العقد، والحواف27.
- الشكل 18.1: التوصيل الحراري ثنائي الأبعاد مع ثلاث شروط حدود متجانسة وشروط حدود غير متجانس واحد32.
- الشكل 19.1: التوصيل الحراري ثنائي الأبعاد مع ثلاث شروط حدود متجانسة وشروط حدود غير متجانس لانتقال الحرارة34.
- الشكل 1.2: أنواع انتقال الحرارة42.
- الشكل 1.2: التوصيل بواسطة اهتزاز الشبكة43.
- الشكل 3.2: التوصيل بواسطة تصادم الجسيمات43.
- الشكل 4.2: التوصيل الحراري عبر جدار مسطح كبير بسمك Δx ومساحة A44.
- الشكل 5.2: محصلة مركبات شعاع انتقال الحرارة في مكعب مادي45.
- الشكل 6.2: شبكة مقاومة الحرارة لانتقال الحرارة عبر جدار مسطح مع تعرضه للحمل الحراري من الجانبين، والتشبيه الكهربائي46.
- الشكل 7.2: تبريد البيضة المسلوقة بواسطة الحمل الحراري القسري والطبيعي47.

- 48..... الشكل 8.2: الإشعاع الحراري.....
- 51..... الشكل 9.2 : الجريان الصفائحي والجريان المضطرب.....
- 52..... الشكل 10.2: تجربة رينولدز.....
- 55..... الشكل 11.2: الجريان المتوسط الثابت وغير الثابت بصورة.....
- 66..... الشكل 1.3: الرسم المنظوري للمبادل الحراري المصمم.....
- 67..... الشكل 2.3 : الرمز الرسمي لصوليدوركس.....
- 68..... الشكل 3.3: الإسقاطات مع توضيح الأبعاد للغطاء الثابت.....
- 69..... الشكل 4.3: الرسم المنظوري للغطاء الثابت.....
- 70..... الشكل 5.3: الإسقاطات مع توضيح الأبعاد للقشرة.....
- 70..... الشكل 6.3: الرسم المنظوري للغلاف.....
- 71..... الشكل 7.3: المساقط مع توضيح الأبعاد للأنايب.....
- 71..... الشكل 8.3 : الرسم المنظوري للأنايب.....
- 72..... الشكل 9.3: الإسقاطات مع توضيح الأبعاد للحواجز.....
- 73..... الشكل 10.3: الرسم المنظوري للحواجز.....
- 76..... الشكل 1.4: شكل المبادل الحراري بعد استيراده من SOLIDWORKS إلى ANSYS.....
- 77..... الشكل 2.4: مجال سائل التبريد داخل المبادل الحراري.....
- 77..... الشكل 3.4: مجال الغاز داخل المبادل الحراري.....
- 78..... الشكل 4.4: أنواع العناصر (Elements) داخل البرنامج.....
- 79..... الشكل 5.4: شجرة الإنشاء في Mesh.....
- 80..... الشكل 6.4: تفاصيل شبكة Mesh.....
- 80..... الشكل 7.4: شكل شبكة Mesh على المبادل الحراري.....
- 81..... الشكل 8.4: إعدادات General في مرحلة Setup.....
- 82..... الشكل 9.4: تفعيل خيار Energy.....
- 83..... الشكل 10.4: إعدادات نموذج اللزوجة (Viscous Model).....
- 84..... الشكل 11.4: تحديد مادة الماء كمائع أول للدراسة.....
- 85..... الشكل 12.4: تحديد مادة غاز البترول المسال كمائع للدراسة.....
- 85..... الشكل 13.4: تحديد مادة الألمنيوم كمادة صلبة.....
- 86..... الشكل 14.4: تحديد غاز البترول المسال ليضمحل حيز الغاز.....
- 87..... الشكل 15.4: تحديد الماء ليضمحل حيز السائل.....
- 87..... الشكل 16.4: تحديد الألمنيوم كمادة للأجسام الصلبة.....

- 88..... الشكل 17.4: تحديد درجة حرارة دخول الغاز
- 88..... الشكل 18.4: تحديد درجة حرارة دخول الماء
- 89..... الشكل 19.4: تحديد سرعة تدفق الغاز
- 89..... الشكل 20.4: تحديد سرعة تدفق الماء
- 90..... الشكل 21.4: تحديد الطرق الحسابية
- 91..... الشكل 22.4: تحديد طريقة التهيئة (Initialization)
- 92..... الشكل 23.4: تحديد الإعدادات المتعلقة بتنفيذ الحسابات
- 92..... الشكل 24.4: المنحنيات الناتجة لمختلف المتغيرات
- 93..... الشكل 25.4: التبادل الحراري بين جميع عناصر النظام
- 94..... الشكل 26.4: التبادل الحراري عند سطح التلامس بين الماء والأنابيب
- 94..... الشكل 27.4: التبادل الحراري عند سطح التلامس بين الغاز والأنابيب
- 95..... الشكل 28.4: التوزيع العام للضغط داخل المبادل الحراري
- 96..... الشكل 29.4: التغير الحراري في مجال الماء
- 96..... الشكل 30.4: توزيع الضغط على طول مجرى الماء
- 97..... الشكل 31.4: التغير الحراري في مجال الغاز
- 98..... الشكل 32.4: توزيع الضغط على طول مسار تدفق الغاز
- 102..... الشكل 1.5: ربط برنامجي ANSYS Static Structural و ANSYS Fluent
- 102..... الشكل 2.5: حذف جسم المائع داخل المبادل الحراري
- 103..... الشكل 3.5: تحديد الألمنيوم كمادة الهيكل
- 103..... الشكل 4.5: تهيئة إعدادات شبكة الميش
- 104..... الشكل 5.5: شكل شبكة الميش على المبادل
- 104..... الشكل 6.5: العمليات المنجزة في Static Structural
- 105..... الشكل 7.5: تحديد المتغيرات المراد دراستها
- 105..... الشكل 8.5: الإنتقال على المحور Y
- 106..... الشكل 9.5: الإنتقال على المحور Z
- 106..... الشكل 10.5: مقطع للإنتقال إتجاه المحور Z للأنابيب
- 107..... الشكل 11.5: الإنتقال الكلي
- 107..... الشكل 12.5: مقطع يوضح الانتقال الكلي للأنابيب
- 108..... الشكل 13.5: التشوه الحراري
- 108..... الشكل 14.5: الإجهادات الرئيسية

الشكل 15.5: إجهاد التشوه المرن المكافئ 109

الشكل 16.5: معيار فون ميزس للإجهاد المكافئ 109

قائمة الرموز

$[W / K]$	K : معدل انتقال الحرارة بالنسبة لفارق في درجة الحرارة
$[m^2]$	A : مساحة المقطع العرضي التي يمر من خلالها الفيض الحراري
$[W / (m \cdot K)]$	k : الموصلية الحرارية للمادة
$[m]$	l : طول أو سماكة العنصر
$[W]$	Q : تدفق الحرارة
$[s]$	t : الزمن
$[K]$	T : درجة الحرارة
$[W / m^3]$	q_g : معدل توليد الحرارة الداخلي في المادة
$[m^2 / s]$	α : معامل الانتشار الحراري
$[kg / m^3]$	ρ : الكثافة
$[J / (kg \cdot K)]$	c : السعة الحرارية النوعية
$[m]$	x, y, z : الإحداثيات الفراغية (الموضع في الاتجاهات الثلاثة)
	i, j, k : هي متجهات الوحدة في اتجاهات الإحداثيات الثلاثة
$[K]$	θ : الفرق بين درجة الحرارة T ودرجة الحرارة المرجعية T_0
$[m]$	r : نصف القطر
$[rad]$	θ : الزاوية القطبية
$[rad]$	φ : الزاوية الأسكرونية
$[W / (m^2 \cdot K)]$	h : معامل الحمل الحراري
$[m^2]$	A : المساحة المتعامدة على اتجاه انتقال الحرارة
$[m]$	L : سمك الجدار
$[K]$	ΔT : الفرق في درجة الحرارة عبر الجدار
$[m]$	Δx : سمك الجدار
$[K / W]$	R : مقاومة الانتقال الحراري

قائمة الرموز

$[W / (m^2 \cdot K^4)]$	$\sigma = 5.670 \times 10^{-8}$: ثابت ستيفان-بولتزمان
	ε : الانبعاثية
	α : الامتصاصية
$[m^2]$	A_c : مساحة السطح المعرض للانتقال الحراري
$[m]$	P : المحيط أو المحيط الحراري للجسم
$[m^3/s]$	Q : معدل التدفق الحجمي للمائع.
$[m/s]$	v : سرعة تدفق المائع
	Re : رقم رينولدز
$[m/s]$	u : سرعة المائع
$[m]$	d : قطر الأنبوب أو الطول المميز
$[Pa \cdot s]$	μ : لزوجة المائع الديناميكية
$[J]$	$k(t)$: الطاقة الحركية اللحظية
$[J]$	\bar{K} : الطاقة الحركية المتوسطة
$[J]$	k' : الطاقة الحركية الاضطرابية
$[m/s]$	v_t : السرعة المتوسطة
$[m/s]$	\vec{V} : متجه السرعة
$[m/s^2]$	\vec{f} : متجه القوة المؤثرة لكل وحدة كتلة
$[W / m^3]$	Φ : الطاقة الناتجة عن اللزوجة
$[J/kg]$	E : الطاقة الداخلية لكل وحدة كتلة
$[J/(kg \cdot K)]$	C_v : السعة الحرارية عند حجم ثابت
$[J/(kg \cdot K)]$	C_p : السعة الحرارية عند ضغط ثابت
$[J]$	H : الأنتالبي أو الطاقة المحتملة
$[Pa]$	p : الضغط
	r : ثابت الغاز النوعي
	$[J/(kg \cdot K)]$
$[m^2/s]$	Γ : المعامل الانتشاري

قائمة الرموز

ϕ : الكمية الفيزيائية المعنية (مثل درجة الحرارة أو تركيز المادة)

S_ϕ : مصارف الكمية الفيزيائية ϕ

δ : دالة كرونكر دلتا

λ : الموصلية الحرارية

x تمثل سعة اهتزاز النقطة

M : الكتلة

C : معامل التخميد

K : ثابت النابض

F : القوى الخارجية المطبقة

$[W / (m \cdot K)]$

$[m]$

$[kg]$

$[N \cdot s / m]$

$[N / m]$

$[N]$

ملخص

تشهد السنوات الأخيرة اهتماما متزايدا باستعمال غاز البترول المسال (LPG) كبديل عن الوقود التقليدي في المركبات، نظرا لمميزاته العديدة مثل انخفاض التكلفة، قلة الانبعاثات، والتوفر الكبير، وفي هذا الإطار، جاءت هذه المنكرة لتقترح فكرة جديدة تتمثل في استغلال غاز البترول المسال لتحسين أداء نظام التبريد في السيارات، وذلك عبر تصميم ودراسة مبادل حراري يعمل على تحويل الحرارة بين الغاز و سائل التبريد، مما يرفع من فعالية النظام الحراري داخل المركبة.

إنطلقت الدراسة بجزء نظري شامل يغطي المبادلات الحرارية، تلاه تحليل رياضي يعتمد على مبادئ ديناميكا الموائع والانتقال الحراري. تم تصميم النموذج الهندسي للمبادل الحراري باستخدام برنامج SolidWorks، ثم أجريت محاكاة عددية باستخدام برنامج ANSYS Fluent لدراسة تدفق الموائع وخصائص التبادل الحراري (CFD). بعد ذلك، تمت محاكاة التفاعل بين السائل والصلب (FSI) عبر ربط Fluent مع Static Structural لتحليل تأثير الحمل الحراري على بنية المبادل.

أظهرت النتائج أن الأداء الحراري للمبادل كان جيدا، حيث كانت التشوهات والإجهادات الحرارية ضعيفة ولا تتجاوز الحدود المسموح بها، مما يدل على صلاحية التصميم وفعاليتيه. وبذلك، توصلنا إلى أن دمج LPG ضمن نظام التبريد يمثل فكرة واعدة تستحق مزيدا من البحث والتطوير.

Abstract

In recent years, there has been growing interest in the use of Liquefied Petroleum Gas (LPG) as an alternative to conventional fuels in vehicles due to its numerous advantages, such as lower cost, reduced emissions, and widespread availability. Within this context, this work proposes an innovative idea: utilizing LPG to enhance the efficiency of the vehicle's cooling system by designing and analyzing a heat exchanger that transfers heat from the gas to the cooling fluid, thereby improving the thermal management of the vehicle.

The study begins with a comprehensive theoretical review covering heat exchangers and the thermophysical properties of LPG, followed by a mathematical analysis based on the principles of fluid dynamics and heat transfer. The heat exchanger model was designed using SolidWorks, and a Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation was carried out using ANSYS Fluent to evaluate the behavior of fluid flow and heat exchange. Subsequently, Fluid-Structure Interaction (FSI) analysis was performed by coupling Fluent with Static Structural to assess the thermal stress and deformation on the exchanger's structure.

The results showed that the thermal performance of the proposed exchanger was satisfactory, with minimal deformations and stresses that remained well within safe limits. These findings confirm that the proposed system design is robust and effective. Therefore, integrating LPG into the vehicle's cooling system represents a promising concept that merits further research and development

Résumé

Ces dernières années, on observe un intérêt croissant pour l'utilisation du gaz de pétrole liquéfié (GPL) comme alternative aux carburants traditionnels dans les véhicules, en raison de ses nombreux avantages tels que son faible coût, ses émissions réduites et sa grande disponibilité. Dans ce contexte, ce mémoire propose une idée novatrice consistant à exploiter le GPL pour améliorer les performances du système de refroidissement des voitures, en concevant et étudiant un échangeur de chaleur permettant le transfert thermique entre le gaz et le liquide de refroidissement, ce qui augmente l'efficacité du système thermique du véhicule.

L'étude a commencé par une partie théorique exhaustive couvrant les échangeurs de chaleur, suivie d'une analyse mathématique basée sur les principes de la dynamique des fluides et du transfert thermique. Le modèle géométrique de l'échangeur a été conçu à l'aide du logiciel SolidWorks, puis une simulation numérique a été réalisée avec ANSYS Fluent pour étudier l'écoulement des fluides et les caractéristiques des échanges thermiques (CFD). Ensuite, l'interaction fluide-structure (FSI) a été simulée en couplant Fluent avec Static Structural pour analyser l'impact de la charge thermique sur la structure de l'échangeur.

Les résultats ont montré que les performances thermiques de l'échangeur étaient satisfaisantes, avec des déformations et des contraintes thermiques faibles ne dépassant pas les limites autorisées, démontrant ainsi la robustesse et l'efficacité de la conception. Nous en concluons que l'intégration du GPL dans le système de refroidissement représente une idée prometteuse qui mérite des recherches et développements supplémentaires

مقدمة عامة

في ظل التوجه العالمي المتزايد نحو الطاقات البديلة والحد من الانبعاثات الغازية، أصبح من الضروري البحث عن حلول فعالة ومستدامة لتحسين كفاءة أنظمة المركبات وتقليل استهلاك الوقود التقليدي. ومن بين الخيارات الواعدة التي حظيت باهتمام واسع في السنوات الأخيرة، يبرز غاز البترول المسال (LPG) كبديل اقتصادي ونظيف مقارنة بالوقود التقليدي مثل البنزين والديزل، وذلك بفضل خصائصه الفيزيائية والكيميائية التي تمنحه كفاءة احتراق جيدة وانبعاثات ملوثة أقل.

انطلاقاً من هذا الاهتمام المتزايد، جاءت فكرتنا في هذه المنكرة كمساهمة جديدة تهدف إلى دراسة إمكانية استغلال غاز البترول المسال ليس فقط كمصدر طاقة بديل، وإنما كعنصر فعال لتحسين كفاءة نظام التبريد في السيارات، من خلال تطوير وتصميم مبادل حراري يعمل بالاعتماد على الخواص الديناميكية والحرارية لهذا الغاز، ويشغل مكان الرادياتور التقليدي في منظومة التبريد.

تم بناء هذه الدراسة بشكل متكامل يغطي الجوانب النظرية والهندسية والتقنية، وقد تم تقسيم العمل إلى خمسة فصول رئيسية، الفصل الأول تناولنا فيه دراسة بيبلوغرافية شاملة، تطرقنا من خلالها إلى المبادئ الأساسية لأنظمة التبريد في السيارات، أنواع المبادلات الحرارية. الفصل الثاني خصص للدراسة الرياضية المتعلقة بالديناميكا الحرارية والديناميكا الحسابية للموائع (CFD)، حيث قمنا بوضع الأسس النظرية والنماذج الفيزيائية التي تركز عليها محاكاة تدفق الموائع وانتقال الحرارة. الفصل الثالث تم خلاله تصميم النموذج الهندسي للمبادل الحراري باستخدام برنامج SolidWorks، بما يتوافق مع خصائص النظام المقترح وقيود التركيب داخل المركبة، ليكون بديلاً وظيفياً للرادياتور التقليدي، أما الفصل الرابع خصص لمحاكاة تدفق الموائع وانتقال الحرارة داخل المبادل باستخدام برنامج ANSYS Fluent، وذلك وفق منهجية CFD بهدف دراسة سلوك الغاز والماء داخل النظام وتقييم فعالية التصميم، الفصل الخامس والأخير تم فيه إجراء محاكاة التفاعل بين السائل والصلب (FSI) لمعرفة تأثير الأحمال الحرارية على بنية المبادل وتقييم مدى مقاومته للتشوهات والإجهادات الناتجة عن التشغيل.

تهدف هذه الدراسة إلى تقديم نموذج أولي قابل للتطوير مستقبلاً من أجل دمجه في أنظمة السيارات العاملة بغاز البترول المسال LPG، وبالتالي تحسين الكفاءة الطاقوية وتقليل الأثر البيئي. كما نطمح من خلال هذا العمل إلى فتح آفاق جديدة في مجال استخدام الغاز في تطبيقات ميكانيكية متقدمة، وتعزيز ثقافة الابتكار في مشاريع التخرج الهندسية.

الفصل الأول:

دراسة ببليوغرافية

Bibliographic Study

1.1 مقدمة :

المبادلات الحرارية هي أجهزة مصممة لنقل الطاقة الحرارية (enthalpy) بين وسيطين أو أكثر، سواء كانت سوائل أو بين مواد صلبة وسوائل، عند درجات حرارة مختلفة مع وجود اتصال حراري. عادة ما تعمل المبادلات الحرارية دون تدخل خارجي مثل إضافة أو فقدان حرارة أو عمل.

تستخدم المبادلات الحرارية في العديد من التطبيقات الهندسية، مثل تسخين أو تبريد السوائل، أو تبخيرها وتكثيفها سواء كانت أحادية المكونات أو متعددة المكونات. كما تستخدم في استرداد الحرارة المهدرة أو التخلص منها، وأيضاً في عمليات التعقيم (sterilization)، والبسترة (pasteurization)، والتقطير (distillation)، والتركيز (concentration)، والتبلور (crystallization)، والتحكم في خواص السوائل أثناء العمليات الصناعية.

من الناحية العلمية، تعتبر المبادلات الحرارية تجسيدا عمليا لمبادئ الديناميكا الحرارية وميكانيكا الموائع. فهي تمثل تطبيقاً هندسياً للمفاهيم الأساسية مثل انتقال الحرارة بالحمل (Convection) والتوصيل (Conduction) والإشعاع (Radiation)، كما أن تصميمها يعتمد بشكل كبير على معرفة دقيقة بالخصائص الفيزيائية للمواد والسوائل، فضلاً عن العوامل المؤثرة في الأداء مثل توزيع التدفق، مقاومة الحرارة، وفقدان الضغط.

2.1 لمحة تاريخية عن المبادلات الحرارية:

منذ زمن الرومان القدماء، الذين استخدموا أجهزة تبريد فخارية بسيطة، تطورت تقنية المبادلات الحرارية بشكل كبير. لقد قطعت هذه التقنية شوطاً طويلاً منذ تلك الأيام البسيطة، ووصلت إلى مستويات متقدمة من الكفاءة والتعقيد، ومع تطور المعادن في القرنين الثامن عشر والتاسع عشر، تحسنت كفاءة المبادلات الحرارية بشكل ملحوظ، وظهرت غلايات أنبوبية تستخدم في محركات البخار لتكون نواة لتكنولوجيا المبادلات الحرارية الحديثة.

شهدت تكنولوجيا المبادلات الحرارية خلال القرن العشرين تطورات متسارعة، حيث انتقلت من تصاميم بسيطة إلى أنظمة أكثر تعقيداً وكفاءة. ففي أوائل القرن 20، أحدث المبادل الحراري نو الأصداف والأنابيب نقلة نوعية في مجال تبادل الحرارة، تبعه في منتصف القرن ظهور المبادلات الحرارية ذات الألواح والتي تتميز بمساحة سطح أكبر وناقلية أعلى للحرارة ومقاومة ضغط أكبر. هذه التطورات ساهمت في تحسين كفاءة الطاقة وتقليل التكاليف التشغيلية في العديد من الصناعات.

كان في فترة العشرينيات والثلاثينيات من القرن العشرين منافسة شرسة بين الشركات الرائدة في مجال تبادل الحرارة لتطوير تصاميم جديدة ومبتكرة. ففي عام 1923، سجلت شركة APV البريطانية براءة اختراع لمبادل حراري نو ألواح، وهو

ما اعتبره الكثيرون بداية عصر جديد في تكنولوجيا المبادلات الحرارية. ولكن سرعان ما لحقتها شركة ألفا لافال السويدية التي سجلت براءة اختراع مشابهة في عام 1932. هذا التنافس الشديد أدى إلى تسريع وتيرة التطوير، ووضع الأسس لمبادلات الحرارة ذات الألواح التي نعرفها اليوم.

حيث طرأ على صناعة المبادلات الحرارية تحولاً كبيراً بفضل التقدم في مجال المواد وعمليات التصنيع. ففي الماضي، كانت المواد التقليدية مثل النحاس والبرونز هي الخيار الأساسي لصناعة المبادلات الحرارية. ومع ذلك، فإن التطورات التكنولوجية أدت إلى ظهور مواد جديدة ذات خصائص أفضل، مثل الفولاذ المقاوم للصدأ الذي يتميز بمقاومته للتآكل والحرارة، والتيتانيوم الذي يتميز بوزنه الخفيف وقوته العالية. بالإضافة إلى ذلك، ساهمت تقنيات التصنيع الحديثة، مثل اللحام بالليزر والتصنيع الإضافي، في إنتاج مبادلات حرارية ذات أشكال هندسية معقدة ومخصصة لتلبية احتياجات تطبيقات محددة. [1]. [2]

3.1 تصنيفات المبادلات الحرارية :

تصنيف المبادلات الحرارية يعدّ خطوة أساسية لفهم آلية تصميمها وطريقة عملها، مما يساهم في اختيار النوع الأمثل لتلبية احتياجات كل تطبيق على حدة. يعتمد هذا التصنيف على مجموعة من المعايير المتنوعة، تشمل:

1.3.1 التصنيف وفقاً لعمليات انتقال الحرارة :

تصنف المبادلات الحرارية وفقاً لعمليات انتقال الحرارة إلى نوعين: نوع الاتصال غير المباشر ونوع الاتصال المباشر.

1.1.3.1 المبادلات الحرارية ذات الاتصال غير المباشر (Indirect-Contact Heat)

(Exchangers):

في المبادلات الحرارية ذات الاتصال غير المباشر، تبقى تيارات السوائل مفصولة عن بعضها، ويتم نقل الحرارة من سائل إلى آخر عبر جدار فاصل غير قابل للاختراق أو عبر جدار يدخل إليه ويخرج منه بشكل متغير. في هذا النوع من المبادلات لا يحدث تلامس مباشر بين السوائل المتفاعلة حرارياً. يعرف هذا النوع من المبادلات باسم مبادل الحرارة السطحي، ويمكن تصنيفه إلى أنواع فرعية مثل: النوع ذو النقل المباشر، النوع التخزيني. [3]

أ- المبادلات من النوع ذو النقل المباشر (Direct-Transfer Type Exchangers) :

في هذا النوع من المبادلات، يتم انتقال الحرارة بشكل مستمر من السائل الساخن إلى السائل البارد عبر جدار فاصل. على الرغم من أن المبادل يتطلب تدفقاً متزامناً لاثنتين (أو أكثر) من السوائل، إلا أنه لا يحدث

اختلاط مباشر بينهما، حيث يتدفق كل سائل عبر ممرات سوائل منفصلة. بشكل عام، لا تحتوي معظم هذه المبادلات على أجزاء متحركة. يطلق على هذا النوع من المبادلات اسم "مبادل الحرارة الاسترجاعي" أو ببساطة "المسترجع. (Recuperator) "

من الأمثلة الشائعة على المبادلات ذات النوع ذو النقل المباشر هي المبادلات الأنبوبية (Tubular Heat Exchangers)، والمبادلات اللوحية (Plate Heat Exchangers)، والمبادلات ذات الأسطح الممتدة (Extended Surface Heat Exchangers). [3].

ب- مبادلات الحرارة التخزينية (Storage Type Exchangers) :

يتم تخزين الطاقة الحرارية في هذه المبادلات بشكل مؤقت في المادة الصلبة المكونة للمسار، يعرف عادة باسم "وسط التعبئة الصلب" (Packed Bed). على عكس المبادلات الحرارية التقليدية ذات التدفق المستمر، يتدفق السوائل الساخنة والباردة بالتناوب عبر نفس الممرات في وسط التعبئة.

عندما يتدفق سائل ساخن عبر وسط التعبئة الباردة، يتم امتصاص الحرارة بواسطة وسط التعبئة، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارته وتبريد السائل الساخن. وعندما يتدفق سائل بارد عبر وسط التعبئة الساخن، يتم نقل الحرارة المخزنة في وسط التعبئة إلى السائل البارد، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة حرارته وتبريد وسط التعبئة. هذه العملية المتكررة لتخزين وإطلاق الحرارة تسمح بنقل الحرارة بشكل فعال بين السائلين.

تعرف الفترة الزمنية التي يتدفق فيها السائل الساخن عبر وسط التعبئة بـ "الفترة الساخنة"، بينما تعرف الفترة الزمنية التي يتدفق فيها السائل البارد بـ "الفترة الباردة". من الضروري تبديل اتجاه تدفق السوائل بشكل دوري لضمان استمرار عملية نقل الحرارة.

تواجه مبادلات الحرارة التخزينية بعض التحديات، مثل تسرب جزء صغير من السائل المحبوس في الممرات إلى مجرى السائل الآخر، وهي ظاهرة تعرف باسم "تسرب الحمل". كما قد يحدث تسرب ضغط بين السائلين إذا كانا عند ضغوط مختلفة.

نظرا لهذه الخصائص، تستخدم مبادلات الحرارة التخزينية بشكل رئيسي في تطبيقات نقل الحرارة والكتلة بين الغازات، حيث تكون انتقالات الحرارة الملموسة هي الغالبة. كما يمكن استخدامها في بعض التطبيقات لنقل الرطوبة. [3]

2.1.3.1 المبادلات الحرارية ذات الاتصال المباشر (Direct-Contact Heat Exchangers) :

في المبادلات الحرارية ذات الاتصال المباشر (Direct-Contact Heat Exchangers) ، يتلامس تياران من السوائل بشكل مباشر، ويتبادلان الحرارة، ثم يتم فصلهما. تستخدم هذه المبادلات بشكل شائع في التطبيقات التي تتضمن انتقال الكتلة (Mass Transfer) بالإضافة إلى انتقال الحرارة (Heat Transfer) ، مثل التبريد التبخيري (Evaporative Cooling) والتقطير الجزئي (Rectification).

مقارنة بالمبادلات الحرارية غير المباشرة (Indirect-Contact Recuperators) ، تتميز المبادلات الحرارية ذات الاتصال المباشر بما يلي:

- تحقيق معدلات عالية جدا لانتقال الحرارة.
- تكلفة الإنشاء منخفضة نسبيا.
- عدم وجود مشكلة التراكم (Fouling) ، بسبب غياب سطح التبادل الحراري (الجدار) بين السائلين.

ومع ذلك، فإن التطبيقات تقتصر على الحالات التي يُسمح فيها بالتلامس المباشر بين السوائل . [3]

أ- مبادلات السوائل غير القابلة للامتزاج (Immiscible Fluid Exchangers) :

في هذا النوع، يتم تلامس تيارين من السوائل غير القابلة للامتزاج بشكل مباشر. قد تكون هذه السوائل في حالة طور واحد (Single-Phase Fluids) أو قد تتضمن التكثيف (Condensation) أو التبخر (Vaporization).

تشمل الأمثلة النموذجية لهذا النوع من المبادلات تكثيف أبخرة الزيوت (Oil Vapors) و الأبخرة العضوية (Condensation of Organic Vapors) باستخدام الماء أو الهواء. [3]

ب- مبادلات الغاز-السائل (Gas-Liquid Exchangers) :

في هذا النوع من المبادلات، يكون أحد الموائع عبارة عن غاز (غالبا الهواء) والآخر سائلا منخفض الضغط (غالبا الماء)، ويمكن فصلهما بسهولة بعد عملية تبادل الطاقة.

في التطبيقات مثل تبريد السائل (Cooling of Liquid) أو ترطيب الغاز (Humidification of Gas)، يتبخر جزء من السائل (الماء) ويحمله الغاز (الهواء) بعيداً. في هذه المبادلات، يتم أكثر من 90% من انتقال الطاقة من خلال انتقال الكتلة (Mass Transfer) بسبب تبخر السائل، بينما يكون انتقال الحرارة بالحمل (Convective Heat Transfer) آلية ثانوية. [3]

ج- مبادلات السائل-البخار (Liquid-Vapor Exchangers) :

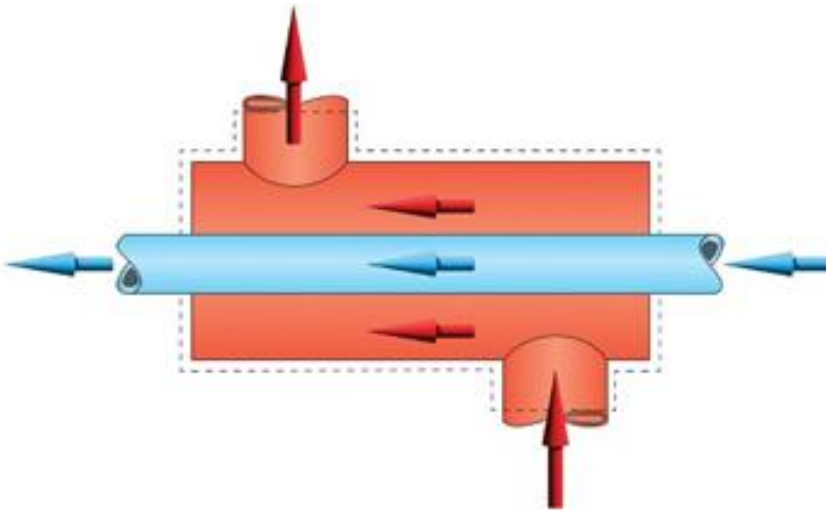
في هذا النوع من المبادلات، يتم عادة تكثيف البخار جزئياً أو كلياً باستخدام الماء البارد، أو تسخين الماء باستخدام البخار الفائض من خلال التلامس المباشر في المبادل. [3]

2.3.1 التصنيف حسب اتجاه تدفق السوائل:

اتجاه تدفق السوائل الساخنة والباردة داخل المبادل يمكن أن يكون له ثلاثة ترتيبات:

1.2.3.1 - التدفق المتوازي (Parallel flow) :

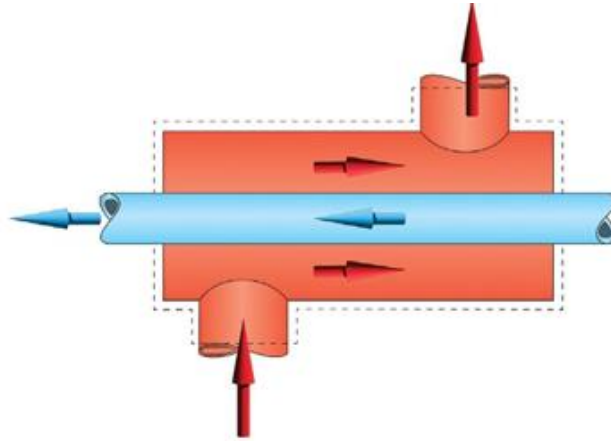
في التدفق المتوازي (الشكل 1.1)، يتدفق السائلان معاً في نفس الاتجاه، حيث يدخل السائل الساخن والسائل البارد من نفس الجهة. وبالتالي، يبدأ السائل البارد في التفاعل مع السائل الساخن عند المدخل، وتتناقص الفروق في درجات الحرارة بينهما تدريجياً حتى تتساوى في النهاية مع مرور السائلين عبر المبادل. [4]



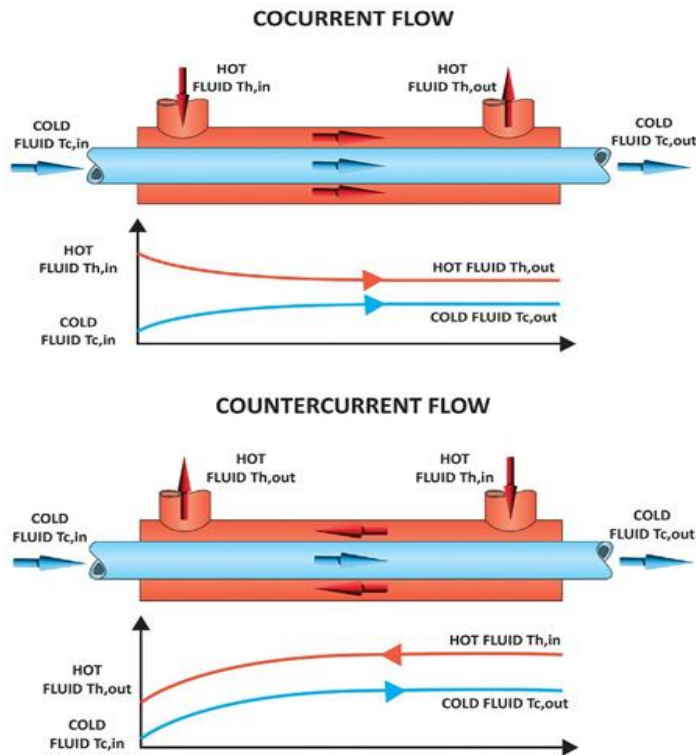
الشكل 1.1: الجريان المتوازي (متجهان في نفس الاتجاه) [4].

2.2.3.1 - التدفق المعاكس (Counterflow) :

في التدفق المعاكس (الشكل 2.1)، يتدفق السائلان في اتجاه مواز لبعضهما البعض، لكنهما يدخلان المبادل من جهتين متقابلتين. نتيجة لذلك، يظل فرق درجة الحرارة بين السائلين ثابتا إلى حد كبير على طول المبادل (الشكل 3.1). [4]



الشكل 2.1: الجريان المعاكس (تياران في اتجاهين متعاكسين). [4]



الشكل 3.1: مقارنة بين الجريان المتوازي والجريان المعاكس. [4]

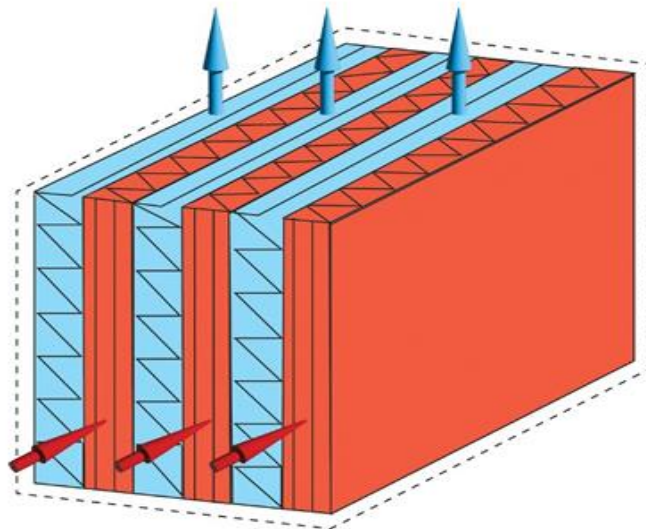
من الناحية الديناميكية الحرارية، يعتبر ترتيب التدفق المعاكس هو الأفضل لنقل الحرارة (شكل 3.1)، حيث يتم نقل أكبر كمية من الحرارة مقارنة بترتيب التدفق الموازي الذي ينقل أقل كمية. كما أن فرق درجة الحرارة الأقصى في التدفق المعاكس أقل من التدفق الموازي، مما يقلل من خطر حدوث صدمات حرارية (التقلبات المفاجئة في درجة الحرارة) في المبادل. لذلك، من الأفضل استخدام نمط التدفق المعاكس في المبدلات الحرارية كلما كان ذلك ممكناً. مع ذلك، في حال كان من الضروري الحفاظ على درجة حرارة الجدار الفاصل ضمن حد معين، يجب النظر في استخدام التدفق الموازي، حيث أن درجة حرارة الجدار تكون أكثر انتظاماً في هذا النمط. [4]

3.2.3.1 - التدفق العرضي (Cross-flow) :

المبادل الحراري ذو التدفق المتقاطع (الشكل 4.1) هو جهاز متخصص يتقاطع فيه مساران للسوائل بزوايا، عادة بشكل عمودي، مما يسهل عملية نقل الحرارة دون تلامس مباشر بين السوائل. يستخدم هذا النوع من المبادلات الحرارية بشكل شائع في التطبيقات التي تتطلب كفاءة عالية مع توفير في المساحة.

في تصميمات التدفق المتقاطع، يتدفق أحد السوائل داخل الأنابيب بينما يتدفق السائل الآخر خارج الأنابيب وبشكل عمودي على اتجاه الأنابيب، مما يعزز الكفاءة الحرارية. تتيح هذه التكوينات تبادلاً فعالاً للحرارة بين السوائل ذات درجات الحرارة المرتفعة والمنخفضة، مما يجعلها مكوناً أساسياً في أنظمة التدفئة والتهوية وتكييف الهواء (HVAC)، وتوليد الطاقة، والعمليات الصناعية.

يساهم التصميم الفريد لهذا النوع من المبادلات في تقليل المقاومة الحرارية وتحسين معدلات نقل الحرارة، مما يجعله الخيار المفضل للأنظمة التي تتطلب الكفاءة والدمج في مساحة محدودة. [5]



الشكل 4.1: الجريان المتقاطع. [4]

3.3.1 - التصنيف وفقا للخصائص البنيوية (CLASSIFICATION ACCORDING TO)

: (CONSTRUCTION FEATURES)

يتم تصنيف المبادلات الحرارية عادة وفقا لخصائصها البنيوية (construction features) وتشمل الأنواع الأساسية للتصميم ما يلي:

- مبادلات الحرارة من النوع الأنبوبي (tubular heat exchangers).
- مبادلات الحرارة من النوع الصفحي (plate heat exchangers).
- مبادلات الحرارة ذات الأسطح الممتدة (extended surface heat exchangers).

1.3.3.1 - مبادلات الحرارة من النوع الأنبوبي (tubular heat exchangers) :

تعتمد مبادلات الحرارة الأنبوبية على نظام من الأنابيب الدائرية لتبادل الحرارة بين سائلين. يمكن تخصيص تصميم هذه المبادلات بشكل كبير من خلال تعديل عوامل مثل قطر وعدد وطول الأنابيب، فضلا عن ترتيبها. وتشمل الأنواع الشائعة من هذه المبادلات:

- مبادلات الحرارة ذات الأنبوب المزدوج (Double-pipe heat exchangers).
- مبادلات الحرارة ذات القشرة والأنبوب (Shell-and-tube heat exchangers).
- مبادلات الحرارة ذات الأنابيب الحلزونية (Spiral-tube-type heat exchangers) [3].

أ- مبادلات الحرارة ذات الأنبوب المزدوج (Double-pipe heat exchangers) :

مبادلات الحرارة ذات الأنبوب المزدوج (الشكل 5.1 و 6.1) هي تصميم كلاسيكي يتكون من أنبوب داخلي يمر بداخل أنبوب خارجي أكبر. يتم توجيه تدفق السوائل خلال هذه الأنابيب باستخدام وصلات خاصة. **المميزات والتطبيقات:**

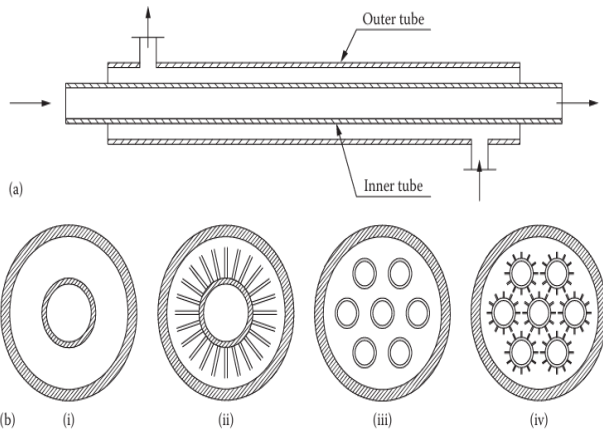
- مرونة في التصميم : يمكن ربط عدة وحدات من هذا النوع بشكل متسلسل أو متوازي لتلبية متطلبات نقل الحرارة المختلفة، مما يجعلها مناسبة لمجموعة واسعة من التطبيقات.
- فعالية في التسخين والتبريد : تستخدم بشكل شائع في عمليات التسخين أو التبريد للسوائل، خاصة عندما تكون مساحة سطح التبادل الحرارية المطلوبة محدودة.
- قدرة على التعامل مع الضغوط المرتفعة: تتميز بقدرتها على التعامل مع سوائل ذات ضغوط عالية، مما يجعلها مناسبة للعديد من التطبيقات الصناعية.

