

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة محمد بوضياف - المسيلة



ميدان: علوم المادة  
فرع: الفيزياء.  
تخصص: الفيزياء الطاقوية و  
الطاقات المتجددة

كلية: العلوم.  
قسم: الفيزياء.  
رقم: 2024/PH/ENR/16

## مذكرة مقدمة لنيل شهادة الماستر أكاديمي

إعداد الطالبتين: طاع الله هناء وبوزيان سهام

تحت عنوان

### دراسة تأثير تموج الزعانف غير المنتظم على كفاءة المبادل الحراري

تمت المناقشة يوم 2024/ 06 /12 أمام اللجنة المكونة من:

|              |               |                                |
|--------------|---------------|--------------------------------|
| رئيسا        | جامعة المسيلة | اسم ولقب الاستاذ(ة) سالمى محمد |
| مشرفا ومقررا | جامعة المسيلة | اسم ولقب الاستاذ(ة) طحور فروع  |
| مناقشا       | جامعة المسيلة | اسم ولقب الاستاذ (ة) مهدي خالد |

السنة الجامعية: 2024/2023

## شكر وعرفان

قال رسول الله صلى الله عليه وسلم "من لم يشكر الناس لم يشكر الله عز وجل  
تتسابق الكلمات وتتراحم العبارات لتنظم عقد شكر الذي يستحقه جميع من ساعدنا في انجاز  
هذا العمل

الشكر لله تعالى الذي ألهمنا الإرادة والسير والمثابرة لإتمام هذا العمل  
اعترافا بالفضل وتقديرا للجميل نتوجه بالشكر وخالص الامتنان إلى الأستاذ الفاضل  
"طحرور فروق" على حسن توجيهه ونصائحه ودعمه طيلة العمل فجزاه الله خيرا وبارك في  
صحته وعلمه

كما نتوجه بجزيل الشكر إلى الأساتذة أعضاء لجنة المناقشة

"مهدي خالد"، "سالي محمد"

لموافقتهم على تقييم هذا العمل

كما نشكر كل من قدم لنا يد المساعدة من قريب أو بعيد لإنجاز هذه المذكرة، وكل من مهدوا  
لنا طريق العلم والمعرفة  
شكرا جميعا

## إهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات

الحمد لله حبا وشكرا وامتنانا على البدء والختام

بكل حب أهدي ثمرة تخرجي ونجاحي

إلى الذي زين اسمي بأجمل الألقاب، من دعمني بلا حدود وأعطاني بلا مقابل، إلى من علمني أن الدنيا كفاح

سلاحها العلم والمعرفة، داعمي الأول في مسيرتي وسندي وقوتي وملأذي، فخري واعتزازي

## "والدي الحبيب"

رحمك الله ورزقني لقاءك في الفردوس الأعلى من الجنة

ستبقى كلماتك نجوم أهتدي بها في ظلمات الحياة اليوم وفي الغد وإلى الأبد

ستبقى حاضرا في كل الأشياء باق في قلبي و حديثي وصمتي ودعائي

رحمك الله يا أغلى ما فقدت

ابنتك: سهام

إهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، الحمد لله قولاً وعملاً وفعلاً،

الحمد لله ما انتهى دربٌ ولا تمَّ عملٌ إلا بفضلِهِ وعونه، تخزَّجت بفضل الله وتوفيقه

أهدي النجاح هذا إلى روح والدي الذي لم يشاهدني وأنا أتوج على هذه المنصة، فكم كنت أتمنى أن تكون بجانبني في هذه اللحظة الجميلة من حياتي، لكن وعد يا أبي سأرفع رأسك عالياً بكل عزيمة وإصرار، رحمك الله وأتار قبرك يا أغلى سند وأغلى أب رحل عن الدنيا

إلى من وضع الله الجنة تحت أقدامها إلى نبع الحب التي حفر اسمها على جدار قلبي إلى من سهرت الليالي من أجل راحتي إلى منبع الطيبة والحنان أمي الحبيبة الغالية