العيوب:

- حجم كبير نسبيا : مقارنة ببعض أنواع المبادلات الأخرى، فإن حجم مبادلات الأنبوب المزدوج يكون كبيرا نسبيا بالنسبة لكمية الحرارة التي تنقلها.
- تكلفة إنتاج عالية : تكلفة تصنيع هذه المبادلات تكون مرتفعة نسبيا لكل وحدة مساحة من سطح التبادل الحراري.

التحسينات والتعديلات:

- أنابيب داخلية متعددة : يمكن استخدام أنبوب داخلي واحد أو عدة أنابيب لزيادة مساحة سطح التبادل الحراري.
 - زيادة معامل انتقال الحرارة: يمكن إضافة زعانف محورية إلى الأنبوب الداخلي لزيادة معامل انتقال الحرارة، خاصة في المنطقة الحلقية بين الأنبوبين.
 - تصميم وحدوي : يتم تصنيع هذه المبادلات على شكل وحدات منفصلة يمكن ربطها بسهولة لتشكيل مبادل أكبر، مما يسهل عملية التركيب والصيانة.
- باختصار، مبادلات الحرارة ذات الأنبوب المزدوج هي تصميم بسيط وفعال، ولكنها قد تكون غير عملية في بعض التطبيقات التي تتطلب مساحة سطح تبادل حرارة كبيرة أو تكلفة إنتاج منخفضة. [3]



الشكل 1.5: مبادل حراري من نوع الأنبوب المزدوج. [6]

الشكل 6.1: مبادل حراري من نوع الأنبوب المزدوج. [6]

ب- مبادلات الحرارة ذات أنبوب وغطاء (Shell-and-tube heat exchangers) :

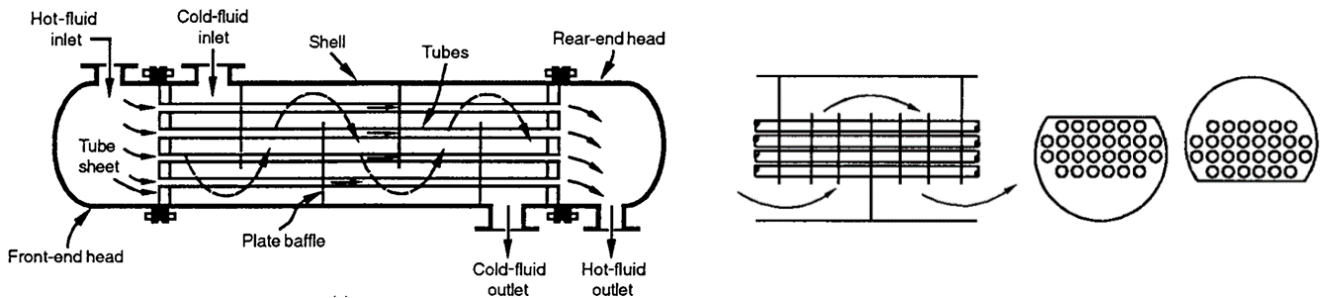
مبادلات الحرارة ذات الأنبوب والغطاء (Shell-and-tube heat exchangers) (الشكل 7.1) هي تصميم أساسي يتكون من مجموعة من الأنابيب الدائرية مثبتة داخل غلاف أسطواني. تستخدم هذه الأنواع من المبادلات على نطاق واسع في العديد من الصناعات، بما في ذلك توليد الطاقة، المعالجة الكيميائية. يسري سائل واحد داخل الأنابيب، بينما يتدفق سائل آخر في الفراغ بين الأنابيب والغلاف.

أشكال وأنواع:

تتعدد أشكال وتصاميم مبادلات الحرارة ذات الأنبوب والغطاء لتلبية احتياجات تطبيقات مختلفة يمكنها التمدد أو الانكماش بسبب التغيرات في درجات الحرارة. هذا يسمح بمواجهة التغيرات في الحجم الناتج عن التمدد الحراري، يمكن أن تكون الأنابيب ثابتة أو متحركة.

➤ حزم أنابيب ثابتة: يتم لحام الأنابيب مباشرة بالغلاف، مما يجعل عملية التنظيف صعبة. تكون الأنابيب ثابتة في مكانها بواسطة حواجز الأنابيب (Tube Baffles) التي تعد المكونات الرئيسية في تثبيت الأنابيب. هذا التصميم أقل تكلفة ولكنه يحد من التمدد الحراري.

➤ حزم أنابيب متحركة: تسمح هذه الحزم ببعض الحركة للأنابيب، مما يقلل من التأثيرات الناتجة عن التمدد الحراري. ومع ذلك، قد تكون أكثر تعقيداً وتكلفة. يتم استخدام جهاز تمدد حراري مثل البوالس التمددية (Expansion Bellows) لتوفير هذه الحركة. هذه الأجهزة تسمح للأنابيب بالتحرك بشكل مرن دون التأثير على الهيكل الأساسي للمبادل. [3]



الشكل 7.1: مبادل حراري من نوع غطاء وأنابيب. [3]

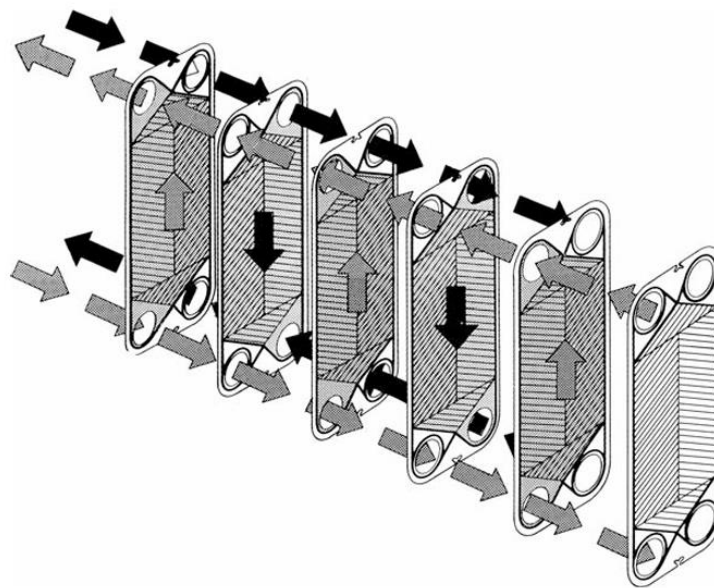
2.3.3.1 - مبادلات الحرارة من نوع الألواح (Plate Heat Exchangers) :

تعتبر مبادلات الحرارة اللوحية من أكثر أنواع المبادلات الحرارية كفاءة، تتكون من مجموعة من الألواح المعدنية الرقيقة التي تشكل قنوات متوازية لتدفق السوائل، يتم فصل هذه القنوات بواسطة حشوات أو لحام، مما يمنع اختلاط السوائل. وتستخدم هذه المبادلات في العديد من التطبيقات الصناعية حيث تكون مساحة السطح الكبيرة ومعامل انتقال الحرارة العالي أمرا ضروريا.

أ- مبادل الحرارة من نوع الألواح المُحكمة (Gasketed Plate Heat Exchanger) :

مبادل الحرارة اللوحي المحكم هو جهاز يتكون من مجموعة من الألواح الرقيقة المموجة ، والتي تفصل بين السوائل المتدفقة (الشكل 8.1). يتم ترتيب هذه الألواح بشكل يضمن تدفق السائلين في مسارات متعكسة عادة، مما يعزز كفاءة تبادل الحرارة. يتم تجميع الألواح باستخدام براغي ضغط و تُستخدم حشوات خاصة لتجميع الألواح ومنع تسرب السوائل أو اختلاطها.

تتميز هذه المبادلات بمساحة سطح كبيرة وكفاءة عالية في نقل الحرارة، ولكنها محدودة في التعامل مع الضغوط ودرجات الحرارة المرتفعة بسبب طبيعة الحشوات المستخدمة. يتم استخدام هذه المبادلات بشكل رئيسي مع سوائل ذات ضغط أقل من 25 بار ودرجة حرارة لا تتجاوز حوالي 250 درجة مئوية، تستخدم هذه المبادلات بشكل واسع في الصناعات التي تتطلب تبادل حراري فعال، مثل صناعة الأغذية، حيث سهولة تنظيفها وتعقيمها تجعلها مثالية. [7]



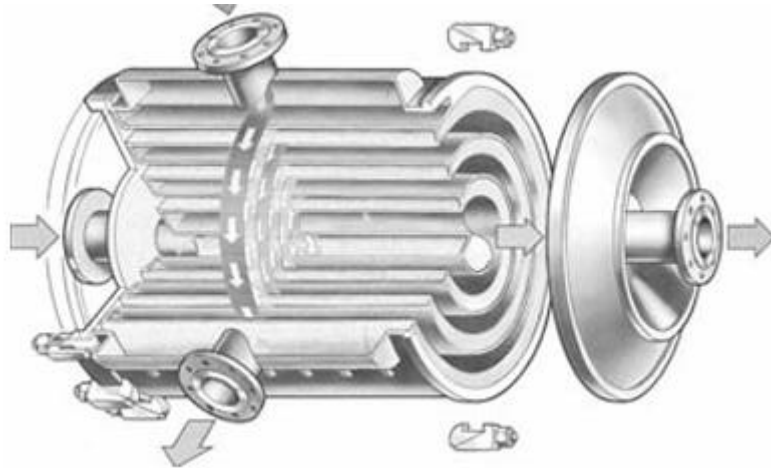
الشكل 8.1: مخطط يوضح مسارات الجريان في مبادل حراري صفيحي. [7]

ب- مبادلات الحرارة ذات الألواح الحلزونية (Spiral Plate Heat Exchangers) :

تتكون مبادلات الحرارة الحلزونية من لف لوحين معدنيين بشكل حلزوني حول أسطوانة مركزية، مما يشكل قناتين حلزونيتين متجاورتين (الشكل 9.1). يتم تثبيت المسافة بين هذين اللوحين بواسطة مسامير خاصة، مما يسمح بتعديل مساحة القنوات لتناسب مختلف معدلات التدفق. هذا التصميم يضمن تدفقا سلسا للسوائل ويزيد من كفاءة نقل الحرارة.

تتميز هذه المبادلات بحجمها الصغير وكفاءتها العالية في التعامل مع السوائل ومع ذلك، فإن تكلفة تصنيعها مرتفعة مقارنة بأنواع أخرى من المبادلات. كما أن هناك حدود لضغط ودرجة الحرارة التشغيلية لهذه المبادلات الحد الأقصى للضغط (حتى 15 بار) ودرجة الحرارة (حتى 500°C).

ببساطة، تعمل المبادلات الحلزونية على مبدأ تدفق السوائل في قنوات حلزونية متجاورة، مما يزيد من تماس السطح بين السوائل وبالتالي يزيد من كفاءة تبادل الحرارة. [7]



الشكل 9.1: مبادل حراري من نوع الألواح الحلزونية. [7]

3.3.3.1- المبادلات الحرارية ذات الأسطح الممتدة (Extended Surface Heat Exchangers):

المبادلات الحرارية ذات الأسطح الممتدة هي نوع متطور من المبادلات الحرارية مصمم لتحسين كفاءة نقل الحرارة. على عكس المبادلات الحرارية التقليدية ذات الأسطح الأولية، مثل المبادلات الحرارية الأنبوبية، فإن المبادلات الحرارية ذات الأسطح الممتدة تستخدم أسطحًا إضافية لزيادة مساحة التلامس بين السائلين، مما يؤدي إلى زيادة معدل نقل الحرارة (الشكل 10.1).

الحاجة إلى الأسطح الممتدة:

- زيادة الكفاءة: في العديد من التطبيقات، يتطلب تحقيق كفاءة عالية في نقل الحرارة استخدام مساحة سطح أكبر بكثير مما توفره الأسطح الأولية.
- تصغير الحجم: في بعض الأحيان، تكون هناك قيود على حجم المبادل الحراري، مما يتطلب استخدام تصميمات أكثر إحكامًا.
- تحسين أداء السوائل ذات معاملات نقل حرارة منخفضة: الغازات والسوائل ذات اللزوجة العالية لديها معاملات نقل حرارة منخفضة، مما يستدعي زيادة مساحة السطح لتحسين الأداء.

طريقة العمل:

- تعتمد فكرة الأسطح الممتدة على إضافة زعانف (Fins) إلى الأسطح الرئيسية للمبادل الحراري. هذه الزعانف تزيد بشكل كبير من مساحة السطح المتاحة لنقل الحرارة. أنواع الزعانف شائعة الاستخدام تشمل:
- زعانف لوحية: تستخدم بشكل شائع في المبادلات الحرارية الصفائحية.
 - زعانف أنبوبية: تستخدم في المبادلات الحرارية الأنبوبية.
 - زعانف متقطعة: مثل زعانف الشرائح أو الزعانف المخزّمة، والتي توفر زيادة في كل من المساحة ومعامل انتقال الحرارة.

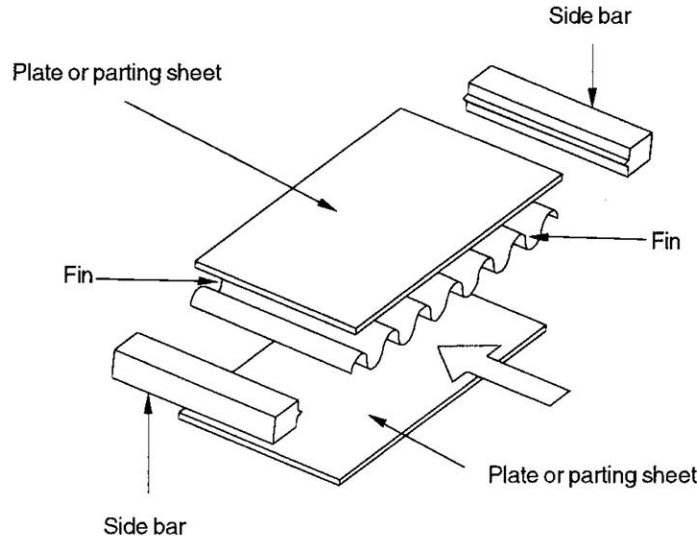
تأثير الزعانف على الأداء:

- زيادة مساحة السطح: الزعانف تزيد بشكل كبير من مساحة السطح المتاحة لنقل الحرارة، مما يؤدي إلى زيادة معدل نقل الحرارة.
- تغيير معامل انتقال الحرارة: قد يزيد أو يقل معامل انتقال الحرارة اعتمادًا على نوع الزعانف وكثافتها.

فوائد استخدام الأسطح الممتدة:

- زيادة الكفاءة: تحسين كبير في كفاءة نقل الحرارة.

- تصغير الحجم: يمكن تحقيق نفس معدل نقل الحرارة باستخدام مبادل حراري أصغر حجماً.
- خفض التكاليف: في بعض الحالات، يمكن أن يؤدي استخدام الأسطح الممتدة إلى خفض التكاليف الإجمالية للنظام. [3]



الشكل 10.1: المكونات الأساسية لمبادل حراري من نوع الألواح والزعانف. [3]

أ- المبادلات الحرارية ذات الصفائح والزعانف (Plate-Fin Heat Exchangers) : [3]

المبادلات الحرارية ذات الصفائح والزعانف هي نوع متقدم من المبادلات الحرارية يتميز بتصميمه الفريد الذي يهدف إلى زيادة مساحة سطح التبادل الحراري وبالتالي تحسين كفاءة نقل الحرارة بين السوائل.

مكونات ووظائف المبادل:

الصفائح: تعمل الصفائح على فصل تيارات السوائل المتدفقة، مما يسمح بنقل الحرارة بينهما.

الزعانف: هي أسطح رقيقة ومتداخلة يتم تثبيتها على الصفائح لزيادة مساحة السطح المتاحة لنقل الحرارة، يمكن أن تكون الزعانف ذات أشكال مختلفة مثل المثانة والمستطيلة والمتموجة (الشكل 11.1).

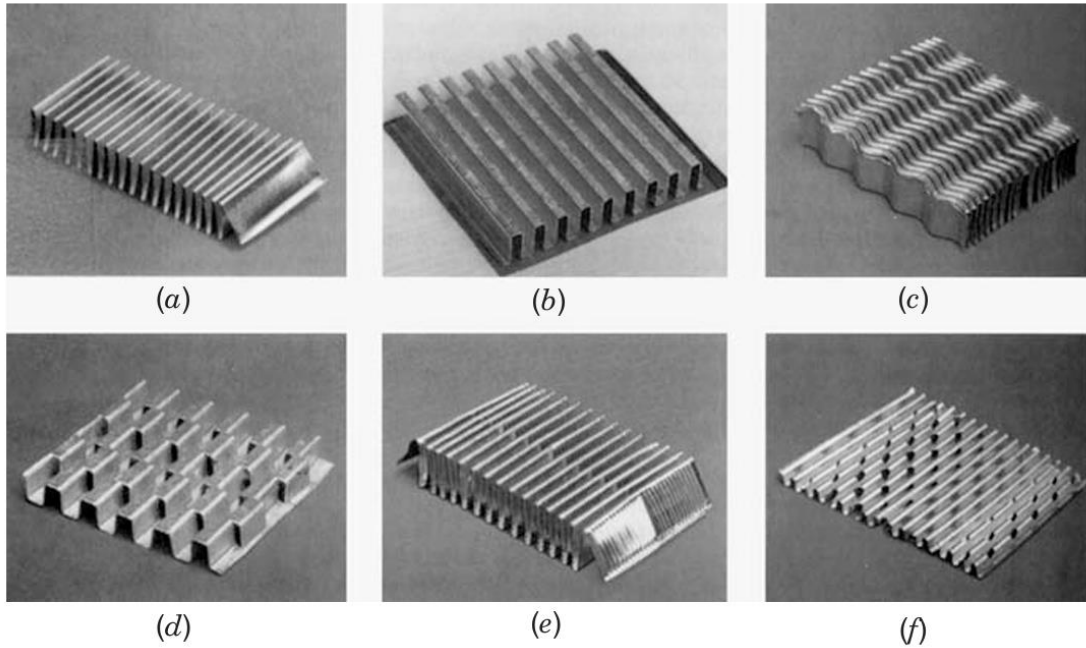
القنوات: يتم تشكيل قنوات التدفق بين الصفائح والزعانف، وتكون هذه القنوات مسؤولة عن توجيه تدفق السوائل.

أنواع الزعانف:

زعانف عادية: هي الزعانف البسيطة ذات الشكل المستطيل أو المثلث (الشكل a.11.1).

زعانف متموجة: تتميز بموجات تزيد من اضطراب السائل وتحسن نقل الحرارة (الشكل c.11.1).

زعانف متقطعة: مثل الزعانف الشريطية المتقطعة ، توفر مساحة سطح أكبر وكفاءة أعلى (الشكل f.11.1).



الشكل 11.1: أشكال الزعانف المموجة لمبادل حراري من نوع الألواح والزعانف.

(a) زعنفة مثلثة عادية (b) زعنفة مستطيلة عادية (c) زعنفة متموجة (d) زعنفة شريطية متقطعة (e) زعنفة متعددة الشفرات (f) زعنفة مثقبة.

مبدأ العمل:

تعتمد آلية عمل المبادل على نقل الحرارة بين السائلين المتدفقين في القنوات المتوازية. يتم تسخين أو تبريد السائل البارد عن طريق نقل الحرارة من السائل الساخن عبر الصفائح والزعانف.

مزايا المبادلات الحرارية ذات الصفائح والزعانف:

كفاءة عالية: توفر مساحة سطح كبيرة لنقل الحرارة، مما يؤدي إلى زيادة الكفاءة.

حجم صغير: يمكن تصميمها بأحجام صغيرة ووزن خفيف.

مرونة في التصميم: يمكن تخصيصها لتلبية مجموعة واسعة من التطبيقات.

قدرة على التعامل مع الضغوط العالية: يمكن تصميمها للعمل في ظروف ضغط عالية.

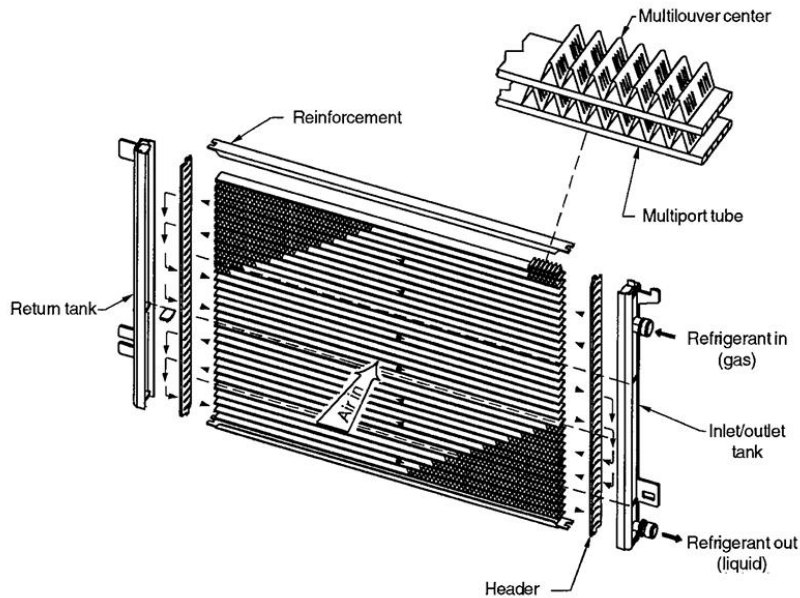
تطبيقات:

تستخدم المبادلات الحرارية ذات الصفائح والزعانف في العديد من الصناعات، بما في ذلك:

صناعة السيارات: لتبريد المحركات.

صناعة النفط والغاز: لتبادل الحرارة في عمليات التكسير والبتروكيماويات.

صناعة الطاقة: في محطات توليد الطاقة لتبريد المبخرات والتوربينات. [4]



الشكل 12.1 : أنبوب مسطح مزود بشبكة وزعانف متعددة (مشعاع السيارة).

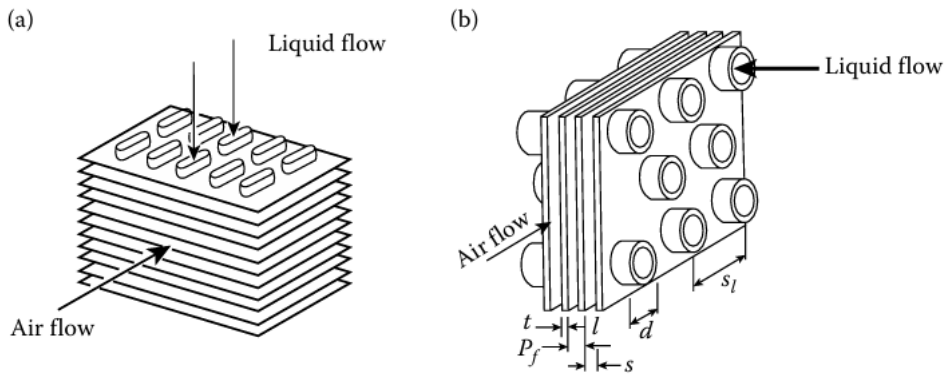
ب- مبادلات الحرارة ذات الأنابيب والزعانف (Tubular-Fin Heat Exchangers) :

تُعتبر مبادلات الحرارة ذات الأنابيب والزعانف من أكثر أنواع المبادلات الحرارية شيوعاً واستخداماً في الصناعات المختلفة. تتميز هذه المبادلات بقدرتها على تحقيق كفاءة عالية في نقل الحرارة وتنوع تطبيقاتها.

مكونات ووظائف:

المبادلات الحرارية ذات الأنابيب والزعانف مشابهة للنوع السابق في التطبيقات ومبدأ العمل ويمكن الفرق بشكل أساسي في مجموعة من الأنابيب التي يتم تثبيت زعانف عليها بدل الصفائح، هذه الزعانف تزيد بشكل كبير من مساحة السطح المتاحة لنقل الحرارة (الشكل 13.1).

- الأنابيب: تحمل السائل الذي يتم تبريده أو تسخينه، يمكن أن تكون مصنوعة من مواد مختلفة مثل النحاس والألومنيوم والفولاذ المقاوم للصدأ.
- الزعانف: تزيد من مساحة السطح المتاحة لنقل الحرارة. يمكن أن تكون الزعانف مسطحة، متموجة، أو متقطعة.
- الصفحات: تستخدم في بعض التصاميم لفصل الأنابيب عن بعضها البعض وزيادة مساحة السطح. [7]



الشكل 13.1 : مبادل حراري من نوع الأنابيب والزعانف: (a) أنبوب مسطح مع زعانف؛ (b) أنبوب دائري مع زعانف. [7]

4.3.1 - التصنيف وفقاً لآليات نقل الحرارة (Heat Transfer Mechanisms) :

يمكن تصنيف المبادلات الحرارية بناء على آليات نقل الحرارة الأساسية التي تحدث بداخلها، هذه الآليات تحدد بشكل كبير تصميم المبادل ومدى كفاءته في نقل الحرارة، ويمكن تصنيفها إلى:

1.4.3.1 - الحمل الحراري أحادي الطور على الجانبين (Single-phase convection on both sides)

(both sides) :

في هذا النوع من المبادلات، يتدفق سائلين أحادي الطور (أي لا يحدث تغير في الحالة الفيزيائية) على جانبي سطح التبادل الحراري. الأمثلة تشمل:

- سخانات الهواء: تسخن الهواء المستخدم في عمليات التجفيف أو التسخين.
- مبردات الهواء المضغوط: تبرد الهواء المضغوط قبل دخوله إلى عملية أخرى.
- مشعات السيارات: تبرد سائل التبريد للمحرك.
- المجددات الحرارية: تستخدم لاستعادة الحرارة من تيار ساخن ونقلها إلى تيار بارد.
- مبردات الزيت: تبرد الزيوت الصناعية. [7]

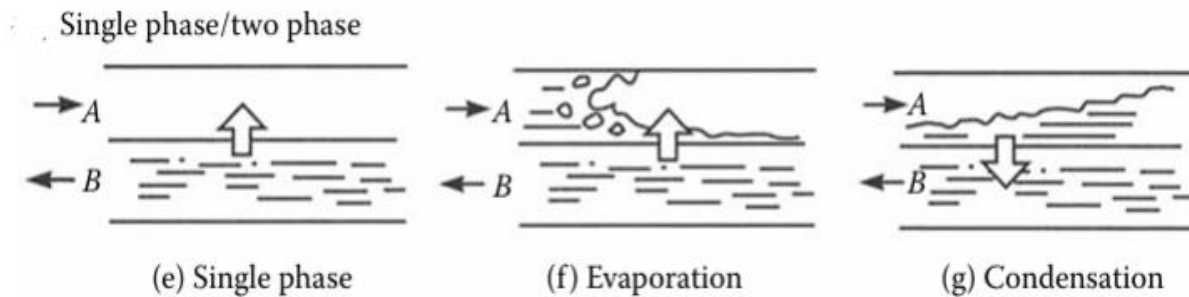
2.4.3.1 - الحمل الحراري أحادي الطور على جانب واحد، والحمل الحراري ثنائي الطور على الجانب الآخر:

في الحمل الحراري أحادي الطور على جانب واحد، والحمل الحراري ثنائي الطور على الجانب الآخر (Single-phase convection on one side, two-phase convection on the other side) ، يحدث تغير في الحالة الفيزيائية لأحد السوائل (تبخر أو تكثف) بينما يبقى السائل الآخر أحادي الطور الأمثلة تشمل:

- المكثفات: تستخدم لتكثيف البخار إلى سائل.
- الغلايات: تستخدم لتبخير الماء إلى بخار.
- مولدات البخار: تستخدم في محطات الطاقة النووية لتوليد البخار.
- المبخرات: تستخدم لتبخير السوائل في عمليات التبريد والتجفيف. [7]

3.4.3.1 - الحمل الحراري ثنائي الطور على الجانبين:

في نوع الحمل الحراري ثنائي الطور على الجانبين (Two-phase convection on both sides) ، يحدث تغير في الحالة الفيزيائية لكلا السائلين ، (الشكل-14.1-g) مثال على ذلك هو المبخرات المستخدمة في أنظمة التبريد حيث يتبخر المبرد في المبخر ويتكثف في المكثف. [7]



الشكل 14.1: آليات انتقال الحرارة.

4.1 - المشعاع (Radiator) :

المشعاع (Radiator) هو عبارة عن مبادل حراري وجزء أساسي في نظام التبريد في السيارة، حيث يقوم بتخفيض درجة حرارة سائل التبريد الذي إكتسبها بدوره اثناء سريانه داخل المحرك من أجل الحفاظ على درجة حرارة المحرك في المجال المسوح.

1.4.1 - مكونات المشعاع (Components of a Radiator) :

النواة (The Core) :

تعتبر النواة هي القلب النابض للمشعاع (Radiator). تتكون من مجموعة من الزعانف المعدنية الرقيقة التي توفر مساحة سطح كبيرة لتبادل الحرارة. عند مرور سائل التبريد الساخن القادم من المحرك عبر هذه الزعانف، يتم تبريده بفعل الهواء الخارجي، استعدادا لدورة جديدة في دائرة تبادل الحرارة (Heat-Exchange Circuit) .

غطاء الضغط (The Pressure Cap) :

يعمل غطاء الضغط على الحفاظ على ضغط معين داخل نضام التبريد ، هذا الضغط ضروري لتشغيل المشعاع بكفاءة، حيث يمنع غليان سائل التبريد (Coolant Boiling) وتسربه.

خزانات المخرج والمدخل (The Outlet and Inlet Tanks) :

توجه هذه الخزانات سائل التبريد (Coolant) إلى المشعاع بعد أن يدور عبر المحرك، تعمل على إدارة السائل عندما يكون في حالة حرارة مرتفعة جدًا.



الشكل 15.11 : الأجزاء الرئيسية لرادياتور السيارة. [8]

سائل التبريد (The Coolant) :

يُعد سائل التبريد مكوناً رئيسياً آخر للمشعاع. على الرغم من أنه ليس جزءاً ميكانيكياً، فإنه العنصر الأساسي الذي يقوم بنقل الحرارة بعيداً عن المحرك، مما يمكن المشعاع من أداء وظيفته بكفاءة. [9]

2.4.1 - إنتماءات مشعاع السيارة ضمن تصنيفات المبادلات الحرارية :

1.2.4.1 - وفقاً لعملية إنتقال الحرارة :

يصنف مشعاع السيارة (Radiator) ضمن المبادلات الحرارية ذات الاتصال غير المباشر (Indirect-Contact Heat Exchangers) ووينتمي أيضاً في مايتدرج تحت هذا العنوان ضمن المبادلات من النوع ذو النقل المباشر (Direct-Transfer Type Exchangers).

2.2.4.1 - وفقاً لإتجاه تدفق الموائع :

تصنف من ناحية إتجاه تدفق الموائع ضمن التدفق العرضي (Cross-flow) و ذلك لتعامد إتجاه تدفق كل من الهواء وسائل التبريد.

3.2.4.1 - التصنيف وفقاً للخصائص البنوية :

يصنف المشعاع من ناحية البناء ضمن المبادلات الحرارية ذات الأسطح الممتدة (Extended Surface Heat Exchangers) وبالضبط المبادلات الحرارية ذات الصفائح والزعانف (Plate-Fin Heat Exchangers).

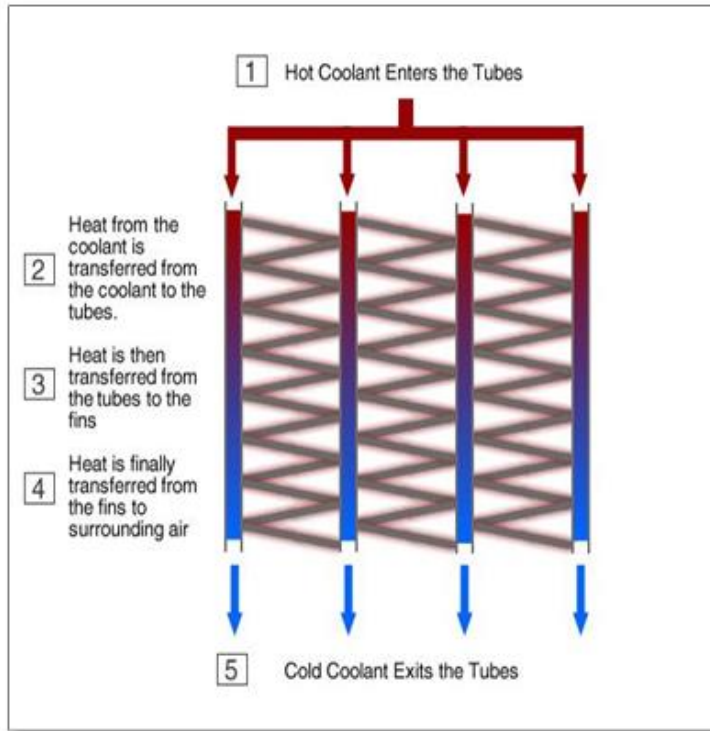
4.2.4.1 - تصنيف وفقاً لألية نقل الحرارة :

ينتمي مشعاع السيارة في تصنيفات المبادلات الحرارية من هذه الناحية إلى الحمل الحراري أحادي الطور على الجانبين (Single-phase convection on both sides).

3.4.1 - مبدأ عمل المشعاع (Radiator Working Principle) :

تدفق سائل التبريد: يدخل سائل التبريد الساخن القادم من المحرك إلى الرادياتور عبر أنبوب الدخول. **التبريد:** يتدفق السائل الساخن عبر الأنابيب داخل الرادياتور والتي تتصل بزعانف رقيقة. تعمل مروحة على دفع الهواء عبر هذه الزعانف مما يبرد السائل.

الخروج: يخرج السائل المبرد من الرادياتور عبر أنبوب الخروج ويعود إلى المحرك (الشكل 16.1). [8]



الشكل 16.1: مبدأ عمل الرادياتور. [10]

4.4.1 - البناء والمواد المستخدمة في تصنيع الرادياتور (Construction And Material) :

الرادياتور هو عنصر أساسي في نظام تبريد المحرك، واختيار المادة المناسبة لتصنيعه يؤثر بشكل كبير على كفاءته. تتكون الرادياتورات بشكل عام من مادتين رئيسيتين هما النحاس والألمنيوم، ولكل منهما مزاياه وعيوبه.

أ- الرادياتور النحاسي:

المزايا: يتميز النحاس بموصلية حرارية عالية، مما يجعله مادة ممتازة لنقل الحرارة.

العيوب: عادة ما يتم ربط الأنابيب والزعانف النحاسية بمواد أخرى مثل الرصاص، الذي يعتبر عازلاً للحرارة ويقلل من كفاءة الرادياتور بشكل عام. كما أن استخدام مواد أخرى مثل النحاس الأصفر والفولاذ في أجزاء أخرى من الرادياتور يزيد من تعقيد التصنيع ويؤثر على الأداء. [10]

ب- الرادياتور الألومنيوم :

المزايا: يتم تصنيع الرادياتورات الألومنيوم بشكل كامل من الألومنيوم عن طريق اللحام، مما يضمن تماسكا حراريا أفضل بين جميع الأجزاء. هذا التصميم البسيط يجعل الرادياتور الألومنيوم أكثر كفاءة في نقل الحرارة مقارنة بالرادياتور النحاسي.

العيوب: على الرغم أنه الأكثر استخداما في تصنيع الرادياتورات الحديثة، إلا أن الألومنيوم قد يكون أقل مقاومة للتآكل من بعض المواد الأخرى. [10]

5.1 - سوائل التبريد (Heat transfer fluids) :

سوائل نقل الحرارة أو سوائل التبريد هي مواد سائلة أو غازية مصممة خصيصا لنقل الطاقة الحرارية من مكان إلى آخر، تلعب هذه السوائل دورا حيويا في العديد من التطبيقات الصناعية والمنزلية، مثل أنظمة التبريد والتدفئة

1.5.1 - أنواع سوائل التبريد :

أ- خلطات الجليكول والماء (Glycol/Water Combinations) :

- تعد الخيار الأكثر شيوعا في العديد من التطبيقات.
- توفر حماية ممتازة ضد التجمد.
- النسبة الشائعة هي 50/50 أو 40/60 من الجليكول إلى الماء.
- تتطلب صيانة دورية واستبدال كل بضع سنوات. [11]

ب- الزيوت الهيدروكربونية (Hydrocarbon Oils) :

- تستخدم في تطبيقات درجات الحرارة العالية.
- تتوفر بأنواع مختلفة تختلف في السمية والكثافة.
- تتطلب أنظمة مغلقة لتجنب التسرب. [11]

ج- المبردات وسوائل تغير الحالة (Refrigerants/Phase Change Fluids) :

- تستخدم بشكل أساسي في أنظمة التبريد والتكييف.
- تعتمد على مبدأ التبخر والتكثيف لنقل الحرارة. [11]

د - السيليكون (Silicones) :

- تتميز بقدرة تحمل عالية لدرجات الحرارة.
- المشكلة: تسربها بسهولة حتى من الفتحات الصغيرة. غير قابلة للتآكل ولكنها لزجة وتتطلب مضخات قوية. [11]

هـ - السوائل منخفضة الحرارة (Low-Temperature Heat Transfer Fluids) :

- تستخدم في التطبيقات التي تتطلب درجات حرارة منخفضة.
- تشمل الإيثيلين جليكول والبروبيلين جليكول والبروبانديول الحيوي. [11]

و - السوائل عالية الحرارة (High-Temperature Heat Transfer Fluids) :

- مصممة للعمل في درجات حرارة مرتفعة جدًا دون أن تتحلل.
- الزيوت المعدنية (Mineral Oils)، الأملاح المنصهرة (Molten Salts)، الزيوت الاصطناعية (Synthetic Oils).
- تتميز بسعة حرارية عالية وقدرة تحمل عالية. [11]

2.5.1 - العوامل المؤثرة في اختيار السائل الحراري:

- درجة الحرارة: يجب أن يتحمل السائل نطاقًا واسعًا من درجات الحرارة.
- اللزوجة: تؤثر على سهولة تدفق السائل في النظام.
- الكثافة: تؤثر على حجم المضخات والخزانات.
- السعة الحرارية: تحدد كمية الحرارة التي يمكن للسائل حملها.
- التكلفة: يجب مراعاة التكلفة الأولية والتكاليف التشغيلية. [11]

6.1 - طرق الحساب النظرية (Theoretical Calculation Methods) :

تشكل طرق الحساب النظرية أداة أساسية لفهم وتحليل ظواهر انتقال الحرارة في الأنظمة المختلفة. تعتمد هذه الطرق على النماذج الرياضية والمعادلات الفيزيائية التي تصف آليات انتقال الحرارة، مثل التوصيل الحراري (Conduction) والحمل (Convection) والإشعاع (Radiation). تُستخدم هذه النماذج لتطوير حلول تقريبية أو دقيقة لمشكلات متنوعة، مما يتيح دراسة تأثير العوامل المختلفة، مثل الخواص المادية والظروف الحدودية، على أداء الأنظمة الحرارية. تساعد طرق الحساب النظرية في تصميم وتحسين العمليات الصناعية، مثل تبريد المعدات الإلكترونية أو تحسين كفاءة المبادلات الحرارية، مما يجعلها أداة لا غنى عنها للمهندسين والباحثين في هذا المجال.