إلى من لهم الفضل الكبير في تشجيعي وتحفيزي ومن منهم تعلمت المثابرة والاجتهاد وإلى من بهم أكبر وعليهم أعتمد وإلى من بوجودهم اكتسب قوة ومحبة لا حدود لها وإلى من عرفت معهم معنى الحياة

“إخوتي وأخواتي وزوجاتهم وأزواجهم وأولادهم فرداً فرداً”

إلى “زوجي الغالي” والعزيز، أشكرك على وقوفك بجانبني في مثل هذا النجاح، فلولا الله ثم دعواتك لما حصلت على ما كنت أتمنى، فشكراً لك من القلب على مساعدتك لي

لتراني واقفة أمامك بكل هذا الصمود

إلى “عائلتي الثانية” من كان لهم الفضل الكبير في وصولي وتحقيق هدي وغايتي إلى من كانوا

عونا وسندا لي في كل خطوة أخطوها إلى النجاح

وإلى كل من علمني حرفاً وأخذ بيدي في سبيل تحصيل العلم والمعرفة وكل اساتذتي الكرام وعلى رأسهم

الأستاذ المشرف “طحرور فروق” وإلى كل أصدقائي الذين تشرفت بمعرفتهم في الدراسة وفي العمل

واخص بالذكر صديقتي في انجاز المذكرة مبارك علينا التخرج يا رفيقتي

طاع الله هنا

# الفهرس

|     |   |
|-----|---|
| i   | الفهرس  |
| iii | قائمة الأشكال   |
| v   | قائمة الجداول   |
| v   | قائمة الرموز  |
| 1   | مقدمة عامة  |
|     | الفصل الأول : مفاهيم أساسية حول المبادلات الحرارية    |
| 3   | 1.1 تعريف المبادل الحراري                             |
| 3   | 2.1 طرق نقل الحرارة                                   |
| 3   | 1.2.1 نقل الحرارة بالتوصيل                            |
| 4   | 2.2.1 نقل الحرارة بالحمل الحراري                      |
| 4   | 3.2.1 نقل الحرارة بالاشعاع الحراري                    |
| 4   | 3.1 الدور الأساسي للمبادل الحراري                     |
| 5   | 4.1 تصنيف المبادلات الحرارية                          |
| 5   | 1.4.1 حسب التوصيل                                     |
| 5   | 2.4.1 حسب التدفق                                      |
| 6   | 3.4.1 حسب التصميم                                     |
| 8   | 5.1 تطبيقات المبادلات الحرارية                        |
| 9   | 6.1 الزعانف   |
| 9   | 1.6.1 تعريف الزعانف                                   |
| 10  | 2.6.1 أنواع الزعانف                                   |
| 10  | 1.2.6.1 الزعانف المستمرة                              |
| 10  | 2.2.6.1 الزعانف المستقلة                              |
| 11  | 7.1 بحث بيولوجرافي على تحسين كفاءة المبادلات الحرارية |
| 12  | 1.7.1 دراسة تأثير الأبعاد الهندسية وتدفق السوائل      |
| 13  | 2.7.1 تأثير المسافة بين الزعانف                       |
| 14  | 3.7.1 تأثير شكل الأنبوب وقطره                         |
| 15  | 4.7.1 تأثير شكل الزعانف                               |
| 18  | 5.7.1 تأثير السعة والطول الموجي                       |
|     | الفصل الثاني : دراسة عددية                            |
| 19  | 1.2 مقدمة   |

|    |  |
|----|--|
| 20 | 2.2. المعادلات المتعلقة بالمشكلة المدروسة    |
| 21 | 3.2. طرق حل المعادلات التفاضلية الجزئية      |
| 21 | 4.2. طريقة الحجوم الحدية (المنتهية)          |
| 23 | 5.2. محاكاة عددية                            |
| 23 | 1.5.2. مجال الحساب                           |
| 26 | 2.5.2. الشروط الحدية                         |
| 27 | 3.5.2. الشبكة                                |
| 27 | 4.5.2. الخصائص الفيزيائية                    |
| 28 | 6.2. أدوات المحاكاة FLUENT و GAMBIT          |
| 28 | 1.6.2. شرح برنامج GAMBIT                     |
| 28 | 1.1.6.2. شرح عام                             |
| 29 | 2.1.6.2. طريقة إنشاء الهندسة                 |
| 30 | 3.1.6.2. الشبكة                              |
| 32 | 4.1.6.2. طريقة الحفظ                         |
| 32 | 2.6.2. شرح برنامج FLUENT وتوضيح مراحل الحساب |
|    | الفصل الثالث: نتائج الدراسة ومناقشتها        |
| 36 | 1.3. مقدمة                                   |
| 36 | 2.3. حساب مختلف المقادير                     |
| 38 | 3.3. النتائج والمناقشة                       |
| 38 | 1.3.3. تأثير تغيير سعة الموجة                |
| 42 | 2.3.3. تأثير تغيير طول الموجة                |
| 45 | 3.3.3. تأثير رقم رينولدز                     |
| 47 | خاتمة  |
| 48 | قائمة المراجع                                |

## قائمة الأشكال

| الصفحة | عنوان الشكل   |
|--------|---|
| 3      | الشكل 1.1: مبادل حراري (15).....  |
| 5      | الشكل 2.1: مبدأ المبادل المضاد للتيار (16).....   |
| 6      | الشكل 3.1: مبدأ المبادل المشترك الحالي (16).....  |
| 6      | الشكل 4.1: نوعان من التيار المتقاطع. (16).....  |
| 7      | الشكل 5.1: مبادل حراري أنبوبي (8).....  |
| 7      | الشكل 6.1: مبدأ مبادل حراري صفائحي (8).....   |
| 9      | الشكل 7.1: تطبيقات المبادلات الحرارية.....  |
| 10     | الشكل 8.1: تصميمات مختلفة للزعانف المستمرة.....   |
| 11     | الشكل 9.1: زعانف مستقلة (11).....   |
| 13     | الشكل 10.1: مختلف الاحداثيات الهندسية التي تحدد مبادل حراري.....  |
| 14     | الشكل 11.1: أمثلة لمسافات فاصلة بين زعانف حلزونية و مسننة.....  |
| 15     | الشكل 12.1: تأثير قطر الأنبوب على عدد نوسيلت وعامل الاحتكاك ومعامل انتقال الحرارة وانخفاض الضغط (20)..... |
| 16     | الشكل 13.1: أنبوب الى زعانف منشورات مع الموقع الزاوي التابع الثقوب (21).....                              |
| 16     | الشكل 14.1: أشكال هندسية لمبادل أنبوبي بزعانف حلقيّة مموجة (23).....                                      |
| 17     | الشكل 15.1: هندسة المبادلات الحرارية (24).....  |
| 17     | الشكل 16.1: رسم تخطيطي لتصاميم الزعانف التي تمت دراستها.....  |
| 18     | الشكل 17.1: رسم تخطيطي لتصميم زعانف مكرومترية متموجة بشكل غير منتظم.....                                  |
| 19     | الشكل 1.2: هندسة مبادل حراري ذو أنابيب دائرية بزعانف متموجة.....  |
| 22     | الشكل 2.2: حجم التحكم النموذجي لحالة ثنائية الأبعاد.....  |
| 24     | الشكل 3.2: مقطع أفقي وعمودي لمجال الحساب لمبادل أنبوبي بزعانف جيبيية.....                                 |
| 25     | الشكل 4.2: مجال الحساب ثلاثي الأبعاد والشروط الحدية.....  |
| 27     | شكل 5.2: مقطع من الشبكة المنجزة.....  |
| 29     | شكل 6.2: عرض عام لنافذة برنامج Gambit.....  |
| 30     | شكل 7.2: خطوات رسم الأشكال الهندسية في Gambit.....  |
| 31     | شكل 8.2: قائمة إنشاء الشبكات.....   |