1.6.1 - طريقة العناصر المنتهية (Finite Element Method) :

تعتبر طريقة العناصر المنتهية (FEM) أداة أساسية في الهندسة لتحليل المشاكل المعقدة التي تتضمن انتقال الحرارة. بدلاً من محاولة حل المعادلات الرياضية الحاكمة لهذه المشاكل بشكل معقد، تقوم طريقة FEM بتقسيم الجسم الذي يتم تحليله إلى عناصر صغيرة ومتراصة. ثم يتم تقريب الحل داخل كل عنصر باستخدام دوال رياضية. من خلال تجميع هذه الحلول الجزئية، يتم الحصول على حل تقريبي للمشكلة الكلية. [12]

لماذا نستخدم FEM في مشاكل انتقال الحرارة؟

- تعقيد الهندسة: تتيح FEM التعامل بسهولة مع الأشكال الهندسية المعقدة التي لا يمكن حلها بطرق تحليلية تقليدية.
- شروط حدودية متنوعة: يمكن تطبيق شروط حدودية مختلفة بمرونة على النموذج، مما يجعلها مناسبة لمجموعة واسعة من المشاكل الهندسية.
- دقة عالية: يمكن الحصول على حلول دقيقة بزيادة عدد العناصر في الشبكة.
- تطبيقات واسعة: تستخدم FEM في العديد من المجالات مثل الهندسة الميكانيكية، والمدنية، والطيران، وغيرها. [12]

مراحل استخدام FEM في حل مشاكل انتقال الحرارة:

- بناء النموذج: يتم إنشاء نموذج رقمي للمشكلة، بما في ذلك الهندسة والمواد المستخدمة وشروط الحدودية.
- التشبيك: يتم تقسيم النموذج إلى عناصر صغيرة مترابطة.
- صياغة المعادلات: يتم صياغة معادلات رياضية تصف سلوك كل عنصر.
- الحل: يتم حل النظام المعادلات الناتج باستخدام حاسوب للحصول على قيم درجة الحرارة في كل عقدة من العناصر.
- تحليل النتائج: يتم تحليل النتائج لتقييم أداء النظام وتحديد المناطق الحرجة. [12]

مقارنة FEM بطرق أخرى:

تعتبر FEM أكثر مرونة ودقة من الطرق الأخرى مثل طريقة الفروق المنتهية والحجم المنتهي، خاصة عند التعامل مع هندسيات معقدة وشروط حدودية متنوعة :

طريقة الفروق المنتهية (Finite Difference Method – FDM):

- طريقة بسيطة ومفهومة، تتطلب تقريب المعادلات الحاكمة عند النقاط الشبكية.
- يمكن تحسين النموذج بزيادة عدد النقاط.
- تصبح صعبة الاستخدام عند التعامل مع الهندسيات غير المنتظمة أو الشروط الحدودية المعقدة .

طريقة الحجم المنتهي (Finite Volume Method – FVM):

- تعد تطويرا لطريقة الفروق المنتهية.
- شائعة في ديناميكا السوائل العددية .
- طريقة مركز العقدة في الحجم المنتهي تشبه طريقة العناصر المنتهية الخطية .

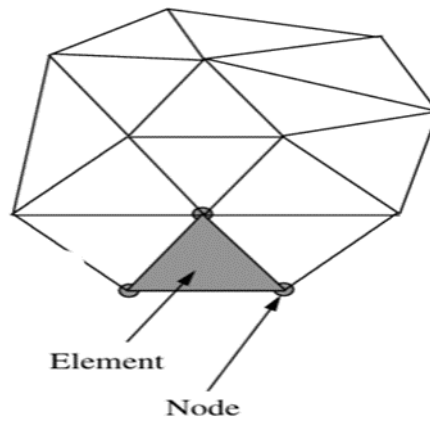
1.1.6.1- تحديات استخدام FEM:

- تعقيد البرمجيات: تتطلب FEM برامج متخصصة يمكن أن تكون معقدة الاستخدام.
- وقت الحساب: قد يستغرق حل المشاكل الكبيرة وقتا طويلا، خاصة على أجهزة الحاسوب العادية.

يتم تقريب حل مشكلة مستمرة بواسطة طريقة العناصر المنتهية من خلال إتباع الخطوات التالية :

(أ) تفكيك المستمر (Discretize the continuum) :

يتم تقسيم منطقة الحل إلى عناصر أو مناطق فرعية غير متداخلة (شكل 17.1). يسمح التفكيك باستخدام طريقة العناصر المنتهية بتشكيلات مختلفة للعناصر، مثل المثلثات والمستطيلات. يتم تشكيل كل عنصر عن طريق ربط عدد معين من النقاط (العقد).



الشكل 17.1: شبكة العناصر المحدودة النموذجية. العناصر، العقد، والحواف. [12]

ب-) تشكيل معادلات العنصر (Form element equations) :

بعد ذلك، ننتقل إلى بناء المعادلات الرياضية التي تصف سلوك كل عنصر على حدى. يتم تمثيل هذه المعادلات في صورة مصفوفة.

$$[K]_e = \frac{Ak}{l} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots(1.1)$$

$$\{f\}_e = \begin{Bmatrix} Q_i \\ Q_j \end{Bmatrix} \dots\dots\dots(2.1)$$

حيث يمثل كل صف في المصفوفة معادلة واحدة. المعادلة (1.1) تمثل خصائص المادية والهندسية للعنصر، بينما يمثل جانب المعادلة (2.1) الأحمال المؤثرة على العنصر (مثل الحرارة المتولدة أو المفقودة).
حيث يمثل الرمز الفرعي e العنصر؛ Q هو إجمالي الحرارة المنتقلة؛ K هو الموصلية الحرارية؛ l هو طول العنصر أحادي البعد والخطي، i و j يمثلان العقد التي تشكل العنصر. المتغيرات المجهولة هي قيم درجة الحرارة على العقد.

ج-) جمع معادلات العنصر للحصول على نظام الكلي (Assemble the element equations) :

لإيجاد خصائص النظام الكلي، يجب جمع جميع معادلات العناصر الفردية، أي دمج معادلات المصفوفات لكل عنصر بطريقة مناسبة بحيث تمثل المصفوفة الناتجة سلوك المنطقة الكلية للمشكلة. يجب دمج شروط الحدود بعد تجميع أي:

$$[K] \{T\} = \{f\} \dots\dots\dots(3.1)$$

حيث $[K]$ هي مصفوفة العامة وهي تجميع لمصفوفات العناصر الفردية و $\{f\}$ هي شعاع الحمل المطبق الكلي على النظام، وهو تجميع لمتجهات الحمل للعناصر الفردية $\{T\}$ وهو المتجه المجهول.

د-) حل نظام المعادلات (Solve the system of equations) :

بعد تجميع المعادلات الجبرية الناتجة، يتم حلها للحصول على قيم العقد للمتغير الحقل، مثل درجة الحرارة.

و-) حساب الكميات الثانوية (Calculate the secondary quantities) :

بناء على القيم العقدية للمتغير الحقل، مثل درجات الحرارة، يمكن حساب الكميات الثانوية مثل تدفقات الحرارة.

1.1.6.1 - العناصر ودوال الشكل (Elements and Shape Functions) :

تقسم طريقة العناصر المنتهية المشكلة الكبيرة إلى مشاكل أصغر وأبسط. يتم ذلك بتقسيم المنطقة التي نريد دراستها إلى قطع صغيرة تسمى عناصر (elements) داخل كل عنصر، نفترض أن الحل يتغير بشكل سلس وفقا لمعادلة رياضية بسيطة تسمى دالة الشكل (shape functions)، هذه الدوال تساعدنا على ربط سلوك كل عنصر بسلوك النظام بأكمله وأيضا لوصف كيفية تغير المتغيرات داخل كل عنصر. هذه الدوال تربط قيمة المتغير داخل العنصر بقيمته عند نقاط محددة تسمى العقد. بمعنى آخر، تستخدم دوال الشكل لتقدير قيمة المتغير في أي نقطة داخل العنصر بناء على قيمه عند العقد. [12]

أ- طريقة جاليركن (Galerkin Approach): [13]

- المعادلة العامة للتوصيل للإحداثيات الكرتيزية (General Conduction Equation of Cartesian Co-) :
:(ordinates)

معادلة ثلاثية البعد غير مستقرة :

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{q_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \tau} \dots\dots(4.1)$$

معادلة ثلاثية البعد مستقرة :

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} + \frac{q_g}{k} = 0 \dots\dots\dots(5.1)$$

- معادلة عاملة للتوصيل للإحداثيات الاسطوانية (General Conduction Equation for Polar Co-) :
:(ordinates)

$$\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{q_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial t}{\partial \tau} \dots\dots\dots(6.1)$$

- معادلة موازنة الطاقة (Energy balance equation) :

الطاقة الداخلة في الزمن dt + الطاقة المتولدة في الزمن dt = الطاقة الخارجة في الزمن dt + التغير في الطاقة الداخلية في الزمن dt

ومنه نتحصل على:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_g}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial \tau} \dots\dots\dots(7.1)$$

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} \quad \text{حيث:}$$

وهي معادلة تفاضلية ثلاثية البعد غير مستقرة بتوليد حراري.

خطوات طريقة جاليركن:

طريقة العناصر المحددة باستخدام أسلوب جاليركن يمكن وصفها بالخطوات التالية:

➤ تقسم المنظومة لعدد من العناصر المحددة E تمتلك عدد من العقد مقدارها P .

➤ إفتراض شكل مناسب من التفاوت في درجة الحرارة T في كل عنصر محدد وعبر عن $T^e(x, y, z, t)$ كتالي:

$$T^e(x, y, z, t) = [N(x, y, z)] T^e \dots\dots\dots(8.1)$$

في طريقة جاليركن فإن المتبقي الوزني لمنظومة العناصر يساوي صفر.

$$\iiint_{V^e} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T^e}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T^e}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T^e}{\partial z} \right) + q^\circ - \rho c \frac{\partial T^e}{\partial t} \right] dv = 0 \dots\dots\dots(9.1)$$

ويمكن كتابتها كتالي:

$$[k_1^e] T^e + [k_2^e] T^e + [k_3^e] T^e - p^e = 0 \dots\dots\dots(10.1)$$

$$[k_1^e] = \iiint [B]^T [D] [B] dv$$

$$[k_2^e] = \iint h [N]^T [N] ds$$

$$[k_3^e] = \iiint \rho c [N]^T [N] dv$$

$$p^e = p_1^e - p_2^e + p_3^e \dots\dots\dots(11.1)$$

$$p_1^e = \iiint \dot{q} [N]^T dv$$

$$p_2^e = \iiint q [N]^T dv$$

$$p_3^e = \iiint h T_\infty [N]^T ds$$

$$[D] = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots(12.1)$$

$$[N] = \begin{bmatrix} N_1(x) & N_2(x) & \dots & N_p(x) \\ N_1(y) & N_2(y) & \dots & N_p(y) \\ N_1(z) & N_2(z) & \dots & N_p(z) \end{bmatrix} \dots\dots\dots(13.1)$$

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_p}{\partial x} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & \frac{\partial N_p}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial z} & \frac{\partial N_2}{\partial z} & \dots & \frac{\partial N_p}{\partial z} \end{bmatrix} \dots\dots(14.1)$$

2.6.1 – الطريقة التحليلية (Analytical method) : [14]

الطريقة التحليلية هي إحدى الطرق الأساسية المستخدمة لدراسة وتحليل انتقال الحرارة، حيث يتم حل المعادلات التفاضلية التي تحكم انتقال الحرارة بشكل دقيق وصريح باستخدام تقنيات رياضية. تتيح هذه الطريقة فهماً عميقاً للظواهر الفيزيائية المرتبطة بانتقال الحرارة، سواء كان التوصيل الحراري (Conduction)، أو الحمل الحراري (Convection)، أو الإشعاع الحراري (Radiation).

1.2.6.1 – أسلوب فصل المتغيرات:

أ – بفرض قيمة ثابتة لدرجة الحرارة عند الحدود (Method of Separation of Variables: Given) (Temperature BC):

في معظم الحالات، تنتقل الحرارة خلال الأجسام ليس في خط مستقيم (بعد واحد)، بل في اتجاهين متعامدين (بعدين). تخيل لوحاً معدنياً مثلاً (الشكل 18.1)، الحرارة ستنتقل فيه ليس فقط من جانب إلى آخر، بل أيضاً من أعلى إلى أسفل. لنفترض أننا نريد معرفة كيف تنتوزع الحرارة داخل هذا اللوح المعدني في كل نقطة منه هذا، ما نسميه توزيع درجة الحرارة، لنتمكن من حساب هذا التوزيع، نحتاج إلى معرفة درجة الحرارة على حواف اللوح، وهذه ما نسميها الشروط الحدية. بمجرد أن نعرف كيف تنتوزع الحرارة، يمكننا حساب كمية الحرارة التي تمر عبر اللوح في كل ثانية. هذا ما نسميه معدل انتقال الحرارة. المعادلة الرياضية التي تصف هذه الظاهرة هي معادلة بسيطة نسبياً، وهي مستقرة في بعدين:

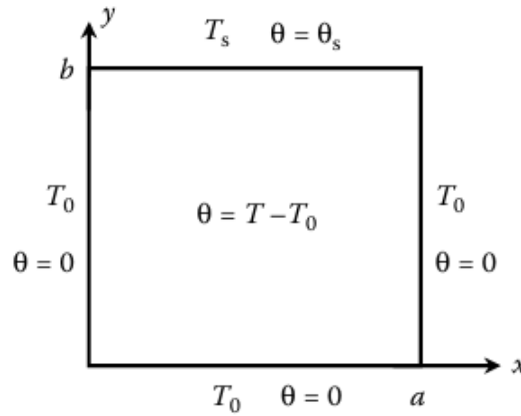
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \dots\dots\dots(15.1)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \dots\dots\dots(16.1)$$

مع: $\theta = T - T_0$

الشروط الحدية (Boundary Conditions):

1. عند $x = 0$:
(homogeneous BC - متجانسة متجانسة) $T = 0$ أو $\theta = 0$
2. عند $x = a$:
(homogeneous BC - متجانسة متجانسة) $T = 0$ أو $\theta = 0$
3. عند $y = 0$:
(homogeneous BC - متجانسة متجانسة) $T = 0$ أو $\theta = 0$
4. عند $y = b$:
(nonhomogeneous BC - متجانسة غير متجانسة) $T = T_s$ أو $\theta = T_s - T_0 = \theta_s$



الشكل 18.1: التوصيل الحراري ثنائي الأبعاد مع ثلاث شروط حدود متجانسة وشروط حدود غير متجانس واحد.

ومنه نستنتج ان الشرط الحدي المتجانس (homogeneous BC) هو أن تدرج الحرارة عند سطح الحد المعطى في الاتجاه x أو y تساوي صفر.

وفي المقابل الشرط الحدي الغير متجانس هو تدرج درجة الحرارة عند سطح الحد المعطى (في اتجاه x أو y) لا تساوي صفراً.

يمكن حل المعادلتين السابقتين باستخدام طريقة فصل المتغيرات (Method of Separation of Variables)، من خلال هذه الطريقة، يمكن فصل درجة الحرارة $T(x, y)$ التي تعتمد على اتجاهين، إلى مكونين يعتمد كل منهما على اتجاه واحد فقط، وهما $T(x)$ و $T(y)$ ، توزيع درجة الحرارة ثنائي الأبعاد النهائي يكون حاصل ضرب الحلول أحادية البعد لكل اتجاه.

$$T(x, y) = T(x) \cdot T(y) \dots\dots\dots (17.1) \text{ أي:}$$

للحصول على حل فريد لمشكلة انتقال الحرارة في بعدين، نحتاج إلى تحديد قيم درجة الحرارة أو تدفق الحرارة على حدود المنطقة التي ندرسها. هذه القيم تسمى الشروط الحدية.

في مشكلة ثنائية الأبعاد، نحتاج بشكل عام إلى أربعة شروط حدية: شرطين على كل من الحافتين المتعامدين اثنان في اتجاه x واثنان في اتجاه y (مثلا، السطح العلوي والسفلي، والجانب الأيمن والأيسر). بالنسبة لأي مشكلة معينة، يجب التأكد من وجود شرط حدي غير متجانس واحد فقط إما في اتجاه x أو في اتجاه y .

إذا كانت المشكلة تحتوي على شرطين، أو ثلاثة، أو أربعة شروط حدية غير متجانسة، فسيتم استخدام مبدأ التراكب (Principal of Superposition) لحلها.

أولا الحالة البسيطة كما هو موضح في المعادلة (17.1) :

$$T(x, y) = T(x) \cdot T(y)$$

ثم إيجاد المشتقات :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = Y \frac{\partial X}{\partial x} = Y \frac{dX}{dx} \dots\dots\dots(18.1)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = Y \frac{\partial^2 X}{\partial x^2} = Y \frac{d^2 X}{dx^2} \dots\dots\dots(19.1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = X \frac{\partial Y}{\partial y} = X \frac{dY}{dy} \dots\dots\dots(20.1)$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = X \frac{\partial^2 Y}{\partial y^2} = X \frac{d^2 Y}{dy^2} \dots\dots\dots(21.1)$$

ثم تعويض بها في معادلة التوصيل الحراري ثنائية الأبعاد :

$$Y \frac{d^2 X}{dx^2} + X \frac{d^2 Y}{dy^2} = 0 \dots\dots\dots(22.1)$$

$$-\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} \dots\dots\dots(23.1)$$

يمكن تحقيق المساواة فقط إذا كان كلا الطرفين يساويان ثابتا، حيث أن كل طرف في المعادلة (23.1) هو دالة في متغير مستقل. هذا الثابت يجب أن يكون موجبا لكي تتوافق مع شروط الحدود المعطاة في هذه الحالة .

$$-\frac{1}{X} \frac{d^2 X}{dx^2} = \frac{1}{Y} \frac{d^2 Y}{dy^2} = \lambda^2 \dots\dots\dots(24.1)$$

ومنه :

الحل لمعادلة لشرط حدي متجانس واحد:

$$\frac{d^2 Y}{dy^2} - \lambda^2 Y = 0 \Rightarrow Y = Y(y) \dots\dots(25.1)$$

الحل للمعادلة مع شرطين حديين متجانسين:

$$X(x) = C_1 \cos(\lambda x) + C_2 \sin(\lambda x) \dots\dots\dots(26.1)$$

حل المعادلة مع شرط حدي متجانس واحد:

$$Y(y) = C_3 e^{-\lambda y} + C_4 e^{\lambda y} \quad (Y(y) = C_3 e^{-\lambda y} + C_4 e^{\lambda y}) \dots\dots\dots(27.1)$$

قيم الثوابت C_1 و C_2 تستخرج من الشروط الحدودية .

بعد استخراج الثابتين C_1 و C_2 ، توزيع درجة الحرارة ثنائي الأبعاد يعطى بالعلاقة:

$$T(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sinh\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \dots\dots\dots(28.1)$$

$$T(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{2}{n\pi}\right) [1 - (-1)^n] T_s}{\sinh\left(\frac{n\pi b}{a}\right)} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sinh\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \dots\dots\dots(29.1)$$

إذا افترضنا أن $\theta = T - T_0$ فإن علاقة توزيع الحرارة تصبح كالتالي:

$$\theta(x, y) = \theta(x) \theta(y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sinh\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \dots\dots\dots(30.1)$$

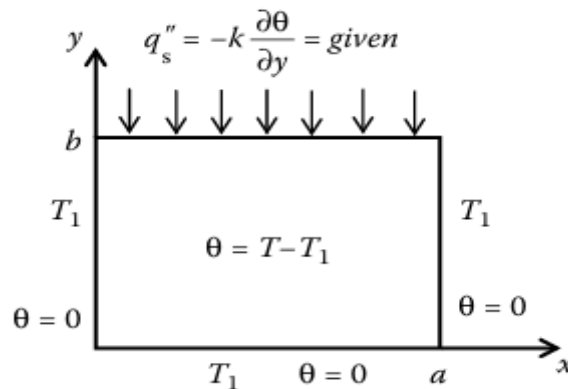
$$\theta(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{2}{n\pi}\right) [1 - (-1)^n] \theta_s}{\sinh\left(\frac{n\pi b}{a}\right)} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sinh\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \dots\dots\dots(31.1)$$

ب - معطى تدفق حراري وشروط حدية الحمل الحراري (Method of Separation of Variables:)

(Given Heat Flux and Convection BCs)

نطبق نفس الإجراء السابق مع شرط حدي غير متجانس واحد على معطى تدفق حراري سطحي (Given Surface)

،، والبداية باستخراج الشروط الحدية المتجانسة . (Heat Flux BC)



الشكل 19.1: التوصيل الحراري ثنائي الأبعاد مع ثلاث شروط حدود متجانسة وشروط حدود غير متجانس لانتقال الحرارة.

في الشكل (الشكل 19.1) تصبح الشروط الحدية الثلاثة لدرجة الحرارة متجانسة من خلال تعيين $\theta = T - T_1$ ، ويصبح شرط

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial y} = q_s'' \text{ هو المتجانس الوحيد}$$

الحل النهائي سيكون ناتج ضرب دوال الجيب وجيب التمام في الاتجاه x (حيث يوجد شرطان حديان متجانسان) ودوال \sinh و \cosh في الاتجاه y (حيث يوجد شرط حدي غير متجانس واحد).

كما هو الحال في السابق، سيتم استخدام شرط التدفق الحراري السطحي غير المتجانس لحساب المعامل المجهول

$$C_n$$

في حالة وجود شريط مستطيل طويل مع تدفق حراري ثابت على أحد الحواف، بينما تكون الحواف الأخرى ذات درجة حرارة ثابتة، يمكن الحصول على شروط حدية متجانسة على الحواف الثلاثة ذات درجة الحرارة الثابتة عبر تعيين

$$\theta = T - T_1$$

تتطبق معادلة لابلاس على هذه المشكلة للتوصيل الحراري الثابت في بعدين.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \dots\dots\dots(32.1)$$

شروط حدية (Boundary conditions) :

$$\theta = 0 \quad : \quad y = 0, x = 0 \text{ عند}$$

$$-k \frac{\partial \theta}{\partial y} = q_s'' \quad : \quad y = b, x = a \text{ عند}$$

الحل يخضع لثلاثة شروط حدية متجانسة، حيث يتم استبدال T بـ θ :

$$\theta(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sinh\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \dots\dots\dots(33.1)$$

بعد الحصول على الحل العام للمعادلة التفاضلية باستخدام طريقة فصل المتغيرات وتطبيق الشروط الحدية المتجانسة،

نستخدم الشرط الحدي غير المتجانس لحساب الثابت C_n .

أخيرا نجد العلاقة تعطى ب:

$$T(x, y) = T_1 - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2q_s' a [1 - (-1)^n]}{kn^2 \pi^2 \cosh(n\pi b/a)} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sinh\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \dots\dots(34.1)$$

ج- معطى شرط حدّي للحمل الحراري السطحي (Given Surface Convection BC) :

يمكن اتباع نفس الإجراء لحل مشكلة الشرط الحدّي غير المتجانس الوحيد الناتج عن الحمل الحراري في حالة

وجود شريط مستطيل يتم تبريده بالحمل الحراري على أحد جوانبه، بينما تبقى الجوانب الأخرى عند درجة حرارة ثابتة T_1

حيث :

$$\theta = T - T_1 \dots\dots\dots(35.1)$$

في هذه الحالة، تنطبق معادلة لابلاس على المشكلة الثابتة للتوصيل الحراري ثنائي الأبعاد.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} = 0 \dots\dots\dots(36.1)$$

ويتم حلها باستخدام الشروط الحدية :

$$\theta = 0 \quad , \quad 0 < y < b \quad , \quad x = 0$$

$$\theta = 0 \quad , \quad 0 < x < a \quad , \quad y = 0$$

$$\theta = 0 \quad , \quad 0 < y < b \quad , \quad x = a$$

$$y = b \quad , \quad 0 < x < a \quad : \quad \left[\begin{array}{l} h(T - T_\infty) = -k \frac{\partial T}{\partial y} \dots\dots\dots(37.1) \\ h[(T - T_1) - (T_\infty - T_1)] = -k \frac{\partial (T - T_1)}{\partial y} \dots\dots\dots(38.1) \\ h(\theta - \theta_\infty) = -k \frac{\partial \theta}{\partial y} \dots\dots\dots(39.1) \end{array} \right.$$

يخضع الحل لثلاثة شروط متجانسة مع استبدال θ بدلا من T :

$$\theta(x, y) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sinh\left(\frac{n\pi y}{a}\right) \dots\dots\dots(40.1)$$

أخيرا نجد :

$$\frac{T - T_1}{T_\infty - T_1} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\left(\frac{2}{n\pi}\right) [1 - (-1)^n] \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sinh\left(\frac{n\pi y}{a}\right)}{\sinh(n\pi b/a) + \left(\frac{n\pi}{a}\right) \left(\frac{h}{k}\right) \cosh(n\pi b/a)} \dots\dots\dots(41.1)$$

د- مبدأ التراكب للشروط الحدّية غير المتجانسة (Principle of Superposition) : (Nonhomogeneous BCs)

في بعض التطبيقات، قد تواجهنا مشكلة تحتوي على الأنواع الثلاثة من الشروط الحدّية السطحية (Surface BCs) وهي: درجة حرارة سطحية معطاة، تدفق حراري، وشرط حدّي للحمل الحراري. بعد تعيين $\theta_{\infty} = T - T_{\infty}$ تصبح المشكلة معقدة بسبب وجود ثلاثة شروط حدّية غير متجانسة.

لحل هذه المشكلة، يتم استخدام مبدأ التراكب (Superposition Principle)، حيث يتم تقسيم المشكلة ذات الشروط الحدّية غير المتجانسة إلى ثلاث مشكلات فردية، بحيث تحتوي كل مشكلة على شرط حدّي غير متجانس واحد فقط. بعد ذلك، يمكن تطبيق طريقة فصل المتغيرات (Separation of Variables) لكل مشكلة.

من المهم ملاحظة أن معادلات التوصيل الحراري والشروط الحدّية المرتبطة بها يجب أن تحقق مبدأ التراكب، بمعنى أن الحل النهائي يكون على الشكل :

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3$$

لكل من معادلة التوصيل الحراري والشروط الحدّية الأربعة.

بالاعتماد على هذه الطريقة، يتم إيجاد الحل لكل من:

θ_1 : مع وجود شرطين حدّيين متجانسين في الاتجاه x وشرط غير متجانس عند $y = 0$

θ_2 : مع وجود شرطين حدّيين متجانسين في الاتجاه y وشرط غير متجانس عند $x = 0$

θ_3 : مع وجود شرطين حدّيين متجانسين في الاتجاه y وشرط غير متجانس عند $x = b$

بتطبيق مبدأ التراكب، يصبح التوزيع النهائي لدرجة الحرارة هو:

$$\theta = \theta_1 + \theta_2 + \theta_3 \dots \dots \dots (42.1)$$

➤ 7.1- خاتمة :

في ختام هذا الفصل، تم استعراض العديد من المفاهيم المتعلقة بالمبادلات الحرارية، بدءاً من تعريفها وأهميتها في الأنظمة الصناعية والتقنية، مروراً بمختلف أنواعها مثل المبادلات الحرارية ذات الألواح والمبادلات أنبوبية الشكل، وصولاً إلى التركيز على الرادياتور أو المشعاع كأحد أهم التطبيقات للمبادلات الحرارية في العديد من المجالات مثل السيارات وأنظمة التبريد.

كما تناول طرق حساب انتقال الحرارة عبر هذه المبادلات، مستعرضين الطرق التحليلية المختلفة مثل معادلات توصيل الحرارة الثنائية مع التركيز على أساليب فصل المتغيرات التي تستخدم في دراسة توزيع درجات الحرارة وتحليل القوى المؤثرة عليها، وطريقة العناصر المنتهية الغنية عن التعريف في مختلف المجالات.

بالإضافة إلى ما تم استعراضه، نجد أن المبادلات الحرارية تلعب دوراً محورياً في تحسين فعالية العديد من التطبيقات الصناعية والتقنية، حيث تساهم بشكل كبير في تقليل استهلاك الطاقة وتعزيز الاستدامة البيئية. في سياق الرادياتورات على وجه الخصوص، تتعدد تطبيقاتها بدءاً من استخدامها في أنظمة تبريد السيارات وصولاً إلى استخدامها في الصناعة الكيميائية والبتروكيمياوية.

من خلال هذه المعلومات، أصبح من الواضح أن المبادلات الحرارية تمثل أحد الركائز الأساسية لتحسين كفاءة الأنظمة الحرارية، وأن معرفة كيفية حساب وتقدير انتقال الحرارة من خلال هذه الأنظمة تساهم في تحسين أدائها وتقليل استهلاك الطاقة.

الفصل الثاني:

الدراسة الرياضية لديناميكا الحسابية

للموائع

**Mathematical Study of
Computational Fluid Dynamics
(CFD)**

➤ 1.2- مقدمة :

في هذا الفصل، نركز على الجانب الرياضي لديناميكا الموائع الحسابية (CFD)، وهو مجال مهم لفهم وتحليل أنماط تدفق الموائع وانتقال الحرارة في التطبيقات الهندسية. تمهيدا لهذه الدراسة، سيتم التطرق إلى المبادئ الأساسية لانتقال الحرارة وعلاقتها الوثيقة بالترموديناميك، بالإضافة إلى الأنواع المختلفة لانتقال الحرارة، بما في ذلك الحمل الحراري (Convection)، والتوصيل (Conduction)، والإشعاع (Radiation).

كما سيتم التطرق إلى تحليل أنواع تدفقات الموائع المختلفة، مثل التدفق الانسيابي والاضطرابي، وعوامل التحكم التي تحدد سلوك المائع أثناء الحركة، مع التركيز على تعريف لعرض طريقة ديناميكا الموائع الحسابية التي تمكن من حل المشكلات المعقدة المرتبطة بتدفق الموائع وانتقال الحرارة عبر نمذجة عددية دقيقة.

في هذا الفصل، سيتم تقديم المعادلات الرياضية الأساسية التي تحكم حركة الموائع، مثل معادلات نافير-ستوكس ومعادلات الطاقة، وسيتم توضيح كيفية تطبيق هذه المعادلات في نمذجة التفاعل بين المائع والهيك، ونوضح كيفية دمجها في إطار ديناميكا الموائع الحسابية للحصول على حلول دقيقة وموثوقة لمشاكل التبادل الحراري.

هذه الدراسة الرياضية تهدف إلى تزويد القارئ بفهم شامل للأدوات والنظريات المستخدمة في تحليل وتصميم النظم الحرارية، مما يعزز القدرة على تحسين أداء المبادل الحراري وتطبيقات أخرى مشابهة كما سيوفر هذا الفصل خلفية متكاملة للموضوعات المتقدمة التي سيتم مناقشتها لاحقا في المذكرة.

➤ 2.2- إنتقال الحرارة (Heat Transfer) :

علم انتقال الحرارة هو مجال علمي وهندسي يختص بدراسة العمليات التي يتم من خلالها نقل الطاقة الحرارية من جسم إلى آخر أو داخل المادة نفسها بسبب وجود اختلاف في درجات الحرارة، يركز هذا العلم على فهم كيفية انتقال الحرارة عبر طرق التوصيل (Conduction)، الحمل الحراري (Convection)، والإشعاع (Radiation)، وتطوير النماذج والمعادلات التي تصف هذه العمليات، الهدف الأساسي من علم انتقال الحرارة هو تحليل وتصميم الأنظمة التي تتطلب إدارة فعالة للطاقة الحرارية، مثل المبدلات الحرارية، وأنظمة التبريد والتدفئة، والأجهزة الإلكترونية.

1.2.2 - إنتقال الحرارة والترموديناميك (THERMODYNAMICS AND HEAT TRANSFER) :

من البديهي، بحكم تجربتنا اليومية، أن المشروبات المعبأة الباردة تكتسب حرارة عند وضعها في بيئة دافئة، بينما تفقد المشروبات الدافئة حرارتها عند وضعها في بيئة باردة كالثلاجة. هذه الظاهرة تعكس انتقالاً للطاقة الحرارية من الوسط الأعلى حرارة إلى الوسط الأقل حرارة، وهي عملية تتوقف عند تساوي درجة حرارة الوسطين.

في إطار الديناميكا الحرارية، يعرف أن الطاقة تتخذ أشكالاً متنوعة. ضمن هذا السياق، ينصب تركيزنا على الحرارة (Heat) كشكل من أشكال الطاقة قابل للانتقال بين الأنظمة نتيجة لوجود اختلاف في درجة الحرارة، العلم الذي يدرس تحديداً معادلات هذا الانتقال يُعرف بعلم انتقال الحرارة (Heat Transfer).

قد يطرح سؤال حول جدوى الخوض في دراسة مفصلة لانتقال الحرارة، في ظل إمكانية تحديد كمية الحرارة المنتقلة باستخدام أدوات التحليل الديناميكي الحراري، الإجابة تكمن في أن الديناميكا الحرارية تُعنى بشكل أساسي بكمية الطاقة الحرارية اللازمة لتحويل نظام من حالة اتزان إلى أخرى، دون تحديد الإطار الزمني لهذا التحول، بمعنى آخر، تُحدد الديناميكا الحرارية مقدار الطاقة المطلوبة لحدوث تغيير مُحدد في حالة النظام، وفقاً لمبدأ حفظ الطاقة.

على النقيض من ذلك، يهتم علم انتقال الحرارة بشكل أساسي بمعدل انتقال الحرارة (كمية الحرارة المنتقلة في وحدة الزمن)، وهو ما يعد أكثر أهمية في التطبيقات العملية. على سبيل المثال، يمكن للديناميكا الحرارية حساب كمية الحرارة التي يفقدها محرك السيارة، ولكنه لا يعطي أي فكرة حول المدة الزمنية اللازمة لذلك، هذا هو بالضبط ما يعالجه علم انتقال الحرارة: تحديد معدلات انتقال الحرارة من وإلى الأنظمة، وبالتالي تحديد أوقات التسخين والتبريد، بالإضافة إلى تحليل التغيرات في درجة الحرارة بمرور الوقت.

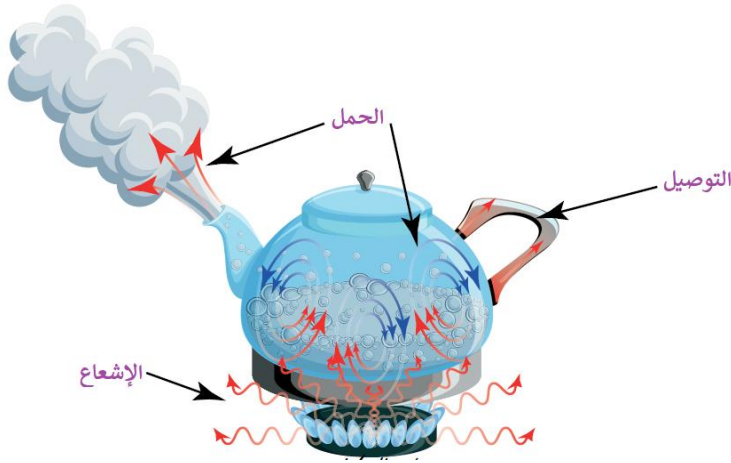
بينما تركز الديناميكا الحرارية على حالات الاتزان والتحويلات بينها، يعالج علم انتقال الحرارة الأنظمة التي لا تكون في حالة اتزان حراري، ما يجعله يتعامل مع ظواهر غير اتزانية بطبيعتها، لذلك، لا يمكن الاعتماد على مبادئ الديناميكا الحرارية وحدها لفهم ظاهرة انتقال الحرارة بشكل كامل، إلا أن قوانين الديناميكا الحرارية تشكل أساساً مهماً لهذا العلم، يلزم القانون الأول للديناميكا الحرارية بأن يكون معدل تدفق الطاقة إلى نظام ما مساوياً لمعدل تغير طاقة هذا النظام، بينما يحدد القانون الثاني أن انتقال الحرارة يحدث دائماً في اتجاه انخفاض درجة الحرارة.

الشرط الأساسي لحدوث انتقال الحرارة هو وجود فرق في درجة الحرارة بين الأجسام، لا يمكن أن يحدث انتقال حرارة صافٍ بين جسمين لهما نفس درجة الحرارة، هذا الفرق في درجة الحرارة هو القوة الدافعة لحدوث انتقال الحرارة، تماماً كما يعد فرق الجهد القوة الدافعة لتدفق التيار الكهربائي، وفرق الضغط القوة الدافعة لتدفق الموائع، يعتمد معدل انتقال الحرارة في اتجاه معين على مقدار تدرج درجة الحرارة (التغير في درجة الحرارة لكل وحدة طول) في هذا الاتجاه، فكلما زاد التدرج، زاد معدل انتقال الحرارة.

من الضروري التمييز بوضوح بين علم انتقال الحرارة والديناميكا الحرارية، ففي حين تعالج الديناميكا الحرارية التفاعلات الحرارية ودورها في القانونين الأول والثاني، فإنها لا تتطرق إلى آليات تبادل الحرارة أو طرق حساب معدلاته، تركز الديناميكا الحرارية على حالات الاتزان، التي تستبعد وجود تدرج في درجة الحرارة. على العكس من ذلك، يتطلب انتقال الحرارة وجود هذا التدرج، ما يجعله ظاهرة لا اتزانية. يهدف علم انتقال الحرارة إلى تحديد كميات معدل انتقال الحرارة بدلالة درجة الاتزان الحراري، وذلك باستخدام مُعادلات المعدل للأشكال الثلاثة لانتقال الحرارة. [15]

2.2.2 - طرق انتقال الحرارة (Heat Transfer Modes) :

هناك ثلاث طرق أساسية لانتقال الحرارة كما هي موضحة في (الشكل 1.2):

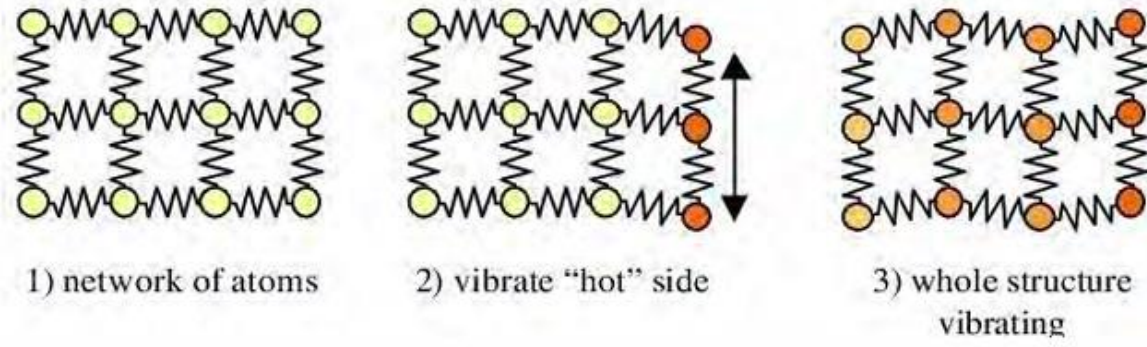


الشكل 1.2: أنواع انتقال الحرارة.

1.2.2.2 - التوصيل (Conduction) :

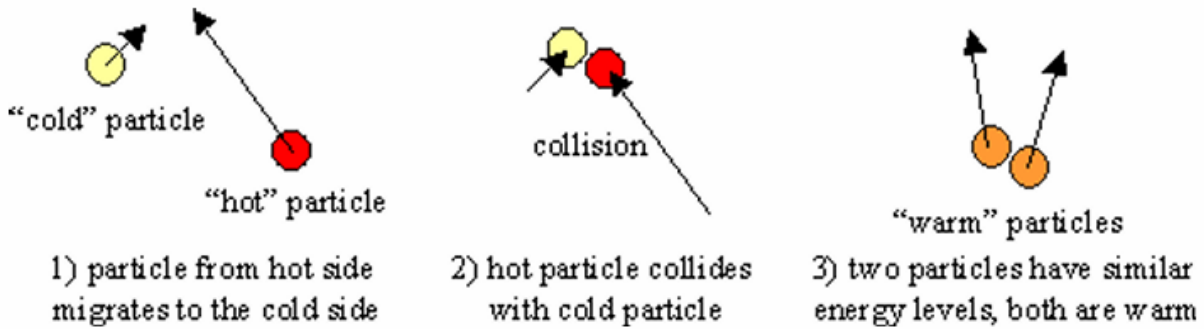
التوصيل الحراري هو آلية انتقال الطاقة الحرارية عبر المواد الصلبة والموائع الساكنة نتيجة لوجود اختلاف في درجة الحرارة. عندما تلمس جسما ساخنا، تشعر بسخونته بسبب انتقال الحرارة من الجسم إلى يدك عن طريق التوصيل، هناك آليتان أساسيتان تساهمان في عملية التوصيل:

➤ اهتزاز الشبكة البلورية (Lattice Vibration): في المواد الصلبة، تتوضع الذرات في ترتيب منتظم يعرف بالشبكة البلورية (الشكل 2.2)، وترتبط هذه الذرات ببعضها البعض بقوى كيميائية يمكن تمثيلها نظريا كنوابض، عندما يتعرض جزء من المادة لدرجة حرارة أعلى تهتز الذرات في هذا الجزء بقوة أكبر، تنتقل هذه الاهتزازات عبر الروابط (النوابض) إلى الذرات المجاورة في المناطق الأقل حرارة، مما يؤدي إلى انتشار الطاقة الحرارية عبر المادة. في النهاية تنتزع الطاقة بالتساوي وتصل المادة إلى حالة اتزان حراري حيث تهتز جميع الذرات بنفس متوسط الطاقة. [16]



الشكل 2.2: التوصيل بواسطة اهتزاز الشبكة. [16]

➤ تصادم الجسيمات (Particle Collisions): بالإضافة إلى اهتزاز الشبكة، تلعب الإلكترونات الحرة دوراً هاماً في توصيل الحرارة في المواد الصلبة، وخاصة المعادن (الشكل 3.2). الإلكترونات الحرة هي إلكترونات غير مرتبطة بذرات معينة وتتحرك بحرية داخل المادة، في المناطق الساخنة، تكتسب هذه الإلكترونات طاقة حركية أكبر وتتحرك بسرعة أعلى، نتيجة لحركتها العشوائية، تصطم الإلكترونات السريعة بالإلكترونات الأبطأ، وتنتقل إليها جزءاً من طاقتها، تستمر هذه التصادمات حتى تنتزع الطاقة بالتساوي وتصل الإلكترونات إلى متوسط سرعة واحد. يعتبر التوصيل عن طريق تصادم الإلكترونات أكثر كفاءة من التوصيل عن طريق اهتزاز الشبكة، وهذا يفسر لماذا تُعتبر المعادن موصلات حرارية أفضل من المواد غير المعدنية مثل الخزف، التي تحتوي على عدد قليل جداً من الإلكترونات الحرة. [16]

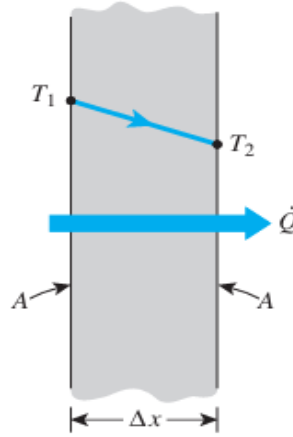


الشكل 3.2: التوصيل بواسطة تصادم الجسيمات. [16]

في الموائع (السوائل والغازات)، يتم انتقال الحرارة بالتوصيل بشكل أساسي عن طريق تصادم الجزيئات. تشبه هذه الآلية تصادم الإلكترونات في المعادن، حيث تنتقل الجزيئات ذات الطاقة الحركية الأعلى جزءاً من طاقتها إلى الجزيئات ذات الطاقة الحركية الأقل من خلال التصادمات.