|    |   |
|----|---|
| 31 | ..... شكل 9.2: مقاطع توضيحية في الشبكة المنجزة  |
| 32 | ..... شكل 10.2: حفظ الملف في البرنامج Gambit  |
| 33 | ..... شكل 11.2: تعريف نموذج الاضطراب  |
| 34 | ..... شكل 12.2: مواصفات الشروط الحدية   |
| 34 | ..... شكل 13.2: اختيار نموذج الحساب   |
| 35 | ..... شكل 14.2: بدء الحسابات  |
| 37 | ..... شكل 1.3: طريقة حساب الانتالبي الكلي   |
| 38 | ..... شكل 2.3: طريقة حساب الضغط الكلي   |
| 39 | ..... شكل 3.3: تأثير تغير سعة الموجة على التدفق الحراري   |
| 40 | ..... الشكل 4.3: توزيع درجات الحرارة من أجل $\Delta A = -0,25\text{mm}$ و $\Delta A = 0,25\text{mm}$ ( $Re = 10800$ )     |
| 41 | ..... شكل 5.3: تأثير تغير سعة الموجة على انخفاض الضغط   |
| 42 | ..... شكل 6.3: تأثير تغير سعة الموجة على معامل الفعالية   |
| 43 | ..... شكل 7.3: تأثير تغير طول الموجة على التدفق الحراري   |
| 43 | ..... شكل 8.3: توزيع درجات الحرارة من أجل $\Delta \lambda = -3\text{mm}$ و $\Delta \lambda = 3\text{mm}$ ( $Re = 10800$ ) |
| 44 | ..... شكل 9.3: تأثير تغير طول الموجة على انخفاض الضغط   |
| 45 | ..... الشكل 10.3: تأثير تغير طول الموجة على معامل الفعالية  |

## قائمة الجداول

| الصفحة | الجدول  |
|--------|---|
| 25     | جدول 1.2: أبعاد المبادلات الحرارية المستخدمة في هذه الدراسة.....                        |
| 26     | جدول 2.2: الشروط الحدية.....  |
| 46     | جدول 1.3: تأثير رقم رينولدز على خصائص المبادل الحراري لقيمتين من $\Delta A$ .....       |
| 46     | جدول 2.3: تأثير رقم رينولدز على خصائص المبادل الحراري لقيمتين من $\Delta \lambda$ ..... |

## قائمة الرموز

| الرموز          | دلالتها                 | الوحدة               |
|-----------------|-------------------------|----------------------|
| $C_p$           | الحرارة النوعية         | [J/(kg. K)]          |
| $D_t$           | قطر الأنبوب             | [m]                  |
| $E_a$           | سمك الزعنفه             | [m]                  |
| $K$             | معامل الأداء            | [/]                  |
| $\dot{m}$       | معدل تدفق كتلة السوائل  | [kg/s]               |
| $\Delta P$      | انخفاض الضغط            | [Pa]                 |
| $S_a$           | التباعد بين الزعانف     | [m]                  |
| $T_{ent}$       | درجة حرارة مدخل الهواء  | [K]                  |
| $T_{sor}$       | درجة حرارة مخرج الهواء  | [K]                  |
| $\dot{V}$       | تدفق الحجم              | [m <sup>3</sup> /s]  |
| $\eta$          | كفاءة المبادل الحراري   | [/]                  |
| $\lambda_a$     | التوصيل الحراري للزعنفه | [W/m. K]             |
| $\lambda_{air}$ | توصيلية الهواء          | [W/m. K]             |
| $\mu$           | الموصلية المضطربة       | [kg/m. s]            |
| $\rho$          | الكثافة                 | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| $\phi$          | التدفق الحراري          | [W]                  |
| $\lambda$       | طول الموجة              | [m]                  |
| $A$             | سعة الموجة              | [m]                  |

# مقدمة عامة

## مقدمة عامة

المبادلات الحرارية الأنبوبية ذات الزعانف هي واحدة من المبادلات الحرارية الأكثر شيوعاً واستخداماً حيث يتم توظيفها في العديد من التطبيقات الصناعية مثل أنظمة تكييف الهواء والتبريد ومبردات السيارات ومحطات الطاقة ومعدات المعالجة ومحطات الطاقة الشمسية الدينامو-حرارية. في هذا النوع من المبادلات، يتدفق المائع ذو معامل نقل الحرارة الأعلى (السائل) داخل الأنابيب والآخر ذو معامل نقل الحرارة الأقل (الهواء) يتدفق خارج الأنابيب، حيث تكون الأسطح ذات الزعانف (مسطحة، دائرية، مسننة... الخ) على الجانبين.