تقاس قدرة المادة على توصيل الحرارة بمعامل يسمى الموصلية الحرارية (k). المواد ذات الموصلية الحرارية العالية، مثل النحاس، تُعتبر موصلات جيدة للحرارة، بينما المواد ذات الموصلية الحرارية المنخفضة، مثل الخشب أو الهواء، تُعتبر عوازل حرارية.

نفترض التوصيل الحراري الثابت عبر جدار مستوٍ بسُمك ومساحة معرفتين، كما هو موضح في (الشكل 4.2) :



الشكل 4.2: التوصيل الحراري عبر جدار مسطح بسُمك Δx ومساحة A . [15]

الفرق في درجة الحرارة عبر الجدار هو $\Delta T = T_2 - T_1$ أظهرت التجارب أن معدل انتقال الحرارة \dot{Q} عبر الجدار يتضاعف عندما يتضاعف الفرق في درجة الحرارة ΔT عبر الجدار أو المساحة A المتعامدة على اتجاه انتقال الحرارة، بينما ينخفض إلى النصف عند مضاعفة سمك الجدار L .

من هنا، يمكننا الاستنتاج أن معدل التوصيل الحراري عبر طبقة مستوية يتناسب طردياً مع فرق درجة الحرارة عبر الطبقة ومساحة انتقال الحرارة، ويتناسب عكسياً مع سمك الطبقة. وبذلك:

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \dots\dots(1.2)$$

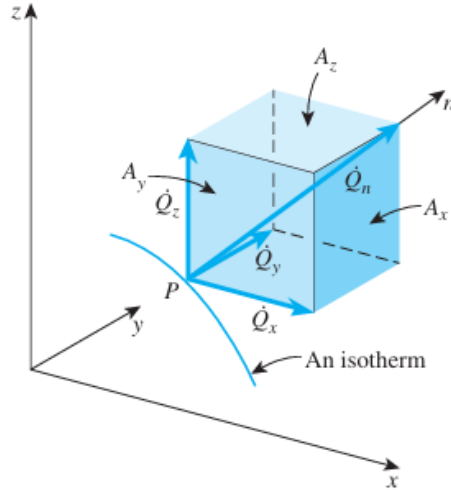
حيث أن ثابت التناسب k هو الموصلية الحرارية للمادة، وهو مقياس لقدرة المادة على توصيل الحرارة. في الحالة الحدية عندما Δx يُؤول إلى الصفر ($\Delta T \rightarrow 0$)، تختزل المعادلة أعلاه إلى الصيغة التفاضلية.

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (W) \dots\dots\dots(2.2)$$

العلامة السالبة (-): تشير إلى أن اتجاه انتقال الحرارة يكون دائماً من درجة الحرارة الأعلى إلى درجة الحرارة الأقل. [15]

أ- انتقال الحرارة متعدد الأبعاد (Multidimensional Heat Transfer) :

هو عملية انتقال الطاقة الحرارية داخل جسم أو نظام في أكثر من بعد واحد (الشكل 5.2)، حيث يمكن أن تنتقل الحرارة في اتجاهات متعددة بسبب تدرجات درجات الحرارة داخل النظام، يحدث هذا النوع من انتقال الحرارة عندما لا يكون التوزيع الحراري متماثلاً أو خطياً، مما يؤدي إلى تدفق الحرارة عبر عدة محاور أو أبعاد مثل الطول، العرض، والارتفاع في الأجسام ثلاثية الأبعاد. [15]



الشكل 5.2: محصلة مركبات شعاع انتقال الحرارة في مكعب مادي. [15]

في الحالة الأكثر عمومية، يكون نقل الحرارة عبر وسط ما ثلاثي الأبعاد، أي أن درجة الحرارة تختلف على طول جميع الاتجاهات الثلاثة الأساسية داخل الوسط أثناء عملية نقل الحرارة، يمكن وصف توزيع درجة الحرارة في جميع أنحاء الوسط في وقت محدد وكذلك معدل نقل الحرارة في أي موقع في هذه الحالة العامة بمجموعة من ثلاثة إحداثيات مثل:

➤ x, y, z في نظام الإحداثيات الديكارتية .

➤ r, θ, z في نظام الإحداثيات الأسطواني.

➤ r, θ, ϕ في نظام الإحداثيات الكروية.

في الإحداثيات الديكارتية، يمكن التعبير عن متجه توصيل الحرارة من حيث مكوناته على النحو التالي:

$$\vec{Q}_n = Q_x \vec{i} + Q_y \vec{j} + Q_z \vec{k} \dots\dots\dots(3.2)$$

حيث أن i, j, k هي أشعة الوحدة و Q_x, Q_y, Q_z هي مقادير معدلات انتقال الحرارة على الترتيب في الاتجاهات

x, y, z والتي يمكن تحديدها مرة أخرى باستخدام قانون فورييه كما يلي:

$$Q_x = -kA_x \frac{\partial T}{\partial x}, \quad Q_y = -kA_y \frac{\partial T}{\partial y}, \quad \text{and} \quad Q_z = -kA_z \frac{\partial T}{\partial z} \dots\dots\dots(4.2)$$

ب-المقاومة الحرارية (Thermal Resistance) : [15]

المقاومة الحرارية هي مقياس لممانعة تدفق الحرارة عبر مادة أو بين مواد مختلفة أي أنها خاصية فيزيائية تعبر عن قدرة المادة أو النظام على مقاومة انتقال الحرارة عبرها، تعتمد قيمتها على خواص المادة مثل الموصلية الحرارية، السماكة، والمساحة المتاحة للتبادل الحراري، يتم استخدام مفهوم المقاومة الحرارية في تصميم الأنظمة الحرارية مثل العزل الحراري في المباني أو المبادلات الحرارية لتحسين كفاءة انتقال الحرارة. [15]

➤ بالنسبة للجدران أو الأسطح المسطحة، يتم حساب المقاومة الحرارية باستخدام الصيغة:

$$R_{\text{wall}} = \frac{L}{kA} \quad (\text{K/W}) \dots\dots\dots(5.2)$$

حيث k هي الموصلية الحرارية للمادة (thermal conductivity).

➤ أما في حالة الحمل الحراري يتم حساب المقاومة الحرارية باستخدام الصيغة:

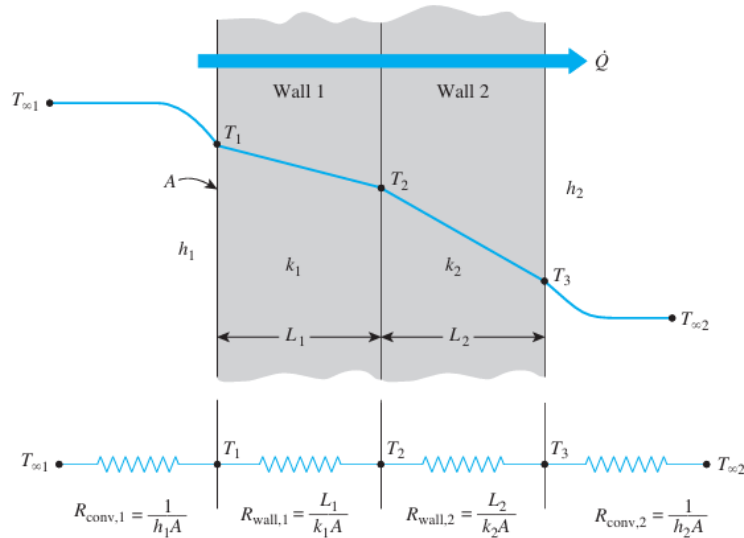
$$R_{\text{conv}} = \frac{1}{hA_s} \quad (\text{K/W}) \dots\dots\dots(6.2)$$

حيث h هو معامل الحمل الحراري (convective heat transfer).

في حالة عدة أسطح متراكبة (الشكل 6.2)، يتم الحصول على المقاومة الكلية بجمع المقومات مع بعضها كما هو معمول في الدوائر الكهربائية وتكون بالشكل التالي:

$$R_{\text{total}} = R_{\text{conv}, 1} + R_{\text{wall}, 1} + R_{\text{wall}, 2} + R_{\text{conv}, 2} \dots\dots(7.2)$$

$$= \frac{1}{h_1 A} + \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{1}{h_2 A} \dots\dots\dots(8.2)$$



الشكل 6.2: شبكة مقاومة انتقال الحرارة عبر جدار مسطح مع تعرضه للحمل الحراري من الجانبين، والتشبيه الكهربائي.

وبمعرفة المقامة الكلية يمكننا حساب التدفق الحراري الكلي من خلال العلاقة (9.2):

$$\dot{Q} = \frac{T_i - T_j}{R_{total,i-j}} \dots\dots\dots(9.2)$$

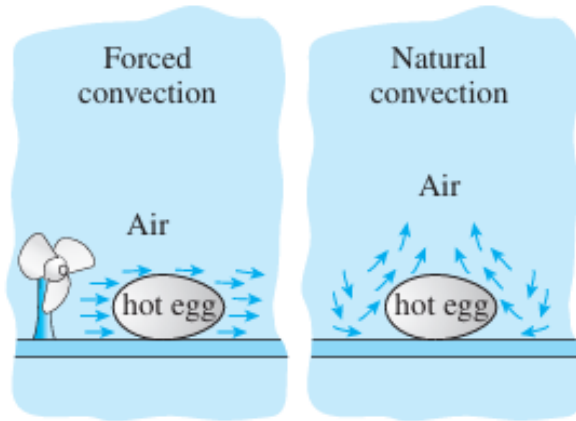
2.2.2.2 - الحمل (Convection) :

الحمل الحراري هو آلية انتقال الطاقة بين سطح صلب والمائع المجاور له الذي يكون في حالة حركة. تتضمن هذه العملية تأثيرات مشتركة بين التوصيل وحركة المائع. كلما زادت سرعة حركة المائع، زاد انتقال الحرارة عن طريق الحمل الحراري، إذا لم يكن هناك حركة للمائع، فإن انتقال الحرارة بين السطح الصلب والمائع يتم عبر التوصيل فقط. ولكن، وجود حركة للمائع يعزز انتقال الحرارة بين السطح والمائع، رغم أنه قد يعقد عملية حساب معدلات انتقال الحرارة. [15]

هناك نوعان رئيسيان للحمل الحراري:

الحمل الحراري الطبيعي (Natural convection): يحدث نتيجة اختلافات الكثافة في المائع بسبب تغيرات درجة الحرارة، عندما يسخن جزء من المائع، تقل كثافته ويرتفع للأعلى، بينما يهبط المائع البارد الأكثر كثافة ليحل محله، مما ينشئ تيارات حمل حراري طبيعية (الشكل 7.2)، مثال على ذلك ارتفاع الهواء الساخن من المدفأة.

الحمل الحراري القسري (forced convection): يحدث عندما تستخدم وسائل خارجية مثل مروحة أو مضخة لإجبار المائع على الحركة (الشكل 7.2)، هذا يزيد من معدل انتقال الحرارة بشكل كبير، مثال على ذلك تبريد معالج الكمبيوتر باستخدام مروحة. [15]



الشكل 7.2: تبريد البيضة المسلوقة بواسطة الحمل الحراري القسري والطبيعي. [15]

على الرغم من تعقيد الحمل الحراري، فإن معدل انتقال الحرارة يظهر علاقة مباشرة مع فرق درجة الحرارة، ويتم التعبير عنه بشكل رياضي من خلال قانون نيوتن للتبريد :

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (W) \dots\dots\dots(10.2)$$

h هو معامل انتقال الحرارة بالحمل الحراري وحدته $\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$ ، A_s هي مساحة السطح الذي يحدث من خلاله انتقال الحرارة، و T_s هي درجة حرارة السطح، و T_∞ هي درجة حرارة المائع بعيداً عن السطح. تجدر الإشارة إلى أن درجة حرارة المائع عند السطح تساوي درجة حرارة السطح الصلب.

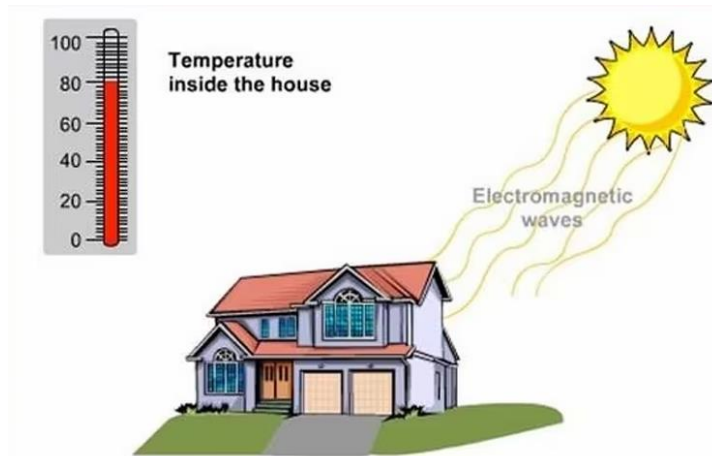
معامل انتقال الحرارة بالحمل الحراري h ليس خاصية للمائع نفسه، بل هو معلمة تجريبية تعتمد على عدة عوامل مثل هندسة السطح، طبيعة حركة المائع، خصائص المائع، وسرعته الكلية. [15]

ملاحظة: الموائع الساكنة في انتقال الحرارة تدرس بالتوصيل، وليس بالحمل. في حالة الموائع الساكنة، لا يوجد حركة كتلة للسائل أو الغاز لنقل الحرارة، لذلك يتم انتقال الحرارة من خلال التوصيل، حيث يتم نقل الطاقة الحرارية من الجزيئات الأكثر سخونة إلى الجزيئات الأقل سخونة عبر التصادمات الجزيئية وانتشار الطاقة.

أما الحمل، فيحدث في الموائع المتحركة، حيث يتم نقل الحرارة بواسطة حركة الكتلة الكلية للسائل أو الغاز، إما بالحمل الطبيعي (نتيجة لاختلاف الكثافة) أو بالحمل القسري (نتيجة لتطبيق قوى خارجية مثل المضخات أو المراوح).

3.2.2.2 - الإشعاع (Radiation) :

الإشعاع الحراري هو شكل من أشكال انتقال الطاقة، على عكس التوصيل والحمل، فإن الإشعاع لا يتطلب وسطاً مادياً لنقل الطاقة، ينتقل الإشعاع بسرعة الضوء ولا يتأثر في الفراغ (الشكل 8.2)، وهذا هو السبب في كيفية وصول طاقة الشمس إلى الأرض، حيث يتم نقل الطاقة على شكل موجات كهرومغناطيسية، أو فوتونات نتيجة للتغيرات في التكوينات الإلكترونية للذرات أو الجزيئات. ينبعث الإشعاع الحراري من جميع الأجسام التي تزيد درجة حرارتها عن الصفر المطلق ($0K = -273.15^\circ C$)، يعتمد مقدار الإشعاع المنبعث على درجة حرارة الجسم وخصائصه السطحية. [15]



الشكل 8.2: الإشعاع الحراري [17].

الإشعاع هو ظاهرة حجمية، بمعنى أن جميع المواد (صلبة وسائلة وغازية) تُصدر وتمتص وتنتقل الإشعاع بدرجات متفاوتة، ومع ذلك، بالنسبة للمواد الصلبة غير الشفافة للإشعاع الحراري (مثل المعادن والخشب والصخور)، يُعتبر الإشعاع ظاهرة سطحية، هذا يعني أن الإشعاع المنبعث من الأجزاء الداخلية لهذه المواد لا يستطيع الوصول إلى السطح الخارجي، والإشعاع الساقط على السطح يمتص في طبقات رقيقة جدا بالقرب من السطح. [15]

يتم تحديد أقصى معدل للإشعاع الذي يمكن أن يُصدره سطح عند درجة حرارة T_s (بالكلفن) باستخدام قانون ستيفان-بولتزمان، كالتالي:

$$\dot{Q}_{emit, max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (W) \dots\dots\dots(11.2)$$

حيث أن: $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ هو ثابت ستيفان-بولتزمان.

السطح المثالي الذي يصدر هذا المعدل الأقصى من الإشعاع يسمى "جسم أسود"، والإشعاع الذي يُصدره الجسم الأسود يُسمى "إشعاع الجسم الأسود". في المقابل، الإشعاع الذي يصدره أي سطح حقيقي يكون أقل من إشعاع الجسم الأسود عند نفس درجة الحرارة، ويمكن التعبير عنه كالتالي:

$$\dot{Q}_{emit} = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (W) \dots\dots\dots(12.2)$$

حيث أن ϵ هو الانبعاثية للسطح، وهي خاصية تمثل مدى تطابق السطح مع الجسم الأسود الذي تكون انبعاثيته $\epsilon=1$. تتراوح قيم الانبعاثية بين 0 و 1.

خاصية أخرى مهمة تتعلق بالإشعاع هي الامتصاصية α ، وهي الكسر من الطاقة الإشعاعية الساقطة على السطح والتي يتم امتصاصها بواسطة السطح. مثل الانبعاثية، تتراوح قيم الامتصاصية بين 0 و 1. الجسم الأسود يمتص كامل الإشعاع الذي يصيبه، أي أن امتصاصيته $(\alpha = 1)$.

بشكل عام، يعتمد كل من ϵ و α للسطح على درجة الحرارة وطول الموجة للإشعاع، وفقا لقانون كيرشوف للإشعاع، فإن الانبعاثية والامتصاصية للسطح عند درجة حرارة وطول موجة معينة متساويتان. معدل امتصاص السطح للإشعاع يُحسب كالتالي:

$$\dot{Q}_{absorbed} = \alpha \dot{Q}_{incident} \quad (W) \dots\dots\dots(13.2)$$

حيث $\dot{Q}_{incident}$ هو معدل الإشعاع الذي يصيب السطح، و α هو الامتصاصية للسطح. بالنسبة للأسطح غير الشفافة، يتم عكس الجزء غير الممتص من الإشعاع الساقط.

الفرق بين المعدلات الصادرة والامتصاصية للإشعاع يمثل انتقال الحرارة الإشعاعي الصافي، إذا كان معدل الامتصاص أكبر من معدل الإصدار، فإن السطح يكتسب الطاقة عن طريق الإشعاع، إذا كان معدل الإصدار أكبر، فإن

السطح يفقد الطاقة بالإشعاع. تحديد المعدل الصافي لانتقال الحرارة بالإشعاع يعتمد على خصائص الأسطح، واتجاهها بالنسبة لبعضها البعض، وخصائص الوسط بينهما.

في حالة مادة ذات درجة حرارة T_s ومساحة سطح A_s محاطة بجسم أسود أكبر عند درجة حرارة T_{surr} ، فإن المعدل الصافي لانتقال الحرارة الإشعاعي بينهما يُعطى بواسطة:

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4) \quad (W) \dots\dots\dots(14.2)$$

في هذه الحالة الخاصة، لا تؤثر الانبعاثية أو مساحة السطح المحيط على المعدل الصافي للإشعاع. انتقال الحرارة الإشعاعي إلى أو من السطح المحاط بغاز مثل الهواء يحدث بالتوازي مع عمليات التوصيل (أو الحمل إذا كان هناك حركة مائع جماعية). وبالتالي، يتم تحديد إجمالي انتقال الحرارة عن طريق جمع مساهمات كلا من الحمل والإشعاع. لهذا الغرض، يتم تعريف معامل انتقال الحرارة المشترك $h_{combined}$ الذي يشمل تأثيرات الحمل والإشعاع، وعليه يكون:

$$\dot{Q}_{total} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} = h_{conv} A_s (T_s - T_{surr}) + \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{surr}^4) \dots\dots(15.2)$$

$$\dot{Q}_{total} = h_{combined} A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (W) \dots\dots\dots(16.2)$$

$$h_{combined} = h_{conv} + h_{rad} = h_{conv} + \epsilon \sigma (T_s + T_{surr})(T_s^2 + T_{surr}^2) \dots\dots\dots(17.2)$$

عادة ما يكون تأثير الإشعاع ذا أهمية في المقارنة مع التوصيل أو الحمل الطبيعي، لكن تأثيره يكون ضئيلاً بالنسبة للحمل القسري. لذلك، في تطبيقات الحمل القسري، يتم تجاهل تأثير الإشعاع بشكل عام، خاصة عندما تكون الأسطح ذات انبعاثية منخفضة ودرجات حرارة معتدل. [15]

3.2 - تدفق الموائع (Types of Fluid Flow) :

تدفق الموائع هو ذلك الجزء من ميكانيكا الموائع الذي يتحدث حصرياً عن حركة المائع وخصائصه، بعبارة بسيطة، هو دراسة حركة الموائع التي تسببه عدم توازن القوى، يمكن التعبير عن تدفق الموائع رياضياً على النحو التالي :

$$Q = v \cdot A \dots\dots\dots(18.2)$$

حيث :

Q : معدل التدفق الحجمي للمائع.

v : سرعة التدفق.

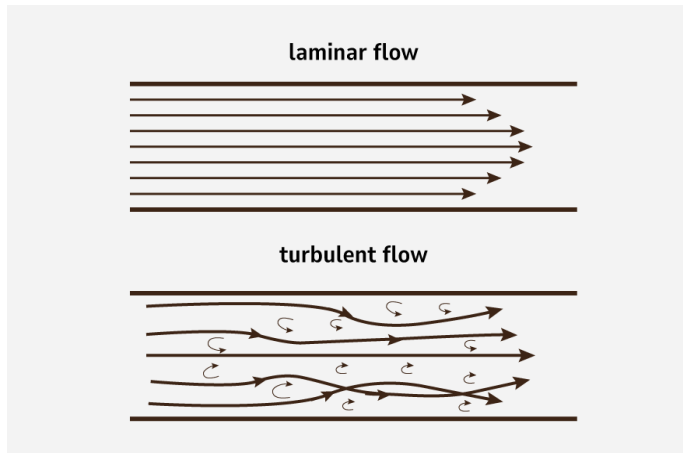
A : مساحة المقطع العرضي.

في المبادلات الحرارية يتم التعامل مع مجموعة متنوعة من أنواع التدفقات نظرا لاستخدام أنواع مختلفة من أسطح نقل الحرارة وتفاوت معدلات تدفق الكتلة، تشير أنواع تدفق الموائع إلى التصنيفات والخصائص التي تحدد سلوك وحركة السوائل والغازات، تتأثر هذه الأنماط بعوامل مثل السرعة والضغط واللزوجة، مما يجعل فهمها ضروريا في التطبيقات العلمية والهندسية. يساعد تحليل أنواع التدفق في التنبؤ بسلوك الموائع وتحسين تصميم الأنظمة والعمليات مما يعزز الكفاءة ويضمن السلامة والموثوقية.

تشمل دراسة أنواع تدفق الموائع مجموعة من الظواهر، لكل منها خصائصه وتأثيراته. التدفق الطبقي، على سبيل المثال، يتميز بحركة سلسة ومنظمة حيث تتحرك جزيئات المائع في طبقات متوازية دون اختلاط. بالمقابل، التدفق المضطرب يتميز بحركة فوضوية وغير منتظمة مع تكوين دوامات. التدفق الانتقالي يقع بين هذين النوعين، حيث يجمع بين خصائص التدفق الطبقي والمضطرب. من خلال هذه التصنيفات، يمكن للمهندسين تحسين الأداء وتطوير أنظمة أكثر كفاءة و في مايلي أهمها:

1.3.2 - التدفقات الطبقيّة، الانتقاليّة، والمضطربة (Laminar, Transition, and Turbulent Flows):

عند فتح صنبور المياه (الذي لا يحتوي على مرفقات مثل المهووي أو غيره) بمعدل تدفق منخفض جدا، يتدفق الماء بشكل ناعم جدا، شفافا كأنه زجاجي، عند زيادة معدل التدفق يصبح الماء مضطربا ويتدفق بطريقة فوضوية (الشكل 9.2). هذا المثال يوضح كيف يمكن أن يكون التدفق إما طبقيًا أو مضطربًا. التدفق الطبقي هو الذي تتحرك فيه جزيئات المائع بشكل متوازٍ وفي طبقات متساوية، بينما التدفق المضطرب هو الذي تتحرك فيه الجزيئات بحركة مختلطة وعشوائية نتيجة تقلبات السرعة ثلاثية الأبعاد. في التدفقات المضطربة، تسافر جسيمات السائل في كتل سائلة متحركة عشوائيًا بأحجام مختلفة تسمى الدوامات (Eddies). [18]

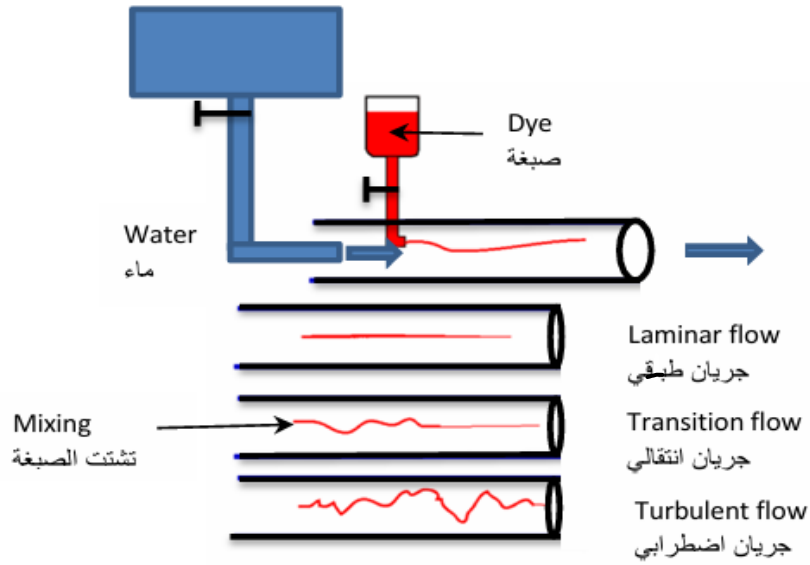


الشكل 9.2: الجريان الصفائحي والجريان المضطرب . [20]

في العديد من تطبيقات ميكانيكا الموائع، مثل تدفق الماء داخل الأنابيب، يعتبر الاضطراب ظاهرة غير مرغوبة لأنه يسبب مقاومة أكبر للتدفق. ومع ذلك، في بعض الحالات، مثل المبادلات الحرارية، يكون الاضطراب مفيداً لأنه يعزز انتقال الحرارة بين جزيئات المائع.

في التدفق الطبقي، تكون سرعة التدفق ببساطة u . أما في التدفق المضطرب، فإن السرعة تتكون من متوسط السرعة u بالإضافة إلى ثلاثة مكونات تقلب عشوائية u' ، v' و w' .

يمكن ملاحظة نمطي التدفق بتطبيق التجربة التي قام بها العالم رينولدز كما هي موضحة في (الشكل 10.2):



الشكل 10.2: تجربة رينولدز [19].

تجربة رينولدز هي تجربة كلاسيكية توضح الفرق بين التدفق الطبقي والتدفق المضطرب في السوائل، وتساعد في فهم ظاهرة الانتقال بين هذين النوعين من التدفق. قام بها العالم أوزبورن رينولدز في أواخر القرن التاسع عشر، فيما يلي شرح للتجربة:

أدوات التجربة:

- أنبوب زجاجي شفاف: يسمح بملاحظة تدفق السائل داخله.
- خزان مياه: يحتوي على الماء الذي سيتدفق عبر الأنبوب.
- صنبور: للتحكم في معدل تدفق الماء.
- خزان صغير من الصبغة: يحتوي على صبغة ملونة لاختلاطها بالماء.
- إبرة رفيعة: لإدخال الصبغة الملونة بشكل مستمر إلى الماء عند مدخل الأنبوب. [19]

خطوات التجربة:

أ- تدفق الماء بمعدل منخفض: يتم فتح الصنبور بحيث يتدفق الماء ببطء داخل الأنبوب، يتم حقن صبغة ملونة في منتصف الأنبوب باستخدام الإبرة.

نتيجة: الصبغة تتدفق في خط مستقيم، مكونة خطأ ناعماً وواضحاً. هذا يدل على أن التدفق طبقي، حيث تتحرك جزيئات السائل في طبقات متوازية بدون اختلاط كبير.

ب- زيادة معدل تدفق الماء تدريجياً: يتم فتح الصنبور أكثر لزيادة معدل التدفق.

نتيجة: تبدأ الصبغة بالاختلاط مع الماء بشكل تدريجي، مما يشير إلى بداية ظهور الاضطرابات في التدفق. عند نقطة معينة، تصبح الصبغة مختلطة بشكل عشوائي مع الماء، مما يدل على أن التدفق أصبح مضطرباً.

تبين من الدراسات ان التحول في نمط الجريان يعتمد على مجموعة غير بعدية تسمى رقم رينولتز يرمز لها بـ Re التي تجمع بين خواص المائع والسرعة وقطر الأنبوب وتعطى بالصيغة :

$$Re = \frac{\rho d u}{\mu} \dots\dots\dots(19.2)$$

Re : رقم رينولتز (عدد غير بعدي)

ρ : كثافة المائع (kg/m^3)

u : سرعة المائع (m/s)

d : قطر الأنبوب أو الطول المميز (m)

μ : لزوجة المائع الديناميكية ($Pa.s$)

➤ $Re < 2000$: تدفق طبقي (صفائحي)، حيث تتحرك جسيمات المائع في طبقات منتظمة.

➤ $2000 < Re < 4000$: التدفق الانتقالي (منطقة انتقالية)، حيث يبدأ التدفق في التحول من طبقي إلى مضطرب. فهو يعرض مزيجاً من الخصائص الطبقيّة والمضطربة.

➤ $Re > 4000$: تدفق مضطرب (توربولنت)، حيث تتحرك جسيمات المائع بشكل عشوائي وفوضوي. [19]

1.1.3.2 - نموذج الاضطراب ذو المعادلتين k, ε (The two equations k, ε turbulence model):

يركز نموذج $K-\varepsilon$ على الآليات التي تؤثر على الطاقة الحركية الاضطرابية (لكل وحدة كتلة)، k تكون الطاقة

الحركية اللحظية $k(t)$ لتدفق مضطرب هي مجموع الطاقة الحركية المتوسطة \bar{K} والطاقة الحركية الاضطرابية k' :

$$\bar{K} = \frac{1}{2} (U^2 + V^2 + W^2) \dots\dots\dots(20.2)$$

$$k' = \frac{1}{2} (\overline{u^2} + \overline{v^2} + \overline{w^2}) \dots\dots\dots(21.2)$$

$$k(t) = \bar{K} + k' \dots\dots\dots(22.2)$$

نحتاج الآن إلى معادلات k و ε :

ε هو معدل التبديد للطاقة الحركية k إذا كانت k و ε معروفتين، يمكننا نمذجة اللزوجة الاضطرابية كالتالي:

$$v_t \propto \mathcal{G} \propto k^{1/2} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} = \frac{k^2}{\varepsilon} \dots\dots\dots(23.2)$$

تحليل نموذج k-epsilon في محاكاة الجريان المضطرب

يعد نموذج k-epsilon من أكثر نماذج الاضطراب استخداما في ديناميكا الموائع الحسابية (CFD)، ويعتمد على

معادلتين لحساب كل من:

طاقة الاضطراب الحركية (k): وهي تمثل كثافة الطاقة الناتجة عن الحركات الاضطرابية الصغيرة.

معدل تبديد الطاقة (epsilon): وهو يعبر عن معدل فقدان الطاقة بسبب اللزوجة. [21]

مميزات النموذج:

- سهولة التطبيق: يتميز ببنية رياضية بسيطة نسبيا، ما يجعله سهل الاستخدام في أغلب برامج المحاكاة.
- استقرار عددي جيد: يوفر استقرارا في الحلول العددية، ويؤدي غالبا إلى تقارب سريع.
- كفاءة من حيث الموارد الحسابية: لا يتطلب وقتا حسابيا كبيرا، مما يجعله مناسباً للنماذج الهندسية المعقدة.
- دقة مقبولة: يعطي نتائج مناسبة في العديد من التطبيقات الصناعية، خصوصا في التدفقات الداخلية المنتظمة. [21]

محدوديات وعيوب النموذج:

ضعف الأداء في بعض أنواع الجريان: لا يقدم نتائج دقيقة في الحالات التالية:

- الجريانات الدوامية أو الدورانية.
- الجريانات ذات الانفصال القوي عن الأسطح.
- النفثات المحورية والهواء غير المحصور.
- الجريان المتطور في القنوات غير الدائرية.
- غير مناسب للجريانات الانتقالية: النموذج يفترض أن الجريان مضطرب بالكامل، لذلك لا يناسب الحالات التي ينتقل فيها الجريان من طبقي إلى مضطرب.
- معادلة epsilon مبسطة: تم اشتقاقها بناء على افتراضات تجريبية لا تغطي كل الظواهر الفيزيائية، مما قد يسبب أخطاء في بعض الحالات المعقدة. [21]

2.3.2 - التدفق الثابت (Steady Flow) :

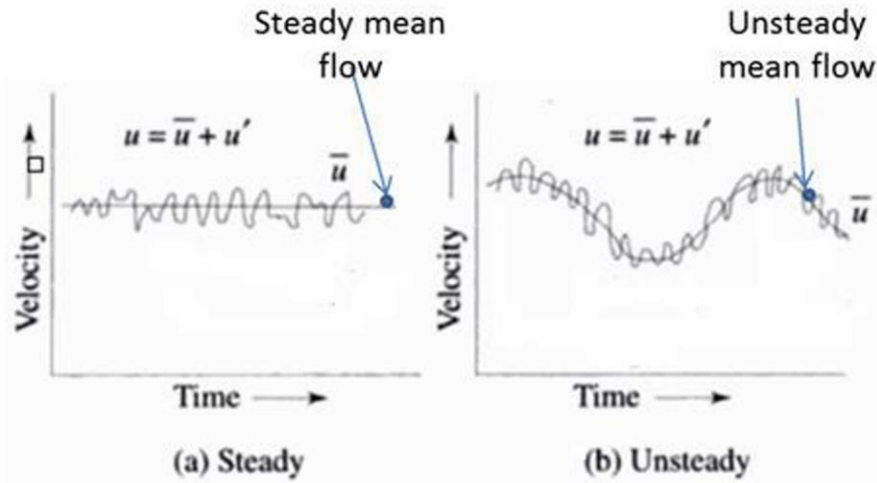
يشير التدفق الثابت إلى حالة تظل فيها خصائص المائع المتدفق، مثل السرعة والضغط ودرجة الحرارة، ثابتة عند أي نقطة معينة داخل مجال التدفق بمرور الوقت هو حالة مثالية. بمعنى آخر، لا تتغير هذه الخصائص مع تغير الزمن، هذا النوع من التدفق يعتبر أبسط أنواع التدفقات من الناحية التحليلية، حيث يمكن وصفه بمعادلات رياضية نسبية مستقلة عن الزمن، تكون خطوط التدفق في التدفق الثابت خطوطا مستقيمة أو منحنية، ولكنها لا تتقاطع ولا تتغير مع الزمن.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial w}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \dots\dots(24.2)$$

3.3.2 - التدفق غير الثابت (Unsteady Flow) :

على عكس التدفق الثابت، فإن التدفق غير الثابت يشير إلى حالة تتغير فيها خصائص المائع المتدفق مع الزمن (الشكل 11.2). هذا يعني أن السرعة والضغط ودرجة الحرارة وغيرها من الخصائص الفيزيائية تتغير من نقطة إلى أخرى وفي نفس النقطة مع تغير الزمن ويتطلب تحليل التدفق غير الثابت استخدام معادلات تفاضلية جزئية، مما يجعله أكثر تعقيدا من التدفق الثابت. [22]. [3].

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} \neq 0; \quad \text{and/or} \quad \frac{\partial p}{\partial t} \neq 0 \dots\dots(25.2).$$



الشكل 11.2: الجريان المتوسط الثابت وغير الثابتة. [23].

4.3.2 - التدفق الانضغاطي (Compressible Flow) :

يشير التدفق الانضغاطي إلى حركة السوائل، وعادة الغازات، حيث تؤثر التغيرات في الكثافة والضغط بشكل كبير على سلوك التدفق، في التدفق الانضغاطي، تلعب انضغاطية السائل دورا حيويا، مما يؤدي إلى تغييرات في الكثافة والسرعة

والضغط عبر مجال التدفق. يعد فهم التدفق الانضغاطي أمراً مهماً في مجالات مثل الديناميكا الهوائية ودفع الصواريخ والديناميكا الغازية. [18]

5.3.2 - التدفق غير الانضغاطي (Incompressible Flow):

يشير التدفق غير الانضغاطي عادةً إلى السوائل، حيث تظل الكثافة ثابتة بغض النظر عن التغيرات في الضغط. يُفترض هذا النوع من التدفق عادةً في الأنظمة ذات السرعات والضغوط المنخفضة، حيث يظل حجم السائل ثابتاً، مما يسمح بتحليل مبسط وحسابات سلوك التدفق والأنماط. [18]

4.2 - ديناميكا الموائع الحسابية (CFD): [24]

الديناميكا الموائع الحسابية (CFD) هي مجال علمي يختص بالنتبؤ بخصائص تدفقات الموائع، وانتقال الحرارة والكتلة، والتفاعلات الكيميائية، من خلال حل المعادلات التفاضلية الحاكمة لهذه العمليات باستخدام تقنيات الحوسبة العددية، تعتمد بشكل أساسي على الحل العددي لمعادلات نافير-ستوكس (Navier-Stokes) باستخدام أجهزة الحاسوب.

1.4.2 - مزايا استخدام ديناميكا الموائع الحسابية (CFD):

- دقة عالية في البيانات: توفر CFD قاعدة بيانات ذات دقة عالية لتشخيص وتحليل مجال التدفق بشكل شامل.
- محاكاة الظواهر المعقدة: تمكن CFD من محاكاة ظواهر فيزيائية يصعب تجربتها عملياً.
- تكلفة منخفضة: مقارنة بالتجارب العملية المكلفة، تعتبر محاكاة CFD أقل تكلفة وتسمح بتقليل الحاجة للموارد المالية واللوجستية.
- سرعة التنفيذ: توفر CFD سرعة أكبر في تنفيذ المحاكاة مقارنة بالاختبارات التجريبية التي تتطلب وقتاً طويلاً.
- التوازي: تتميز CFD بالقدرة على معالجة وتحليل العديد من الحالات في وقت واحد (التوازي)، مما يسرع من عملية الحصول على النتائج.
- إمكانية المحاكاة لمجموعة واسعة من السيناريوهات: يمكن لـ CFD التعامل مع سيناريوهات متعددة ومعقدة مثل تدفقات السوائل الغازية وتفاعلاتها، وهي أمور قد تكون صعبة في التجارب العملية.
- دعم الدراسات التصميمية والتحسين: تُستخدم CFD بشكل واسع في دراسات تصميم المنتجات وتحسين الأداء من خلال محاكاة الظروف المختلفة قبل تنفيذ التجارب الفعلية.
- تكمل للتحليل النظري والتجريبية: تقدم CFD بيانات تكميلية تعزز الفهم النظري والتجريبية، مما يساعد في تحسين القرارات التقنية والهندسية.