يمكن للأنابيب أن تكون دائرية أو بيضاوية أو مسطحة الشكل ومرتبطة في نمط خطي أو متداخل حيث تتحمل الضغط العالي (حتى 3000 كيلو باسكال) بحيث يتدفق السائل عالي الضغط بسهولة داخل الأنابيب دون تسرب.

إن دراسة تأثير شكل الزعانف والأنابيب على كفاءة المبادل الحراري أمر مهم لفهم العوامل التي تؤثر على عمليات الخصائص الهيدروليكية والحرارية لهذه الأجهزة.

في عمليات النقل الحراري من خلال المبادلات الحرارية تكون المقاومة الحرارية الكبيرة على الجانب الغازي (80% من إجمالي المقاومة الحرارية) حيث تضاف زعانف معدنية لتطوير أداء الجانب الغازي. ومن بين الأشكال الهندسية المختلفة المتاحة، تم استخدام الزعانف المتموجة على نطاق واسع في أنظمة تكييف الهواء والتبريد. توفر الزعانف المتموجة مساحة سطحية كبيرة للتبادل الحراري مع فقدان ضغط معتدل بسبب الخلط الفعال للسائل الناتج عن الدوامات الممتدة والمتدفقة. إلا أن إضافة الزعانف المموجة يؤدي إلى زيادة في سعر المبادلات ووزنها وقدرة ضخ المائع المطلوبة في حالة الحمل القسري. ولهذا السبب، هناك الكثير من الأبحاث حول تحسين أداء هذا النوع من الزعانف.

عندما تكون زعانف المبادل الحراري متموجة بشكل منتظم أو غير منتظم، فإنها يمكن أن تعطل التدفق الصفحي للمائع وتسبب الجريان المضطرب للمائع. يعزز الاضطراب انتقال الحرارة عن طريق زيادة اختلاط جزيئات الموائع وتعزيز انتقال الحرارة بالحمل الحراري. ومع ذلك، يمكن أن يؤدي أيضاً إلى زيادة انخفاض الضغط وفقدان سرعة التدفق.

تتضمن دراسة التموج غير المنتظم للزعانف عادةً دراسة العوامل التي تساهم في تموج الزعانف، مثل عمليات التصنيع، وخصائص المواد، والظروف التشغيلية. ويهدف الباحثون إلى فهم كيفية تأثير هذه المخالفات على الأداء الحراري للمبادلات الحرارية، بما في ذلك معدلات نقل الحرارة، وانخفاض الضغط، والكفاءة الإجمالية.

لتحسين أداء المبادل الحراري في ظل وجود تموج غير منتظم للزعانف، يمكن استخدام تقنيات مختلفة. وقد يشمل ذلك تصميم مبادلات حرارية ذات مساحات سطحية أكبر لتعزيز نقل الحرارة، واستخدام الحواجز أو الزعانف للحث على المزيد من الاضطراب، وتحسين خشونة السطح لتعزيز المستويات المرغوبة من الاضطراب، والتحكم في سرعة التدفق لتحقيق نقل الحرارة الأمثل، كذلك استخدام مواد متقدمة ذات كفاءة عالية في نقل الحرارة.

. يعد دراسة وفهم كل أنواع المبادلات الحرارية ومزاياها الفريدة أمرًا بالغ الأهمية في اختيار النوع المناسب لتطبيقك المحدد. سواء كنت تحتاج إلى الحجم الصغير، أو الكفاءة، أو الدقة، أو تعدد الاستخدامات، فإن اختيار نوع المبادل الحراري المناسب ضروري لتلبية احتياجاتك.

في نفس سياق البحث قمنا في هذه المذكرة بدراسة عددية معمقة لتأثير هندسة الزعانف المتموجة بشكل غير منتظم (تأثير تغيير الزيادة والنقصان في سعة وطول الموجة) وعدد رينولدز على جريان المائع والتبادل الحراري لمبادل حراري مع وجود صفين من الأنابيب في ترتيب متداخل. تم تحليل عشرة أشكال هندسيًا بسعة موجة مختلفة (0-1,75 مم) وأطوال موجات (8-21,5 مم). من أجل تحديد خصائص تدفق المائع و التبادل الحراري من أجل مجال تغيير عدد رينولدز ( $10800 < Re < 1200$ )، تم استخدام طريقة الحجم المنتهية الخاصة بالبرنامج الحسابي Fluent 6.2 في عمليات المحاكاة لدينا.