2.4.2 - المعادلات الحاكمة لحركة السوائل :

1.2.4.2 - معادلة الاستمرارية (Continuity Equation) :

التي تعبر عن مبدأ حفظ الكتلة (Conservation of Mass).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \dots\dots(26.2)$$

2.2.4.2 . معادلة الزخم (Momentum Equation) :

التي تعيد بأن التغيير في الزخم يعادل مجموع القوى المؤثرة على السائل وفقاً للقانون الثاني لنيوتن (Newton's Second Law).

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) \vec{V} \right] = -\vec{\nabla} p + \mu \Delta \vec{V} + \frac{1}{3} \mu \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{V}) + \rho \vec{f} \dots\dots(27.2)$$

3.2.4.2 - معادلة الطاقة (Energy Equation) :

التي تقتضي مبدأ حفظ الطاقة (Conservation of Energy) طبقاً للقانون الأول للديناميكا الحرارية (First Law of Thermodynamics)

$$\rho \frac{DE}{Dt} = \rho \left[\frac{\partial E}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla}) E \right] = \vec{\nabla} \cdot (k \vec{\nabla} T) - p \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \Phi \dots\dots(28.2)$$

$$\Phi = \mu \left[2 \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial z} \right)^2 \right\} + \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] - \frac{2}{3} \mu (\vec{\nabla} \cdot \vec{V})^2 \dots\dots(29.2)$$

- بالنسبة للمشاكل التي تشمل انتقال الحرارة (Heat Transfer) ، فإن معادلة الطاقة تساعدنا في تحديد درجة حرارة السائل (Fluid Temperature)

4.2.4.2 - معادلة الحالة (Equation of State) :

$$F(\rho, T, p) = 0 \dots\dots\dots(30.2)$$

5.2.4.2 - الطاقة الداخلية (Internal Energy) :

$$E = C_v T \dots\dots\dots(31.2)$$

6.2.4.2 - الأنثاليبي (Enthalpy) :

$$H = C_p T \dots\dots\dots(32.2)$$

7.2.4.2 - الغاز المثالي (Ideal Gas) :

$$\frac{p}{\rho} = rT \dots\dots\dots(33.2)$$

8.2.4.2 - معادلات نافير-ستوكس غير القابلة للانضغاط (Incompressible Navier-) :

(Stokes Equations)

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \dots\dots(34.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \dots\dots\dots(35.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \dots\dots\dots(36.2)$$

$$\rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \dots\dots\dots(37.2)$$

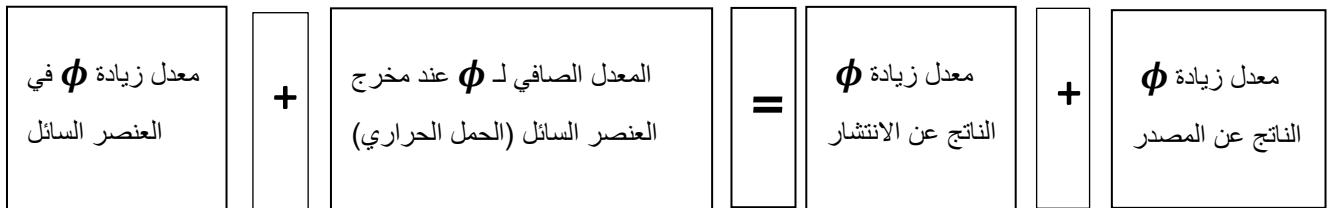
$$\rho c_p \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \Phi \dots\dots(38.2)$$

9.2.4.2 - المعادلة العامة للنقل (General Transport Equation)

باستخدام متغير عام Φ ، يمكن كتابة الشكل المحافظ لجميع معادلات الديناميكا الموائع الحسابية (CFD) بشكل مفيد على

النحو التالي:

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \vec{V} \cdot (\rho\vec{V}\phi) = \vec{V} \cdot (\Gamma\vec{V}\phi) + S_\phi \dots\dots\dots(39.2)$$



$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{V}\phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad} \phi) + S_\phi \dots\dots\dots(40.2)$$

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \vec{V} \cdot (\rho\vec{V}\phi) = \vec{V} \cdot (\Gamma\vec{V}\phi) + S_\phi \dots\dots\dots(41.2)$$

Flow Eqs	Continuity	$\phi = 1$	$\Gamma = 0$	$S_\phi = 0$
	Momentum	$\phi = \vec{V}$	$\Gamma = \mu$	$S_\phi = -\vec{\nabla}p + \rho\vec{g}$
	Energy	$\phi = C_p T$	$\Gamma = k/C_p$	$S_\phi = \Phi + \dot{q}$
+	Turbulence	Concentration	Combustion	Other eqts

5.2 - التفاعلات بين الهيكل والمائع (Structure-Fluid Interactions) :

مفهوم التفاعل بين الموائع والهيكل (Fluid-Structure Interaction - FSI) يشير إلى التفاعل الديناميكي بين السوائل والهيكل الصلبة، حيث يتعرض الهيكل المرن لضغوط من مائع متدفق تؤدي إلى تشوهه، هذا التشوه بدوره يغير من نمط تدفق المائع، مما يؤدي إلى تأثيرات متبادلة مستمرة بين الاثنين. على سبيل المثال، يؤدي تدفق المائع سواء داخل أو خارج الأنابيب أو الأوعية إلى ممارسة ضغط ثابت أو متذبذب على السطح المبلل للأنابيب أو الأوعية، مما قد يشوهها أو يجعلها تهتز. مثال آخر هو تدفق الهواء حول جناح الطائرة الذي يؤدي إلى تشوه الجناح، ومع تشوه الجناح يتغير نمط الهواء حوله. بشكل عام، يغطي مفهوم التفاعل بين الموائع والهيكل عدة مجالات، منها:

➤ المرونة الهوائية (Aero-elasticity).

➤ المرونة المائية (Hydro-elasticity).

➤ الاهتزاز الناتج عن التدفق (Flow-induced vibration).

➤ التشوه الحراري (Thermal deformation).

تعتبر أوعية الضغط وأنظمة الأنابيب هيكل أساسية في صناعات الطاقة والمعالجة، حيث تظل ثابتة بشكل عام باستثناء بعض الحركات الاهتزازية أو التشوهات الحرارية، على عكس ما يحدث في المرونة الهوائية، عادة ما تكون سرعات تدفق السوائل في هذه الأنظمة أقل بكثير مما هو موجود في التطبيقات الهوائية.

تتضمن التحديات المتعلقة بتفاعل الموائع والهيكل في أوعية الضغط وأنظمة الأنابيب مجموعة من آليات الفشل الميكانيكي، هذه الآليات تشمل الهياكل الثابتة التي تتعرض لمائع متدفق، أو الهياكل المتحركة المغمورة في سائل متدفق أو ساكنة، بالإضافة إلى الأنابيب أو الأوعية الثابتة التي تحتوي على سائل باردة أو ساخنة، من بين المشكلات الشائعة التي قد تظهر: الاهتزاز الناتج عن التدفق (Flow-induced vibration)، والتشوه الحراري (Thermal deformation)، والإجهاد (Fatigue).

بوجه عام، يتم تصنيف نظام التفاعل بين الموائع والهياكل على أنه إما نظام مرتبط ضعيفا (Weakly coupled) أو نظام مرتبط بقوة (Strongly coupled). [25]

أنظمة مرتبطة ضعيفا (Weakly Coupled Systems):

إذا كان الهيكل في مجال التدفق أو يحتوي على مائع متدفق يتشوه قليلا أو يهتز بسعة صغيرة، فإنه سيؤثر بشكل طفيف على مجال التدفق بسبب الضغط النسبي المنخفض. حتى لو تم تحفيز ضغوط حرارية كبيرة في المادة الصلبة بسبب التدرجات الحرارية في مجال التدفق، فقد لا يتأثر مجال التدفق بشكل كبير إذا كان التشوه الناتج في المادة الصلبة صغيرا جدا. تشمل الأمثلة النموذجية لأنظمة التفاعل بين الموائع والهياكل المرتبطة ضعيفا التي تواجهها، أوعية الضغط والأنابيب المتشوه الحراري الصغير أو اهتزاز السعة المنخفضة للأنابيب التي تنقل مائعا. في أي من هذه الأنظمة، يُفترض أن القوة المؤثرة على المائع بسبب الحركة الهيكلية يمكن أن تضاف خطيا إلى دالة القوة الأصلية في المائع. [25]

أنظمة مرتبطة بقوة (Strongly Coupled Systems):

من ناحية أخرى، تسمى الأنظمة المرتبطة بقوة (Strongly coupled systems) إذا لم يكن بالإمكان إهمال تغيير مجال التدفق بسبب التشوه الكبير أو الاهتزاز العالي للهيكل، في مثل هذه الأنظمة، التي يؤدي فيها التشوه الكبير أو الإزاحة للهيكل إلى تغيير كبير في مجال التدفق الأصلي، لا يمكن الجمع بين مجالات التدفق المتغيرة والأصلية خطيا. من الأمثلة النموذجية لنظام التفاعل بين الموائع والهياكل المرتبطة بقوة في مجال أوعية الضغط والأنابيب الاهتزاز الناجم عن الدوامات (Vortex-induced vibration) وعدم استقرار الموائع المرنة (Fluid-elastic instability) للأنابيب المبادلات الحرارية. [25]

1.5.2 - الصياغة الرياضية لتفاعل المائع-الهيكل (Mathematical formulation of FSI)

1.1.5.2 - مجالات المائع (Fluid Domains):

معادلة حفظ الكتلة والزخم والطاقة اللحظية في إطار ثابت تحكم مجالات التدفق داخل أو خارج الأنبوب سواء كانت طبقية أو مضطربة يمكن أن تُعطى كمايلي :

معادلة الاستمرارية (Continuity equation):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \dots\dots\dots(42.2)$$

معادلات الزخم (Momentum equations):

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = \nabla \cdot (-p \delta + \mu (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)) + \mathbf{S}_M \dots\dots(43.2)$$

معادلة الطاقة (Energy equation) :

$$\frac{\partial \rho h_{tot}}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \dots\dots\dots(44.2)$$

حيث :

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2, \quad h = h(p, T) \dots\dots\dots(45.2)$$

حيث تمثل ρ الكثافة، و t الزمن، و U السرعة، و p الضغط، و δ دالة كرونكير دلتا، و μ اللزوجة، و S مصطلح المصدر، و h الإنتالبي، و λ الموصلية الحرارية، و T درجة حرارة المائع، بالإضافة إلى ذلك، يشير المصطلح S_M إلى مجموع القوى السطحية المؤثرة على المائع. عامل \otimes هو حاصل ضرب تنسوري و $(\nabla \mathbf{U})^T$ هو تبديل مصفوفة $\nabla \mathbf{U}$ بالنظر إلى نظام الإحداثيات الديكارتية (x, y, z) حيث i و j و k هي متجهات الوحدة في اتجاهات الإحداثيات الثلاثة، يتم تعريف ∇ على النحو التالي:

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right] \dots\dots\dots(46.2)$$

بالنسبة لدالة عددية عامة $\phi(x, y, z)$ ، يتم تعريف تدرج ϕ على النحو التالي:

$$\nabla \phi = \left[\mathbf{i} \frac{\partial}{\partial x} + \mathbf{j} \frac{\partial}{\partial y} + \mathbf{k} \frac{\partial}{\partial z} \right] \phi \dots\dots\dots(47.2)$$

من أجل شعاع الدالة :

$$\mathbf{U}(x, y, z) = U_x \mathbf{i} + U_y \mathbf{j} + U_z \mathbf{k} \dots\dots\dots(48.2)$$

$$\mathbf{U}(x, y, z) = \begin{bmatrix} U_x \\ U_y \\ U_z \end{bmatrix} \dots\dots\dots(49.2)$$

حيث :

المكونات الديكارتية لتدرج U تُعبر عنها كما يلي :

$$[\nabla \mathbf{U}] = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_x}{\partial x} & \frac{\partial U_x}{\partial y} & \frac{\partial U_x}{\partial z} \\ \frac{\partial U_y}{\partial x} & \frac{\partial U_y}{\partial y} & \frac{\partial U_y}{\partial z} \\ \frac{\partial U_z}{\partial x} & \frac{\partial U_z}{\partial y} & \frac{\partial U_z}{\partial z} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(50.2)$$

و تتابع U يُعرّف على أنه :

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = \frac{\partial U_x}{\partial x} + \frac{\partial U_y}{\partial y} + \frac{\partial U_z}{\partial z} \dots\dots\dots(51.2)$$

حاصل الضرب التتسوري لمتجهين، U و W ، يُعرّف على أنه :

$$U \otimes W = \begin{bmatrix} U_x W_x & U_x W_y & U_x W_z \\ U_y W_x & U_y W_y & U_y W_z \\ U_z W_x & U_z W_y & U_z W_z \end{bmatrix} \dots(52.2)$$

يتم تشكيل تبديل مصفوفة عن طريق تحويل جميع صفوف مصفوفة معينة إلى أعمدة والعكس صحيح. وبالتالي، يتم كتابة

تبديل $(\nabla U)^T$ للمصفوفة ∇U على النحو التالي:

$$(\nabla U)^T = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_x}{\partial x} & \frac{\partial U_y}{\partial x} & \frac{\partial U_z}{\partial x} \\ \frac{\partial U_x}{\partial y} & \frac{\partial U_y}{\partial y} & \frac{\partial U_z}{\partial y} \\ \frac{\partial U_x}{\partial z} & \frac{\partial U_y}{\partial z} & \frac{\partial U_z}{\partial z} \end{bmatrix} \dots(53.2)$$

دالة كرونكر دلتا، أي مصفوفة الوحدة، تُعرّف على النحو التالي:

$$\delta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots(54.2)$$

2.1.5.2 - مجال الصلب (Solid Domain) :

أ- معادلة توصيل الحرارة (Heat conduction equation) :

الطريقة الوحيدة لنقل الحرارة في مجال الصلب لجدار الأنبوب هي التوصيل المعبر عنها كما يلي:

$$\frac{\partial \rho c_p T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \dots(55.2)$$

حيث ρ ، c_p ، λ و S_E تمثل على التوالي الكثافة، السعة الحرارية النوعية، الموصلية الحرارية، وتوليد الحرارة في الصلب. [25]

ب- معادلة ديناميكا الهيكل (Equation of structural dynamics) :

$$M \ddot{x} + C \dot{x} + Kx = F(t) \dots(56.2)$$

حيث x تمثل سعة اهتزاز النقطة، و M ، C ، K و F تمثل الكتلة، ومعامل التخميد، وثابت النابض، والقوى الخارجية المطبقة، على التوالي.

بالنسبة لنظام هيكلي ممتد يتكون من كتل متصلة مثل العوارض، والصفائح، والأنابيب، والقضبان، والأغطية، إلخ، والتي تخضع لمجموعة من القوى الخارجية، يمكن وصف معادلة الحركة بواسطة:

$$[M]\{\ddot{X}\} + [C]\{\dot{X}\} + [K]\{X\} = \{F\} \dots\dots(57.2)$$

حيث $[M]$ ، $[C]$ و $[K]$ هي مصفوفات الكتلة، التخميد، والصلابة على التوالي، و $\{X\}$ هو متجه الإحداثيات المعممة، و $\{F\}$ هو متجه القوى الخارجية. [25]

هناك 3 اعتبارات أساسية في المرونة :

➤ التوازن (Equilibrium):

$$\frac{\partial \sigma_{mn}}{\partial y_m} + f_n = 0 \dots\dots\dots(58.2)$$

➤ الإجهاد - الإزاحة (Strain - Displacement):

$$\varepsilon_{mn} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_m}{\partial y_n} + \frac{\partial u_n}{\partial y_m} \right) \dots\dots\dots(59.2)$$

➤ الإجهاد-الإجهاد الهندسي (Stress - Strain):

$$\sigma_{mn} = E_{mnpq} \varepsilon_{pq} \dots\dots\dots(60.2)$$

E : مصفوفة المرونة.

$mnpq$: عدد المكونات التي يبدو أن هذا الموتر يحتوي عليها. [26]

2.5.2 - تحليل مشاكل تفاعل المائع-الهيكل (Analysis Fluid-Structure Interaction)

: (Problems

تعتبر دراسة تفاعل المائع والهيكل من أكثر التحديات التي تواجه الباحثين والمهندسين. إن التعقيد يكمن في الطبيعة المترابطة والمتبادلة للتأثير بين المائع والسطح الصلب، حيث يؤثر كل منهما على الآخر بشكل كبير، ونتيجة لهذا الترابط المعقد، فإن المعادلات الحاكمة لهذه الظاهرة تكون غير خطية ومعقدة للغاية، مما يجعل الحل التحليلي الدقيق لهذه المشكلة أمراً شبه مستحيل.

حتى الآن، لم يتم التوصل إلى حل شامل وكامل لمعادلة تفاعل المائع والهيكل بشكل عام، وبالتالي، فإن الباحثين يلجأون إلى تقسيم هذه المشكلة المعقدة إلى مشكلتين فرعيتين، وهما دراسة سلوك المائع بشكل منفصل ودراسة سلوك الهيكل بشكل منفصل، أو اللجوء إلى تحليلها من خلال التجارب أو المحاكاة العددية. [25]

6.2 - خاتمة :

في نهاية هذا الفصل، تم تناول دراسة رياضية شاملة لديناميكا الموائع الحسابية، حيث تم التطرق إلى مفهوم انتقال الحرارة وعلاقته بالديناميكا الحرارية، مع توضيح الأنواع المختلفة لآليات انتقال الحرارة، بما في ذلك الحمل والتوصيل والإشعاع. علاوة على ذلك، تم تسليط الضوء على أنواع تدفقات الموائع، مع توضيح كيفية تأثيرها على أداء المبادلات الحرارية، وتم تقديم طريقة ديناميكا الموائع الحسابية كأداة قوية لتحليل سلوك السوائل وتوقع النتائج بدقة عالية، كما تم الإهتمام بالتفاعل بين المائع والهيك، بالإضافة إلى التفاعل بين الهياكل نفسها، مما يبرز أهمية فهم هذه الديناميكيات في تصميم الأنظمة الهندسية. لقد قمنا بتقديم العلاقات الرياضية الأساسية التي تدعم كل من هذه المفاهيم، مما يوفر إطاراً رياضياً متيناً لفهم الظواهر المعقدة المرتبطة بديناميكا الموائع وانتقال الحرارة. إن هذه الدراسة ليست فقط أساسية لفهم المبادلات الحرارية ولكن أيضاً تفتح آفاقاً جديدة للبحث والتطوير في مجال الهندسة الحرارية.

الفصل الثالث:

تصميم النموذج الهندسي للمبادل

الحراري باستخدام SolidWorks

Geometrical Modeling of the

heat exchanger using

SolidWorks

1.3- مقدمة :

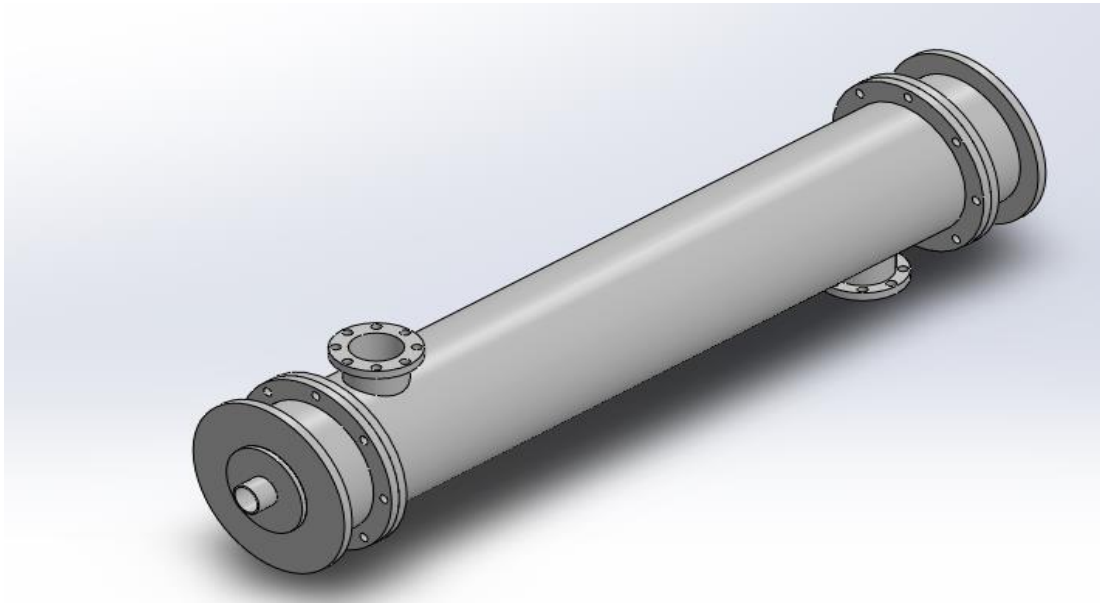
يعد النموذج الهندسي أداة أساسية في عملية التصميم الهندسي، حيث يساهم بشكل فعال في تحويل الأفكار النظرية إلى تمثيل بصري واقعي ودقيق، إن إنشاء نموذج هندسي للمبادل الحراري، يمكّن المصممين والمهندسين من دراسة تفاصيل التركيب الداخلي والخارجي للجهاز، وتحليل أدائه قبل مرحلة التصنيع الفعلي.

يساعد النموذج ثلاثي الأبعاد على اكتشاف العيوب التصميمية المحتملة، وتحسين الكفاءة، وتقليل التكاليف من خلال تجنب الأخطاء المكلفة في مرحلة الإنتاج، كما يوفر قاعدة متينة لإجراء المحاكاة وتحليل سلوك النظام تحت ظروف تشغيل مختلفة، مما يعزز من دقة النتائج ويوجه عملية اتخاذ القرار الهندسي نحو أفضل الحلول الممكنة، لذلك، يمثل التصميم الهندسي خطوة محورية لنجاح أي مشروع تطبيقي أو بحث أكاديمي في مجال الهندسة الميكانيكية.

2.3- أهداف التصميم والقيود Design objectives and constraints :

يهدف هذا المشروع إلى تصميم نموذج هندسي لمبادل حراري فعال باستخدام برنامج SolidWorks، بحيث يحقق وظيفتين أساسيتين: تبريد سائل التبريد إلى الدرجة المطلوبة، وفي الوقت نفسه تسخين الغاز إلى درجة حرارة ملائمة لظروف التشغيل. لتحقيق هذه الأهداف، يجب أن يراعي التصميم عدة قيود أساسية، أبرزها ضرورة التوفيق بين الحجم المناسب ليتلائم مع النظام الكلي، والشكل الهندسي الذي يضمن أعلى كفاءة ممكنة في عملية انتقال الحرارة.

كما ينبغي أن يتمتع النموذج بالمتانة والقدرة على مقاومة التغيرات الحرارية والميكانيكية أثناء التشغيل، مع المحافظة على سهولة التصنيع والصيانة، تتطلب هذه المعايير اختيار مواد مناسبة، وتحديد أبعاد دقيقة تساهم في تحسين الأداء العام للمبادل الحراري، مع التقليل من الفوائد الطاقوية وضمان استمرارية العمل في مختلف الظروف التشغيلية.



الشكل 1.3: الرسم المنظوري للمبادل الحراري المصمم.

3.3- لمحة عامة عن برنامج SolidWorks ودوره في التصميم الهندسي :

يعدّ برنامج SolidWorks من أقوى وأشهر برامج التصميم الهندسي الثلاثي الأبعاد (3D CAD)، ويستخدم بشكل واسع في مجالات متعددة مثل الميكانيك، الطيران، الطاقة، الهندسة الطبية والصناعات التحويلية. يتميز البرنامج بقدرته الفائقة على تصميم الأجزاء (Parts) والمنتجات المعقدة، وتجميعها (Assemblies)، بالإضافة إلى إعداد رسومات هندسية تفصيلية (Drawings) وفقا للمعايير العالمية.

يوفر SolidWorks بيئة عمل متكاملة تجمع بين التصميم، المحاكاة، التحليل، وإعداد التصنيع، مما يتيح للمهندسين تقييم أداء النماذج قبل تنفيذها الفعلي، وبالتالي تقليل التكاليف والأخطاء وتحسين جودة المنتج النهائي. وفي إطار هذا المشروع، سيتم الاعتماد على برنامج SolidWorks لتصميم نموذج هندسي دقيق لمبادل حراري، يستخدم لتبريد سائل التبريد وتسخين الغاز في آن واحد، مع مراعاة جميع المتطلبات التقنية، القيود التصميمية مثل الحجم، الشكل، الكفاءة الحرارية، ومقاومة التغيرات البيئية، مما يضمن أداء مثاليا للنظام الحراري المستهدف.



الشكل 2.3 : الرمز الرسمي لـ SOLIDWORKS.

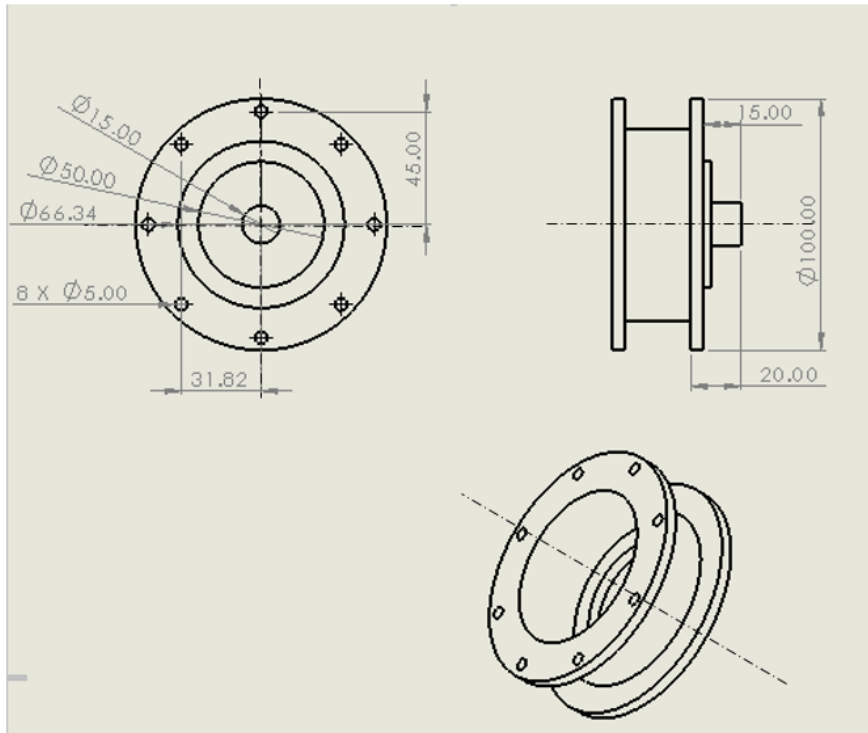
4.3- وصف لأجزاء المبادل الحراري Heat Exchanger Geometry Description :

1.4.3- الغطاء الثابت Stationary Head :

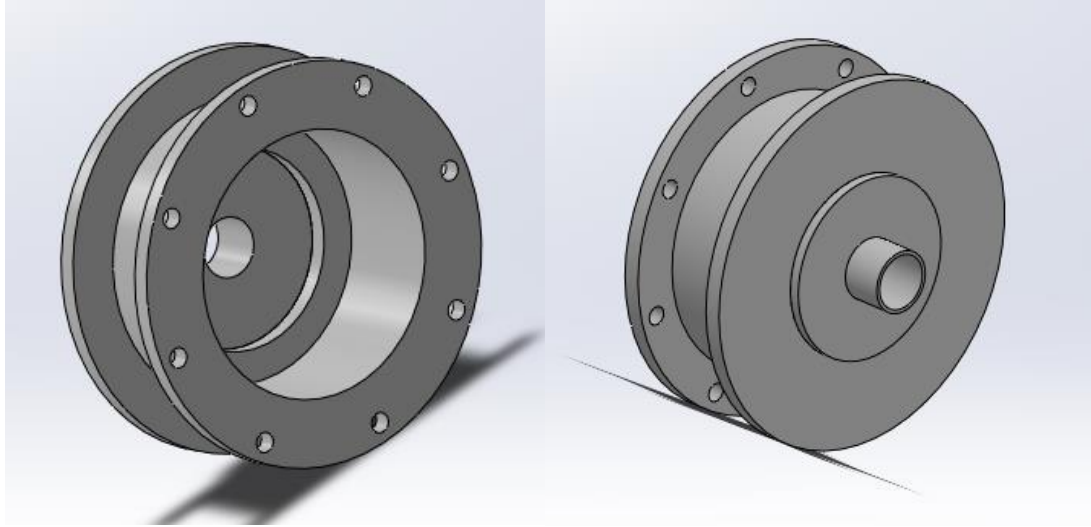
يعد الغطاء الثابت (Stationary Head) (الشكل 3.3 و 4.3) أحد الأجزاء الأساسية في المبادل الحراري من نوع القشرة والأنابيب (shell and tube)، حيث يتواجد على طرفي حزمة الأنابيب، يتمثل دوره الرئيسي في توجيه المائع العامل إلى داخل الأنابيب أو تجميعه عند الخروج منها، مما يضمن توزيعاً منتظماً للسريان داخل النظام. في التصميم الحالي، يستخدم الغطاء الثابت كمدخل للغاز البارد، حيث يدخل الغاز عبر أنبوب بقطر 15 ملمتر (mm) يتصل مباشرة بالغطاء الثابت، مما يسمح بتوزيعه بكفاءة داخل الأنابيب.

على الجانب الآخر من المبادل، يعمل غطاء ثابت آخر كمخرج للغاز المسخن بعد مروره عبر حزمة الأنابيب واكتسابه للطاقة الحرارية المطلوبة.

تم تصميم هذا الجزء ليكون قادراً على مقاومة الضغوط الداخلية والتغيرات الحرارية التي قد تحدث أثناء التشغيل، مع الحفاظ على كفاءة التبادل الحراري ومنع أي تسرب محتمل للغاز.



الشكل 3.3: الإسقاطات مع توضيح الأبعاد للغطاء الثابت.



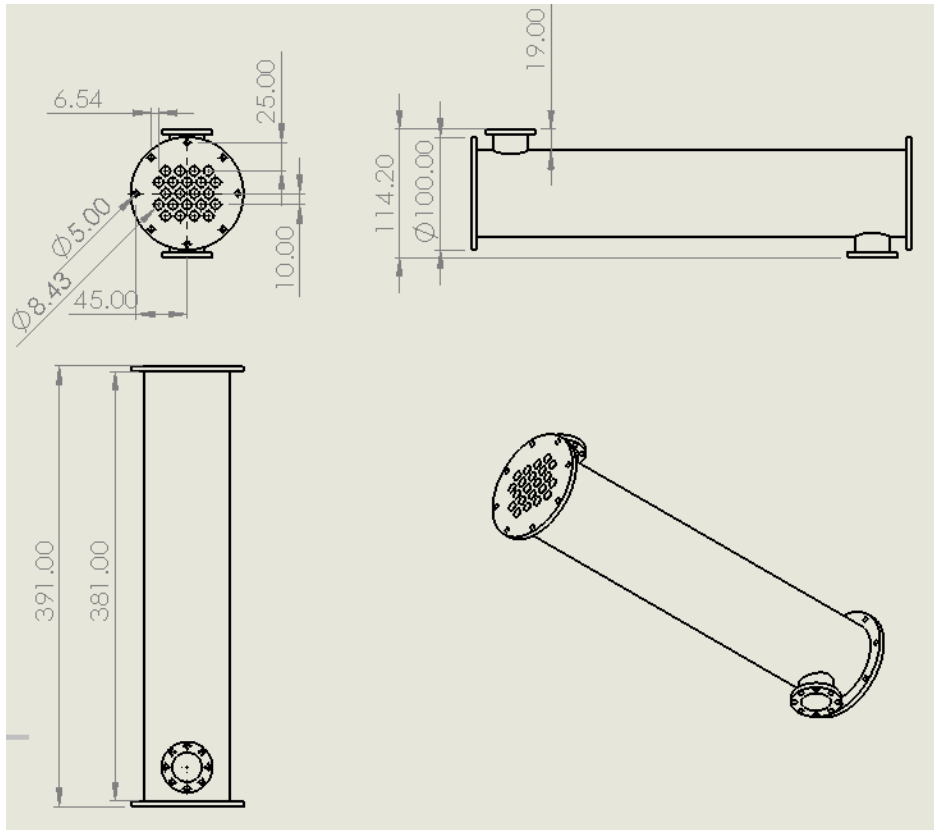
الشكل 4.3: الرسم المنظوري للغطاء الثابت.

2.4.3 - القشرة Shell :

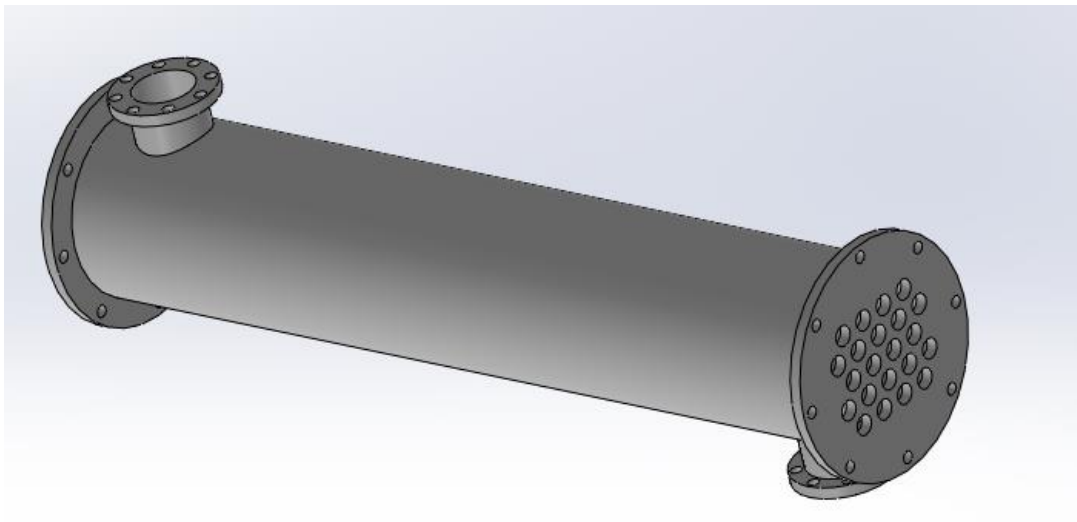
تعدّ القشرة (Shell) أحد الأجزاء الرئيسية في المبادل الحراري، حيث تمثل الغلاف الخارجي الذي يركب داخله حزمة أنابيب (الشكل 5.3 و 6.3)، وهي مصممة للسماح بمرور أحد السوائل (عادة السائل ذو درجة الحرارة المختلفة عن السائل داخل الأنابيب) من خلاله بطريقة عرضية لضمان عملية التبادل الحراري بكفاءة عالية. في هذا التصميم، تحتوي القشرة على أنبوبين بقطر 26.25 مم، أحدهما مخصص لدخول سائل التبريد الساخن والآخر لخروجه بعد عملية التبريد.

كما تتميز القشرة بوجود نقاط تثبيت محكمة للأنابيب على الأطراف، مما يضمن ثباتها أثناء التشغيل ومقاومتها للتغيرات الناتجة عن الفروقات الحرارية والضغط.

تلعب القشرة دوراً مهماً في توجيه السائل حول الأنابيب بشكل منتظم، مما يعزز من كفاءة انتقال الحرارة، ويضمن حماية مكونات المبادل من الإجهادات الميكانيكية الناتجة عن التشغيل المستمر.



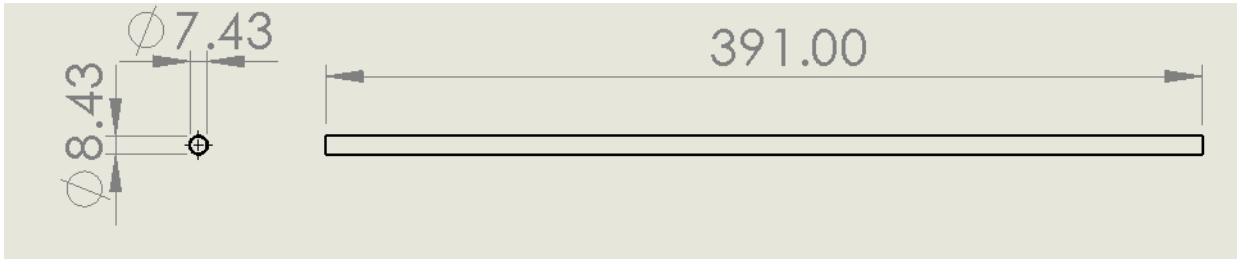
الشكل 5.3: الإسقاطات مع توضيح الأبعاد للقشرة.



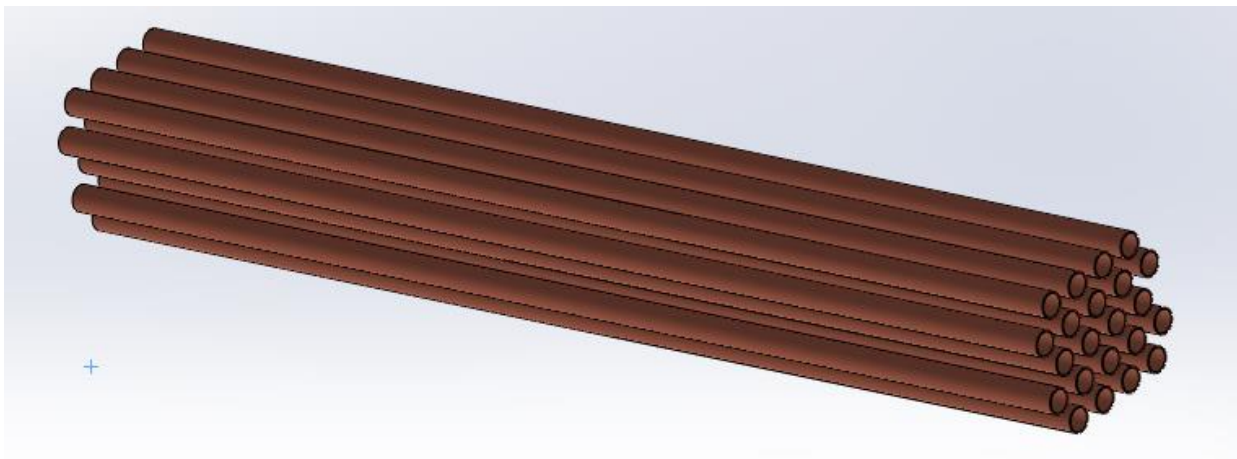
الشكل 6.3: الرسم المنظوري للقشرة.

3.4.3 - الأنابيب Tubes :

تعد الأنابيب من الأجزاء الحيوية في المبادل الحراري، حيث يتم تمرير الغاز البارد عبرها ليخضع لعملية التسخين بواسطة التبادل الحراري مع السائل الساخن الموجود في القشرة. في هذا النظام، تم تصميم الأنابيب بحيث تكون قادرة على تحمل الضغط والحرارة العالية أثناء عملية التبادل الحراري، مما يضمن فعاليتها في نقل الغاز البارد داخل المبادل. عدد الأنابيب المستخدمة في هذا التصميم 22 أنبوب بقطر داخلي يساوي 7.43 مم و خارجي يساوي 8.84 مم، مما يسمح بمرور الغاز البارد بشكل منتظم عبرها. يتعرض الغاز البارد داخل الأنابيب لحرارة السائل الساخن المار عبر القشرة المحيطة بالأنابيب، مما يؤدي إلى رفع درجة حرارة الغاز إلى المستوى المطلوب. تتم عملية تثبيت الأنابيب داخل القشرة بطرق متينة بواسطة حوامل تضمن عدم تحركها أو تعرضها لأي اهتزازات قد تؤثر على فعالية التبادل الحراري. كما تساهم هذه الأنابيب في ضمان استمرارية وتوزيع تدفق الغاز البارد بشكل منتظم، مما يساعد في تحسين كفاءة العملية الحرارية بشكل عام.



الشكل 7.3: المساقط مع توضيح الأبعاد للأنابيب.



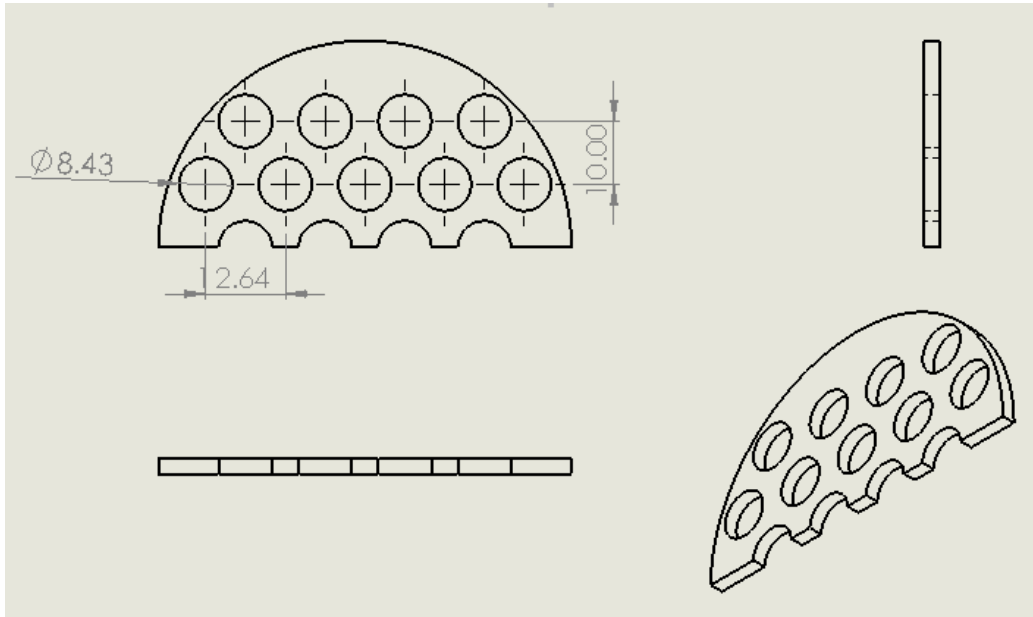
الشكل 8.3 : الرسم المنظوري للأنابيب.

4.4.3 - الحواجز (Baffles) :

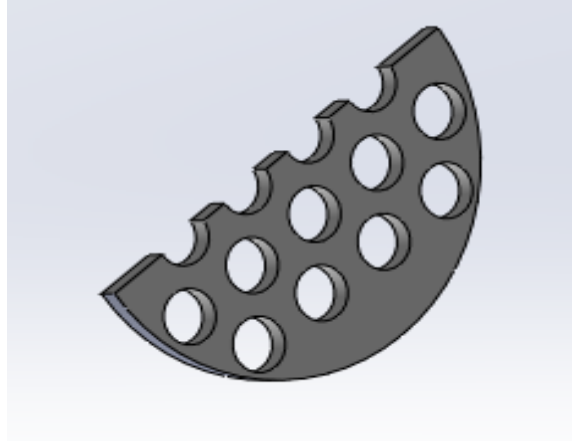
تعد الحواجز من العناصر الأساسية داخل المبادل الحراري (الشكل 9.3 و 10.3)، حيث تلعب دورا مهما في تحسين فعالية التبادل الحراري بين السوائل، يتمثل دورها الرئيسي في توجيه مسار السائل داخل الغلاف (Shell) بحيث لا يمر بشكل مستقيم، بل يجبر على اتخاذ مسار متعرج عبر الأنابيب، هذا التغيير في اتجاه السريان يزيد من اضطراب السائل، مما يحسن انتقال الحرارة ويزيد من كفاءة المبادل.

في النموذج المصمم، تم توزيع الحواجز بشكل مدروس على طول الغلاف لضمان تدفق منتظم وتحقيق أعلى مردود حراري، كما تساعد الحواجز أيضا في دعم الأنابيب داخليا، مما يقلل من احتمالية اهتزازها أو انحنائها تحت تأثير الضغط أو تغيرات درجة الحرارة.

اختيار عدد الحواجز، شكلها، والمسافة بينها من المعايير المهمة التي تؤثر بشكل مباشر على أداء المبادل الحراري، وقد تم ضبط هذه المعطيات بعناية خلال عملية التصميم لضمان أفضل توازن بين الأداء والكفاءة.



الشكل 9.3: الإسقاطات مع توضيح الأبعاد للحواجز.



الشكل 10.3: الرسم المنظوري للحواجز.

5.3 - خاتمة :

في ختام هذا الفصل، قمنا بتصميم النموذج الهندسي للمبادل الحراري باستخدام برنامج SolidWorks، مع مراعاة جميع المتطلبات التقنية والقيود المفروضة من حيث الحجم، الشكل، وكفاءة الأداء الحراري. تم التركيز على دقة الأبعاد وتوزيع المكونات بما يضمن تحقيق أفضل فعالية ممكنة لعمليات التبادل الحراري بين سائل التبريد والغاز. هذا النموذج المصمم سيمثل قاعدة أساسية للفصلين القادمين، حيث سيتم استخدامه في عمليات المحاكاة لتحليل أدائه تحت ظروف تشغيل مختلفة، وتقييم مدى تحقيقه للأهداف المرجوة، ستمكنا هذه المحاكاة من تحسين التصميم مستقبلاً وضمان جاهزيته للتطبيقات العملية.

الفصل الرابع:

محاكاة ديناميكا الموائع الحاسوبية (CFD)
للمبادل الحراري المصمم

**CFD Simulation of the
Designed Heat Exchanger**

1.4 - مقدمة :

يهدف هذا العمل إلى تقييم أداء النموذج الهندسي للمبادل الحراري المصمم، من خلال إجراء محاكاة ديناميكية للموائع الحسابية (CFD)، وذلك لتحقيق هدف مزدوج يتمثل في تبريد سائل التبريد الخارج من المحرك عند درجة حرارة تشغيل المروحة المقدره بحوالي 95 درجة مئوية إلى درجة تشغيل مثلى تبلغ 85 درجة مئوية، وفي الوقت نفسه تسخين غاز البترول المسال (LPG) بعد عملية التمدد إلى درجة حرارة تشغيل مناسبة تقارب 38 درجة مئوية. يعتمد هذا التبادل الحراري المتكامل على استغلال الفرق الحراري بين السائل الساخن والغاز البارد بهدف تحسين الكفاءة الحرارية للنظام ككل وضمان شروط تشغيل مثالية لكل من المحرك ووحدة تسيير الغاز. ستمكنا المحاكاة العددية من دراسة توزيع درجات الحرارة داخل المبادل، مما يساعد في التحقق من فعالية التصميم الهندسي واكتشاف إمكانات تحسينه مستقبلاً.

2.4 - البرنامج المستخدم في المحاكاة The software used in simulation :

يعد ANSYS Fluent من أقوى وأشهر البرامج المتخصصة في مجال المحاكاة العددية للموائع CFD (Computational Fluid Dynamics) وانتقال الحرارة. يستخدم البرنامج لحل وتحليل معادلات الجريان والحرارة والانتقال الكتلي والظواهر الفيزيائية المرتبطة بها باستخدام تقنيات عددية متطورة.

يتميز ANSYS Fluent بقدرته العالية على التعامل مع نماذج فيزيائية معقدة مثل الجريان المضطرب، تغير الطور، انتقال الحرارة بالتوصيل والحمل والإشعاع، تفاعلات كيميائية، تدفق الجسيمات، وغيرها. كما يتيح البرنامج للمستخدمين تصميم شبكات حسابية دقيقة (Mesh)، تعريف خصائص المواد، تحديد الشروط الحدية، وضبط الإعدادات الخاصة بالمحلل العددي (Solver) بطريقة مرنة ودقيقة.

يستخدم ANSYS Fluent في مجموعة واسعة من التطبيقات الهندسية، مثل تصميم أنظمة التبريد، محاكاة أداء المبادلات الحرارية، تحسين أنظمة التهوية، تصميم المضخات والتوربينات، بالإضافة إلى تطبيقات صناعية أخرى في مجالات الطاقة، الطيران، السيارات، والصناعات الكيميائية.

في هذا العمل، تم الاعتماد على ANSYS Fluent لمحاكاة الأداء الحراري والهيدروديناميكي للمبادل الحراري المصمم، بهدف دراسة توزيع درجات الحرارة، سرعة الجريان، وضغط الموائع الداخلة والخارجة، مما يساعد على تقييم كفاءة التصميم ومقارنته بالمعايير التشغيلية المطلوبة.

3.4 - مراحل محاكاة ديناميكا الموائع الحسابية (CFD) باستخدام Ansys Fluent :

1.3.4 - إعداد الشكل الهندسي (Geometry) :

في هذه المرحلة الأولى من عملية المحاكاة، تم استيراد النموذج الهندسي للمبادل الحراري الذي تم تصميمه في الفصل الثالث باستخدام برنامج SolidWorks إلى بيئة العمل الخاصة بـ ANSYS Fluent عبر واجهة DesignModeler (الشكل 1.4).

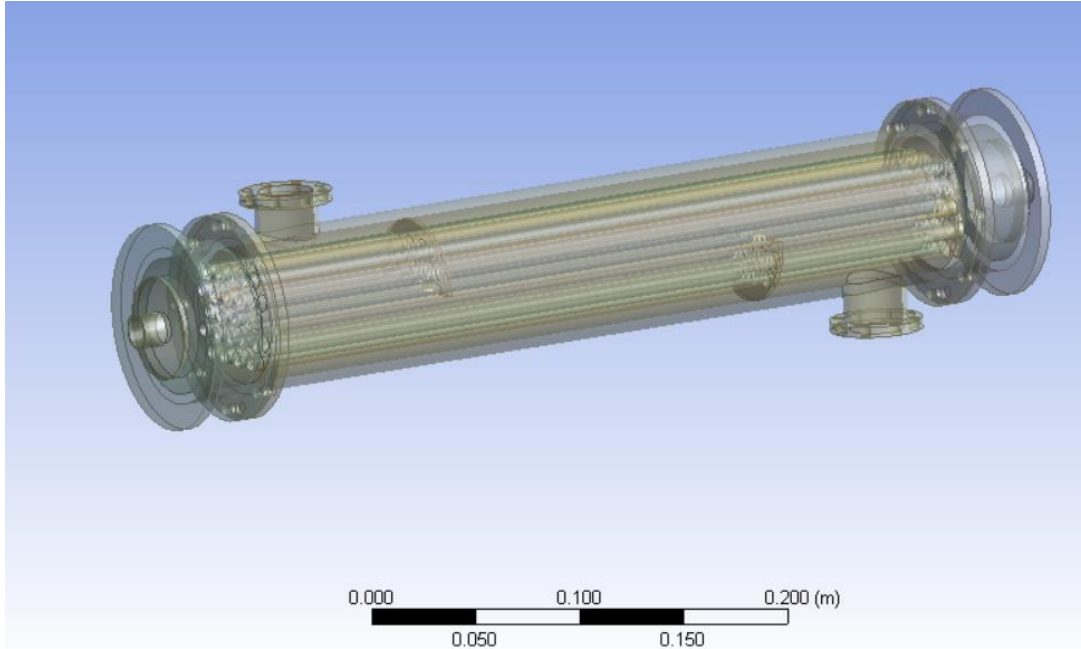
بعد الاستيراد، تم العمل على تهيئة الشكل الهندسي ليكون مناسباً للمحاكاة العددية، حيث تم تحديد مجالات الجريان الداخلية لكل من الغاز البارد وسائل التبريد الساخن داخل المبادل الحراري، شملت هذه العملية:

➤ تعريف نطاق جريان سائل التبريد عبر الغلاف (Shell) (الشكل 2.4).

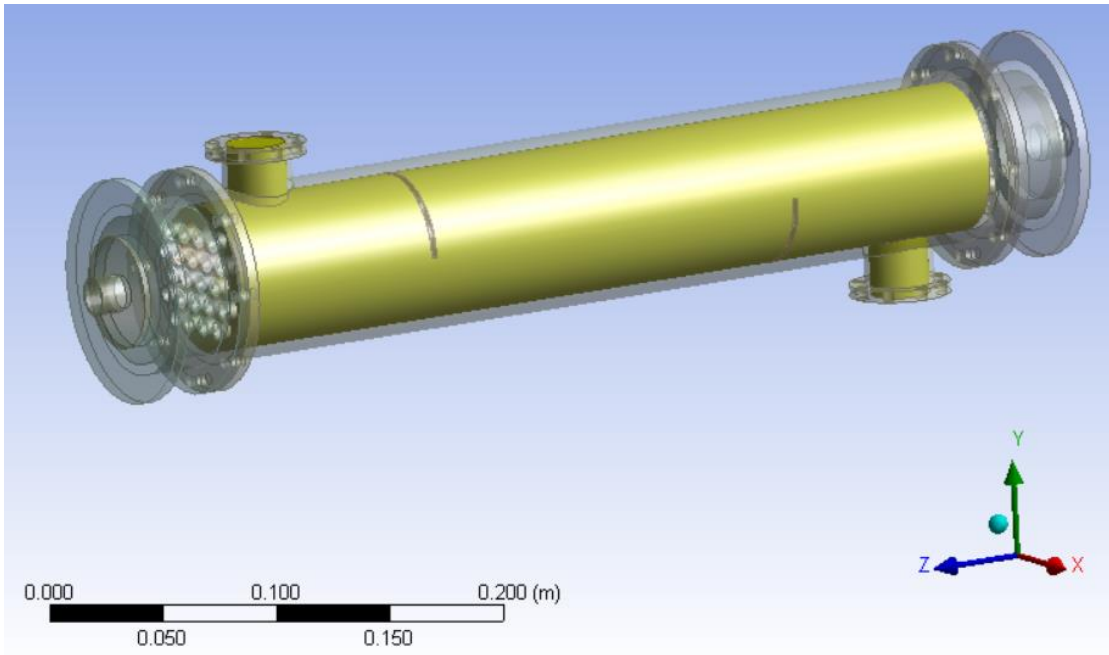
➤ تعريف نطاق جريان الغاز داخل الأنابيب (الشكل 3.4).

➤ التأكد من إغلاق جميع الأسطح بشكل صحيح لضمان عدم وجود تسرب في المجالات.

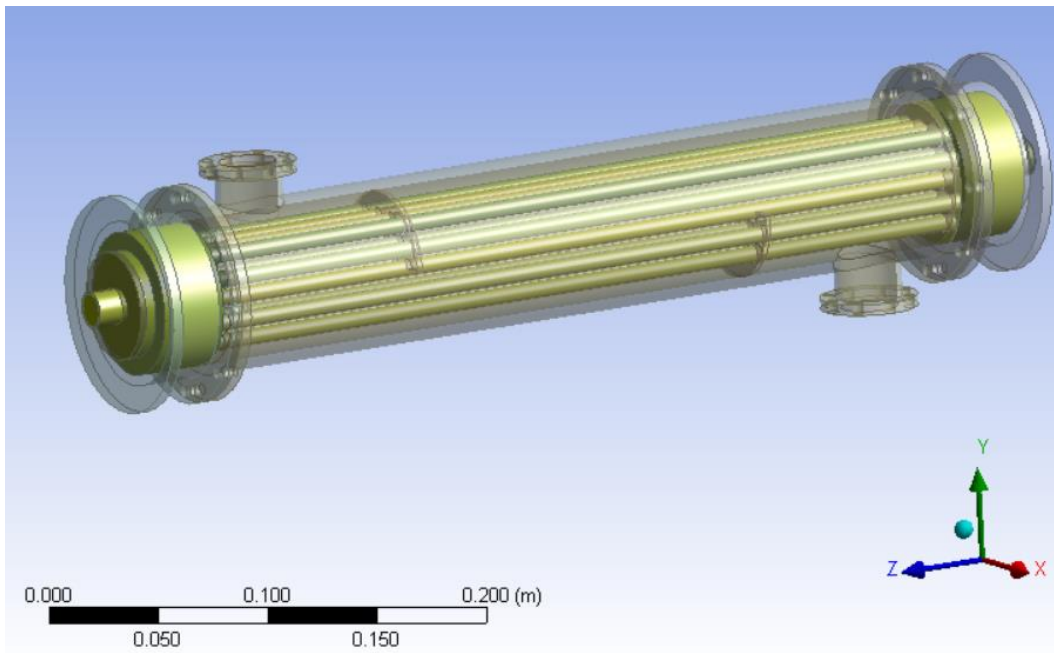
كان الهدف الأساسي من هذه المرحلة هو إعداد شكل هندسي نظيف ومنظم يعبر بدقة عن مناطق تدفق الموائع، مما يضمن تحقيق شروط المحاكاة الصحيحة في المراحل القادمة.



الشكل 1.4: شكل المبادل الحراري بعد استيراده من SOLIDWORKS إلى ANSYS.



الشكل 2.4: مجال السائل التبريد داخل المبادل الحراري.



الشكل 3.4: مجال الغاز داخل المبادل الحراري.

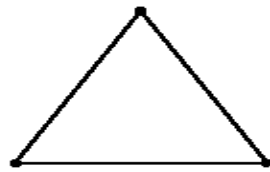
2.3.4 - مرحلة إنشاء الشبكة (Mesh) :

بعد الانتهاء من إعداد الشكل الهندسي في برنامج DesignModeler, انتقلنا إلى مرحلة إنشاء الشبكة (Meshing) التي تعتبر خطوة حاسمة لضمان دقة المحاكاة، في هذه المرحلة، قمنا باستخدام أنواع مختلفة من العناصر لبناء الشبكة الحسابية التي ستستخدم في إجراء المحاكاة (الشكل 4.4).

يحتوي برنامج ANSYS Fluent على عدة أنواع من العناصر، بما في ذلك:

- Hexahedron Elements (عناصر مكعبية).
- Tetrahedron Elements (عناصر هرمية).
- Prism Elements (عناصر هرمية مائلة).
- Pyramid Elements (عناصر هرمية خماسية الأوجه).

2D Cell Types

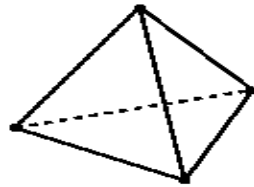


Triangle

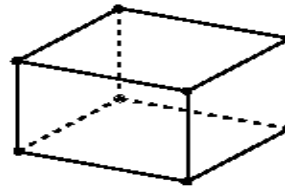


Quadrilateral

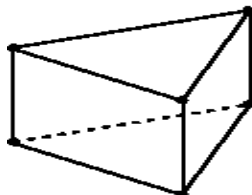
3D Cell Types



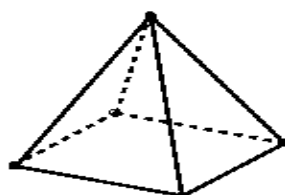
Tetrahedron



Hexahedron



Prism/Wedge



Pyramid



Polyhedron

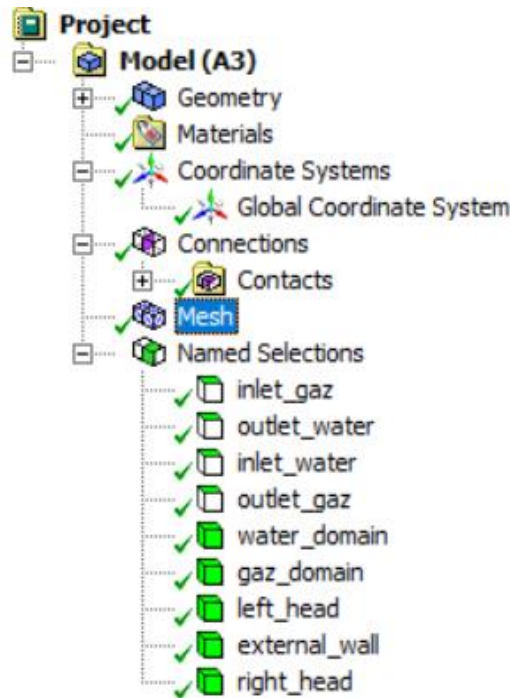
الشكل 4.4: أنواع العناصر (Elements) داخل البرنامج.

قمنا بإنشاء الروابط (Connections) بين القطع المختلفة للتأكد من أن جميع الأجزاء مترابطة بشكل صحيح، مما يضمن صحة النتائج المترتبة على المحاكاة (الشكل 5.4). كانت هذه المرحلة ضرورية لضمان أن الشبكة الحسابية التي سيتم استخدامها في المحاكاة ستكون دقيقة وذات جودة عالية، مما يساعد في الحصول على نتائج واقعية وموثوقة.

نظراً للتعقيد في شكل المبادل الحراري، ووجود أسطح غير منتظمة وزوايا حادة، تم اختيار عناصر Tetrahedron (هرمية) لبناء الشبكة، حيث تتيح هذه العناصر مرونة عالية في التعامل مع الأشكال المعقدة، مما يضمن توزيعاً مناسباً لعناصر الشبكة في جميع الأجزاء.

قيمة حجم العنصر (Element Size) تم تحديدها لتكون 0.0016 m كحد أقصى، وهو حجم دقيق يتيح تحسين دقة الحلول العددية ويقلل من الأخطاء الناتجة عن توزيع الشبكة غير المتوازن (الشكل 6.4 ؛ 7.4).

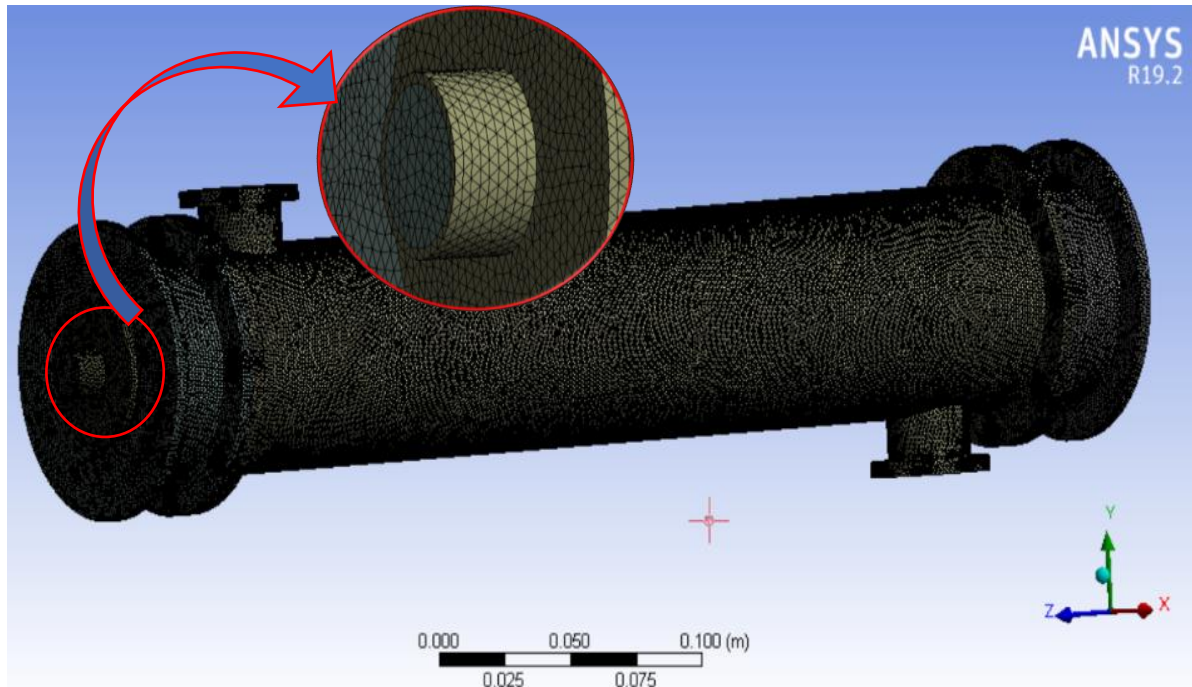
بعد إنشاء الشبكة، تم تنفيذ عملية Named Selection لتحديد وتسمية مختلف العناصر والسطوح داخل النموذج مثل الأنابيب، الجدران، ومناطق الدخول والخروج، وذلك لتسهيل تحديد شروط الحدود (Boundary Conditions) في مراحل المحاكاة التالية.



الشكل 5.4: شجرة الإنشاء في Mesh.

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	1.6e-003 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface Mesh	No
Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1.2)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (3.2e-003 m)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (8.e-006 m)
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Min Size	Default (1.6e-005 m)
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18.0°)
Capture Proximity	No
Bounding Box Diagonal	0.51584 m
Average Surface Area	3.0745e-003 m ²
Minimum Edge Length	2.5e-003 m

الشكل 6.4: تفاصيل شبكة Mesh.



الشكل 7.4: شكل شبكة Mesh على المبادل الحراري.

3.3.4 - مرحلة الإعداد (Setup):

تعد مرحلة الإعداد (Setup) في برنامج ANSYS Fluent خطوة حاسمة بعد إنشاء الشبكة Mesh ، حيث يتم فيها تحديد جميع الخصائص الفيزيائية والنماذج الرياضية التي ستستخدم في محاكاة الجريان الحراري والموائع، في هذه المرحلة، يتم تحديد كافة المعايير الضرورية لضمان تنفيذ المحاكاة بشكل صحيح وفعال.

1.3.3.4 - المرحلة الأولى General:

في هذا الجزء، بدأنا بتحديد إتجاه الجاذبية (Gravity Direction) في النظام، حيث تم تعيينه كقيمة 9.81 م/ث² في الاتجاه المناسب للتأكد من محاكاة تأثير الجاذبية على الموائع بشكل دقيق.

ثم قمنا بتحديد نوع النموذج الرياضي المستخدم في المحاكاة، حيث تم اختيار Pressure-based كنوع من النماذج التي تعتمد على حسابات الضغط لحل المعادلات الرياضية للجريان.

بالنسبة لصيغة السرعة (Velocity Formulation)، اخترنا Absolute Velocity، مما يعني أننا نقوم بحساب السرعة باستخدام النظام الإحداثي المطلق، مما يسهل عملية حساب سرعة تدفق الموائع في النظام بشكل مباشر دون الحاجة إلى تحويلات إضافية.

أخيراً، تم تحديد نوع الدراسة (Time)، حيث اخترنا Steady-state، نظراً لأن المحاكاة التي نقوم بها تركز على الحالة الثابتة للجريان، أي أننا لا نأخذ في الاعتبار التغيرات الزمنية في الظروف الفيزيائية للنظام (الشكل 8.4).

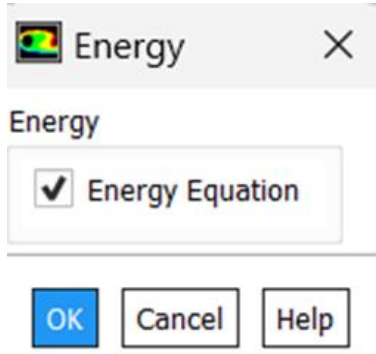
الشكل 8.4: إعدادات General في مرحلة Setup.

2.3.3.4 - المرحلة الثانية Models :

في هذه المرحلة من إعداد المحاكاة، قمنا بتفعيل مجموعة من النماذج الفيزيائية التي تساهم في تحسين دقة النتائج وتحاكي الواقع بشكل أكثر دقة.

نموذج الطاقة (Energy Model):

تم تفعيل خيار Energy في هذا الجزء، وهو ضروري لحساب التغيرات في درجات الحرارة داخل المبادل الحراري (الشكل 9.4)، هذا الخيار يضمن أن المحاكاة تأخذ في الحسبان التغيرات الحرارية الناتجة عن انتقال الحرارة بين سائل التبريد والغاز، مما يساعد في الحصول على نتائج دقيقة في حسابات كفاءة التبادل الحراري داخل النظام.



الشكل 9.4: تفعيل خيار Energy.

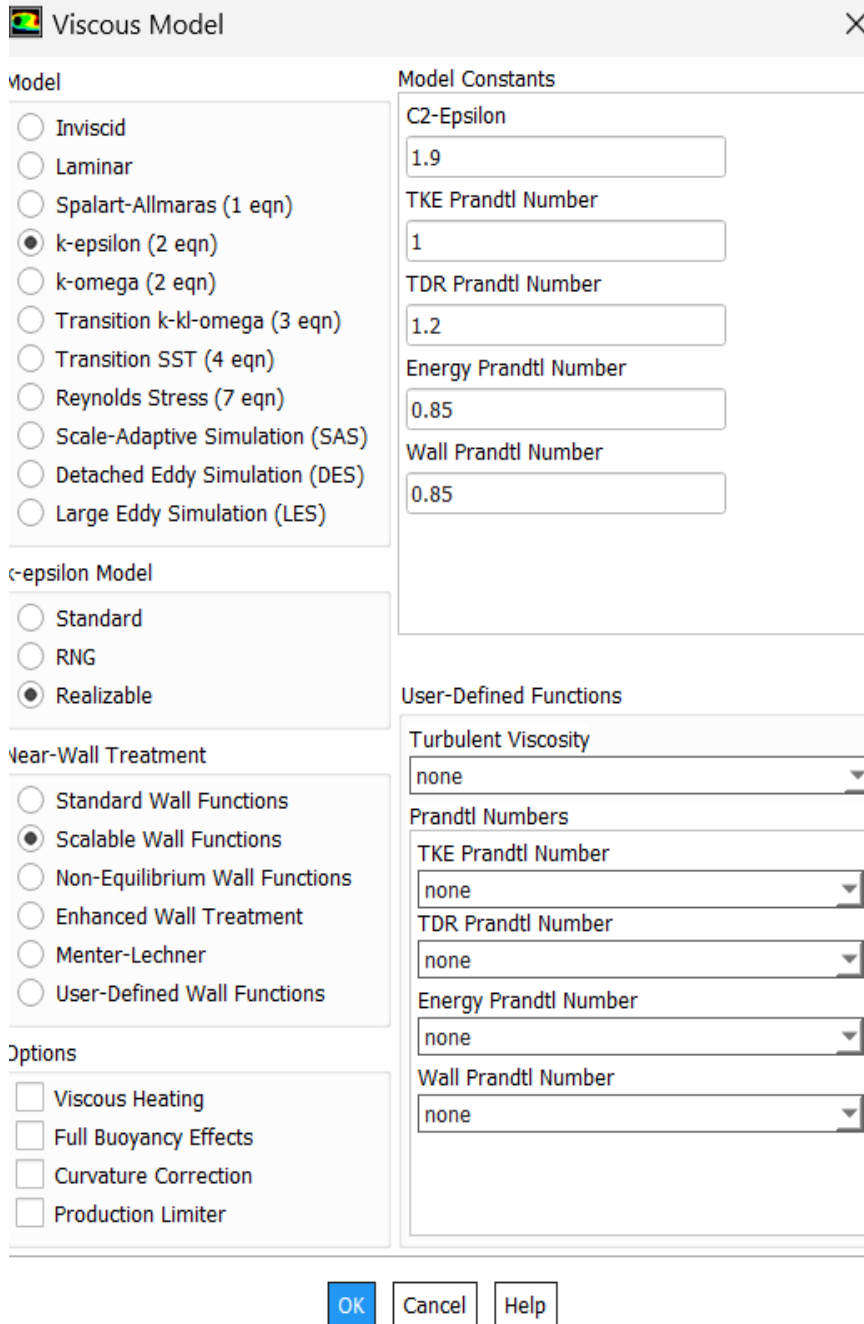
نموذج اللزوجة (Viscous Model):

تم اختيار نموذج k-epsilon في هذا الجزء (الشكل 10.4)، وهو أحد النماذج الأكثر استخداماً في محاكاة الجريان المضطرب، هذا النموذج يعمل على تمثيل حركية الموائع بشكل دقيق ويعتمد على حل معادلات turbulence kinetic energy (k) و dissipation rate (epsilon). يتيح هذا النموذج تحليل تأثير الاضطراب في الجريان داخل الأنابيب والمبادلات الحرارية.

في إعدادات k-epsilon model، تم تحديد خيار Realizable، والذي يوفر دقة أكبر في محاكاة الظواهر المتصلة بالاضطراب، خاصة في الحالات التي تتضمن تدفقات مضطربة قوية. هذا النموذج يعطي نتائج أكثر واقعية عندما يكون هناك تباين كبير في السرعات، مثل تلك التي تحدث في الأنابيب أو الأماكن التي تتغير فيها خصائص الجريان بشكل كبير.

معالجة الجدار (Near Wall Treatment):

في خيار Near Wall Treatment، تم اختيار Scalable Wall Function (الشكل 10.4)، هذا الخيار يساعد في تحسين دقة الحل عند الجدران ويضمن تمثيلاً دقيقاً للظروف القريبة من الجدران (مثل الجدران الداخلية للأنايبب). تعمل هذه المعالجة على تحسين حسابات الطبقات الحدودية بالقرب من الأسطح، مما يساهم في تحقيق دقة أعلى في محاكاة تدفق الموائع داخل الأنايبب والمبادل الحراري.



الشكل 10.4: إعدادات نموذج اللزوجة (Viscous Model).

3.3.3.4 - المرحلة الثالثة Materials :

في هذه المرحلة، تم تحديد المواد التي ستستخدم في المحاكاة من أجل تمثيل الموائع والأجسام الصلبة بشكل دقيق، وذلك بناء على الخصائص الفيزيائية لكل مادة.

المواد المائعة (Fluids):

تم اختيار الماء كسائل التبريد في النظام نظرا لخصائصه الممتازة في نقل الحرارة وتوافره الواسع في التطبيقات الهندسية (الشكل 11.4)، كما أن الماء له خواص فيزيائية مستقرة تسهل إجراء المحاكاة، بما في ذلك الكثافة واللزوجة. لذا، يعتبر الماء خيارا مثاليا لسائل التبريد في المبادل الحراري في هذا المشروع.

The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box in ANSYS Fluent. The 'Name' field is 'water-liquid'. The 'Material Type' is 'fluid'. The 'Chemical Formula' is 'h2o<l>'. The 'Material Type' dropdown is set to 'fluid', and the 'Fluent Fluid Materials' dropdown is set to 'water-liquid (h2o<l>)'. The 'Mixture' dropdown is set to 'none'. The 'Properties' section shows the following values: Density (kg/m3) is 'constant' with a value of 998.2; Cp (Specific Heat) (J/kg-k) is 'constant' with a value of 4182; Thermal Conductivity (w/m-k) is 'constant' with a value of 0.6; and Viscosity (kg/m-s) is 'constant' with a value of 0.001003. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. There are buttons for 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help' at the bottom.

الشكل 11.4: تحديد مادة الماء كمائع أول للدراسة.

غاز البترول المسال (LPG):

نظرا لعدم توفر غاز البترول المسال (LPG) في قائمة المواد الجاهزة في ANSYS Fluent، قمنا بإنشاء مادة جديدة يدويا (الشكل 12.4). تم إدخال الخصائص الفيزيائية المميزة له مثل الكثافة، اللزوجة، والسعة الحرارية النوعية بناء على البيانات المتوفرة للغاز عند ظروف التشغيل، يشمل ذلك تأثيرات التمدد والتغيرات الحرارية التي سيخضع لها الغاز خلال العمليات.

The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box. The 'Name' field contains 'gpl', 'Chemical Formula' is 'c3h8_c4h10', and 'Material Type' is 'fluid'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. The 'Properties' section shows: Density (kg/m3) constant at 2.2, Cp (Specific Heat) (j/kg-k) constant at 2000, Thermal Conductivity (w/m-k) constant at 0.015, and Viscosity (kg/m-s) constant at 1.5e-05. Buttons at the bottom include 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help'.

الشكل 12.4: تحديد مادة غاز البترول المسال كمائع للدراسة.

الأجسام الصلبة (Solids):

بالنسبة للأجزاء الصلبة في النظام، تم اختيار الألمنيوم كالمادة الأساسية (الشكل 13.4)، الألمنيوم يعد من المواد الجيدة جدا في توصيل الحرارة نظرا لكفاءته العالية في نقل الحرارة مقارنة بالمواد الأخرى، كما أن خصائصه الفيزيائية مثل الكثافة والموصلية الحرارية تجعله مناسباً تماماً لاستخدامه في الأجزاء التي تتطلب انتقال حرارة سريع، مما يعزز فعالية المبادل الحراري.

The screenshot shows the 'Create/Edit Materials' dialog box. The 'Name' field contains 'aluminum', 'Chemical Formula' is 'al', and 'Material Type' is 'solid'. The 'Order Materials by' section has 'Name' selected. The 'Properties' section shows: Density (kg/m3) constant at 2719, Cp (Specific Heat) (j/kg-k) constant at 871, and Thermal Conductivity (w/m-k) constant at 202.4. Buttons at the bottom include 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help'.

الشكل 13.4: تحديد مادة الألمنيوم كمادة صلبة.

4.3.3.4 - المرحلة الرابعة Cell Zone Conditions :

في هذه المرحلة، قمنا بتخصيص المواد التي تم تحديدها مسبقاً لأجزاء النظام المختلفة، وتحديد اتجاه تدفق الموائع داخل المناطق المتنوعة من النموذج، بما يتوافق مع الظروف الفعلية للمبادل الحراري.

تم إسناد المواد التي تم تحديدها في المرحلة السابقة إلى الخلايا (Cells) المناسبة داخل شبكة المحاكاة. كل منطقة داخل النموذج تتطلب تحديد المواد التي تشغيلها لضمان أن الحسابات تتم وفقاً للخصائص الفيزيائية لكل مادة. على سبيل المثال، تم إسناد الماء داخل المجال الذي يمثل مسار سائل التبريد (الشكل 15.4)، بينما تم إسناد الألمنيوم للأجزاء التي تمثل الهيكل الصلب للمبادل الحراري (الشكل 16.4)، وغاز البترول المسال لمجال الغاز (الشكل 14.4)، قمنا أيضاً بتحديد اتجاه تدفق الموائع داخل النظام حسب المحاور الرئيسية.

تم ضبط هذه الإعدادات بدقة لضمان محاكاة واقعية لظروف تدفق الموائع داخل النظام، وهو ما يساعد في الحصول على نتائج دقيقة للمحاكاة.

The screenshot shows the 'Cell Zone Conditions' dialog box for a fluid zone. The 'Zone Name' is 'gaz_domain' and the 'Material Name' is 'gpl'. The 'Reference Frame' is set to 'Reference Frame'. The 'Rotation-Axis Origin' and 'Rotation-Axis Direction' sections are visible, with X, Y, and Z coordinates set to 0 and -1 respectively, and all set to 'constant'.

الشكل 14.4: تحديد غاز البترول المسال ليضمحل حيز الغاز.

Fluid

Zone Name
water_domain

Material Name water-liquid Edit...

Frame Motion 3D Fan Zone Source Terms
 Mesh Motion Laminar Zone Fixed Values
 Porous Zone

Reference Frame Mesh Motion Porous Zone 3D Fan Zone Embedded LES Reaction Source Terms

Rotation-Axis Origin			Rotation-Axis Direction		
X (m)	0	constant	X	0	constant
Y (m)	0	constant	Y	1	constant
Z (m)	0	constant	Z	0	constant

OK Cancel Help

الشكل 15.4: تحديد الماء ليشملي حيز السائل.

- Cell Zone Conditions
 - external_wall (solid, id=55)
 - gaz_domain (fluid, id=53)
 - heat_exchanger_m-prt0_solid1 (solid, id=28)
 - heat_exchanger_m-prt10_solid1 (solid, id=35)
 - heat_exchanger_m-prt11_solid1 (solid, id=36)
 - heat_exchanger_m-prt12_solid1 (solid, id=37)
 - heat_exchanger_m-prt13_solid1 (solid, id=38)
 - heat_exchanger_m-prt14_solid1 (solid, id=39)
 - heat_exchanger_m-prt17_solid1 (solid, id=40)
 - heat_exchanger_m-prt18_solid1 (solid, id=41)
 - heat_exchanger_m-prt19_solid1 (solid, id=42)
 - heat_exchanger_m-prt20_solid1 (solid, id=43)
 - heat_exchanger_m-prt21_solid1 (solid, id=44)
 - heat_exchanger_m-prt22_solid1 (solid, id=45)
 - heat_exchanger_m-prt23_solid1 (solid, id=46)
 - heat_exchanger_m-prt24_solid1 (solid, id=47)
 - heat_exchanger_m-prt25_solid1 (solid, id=48)
 - heat_exchanger_m-prt26_solid1 (solid, id=49)
 - heat_exchanger_m-prt2_solid1 (solid, id=29)
 - heat_exchanger_m-prt3_solid1 (solid, id=30)
 - heat_exchanger_m-prt5_solid1 (solid, id=31)
 - heat_exchanger_m-prt6_solid1 (solid, id=32)
 - heat_exchanger_m-prt8_solid1 (solid, id=33)
 - heat_exchanger_m-prt9_solid1 (solid, id=34)
 - left_head (solid, id=54)
 - right_head (solid, id=56)
 - water_domain (fluid, id=52)

الشكل 16.4: تحديد الألمنيوم كمادة للأجسام الصلبة.

5.3.3.4 - المرحلة الخامسة Boundary Conditions :

في هذه المرحلة، قمنا بتعيين الشروط الحدية (Boundary Conditions) التي تمثل الظروف الابتدائية والنهائية للتدفق داخل النظام، هذه الشروط تعتبر ضرورية لضمان دقة المحاكاة وتمثيل الواقع بشكل صحيح، حيث تساعد في تحديد كيف يبدأ الموائع (الغاز والماء) في التدفق عبر المبادل الحراري.

قمنا بتحديد درجة حرارة دخول الغاز على أنها 238 كلفن (K) (الشكل 17.4). هذه درجة الحرارة تمثل حالة الغاز بعد التمدد في النظام، وهو ما يؤثر على قدرتها على تبريد سائل التبريد. أما بالنسبة لدرجة حرارة دخول الماء، فقد تم تحديدها على 368 كلفن (K) (الشكل 18.4)، وهي تمثل درجة حرارة الماء بعد خروجها من المحرك ويحتاج إلى خفضها داخل المبادل الحراري.

Velocity Inlet

Zone Name
inlet_gaz

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Temperature (k) 238 constant

OK Cancel Help

الشكل 17.4: تحديد درجة حرارة دخول الغاز.

Velocity Inlet

Zone Name
inlet_water

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Temperature (k) 368 constant

OK Cancel Help

الشكل 18.4: تحديد درجة حرارة دخول الماء.

سرعة تدفق الغاز:

تم تحديد سرعة تدفق الغاز داخل الأنبوب بقطر 15 ملمتر بـ 7 متر/ثانية (الشكل 19.4). هذه السرعة تمثل تدفق الغاز خلال الأنبوب الذي يقوم بتبادل الحرارة مع الماء، وتعد سرعة تدفق الغاز أحد العوامل المؤثرة في كفاءة التبادل الحراري.

Velocity Inlet

Zone Name
inlet_gaz

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary
Reference Frame: Absolute
Velocity Magnitude (m/s): 7 constant
Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Turbulence
Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio
Turbulent Intensity (%): 10
Turbulent Viscosity Ratio: 20

OK Cancel Help

الشكل 19.4: تحديد سرعة تدفق الغاز.

سرعة تدفق الماء:

أما بالنسبة لسرعة تدفق الماء، فتم تحديدها عند 0.17 متر/ثانية داخل الأنبوب بقطر 26 ملمتر (الشكل 20.4)، هذه السرعة تمثل سرعة سائل التبريد الذي يدخل المبادل الحراري ويعبر خلال الأنابيب لامتناس الحرارة من الغاز، سرعة تدفق الماء تؤثر بشكل مباشر على قدرة النظام على خفض درجة حرارة سائل التبريد بشكل فعال.

Velocity Inlet

Zone Name
inlet_water

Momentum Thermal Radiation Species DPM Multiphase Potential UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary
Reference Frame: Absolute
Velocity Magnitude (m/s): 0.17 constant
Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Turbulence
Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio
Turbulent Intensity (%): 5
Turbulent Viscosity Ratio: 10

OK Cancel Help

الشكل 20.4: تحديد سرعة تدفق الماء.

4.3.4 - الحل (Solution) :

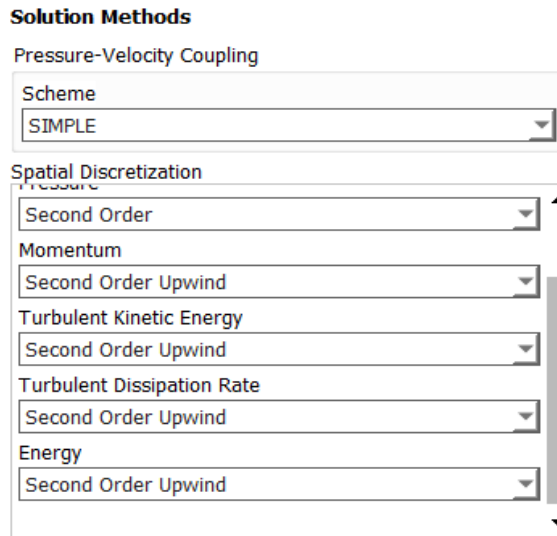
في هذه المرحلة، يتم استخدام الطرق الحسابية لحل المعادلات الرياضية التي تمثل تدفق الموائع وانتقال الحرارة داخل المبادل الحراري، هدف هذه المرحلة هو إيجاد الحل المناسب التي تظهر سلوك النظام تحت ظروف العمل المختلفة التي تم تحديدها في المراحل السابقة، من خلال اختيار الطرق العددية الملائمة، تعتبر مرحلة الحل من المراحل الأساسية للحصول على نتائج دقيقة وواقعية تستخدم لاحقا في تحليل الأداء والتقييم الفعلي للمبادل الحراري.

1.4.3.4 - المرحلة الأولى Methods :

في هذه المرحلة، قمنا بتحديد الطرق الحسابية (Methods) التي سيتم استخدامها لحل المعادلات في محاكاة التبادل الحراري داخل المبادل الحراري، من أجل ضمان دقة وموثوقية النتائج، تم اختيار طرق متقدمة لحساب انتقال الحرارة وتدفق الموائع.

تم اختيار Second Order Upwind كطريقة لحساب التفاضلات الموجهة في جميع المعادلات المستخدمة في المحاكاة (الشكل 21.4)، هذه الطريقة تعتبر من الطرق الدقيقة والموثوقة لأنها تساعد في تقليل الأخطاء الناتجة عن الانتقال في الموائع عبر الشبكة.

تتميز هذه الطريقة بقدرتها على تقديم نتائج أكثر دقة مقارنة بالطريقة الأولى (First Order Upwind)، حيث تستخدم تقديرا أعلى في الاتجاه المعاكس لسرعة التدفق، هذا يساعد في تقليل التقديرات البسيطة التي قد تحدث في الطرق الأقل دقة، مما يجعل هذه الطريقة مثالية للأنظمة التي تحتوي على تدفقات معقدة وتغيرات حرارية كبيرة، مثل المبادل الحراري في هذا المشروع.



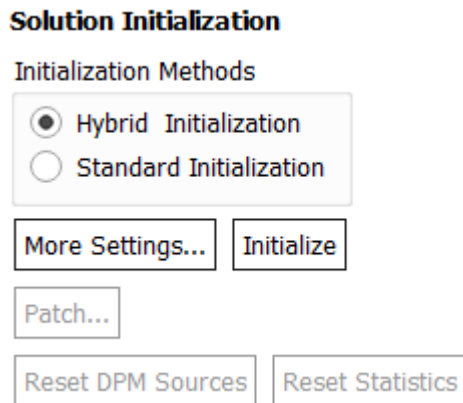
الشكل 21.4: تحديد الطرق الحسابية.

2.4.3.4 - المرحلة الثانية Initialization :

في هذه المرحلة، تم تحديد طريقة التهيئة (Initialization) التي تساعد في تحديد القيم الابتدائية للمجالات الفيزيائية المختلفة داخل المحاكاة، مثل السرعة، الحرارة، والضغط، التهيئة الجيدة للمجالات الفيزيائية تعد خطوة أساسية لضمان استقرار الحل وتوجيه المحاكاة نحو نتائج دقيقة.

تم اختيار التهيئة الهجينة Hybrid Initialization كطريقة لتهيئة المحاكاة (الشكل 22.4)، تتميز هذه الطريقة بأنها تجمع بين مزيج من التهيئة الأولية المتجانسة و التهيئة المتعددة، وهي تساعد في تحسين استقرار المحاكاة من خلال تقديم قيم ابتدائية مناسبة للمجالات المختلفة، مما يقلل من تأثير الأخطاء التي قد تظهر عند بداية الحسابات.

توفر طريقة Hybrid Initialization بداية أكثر توازناً لديناميكيات الموائع في النموذج، حيث تقوم بتطبيق قيم ابتدائية تستند إلى مزيج من التقديرات الأولية البسيطة والمتقدمة، هذا يساعد على تسريع عملية التقارب نحو الحلول الصحيحة ويمنع حدوث مشاكل قد تظهر نتيجة لتهيئة غير صحيحة في بعض الحالات الأكثر تعقيداً.



الشكل 22.4: تحديد طريقة التهيئة (Initialization).

3.4.3.4 - المرحلة الثالثة Run Calculation :

في هذه المرحلة، تم تحديد الإعدادات المتعلقة بتنفيذ الحسابات (Run Calculation) التي سيتم من خلالها إجراء محاكاة التدفق الحراري داخل المبادل الحراري (الشكل 23.4)، تهدف هذه المرحلة إلى حساب النتائج بناء على الشروط الحدية والمواد المختارة في المراحل السابقة، مما يؤدي إلى الحصول على نتائج دقيقة تمثل سلوك النظام تحت الظروف المحددة.

تم تحديد عدد التكرارات Number of Iterations بمقدار 150 تكرار، هذه التكرارات تستخدم لتحسين الحل تدريجياً والتقارب نحو الحل النهائي، تم اختيار هذا العدد من التكرارات بناء على تحليل التجربة السابقة لضمان استقرار النتائج وعدم حدوث تذبذب في القيم الحسابية أثناء المحاكاة.

تم تعيين فترة تقارير النتائج Reporting Interval إلى 1، مما يعني أنه سيتم تحديث التقرير وعرض النتائج بعد كل تكرار. هذه الطريقة تتيح متابعة التقدم في الحسابات بشكل دوري وتحليل سلوك النظام أثناء عملية الحل.

تم أيضا تحديد فترة تحديث البروفايل Profile Update Interval إلى 1، مما يعني أنه سيتم تحديث البروفايل (الملف التعريفي للنتائج) بعد كل تكرار، هذا يسمح بمراقبة التغيرات في القيم الفيزيائية مثل درجة الحرارة، السرعة، والضغط على طول المسار خلال كل تكرار للحسابات.

باختيار هذه الإعدادات، تمكنا من إجراء محاكاة دقيقة وسلسة لمراحل الحل، مما يساعد في الحصول على نتائج مثلى لعمليات التبادل الحراري داخل المبادل الحراري.

Run Calculation

Check Case... Update Dynamic Mesh...

Options

Data Sampling for Steady Statistics

Sampling Interval: 1 Sampling Options...

Iterations Sampled: 0

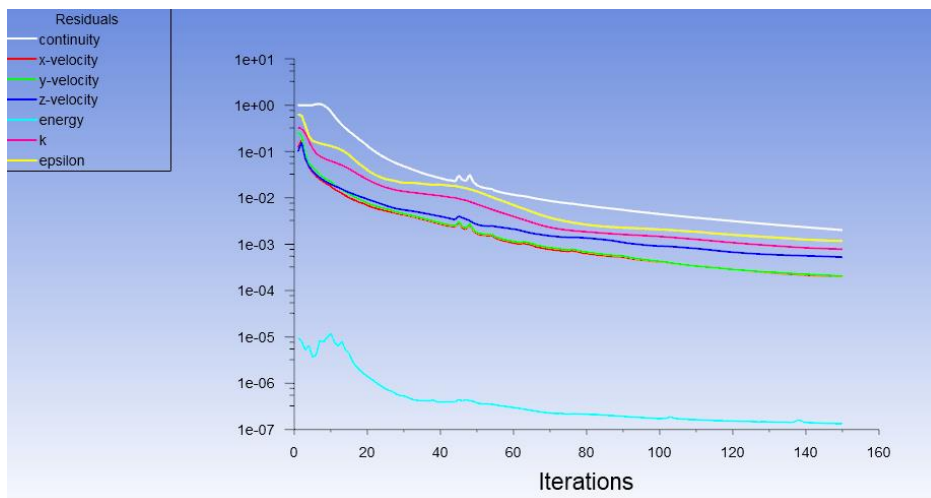
Number of Iterations: 150 Reporting Interval: 1

Profile Update Interval: 1

Data File Quantities... Acoustic Signals... Acoustic Sources FFT...

Calculate

الشكل 23.4: تحديد الإعدادات المتعلقة بتنفيذ الحسابات.



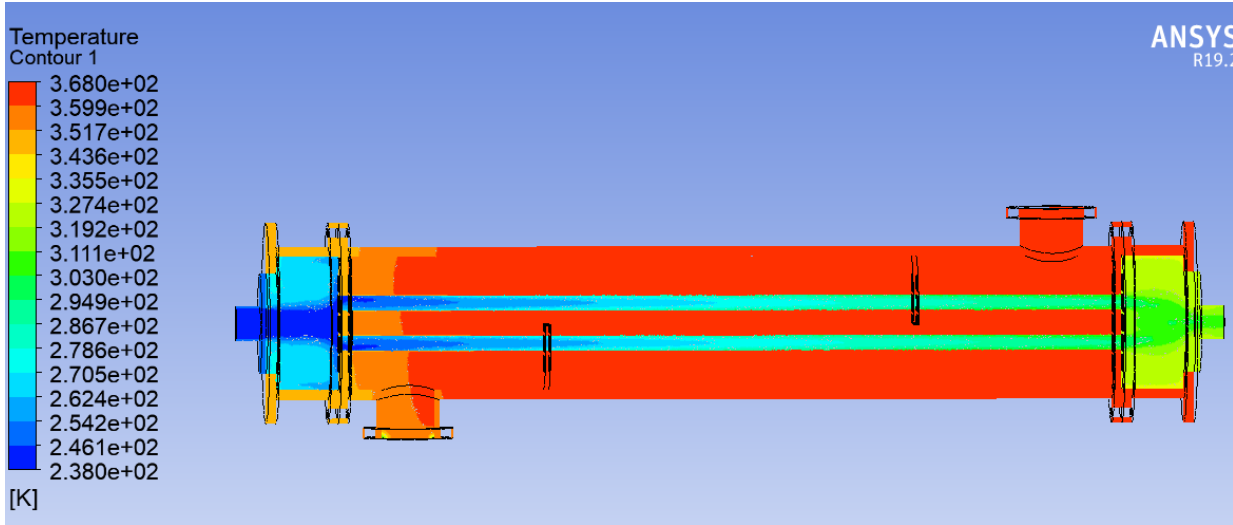
الشكل 24.4: المنحنيات الناتجة لمختلف المتغيرات.

5.3.4 - النتائج (Results) :

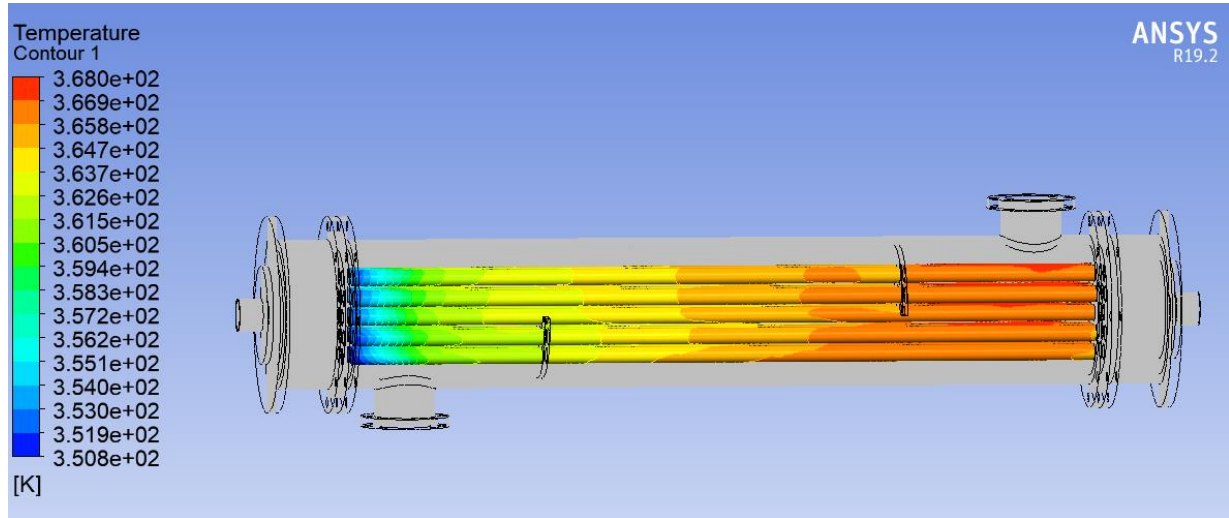
بعد الانتهاء من إجراء المحاكاة عبر المرحلة السابقة (**Run Calculation**)، نصل الآن إلى مرحلة تحليل النتائج. في هذه المرحلة، يتم استخراج النتائج النهائية للمحاكاة وتحليلها لفهم سلوك النظام بشكل كامل، تتضمن هذه المرحلة مقارنة القيم المحاكاة مع القيم المتوقعة من النظام لتحليل أدائه وفعاليتته.

1.5.3.4 - النتائج العامة :

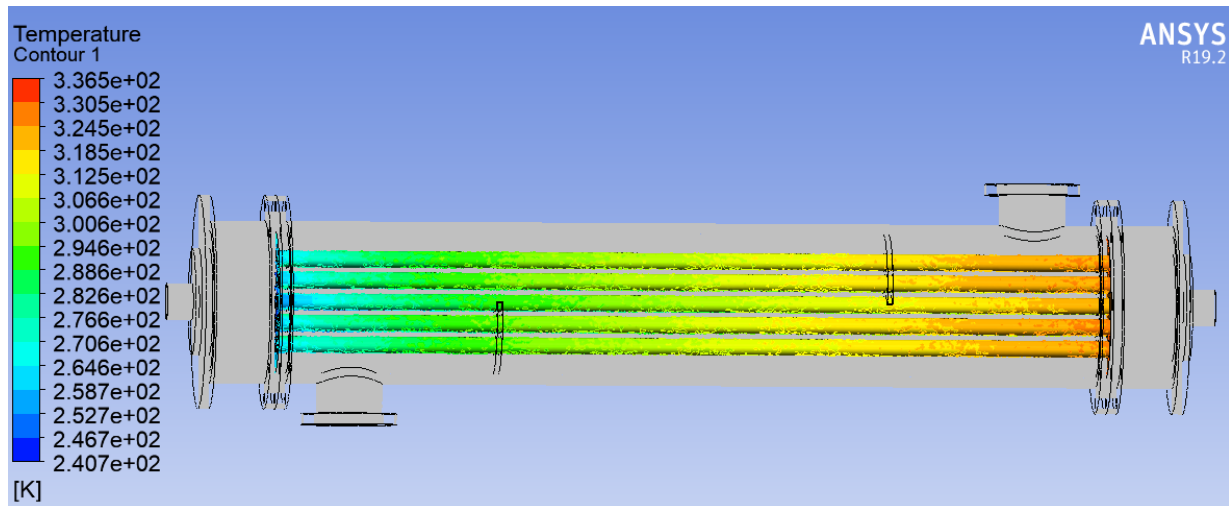
بمراجعة النتائج العامة للمبادل الحراري، يظهر بوضوح وجود تبادل حراري فعال بين مختلف مكونات النظام (الشكل 25.4؛ 26.4؛ 27.4)، من خلال توزيع درجات الحرارة، نلاحظ أن سائل التبريد (الماء) بدأ يفقدان حرارته تدريجياً أثناء مروره عبر الأنابيب المثبتة داخل الـ shell، في حين اكتسب الغاز البارد حرارة أثناء تدفقه عبر الأنابيب الداخلية، كما أن الجدران الفاصلة بين السائلين ساهمت بفعالية في نقل الحرارة بفضل خصائصها الفيزيائية الجيدة، بشكل عام، يتضح من النتائج أن التصميم الهندسي الذي اتبعناه يسمح بحدوث انتقال حراري مستقر وموزع بشكل جيد داخل المبادل، مما يؤكد صحة النموذج المحاكى وجودة الإعدادات المتبعة في المحاكاة.



الشكل 25.4: التبادل الحراري بين جميع عناصر النظام.



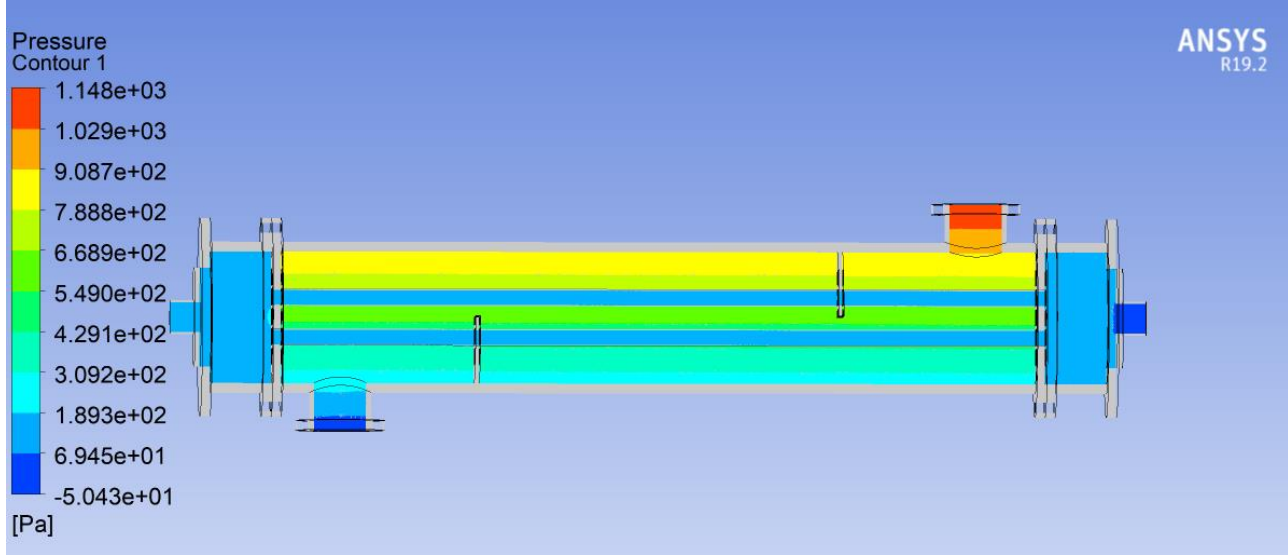
الشكل 26.4: التبادل الحراري عند سطح التلامس بين الماء والأنابيب.



الشكل 27.4: التبادل الحراري عند سطح التلامس بين الغاز والأنابيب.

بخصوص الضغط، يمثل الشكل (28.4) خريطة التوزيع العام للضغط في المائع داخل المبادل الحراري، الناتجة عن المحاكاة العددية. من خلال تدرج الألوان الظاهر في الشكل، يمكن ملاحظة وجود فرق واضح في الضغط بين مناطق الدخول والخروج، سواء في مجال الغاز أو الماء، ما يدل على وجود فقدان في الضغط ناتج عن عوامل متعددة، مثل الاحتكاك الداخلي للمائع مع الجدران، وتأثيرات التبادل الحراري، وكذا التغييرات الهندسية في التصميم الداخلي للمبادل التي تولد التدفق المضطرب (Turbulence).

إن فهم هذا التوزيع العام للضغط يشكل خطوة أساسية لتحليل القوى المؤثرة على الجدران الصلبة، كما يوفر قاعدة ضرورية للانتقال إلى تحليل التفاعل بين المائع والبنية (FSI)، الذي يسمح بتقييم الإجهادات والتشوهات المحتملة الناتجة عن الضغط الداخلي.



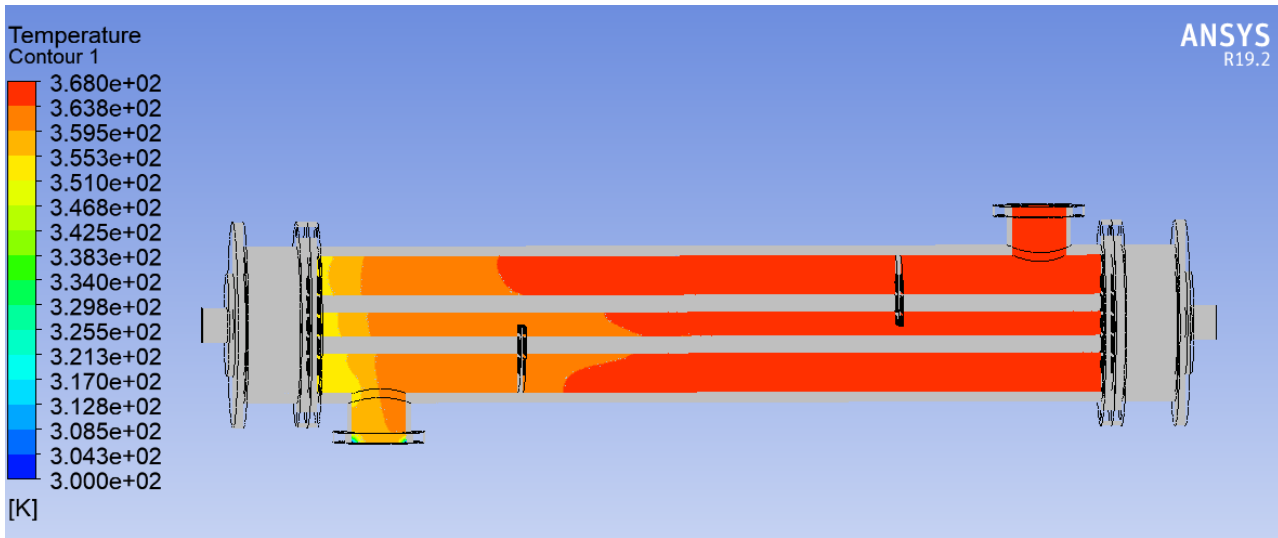
الشكل 28.4: التوزيع العام للضغط داخل المبادل الحراري.

2.5.3.4 - تحليل توزيع الضغط والتغيرات الحرارية في جريان الماء Pressure and Thermal : Distribution Analysis in Water Flow

في مجال دراسة سلوك الماء وتأثيرات الحرارة عليه (الشكل 29.4)، نلاحظ هنا انخفاضاً ملحوظاً في درجة حرارته من 368 كلفن (K) إلى 357 كلفن (K). هذا التغير في درجة الحرارة يمثل انخفاضاً قدره 11 كلفن.

بالنظر إلى السياق الذي تم فيه إجراء هذه الملاحظة، فإن الوصول إلى درجة حرارة 357 كلفن (K) يمثل النتيجة المطلوبة التي كنا نسعى لتحقيقها، هذا النجاح في خفض درجة الحرارة ضمن النطاق المستهدف يشير إلى فعالية الآلية أو العملية المستخدمة في التحكم في درجة حرارة الماء.

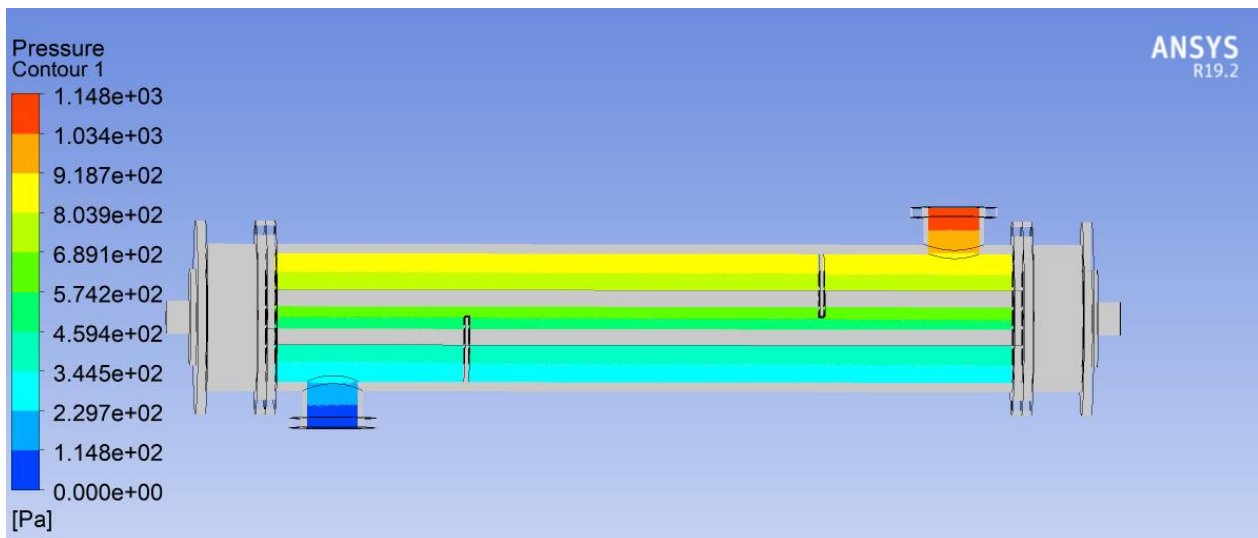
يمكن أن يكون لهذا الانخفاض في درجة الحرارة آثار مهمة اعتماداً على التطبيق أو النظام قيد الدراسة بشكل عام، تحقيق النتيجة المطلوبة بانخفاض درجة حرارة الماء إلى 357 كلفن (K) وهي درجة الحرارة المثالية لعمل المحرك LPG. هذه النتيجة تمثل خطوة ناجحة في هذا المجال من الدراسة، ويفتح الباب لمزيد من التحليل والتطبيقات بناء على هذه الظروف.



الشكل 29.4: التغير الحراري في مجال الماء.

أما فيما يخص الضغط في النظام النسبي على طول مسار جريان الماء داخل المبادل الحراري. حيث يبدأ الضغط عند مدخل القناة بقيمة تقدر بـ 1148 باسكال ، وينخفض بشكل تدريجي إلى أن يصل إلى 115 باسكال عند المخرج. هذا الانخفاض التدريجي في الضغط يعكس فقدان الضغط الناتج عن مقاومة الجريان داخل القنوات، والتي تعود إلى تأثيرات الاحتكاك بين طبقات المائع من جهة، واحتكاك المائع بجدران القناة من جهة أخرى، بالإضافة وجود عناصر هندسية (الحواجز) تؤثر على انتظام السريان.

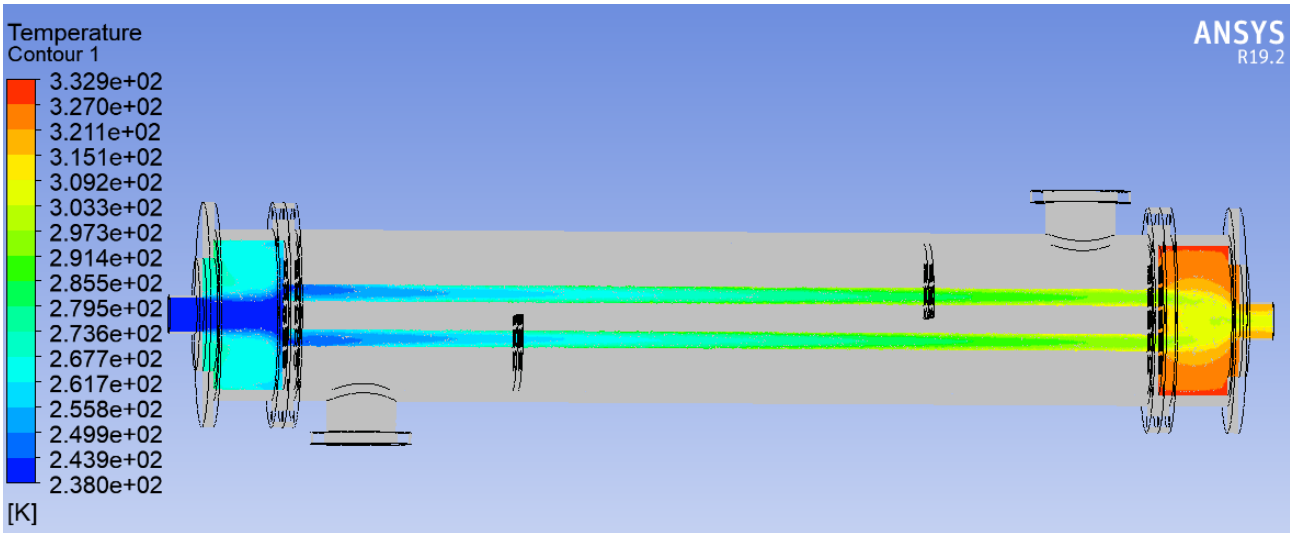
هذا التدرج في الضغط يعكس سلوكا هيدروديناميكيا سليما، إذ ينتقل الماء من منطقة ذات ضغط أعلى إلى أخرى أقل ضغطا، وهو ما يحقق شروط التدفق في الأنظمة الحرارية.



الشكل 30.4: توزيع الضغط على طول مجرى الماء.

3.5.3.4 - تحليل توزيع الضغط والتغيرات الحرارية للغاز Pressure and Thermal : Distribution Analysis of gas

بخصوص مجال الغاز داخل المبادل الحراري، تم ضخ الغاز عند درجة حرارة ابتدائية منخفضة مقدارها 238 كلفن (K)، وهي درجة حرارة الغاز بعد عملية التمدد، ومع تحرك الغاز داخل الأنابيب وتعرضه لتبادل حراري مع سائل التبريد، وجدنا ارتفاعا تدريجيا في درجة حرارته (الشكل 30.4)، في نهاية مسار التدفق وصلت درجة حرارة الغاز إلى 315 كلفن (K)، وهو ما يمثل الهدف الحراري المرغوب فيه، هذا الارتفاع يدل على فعالية نقل الحرارة داخل المبادل، ويؤكد نجاح التصميم في تسخين الغاز إلى درجة حرارة التشغيل المطلوبة للمحرك.

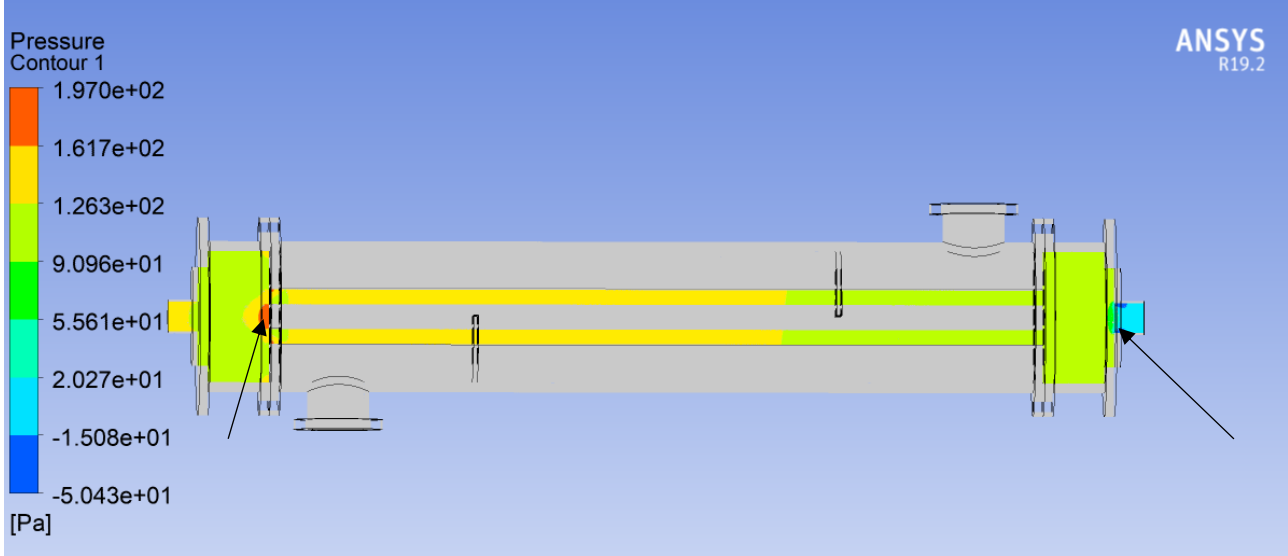


الشكل 31.4: التغير الحراري في مجال الغاز.

أما فيما يخص توزيع الضغط في النظام النسبي داخل منطقة تدفق الغاز في المبادل الحراري. يدخل الغاز إلى القناة عند ضغط يقارب 140 باسكال، ثم ينخفض تدريجيا ليصل إلى حوالي 55 باسكال عند المخرج. هذا التناقص التدريجي في الضغط يعكس الفقد الطبيعي الناتج عن مقاومة الجريان، والذي يشمل الاحتكاك الداخلي بين جزيئات الغاز، واحتكاكه بجدران القناة، بالإضافة إلى تأثير التغيرات الهندسية في المسار مثل التضيقات.

يلاحظ أن الفارق الكلي في الضغط، يعد منطقيا ويعكس انتقالا منتظما للغاز من مدخل عالي الضغط إلى مخرج منخفض الضغط، بما يتوافق مع المبادئ الأساسية لحركية الغازات في الأنظمة الحرارية. يشير هذا الانخفاض التدريجي إلى استقرار السريان، وعدم وجود مناطق فصل أو دوامات كبيرة في المناطق المستقيمة عكس المداخل و المخرجات. حيث عند المدخل يأخذ

الضغط أعلى قيمة نظرا لضيق مداخل الأنابيب وعند مخرج الأنابيب ينخفض الضغط نتيجة لحدوث اضطرابات في التدفق الناتج عن التغير الكبير في الشكل الهندسي .



الشكل 32.4: توزيع الضغط على طول مسار تدفق الغاز .

4.4 - خاتمة :

في ختام هذا الفصل، تم تسليط الضوء على جميع مراحل إعداد المحاكاة العددية باستخدام برنامج ANSYS Fluent، بداية من استيراد النموذج الهندسي وتهيئة الشبكة (Mesh)، مروراً بتحديد الخصائص الفيزيائية والحرارية للمواد، ثم ضبط شروط الاولية والمعطيات الابتدائية بدقة، تم تفعيل النماذج الفيزيائية المناسبة لضمان تحقيق تمثيل دقيق لظاهرة انتقال الحرارة داخل المبادل الحراري.

من خلال تحليل النتائج، تم تحقيق هدف الدراسة بنجاح، حيث تم تبريد سائل التبريد من درجة حرارة عالية إلى المستوى المطلوب، كما ارتفعت درجة حرارة الغاز تدريجياً حتى وصلت إلى القيمة المرجوة و بذلك قد وفرنا شروط الحرارية لعمل محرك LPG. أيضاً هذه النتائج تدل على فعالية النموذج المصمم وكفاءته في عملية التبادل الحراري، كما نفتح المجال للمزيد من التحسينات و دراسات إضافية.

الفصل الخامس:

محاكاة التفاعل بين السائل والصلب FSI

في المبادل الحراري المصمم

**FSI Simulation in the Designed
Heat Exchanger**

1.5 - مقدمة :

بعد إتمام محاكاة CFD ودراسة السلوك الحراري والموائعي داخل المبادل الحراري، من الضروري التحقق من تأثير هذه الظروف على البنية الميكانيكية و الهندسية للمبادل لضمان سلامته وكفاءته خلال التشغيل. ولهذا الغرض، يتم اللجوء إلى محاكاة التفاعل بين المائع والهيك (Fluid-Structure Interaction - FSI)، والتي تسمح بدمج نتائج الجريان الحراري والضغط المحسوبة مع تحليل بنية المادة للهيك.

تتيح محاكاة FSI دراسة التشوهات والانفعالات الناتجة عن تأثير الأحمال الحرارية والضغط الديناميكية المسطرة من الموائع على المبادل الحراري، تعتبر هذه الخطوة حيوية لضمان أن التصميم يمكنه تحمل الظروف الفعلية للعمل بدون فشل ميكانيكي أو انخفاض في الأداء.

في هذا الفصل، سيتم تفصيل جميع مراحل محاكاة FSI بداية من استيراد نتائج محاكاة CFD، مروراً بتحضير النموذج لتحليل بنية المادة، ضبط خواص المواد، إعداد الشبكة وشروط الحدية، وصولاً إلى تنفيذ الربط بين التحليلين واستعراض النتائج وتحليلها لضمان توافق التصميم مع متطلبات العمل الفعلية.

2.5 - أهمية محاكاة FSI :

تعد محاكاة التفاعل بين المائع والهيك (Fluid-Structure Interaction - FSI) خطوة أساسية في تصميم الأنظمة الهندسية المعرضة لتأثيرات ميكانيكية وحرارية ناتجة عن حركة الموائع، فجانبا دراسة السلوك الحراري والموائعي عبر محاكاة CFD، تتيح FSI تقييم كيفية استجابة الأجزاء الصلبة مثل الجدران والأنابيب للضغط الحرارية والميكانيكية. تظهر أهمية هذه المحاكاة في التنبؤ بالتشوهات والانفعالات والإجهادات الناتجة، مما يساعد على:

- ضمان سلامة وكفاءة النظام تحت ظروف التشغيل الفعلية.
- تحسين التصميم الهندسي لزيادة العمر الافتراضي وتقليل احتمالات الفشل.
- التأكد من أن الأبعاد والشكل الهندسي للمبادل لا يتغيران بشكل يضر بكفاءته الحرارية أو الميكانيكية.
- تقليل التكاليف المستقبلية عبر اكتشاف نقاط الضعف مبكراً ومعالجتها.

وبالتالي، فإن إدراج محاكاة FSI في دورة تطوير المنتج يعزز من موثوقية النظام النهائي ويضمن توافقه مع المعايير المطلوبة للأداء والسلامة.

3.5- أهمية دمج نتائج CFD السابقة مع تحليل بنية المادة The Importance of Integrating

: Previous CFD Results with Structural Analysis

يعتبر دمج نتائج المحاكاة العددية للموائع (CFD) مع التحليل الإنشائي خطوة ضرورية للحصول على تحليل دقيق ومتكامل لأنظمة التفاعل بين المائع والهيكل (FSI). فمن خلال النتائج الحرارية والضغطية المستخرجة من محاكاة CFD، يمكن نمذجة الأحمال الحقيقية التي يتعرض لها الهيكل بدقة عالية. تتجلى أهمية هذا الدمج في عدة نقاط أساسية:

- واقعية تحليل بنية المادة (Structural analysis): استخدام قيم الضغط ودرجات الحرارة الفعلية يجعل الحسابات العددية أكثر قرباً من ظروف التشغيل الحقيقية.
 - التنبؤ الدقيق بالتشوهات والإجهادات: مما يسمح بالكشف المبكر عن مناطق الضعف المحتملة وتصحيح التصميم قبل التصنيع.
 - تحسين الكفاءة والأمان: حيث يؤدي الدمج بين نتائج الموائع والسلوك الإنشائي إلى ضمان عمل النظام بأداء ثابت وآمن تحت مختلف ظروف التشغيل.
 - اختصار الزمن والتكلفة: يقلل هذا التكامل من الحاجة إلى اختبارات مادية مكلفة ومتكررة عبر تعويضها بنتائج رقمية دقيقة.
 - تحسين عملية التصميم المتكاملة: يسمح بتعديل التصميمات بشكل مدروس بناءً على التفاعلات المتوقعة بين الموائع والهياكل.
- بالتالي، فإن هذا الدمج بين CFD والتحليل الإنشائي لا يعتبر خياراً إضافياً فحسب، بل هو جزء جوهري من دورة تطوير الأنظمة المعقدة لضمان جودة وكفاءة المنتج النهائي.

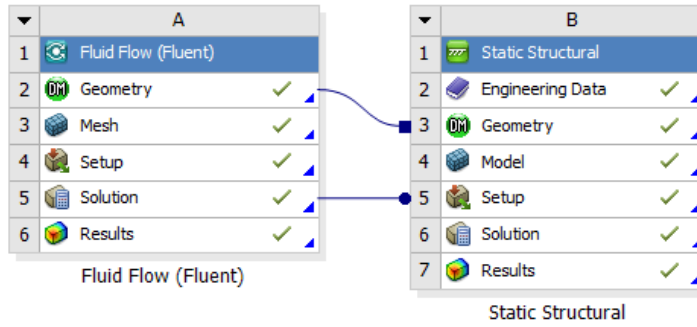
4.5- مراحل المحاكاة FSI Simulation Stages

1.4.5- استيراد نتائج محاكاة CFD إلى إعداد محاكاة FSI:

في المرحلة الأولى من محاكاة التفاعل بين الهيكل والسوائل (FSI)، قمنا باستيراد نتائج محاكاة الديناميكا الموائع (CFD) التي تم الحصول عليها باستخدام برنامج ANSYS Fluent إلى برنامج ANSYS Static Structural، الذي سيستخدم لتحليل التأثيرات الميكانيكية على الهيكل الصلب (الشكل 1.5)، الهدف من هذه المرحلة هو استخدام البيانات المستخلصة من محاكاة CFD، مثل الضغط، السرعة، ودرجة الحرارة، كمدخلات تؤثر على سلوك الهيكل في محاكاة FSI.

الفصل الخامس محاكاة التفاعل بين السائل والصلب (FSI) في المبادل الحراري المصمم

من خلال ربط برنامجي ANSYS Fluent و ANSYS Static Structural، يمكننا تحليل تأثير القوى والضغط الناتجة عن المائع على الهيكل الصلب للمبادل الحراري بشكل دقيق، هذه العملية تتيح نقل البيانات بين البرنامجين بشكل سلس، مما يضمن تحليل التفاعلات المتبادلة بين المائع والهيكل بدقة، وتأثيرات القوى والحرارة على التصميم، كما يتم التأكد من توافق الشبكات بين محاكاة CFD و FSI لضمان دقة انتقال البيانات وتكامل التحليل بين المائع والهيكل.



الشكل 1.5: ربط برنامجي ANSYS Static Structural و ANSYS Fluent.

2.4.5 - النموذج Model :

في المرحلة الثانية من محاكاة التفاعل بين الهيكل والسوائل (FSI)، بدأنا بحذف جسم المائع داخل المبادل الحراري (الشكل 2.5)، حيث أن البيانات التي تم الحصول عليها من محاكاة CFD قد وفرت لنا المتغيرات المؤثرة على الهيكل (مثل الضغط والحرارة) دون الحاجة إلى محاكاة المائع مرة أخرى.



الشكل 2.5: حذف جسم المائع داخل المبادل الحراري.

الفصل الخامس محاكاة التفاعل بين السائل والصلب (FSI) في المبادل الحراري المصمم

بعد ذلك، قمنا بتحديد نوع مادة الأجزاء المكونة للهيكل واختيارنا للألمنيوم (الشكل 3.5). يعتبر الألمنيوم مادة مثالية في دراستنا لأنها خفيفة الوزن، ولها قدرة جيدة على توصيل الحرارة، مما يجعلها مناسبة لتطبيقات المبادل الحراري، كما أن الألمنيوم يتمتع بمقاومة جيدة للتآكل وقوة ميكانيكية معتدلة، مما يجعله خيارا مثاليا لتحمل الأحمال الديناميكية الناتجة عن الموائع في النظام.

Outline of Schematic B2: Engineering Data				
A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Description
2	Material		Source	
3	Aluminum Alloy		Ger	General aluminum alloy. Fatigue properties come from MIL-HDBK-5H, page 3-277.
4	Structural Steel		Ger	Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material			

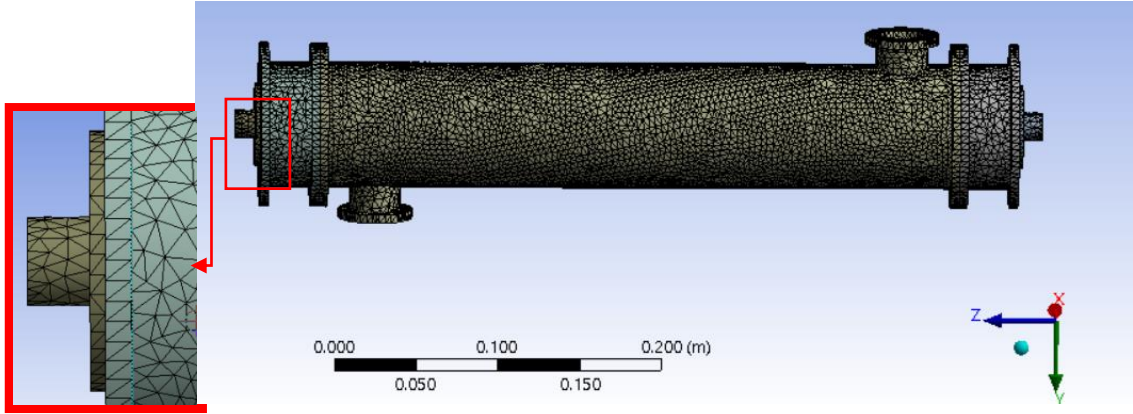
Properties of Outline Row 3: Aluminum Alloy				
A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2770	kg m ⁻³	
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion			
5	Coefficient of Thermal Expansion	2.3E-05	C ⁻¹	
6	Isotropic Elasticity			
7	Derive from	Young's Modulus and Poisson...		
8	Young's Modulus	7.1E+10	Pa	
9	Poisson's Ratio	0.33		
10	Bulk Modulus	6.9608E+10	Pa	
11	Shear Modulus	2.6692E+10	Pa	
12	S-N Curve	Tabular		
13	Interpolation	Semi-Log		
14	Scale	1		
15	Offset	0	Pa	
16	Tensile Yield Strength	2.8E+08	Pa	
17	Compressive Yield Strength	2.8E+08	Pa	
18	Tensile Ultimate Strength	3.1E+08	Pa	
19	Compressive Ultimate Strength	0	Pa	

الشكل 3.5: تحديد الألمنيوم كمادة الهيكل.

بعد تحديد المادة، قمنا بإنشاء شبكة (Mesh) لتمثيل الهيكل (الشكل 4.5). اخترنا حجم العنصر (Element Size) ب 0.004 متر (m) لضمان دقة التفاصيل في محاكاة التشوهات والضغط، كما اخترنا نوع العنصر Tetrahedron نظرا لقدرته على تمثيل الأشكال المعقدة بدقة أعلى (الشكل 5.5)، مما يساهم في تحسين دقة التحليل الميكانيكي للهيكل.

Details of "Mesh"	
Display	
Display Style	Use Geometry Setting
Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	4.e-003 m
Sizing	
<input checked="" type="checkbox"/> Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (2)
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default
Transition	Fast
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	0.51584 m
Average Surface Area	3.0745e-003 m ²
Minimum Edge Length	2.5e-003 m

الشكل 4.5: تهيئة إعدادات شبكة الميش.



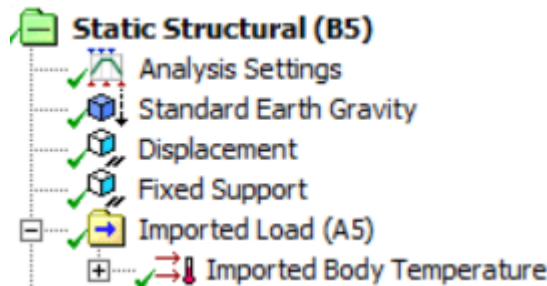
الشكل 5.5: شكل شبكة الميش على المبادل.

3.4.5 - التحليل الهيكلي الثابت Static Structural :

في مرحلة Static Structural (الشكل 6.5)، قمنا بتحديد اتجاه الجاذبية بحيث يكون موجها مع المحور Y. هذا التحديد مهم لأن الجاذبية تؤثر على توزيع القوى على الهيكل، وبالتالي يؤثر على سلوك المبادل الحراري تحت تأثير الأحمال المختلفة.

ثم في خيار Displacement، قمنا بتثبيت المبادل الحراري على السطح الأسطواني للغطاء الثابت، يعني ذلك أننا قمنا بتثبيت هذه المناطق لضمان أن الهيكل لا يتحرك أو يتعرض لتشوهات غير طبيعية عند نقاط الاتصال التي تكون ثابتة في الواقع بواسطة حوامل، هذا التثبيت يعكس الواقع العملي حيث تكون عادة مثبتة في مكانها ولا تتحرك تحت تأثير القوى.

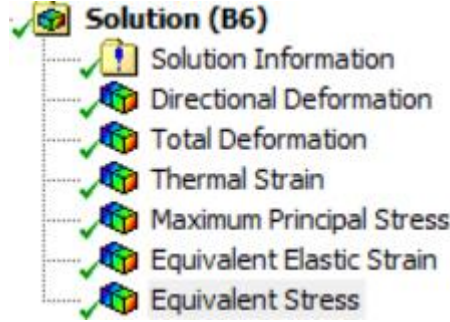
في خيار Imported Load، اخترنا Imported Body Temperature لتحديد تأثير الحرارة على الهيكل، من خلال هذه الخاصية، تم استيراد نتائج درجة الحرارة التي تم الحصول عليها من محاكاة CFD (حيث تم تحليل توزيع درجة الحرارة في السائل داخل المبادل الحراري)، ثم قمنا بتحديد هيكل المبادل الحراري في محاكاة Static Structural بحيث تتأثر الأجزاء المختلفة من الهيكل بدرجة السوائل المتدفقة داخل الأنابيب، مما يتيح لنا دراسة تأثيرات الحرارة على التشوهات والضغط الميكانيكية التي يتعرض لها الهيكل نتيجة لهذه الحرارة.



الشكل 6.5: العمليات المنجزة في Static Structural.

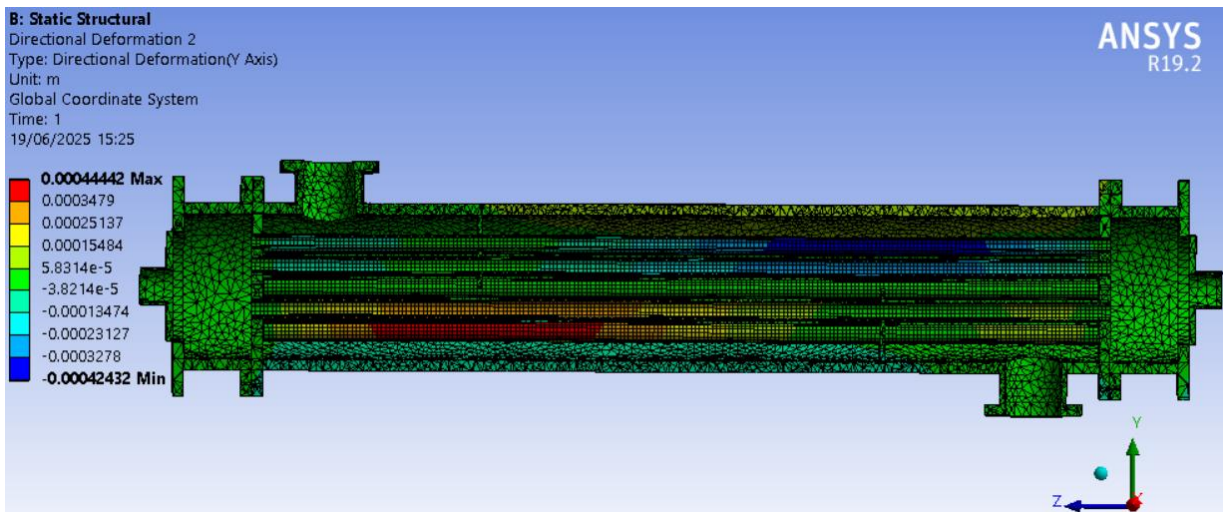
4.4.5 - تحديد المتغيرات وتحليل النتائج : Defining Variables and Analyzing Results

في هذه المرحلة، قمنا بتحديد مجموعة من المتغيرات المهمة لدراسة سلوك الهيكل تحت تأثير الحمل (الشكل 7.5)، والتي شملت:

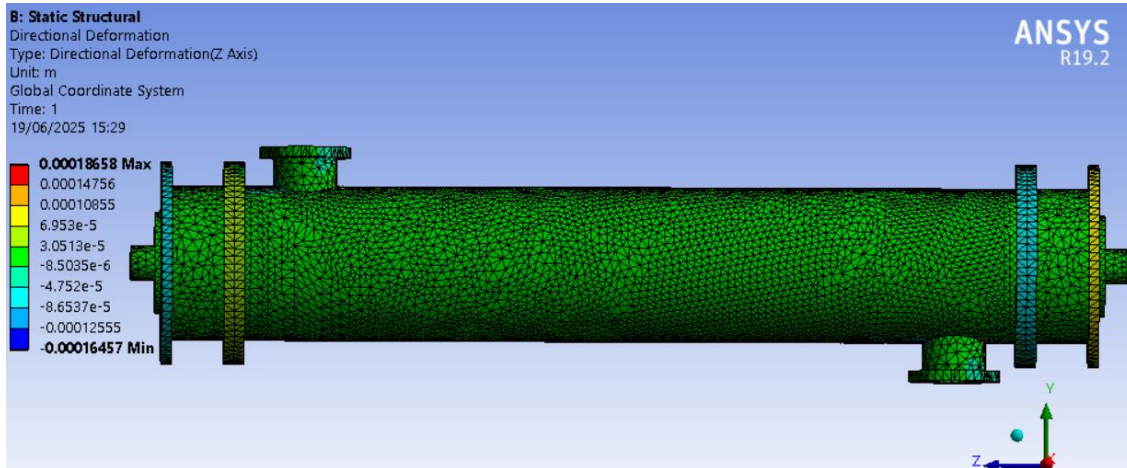


الشكل 7.5: تحديد المتغيرات المراد دراستها.

➤ الانتقال في اتجاه المحور Y و Z (Directional Deformation): هذا المتغير يعكس الانتقال الذي يحدث في اتجاه معين من الهيكل (الشكل 8.5 و 9.5)، تم ملاحظة أن الانتقالات كانت ضئيلة للغاية في الاتجاهات المختلفة، مما يشير إلى أن الهيكل قادر على مقاومة القوى المؤثرة عليه دون حدوث تشوهات كبيرة في أي اتجاه. الشكل 8.5 عبارة عن مقطع طولي للمبادل الحراري يوضح الانتقال على المحور Y للأنايب، حيث أن أقصى القيم للانتقالات كانت عند المساحة الحرة للأنايب وأكثر ثباتاً عند الحواجز.

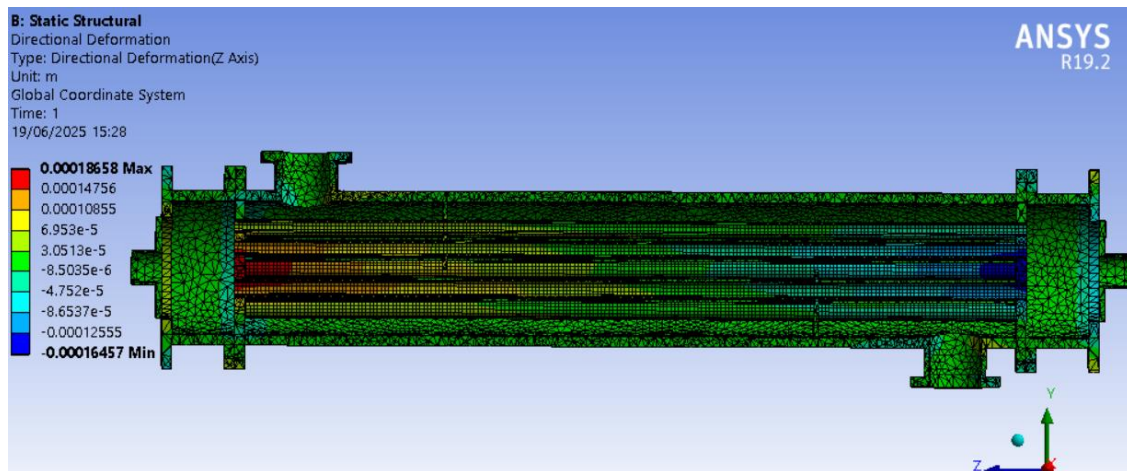


الشكل 8.5: الانتقال على المحور Y.



الشكل 9.5: الانتقال على المحور Z.

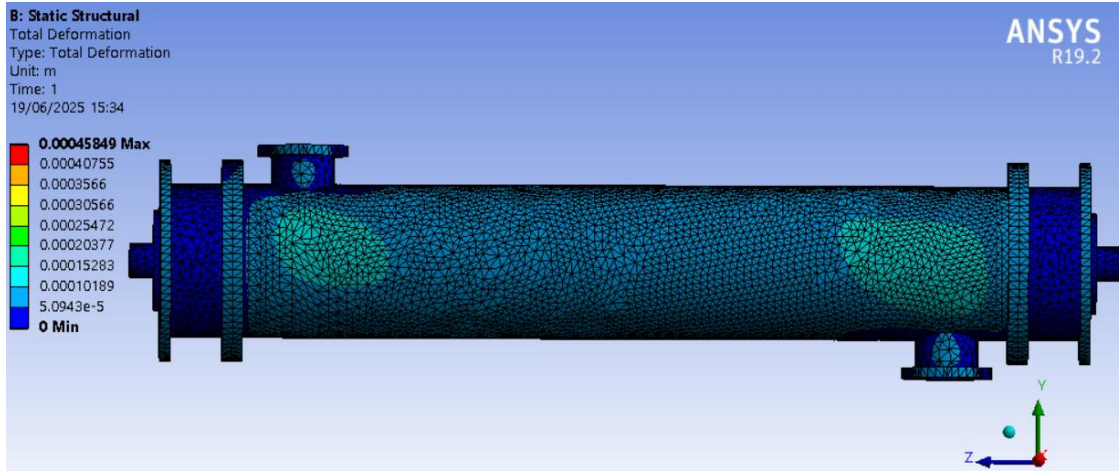
الشكل 10.5 عبارة عن مقطع طولي للمبادل الحراري تحت تأثير الحمل الحراري والضغط. يوضح تشوهات الأنابيب الحاملة للغاز حيث نجد أنها عند الحواجز أكثر ثباتاً ، كما أن الانتقالات القصوى تكون عند جانبي الغلاف ناتجة عن تمدد الأنابيب خاصة في المناطق الحرة (الغير مثبتة بالحواجز) مما يسمح بالانتقالات بنسبة أكبر تحت تأثير الحرارة وأيضاً بسبب تثبيت الغطاء الثابت على الجهتين بحوامل كما هو معمول في الواقع .



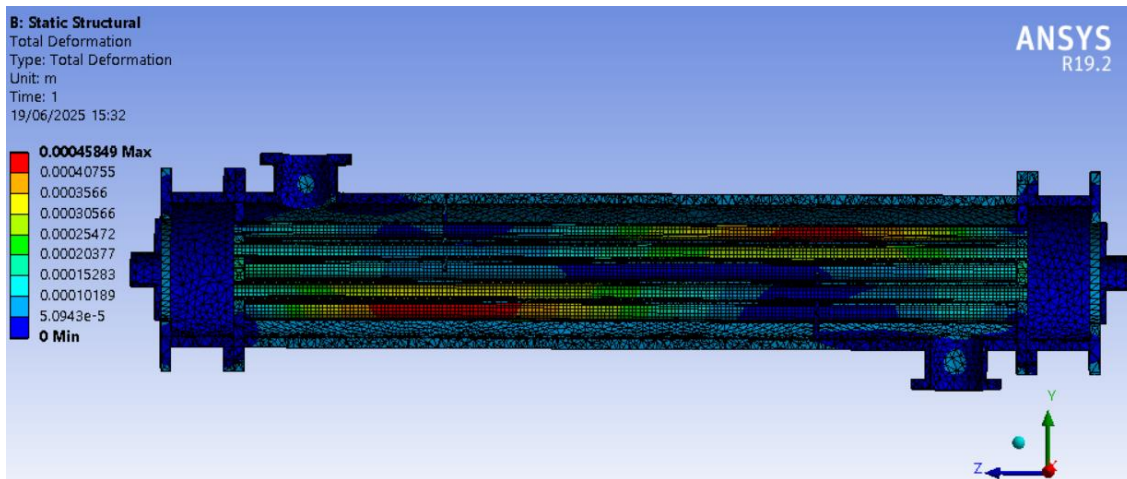
الشكل 10.5: مقطع للانتقال إتجاه المحور Z للأنابيب.

الفصل الخامس محاكاة التفاعل بين السائل والصلب (FSI) في المبادل الحراري المصمم

➤ الانتقال الكلي (Total Deformation): وهو الانتقال الإجمالي الذي يتعرض له الهيكل نتيجة لأحمال الحرارة والديناميكية (الشكل 11.5؛ 12.5). الانتقالات الكلية أيضا ضئيلة جدا، حيث لم تتجاوز 0.2 ملمتر (mm)، للهيكل الخارجي، وبالنسبة للأنايبب الحاملة للغاز فكانت أقصى قيمة 0.45 ملمتر (mm)، في المناطق الحرة. هذا يشير إلى أن الهيكل لا يتعرض لتشوهات كبيرة، وأنه يحتفظ بصلابته واستقراره تحت تأثير الأحمال والظروف الحرارية التي تم محاكاتها.



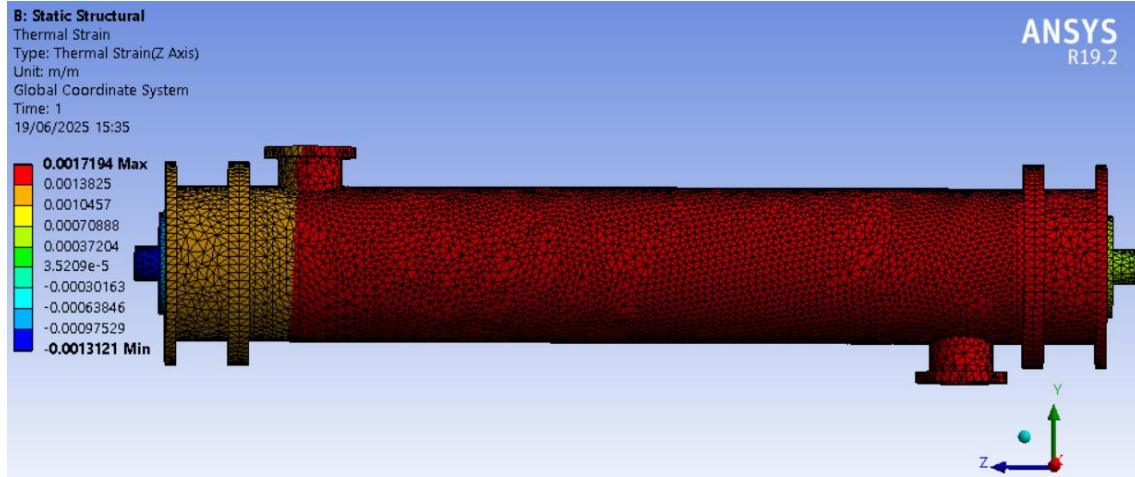
الشكل 11.5: الانتقال الكلي.



الشكل 12.5: مقطع يوضح الانتقال الكلي للأنايبب.

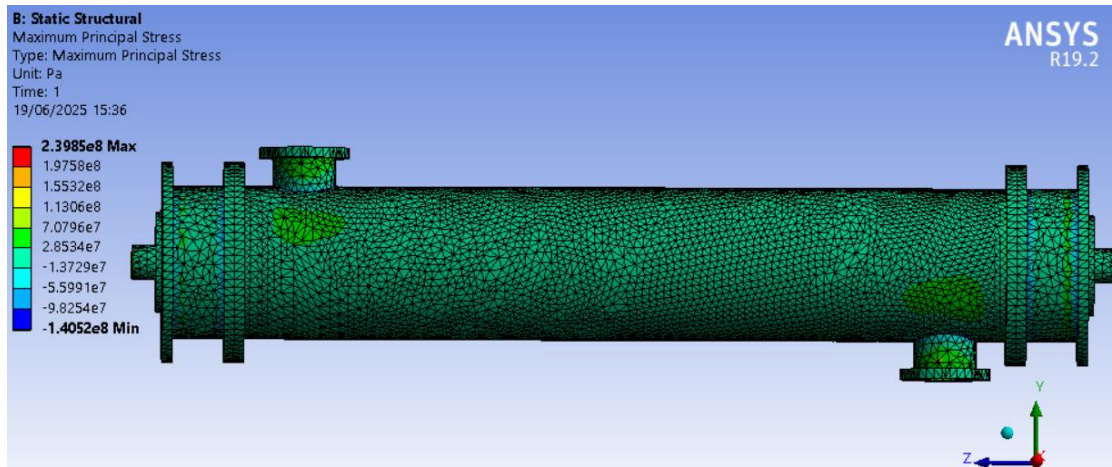
الفصل الخامس محاكاة التفاعل بين السائل والصلب (FSI) في المبادل الحراري المصمم

➤ **التشوه الحراري (Thermal Strain):** يمثل الشكل 13.5 تأثير درجات الحرارة على الهيكل من خلاله التمدد والانكماش الناتج عن التغيرات في درجات الحرارة ، وقد تبين أن التشوه الحراري الناتج عن الحرارة الذي بلغت قيمته القصوى **0.171%** لم يكن كبيرا بما يكفي للتسبب في تشوهات كبيرة، مما يعكس فعالية المادة (الألمنيوم) في تحمل التغيرات الحرارية وذلك مقارنة بالتشوه عند نهاية المرونة لمادة الالمنيوم.



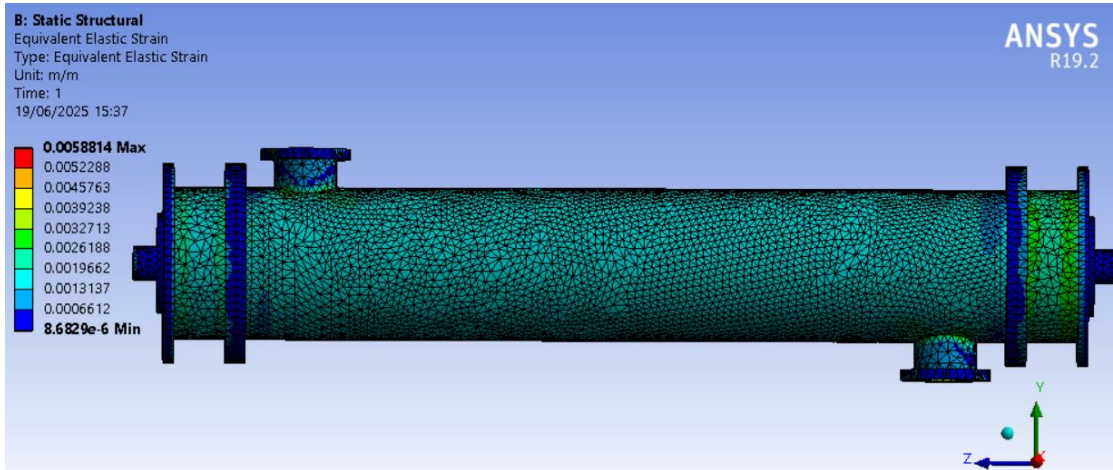
الشكل 13.5: التشوه الحراري.

➤ **الإجهاد الرئيسي الأقصى (Maximum Principal Stress):** الشكل 14.5 يوضح و يحدد الإجهاد الرئيسي الأقصى على الهيكل ب: **30 MPa**، وقد تبين أن هذا الإجهاد كان ضمن الحدود المقبولة، حيث لم يتجاوز القيم التي قد تتسبب في فشل أو تشوه دائم للهيكل أي بقائه في مجال مرونته، هذا يوضح أن الهيكل قادر على تحمل الضغوط الناتجة عن التدفق الحراري والميكانيكي في النظام.



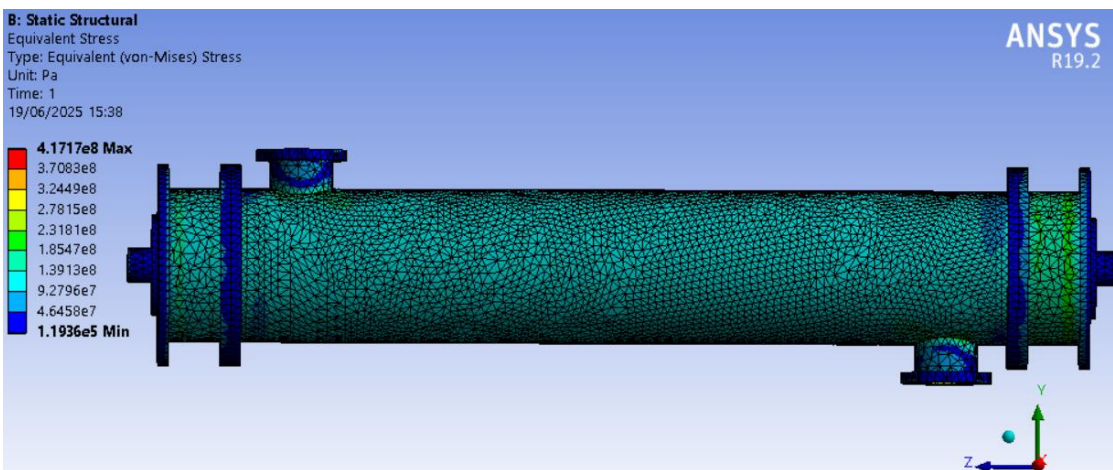
الشكل 14.5: الإجهادات الرئيسية.

➤ إجهاد التشوه المرن المكافئ **Equivalent Elastic Strain** : الشكل 15.5 يعبر عن مدى التغير في إجهاد التشوه المرن المكافئ، أي معرفت كيف يتغير شكل الهيكل أثناء التشغيل حيث وصلت إلى قيمة قصوى تساوي **0.40 %** وهذه القيمة لم تصل إلى مرحلة التشوه الدائم من خلال النتائج، لوحظ أن قيم هذا المتغير ظلت ضمن حدود منخفضة، مما يشير إلى أن التشوهات بقيت في المجال المرن، وهو مؤشر إيجابي على سلامة الهيكل.



الشكل 15.5: إجهاد التشوه المرن المكافئ .

➤ معيار فون ميزس للإجهاد المكافئ **Equivalent Stress (von Mises Stress)**: هو من أهم المعايير المعتمدة لتقييم مقاومة المادة للإجهادات المركبة (الشكل 16.5)، أي دمج جميع مكونات الإجهاد وتبسيط التشوهات المعقدة في المواد الثلاثية الأبعاد إلى قيمة واحدة يمكن مقارنتها بخصائص المادة، أظهرت النتائج أن الإجهادات القصوى **230 MPa** بقيت دون الحد الأقصى لتحمل مادة الألمنيوم، مما يدل على أن التصميم آمن من حيث مقاومة الانهيار أو الانبعاج.



الشكل 16.5: معيار فون ميزس للإجهاد المكافئ.

بناءً على هذه التحليلات، نستنتج أن النتائج كانت جيدة جداً، مما يعني أن الهيكل يحافظ بخصائصه الميكانيكية ويظل مستقرًا ضمن الظروف التشغيلية المحددة.

5.5 - خاتمة :

في ختام هذا الفصل، تمكنا من إجراء محاكاة شاملة للتفاعل بين الهيكل والسوائل (FSI) باستخدام برنامج ANSYS. بدأنا بتحديد المتغيرات الأساسية في محاكاة CFD لاستيراد النتائج المؤثرة على الهيكل، مثل الضغط ودرجة الحرارة، ومن ثم استخدمنا هذه البيانات في محاكاة Static Structural لتحليل تأثير هذه الأحمال والظروف الحرارية على الهيكل. قمنا بتحديد مادة الهيكل (الألمنيوم) نظرا لخصائصها المثالية في توصيل الحرارة، مقاومتها للتآكل، ووزنها الخفيف، مما يجعلها خيارا مثاليا لتطبيقات المبادل الحراري، ثم أتممنا إنشاء شبكة Mesh دقيقة باستخدام عناصر Tetrahedron، مع تحديد حجم العنصر بدقة لضمان تحليل دقيق للمناطق الحساسة في الهيكل. خلال مرحلة Static Structural، تم تحديد اتجاه الجاذبية، وتثبيت الهيكل في مناطق محددة، ثم تطبيق الأحمال الحرارية والميكانيكية بناء على نتائج محاكاة CFD، وفي مرحلة Solution، تم تحديد المتغيرات الأساسية مثل التشوهات، الإجهادات الحرارية، والإجهادات الرئيسية، حيث تبين أن التشوهات كانت ضئيلة جدا، مما يعكس استقرار الهيكل وقدرته على تحمل القوى والحرارة بشكل فعال. أظهرت نتائج هذه المحاكاة أن الهيكل المصمم للمبادل الحراري يظهر أداء جيدا تحت الظروف التشغيلية المدروسة، حيث كانت التشوهات والإجهادات ضمن الحدود المقبولة، مما يضمن استقرار النظام وعمره الافتراضي الطويل.

خاتمة عامة

ختاماً، تأتي هذه المذكرة كمحاولة علمية وهندسية لاستكشاف فكرة مبتكرة تهدف إلى تحسين أداء نظام التبريد في السيارات عبر استغلال الخصائص الفيزيائية المميزة لغاز البترول المسال (LPG)، وهو توجه ينسجم مع التغيرات العالمية المتسارعة نحو بدائل طاقة أنظف وأكثر كفاءة، ومن خلال هذه الدراسة، سعينا إلى تقديم رؤية متكاملة تشمل الجوانب النظرية، التصميم الهندسي، والمحاكاة العددية المتقدمة لفهم سلوك المبادل الحراري المقترح ومدى قابليته للتطبيق العملي.

انطلق العمل من دراسة نظرية معمقة غطت المبادلات الحرارية، تلتها دراسة رياضية لتفسير الظواهر الفيزيائية المؤثرة في النظام، ثم قمنا بتصميم نموذج هندسي يحاكي مبادلاً حرارياً بديلاً للرادياتور التقليدي باستخدام برنامج SolidWorks، متبعاً بمحاكاة ديناميكية الموائع الحاسوبية (CFD) في بيئة ANSYS Fluent لتحليل تدفق الموائع وانتقال الحرارة داخل النظام. كما شملت الدراسة محاكاة التفاعل بين السائل والصلب (FSI) لتقييم تأثيرات الحمل الحراري على بنية المبادل من حيث التشوهات والإجهادات.

النتائج التي تم الحصول عليها أظهرت أداء جيداً للنظام المقترح، حيث بقيت التشوهات والإجهادات ضمن حدود مقبولة، مما يؤكد جدوى الفكرة وفعاليتها من الناحية النظرية والهندسية، كما بيّنت الدراسة أن استغلال الغاز كمكون نشط في نظام التبريد يمكن أن يكون خطوة نحو تحسين كفاءة الأنظمة الحرارية داخل المركبات، مع الحفاظ على الاستدامة البيئية والاقتصادية.

في ضوء ما سبق، يمكن اعتبار هذا العمل أساساً يمكن البناء عليه في مشاريع مستقبلية أكثر تطوراً، سواء من خلال تحسين النموذج الهندسي، أو التحقق التجريبي من النتائج، أو توسيع نطاق الدراسة ليشمل ظروف تشغيل أكثر تنوعاً، نأمل أن تساهم هذه المذكرة في إثراء البحث العلمي في مجال أنظمة الطاقة الحرارية وتلهم حلولاً مبتكرة تخدم مستقبل النقل النظيف والفعال.

قائمة المراجع

- [1] .K. P. Shailandra and. R. Prerna, “Advancements in heat exchanger materials and manufacturing,” International Journal of Applied Engineering & Technology, vol. 6, p. 2, 2, June, 2024 .
- [2] N.tec, “Nordic tec,” 28 08 2024. [Online]. Available: <https://norditect-shop.fr> [Accessed 05 12 2024].
- [3] .K. S. Ramesh and. S. Dusan P, Fundamentals of heat exchanger design, Canada: John Wiley & Sons, INC, 2003.
- [4] N. Hossain, M. A. Mohammad, M. James and M. Josua P, Fundamentals of Industrial Heat Exchangers, India: Elsevier Inc, 2024.
- [5] I. H. EXCHANGERS, “ICARUS HEAT EXCHANGERS,” [Online]. Available: <https://www.icarus-hex-group.com>. [Accessed 11 23 2024].
- [6] K. Thulukkanam, Heat Exchanger Design Handbook Second edition, Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group, 2013.
- [7] k.sadik, l. Hongtan and p. Anchasa, third edition HEAT EXCHANGERS, Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group, 2012.
- [8] E. A. Kumar, “THE MECHANICAL ENGINEERING,” 18 02 2021. [Online]. Available: <https://themechanicalengineering.com>. [Accessed 27 11 2024].
- [9] J. S. Choksey, “J. D. Power,” 27 01 2021. [Online]. Available: <https://www.jdpower.com>. [Accessed 27 11 2024].

[10]Kaustubh Wani, Kounal Sose, Mangesh Shitole, Pradnya Kokad and N.R. Patil, “Basics of Radiator and Improvement Techniques,” International Journal of Innovative Science and Research Technology, vol. 4, no. 3, 2019 .

[11] “EControl Devices,” 05 07 2021. [Online]. Available: <https://econtroldevices.com>. [Accessed 28 11 2024].

[12]Roland W. Lewis, Perumal Nithiarasu and Kankanhalli N. Seetharamu, Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England: John Wiley & Sons Ltd, 2004 .

[13]التصميم بمساعدة الحاسوب, جامعة in.م. ا.س. الخيال, “تطبيق طريقة العناصر المحددة في إنتقال الحرارة,” وادي النيل، عطبرة، السودان, 1998.

[14]J.-C. Han, Analytical heat transfer, Boca Raton, FL: CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business, 2012 .

[15]YUNUS A. ÇENGEL and AFSHIN J. GHAJAR, HEAT AND MASS TRANSFER, 2 Penn Plaza, New York, NY 10121: McGraw-Hill Education, 2015 .

[16]R. Singh, “Lecture Notes,” Namibia University of Science and Technology, 2021. [Online]. Available: www.studocu.com. [Accessed 14 01 2025].

[17] .2024 03 26 “أراجيك,” حوري, [Online]. Available: <https://www.arageek.com/>. [Accessed 01 08 2025].

[18]Robert W. Fox, Alan T. McDonald and Philip J. Pritchard, INTRODUCTION TO FLUID MECHANICS SIXTH EDITION, 111 River Street, Hoboken, NJ 07030: John Wiley & Sons, 2004 .

[19] م. ت. الكامل, ميكانيك الموائع الطبعة الثالثة 2021, الإمارات: المؤلف, 2021. [19]

[20] unknown, "GeeksforGeeks," K 061, Tower K, Gulshan Vivante Apartment, Sector 137, Noida, Gautam Buddh Nagar, Uttar Pradesh, 201305, 19 12 2023. [Online].

Available: <https://www.geeksforgeeks.org/>. [Accessed 08 01 2025].

[21] D.-I. F. U. Rückert, "Computational Fluid Dynamics (CFD) 05 – Turbulent Flow and Eddies," Presentation, 09 08 2018 .

[22] Bruce R. Munson, Theodore H. Okiishi, Wade W. Huebsch and Alric P. Rothmayer, Fundamentals of Fluid Mechanics 7 th edition, Inc. 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923: John Wiley & Sons, 2013 .

[23] s.kabir, "MEASUREMENT OF PRESSURES ON AIRFOIL/WING IN UNSTEADY FLOW," ResearchGate, 14 05 2020 .

[24] abdelhamid bouhelal and arezki smaili, "Introduction à la CFD (Computational Fluid Dynamics)," ResearchGate, 02 02 2024 .

[25] J. C. Jo, "FLUID-STRUCTURE INTERACTIONS," in PRESSURE VESSELS AND PIPING SYSTEM, ©Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), p. 62.

[26] P. Paul A. Lagace, "ocw.mit.edu," 2001. [Online]. Available: <https://ocw.mit.edu/>. [Accessed 01 02 2025].