تحتوي هذه المذكرة على ثلاثة فصول:

- في الفصل الأول قدمنا أولاً المفاهيم الأساسية المتعلقة بتصميم هذه الأجهزة. يعرض الجزء الثاني من هذا الفصل بحث ببليوغرافي مهم جدًا فيما يتعلق بتأثير العديد من المعلمات الهندسية على أداء المبادل الحراري.
  - وفي الفصل الثاني عرضنا طريقة المحاكاة باستخدام برنامج Fluent الحسابي وبرنامج Gambit الذي يسمح برسم الأشكال الهندسية وشبكتها. كما قدمنا، في هذا الفصل، المعادلات المشتقة الجزئية التي تحكم التدفق غير القابل للضغط للمائع مع انتقال الحرارة المرتبط به، والشروط الحدية التي تناسبها وكذلك أبعاد مجالنا الحسابي.
  - تم تخصيص الفصل الثالث لعرض النتائج العددية لتأثير تغيير سعة وطول موجات الزعانف وعدد رينولدز على تشغيل المبادل الحراري. تم عرض النتائج من حيث تغيير التدفق الحراري، انخفاض الضغط، معامل الأداء وتوزيع درجات الحرارة.
- وختمنا هذه الفصول الثلاثة بخاتمة عامة تم فيها عرض النتائج العددية ووجهات نظرنا بشأنها بشكل موجز.

## الفصل الأول:

مفاهيم أساسية حول المبادلات

الحرارية

### 1.1. تعريف المبادل الحراري

المبادل الحراري هو جهاز يستخدم لنقل الحرارة بين سائلين أو بين سائل وهواء بطريقة فعالة، يتم ذلك عن طريق وضع السوائل أو الغازات المراد تبريدها أو تسخينها في مسارات متعددة مما يسمح بانتقال الحرارة بينها دون أن تختلط المواد.

تتكون المبادلات الحرارية من مجموعة من الأنابيب أو الألواح الموضوعية بالتوازي أو على التقاطع مع مسارات للسوائل أو الغازات لتمكين انتقال الحرارة،

تُستخدم في مجموعة واسعة من التطبيقات مثل تبريد المياه في نظم التكييف، أو تسخين الماء في أنظمة التدفئة، أو حتى في عمليات صناعية معقدة مثل تكرير البترول أو توليد الكهرباء [1].

جهاز مبادل الحرارة، كما يوحي اسمه، هو جهاز يُسهّم في نقل الطاقة على شكل حرارة بين سائلين أو أكثر، تتحرك السوائل الساخنة من المدخل إلى المخرج لتحويل جزء من حرارتها إلى سائل باردة تتدفق بين مداخل ومخارج مختلفة، في أنواع المبادلات الأكثر شيوعاً، يتم فصل السوائل بواسطة جدار يتم من خلاله نقل الحرارة بالتوصيل [2].



شكل 1.1: مبادل حراري

### 2.1 طرق نقل الحرارة

#### 1.2.1 نقل الحرارة بالتوصيل

نقل الحرارة عن طريق التوصيل يشير إلى تبادل الطاقة الذي يحدث عند اتصال مباشر بين المواد ومصدر الحرارة. في الغازات والسوائل، تنتشر الطاقة عن طريق التصادمات العشوائية بين الجزيئات على المستوى المجهرى، أما في الصلب فإن نقل الحرارة يتم عن طريق التوصيل بواسطة الإلكترونات الموصلة والفوتون وهي اهتزازات الشبكة البلورية حيث يتفاعل الفوتون مع الإلكترونات الحرة، مما يفسر الارتباط بين القيادة الحرارية والكهربائية، ولهذا السبب تعتبر بعض المعادن مثل النحاس والفضة والألومنيوم والفولاذ المقاوم للصدأ موصلين جيدين للحرارة

والكهرباء، التوصيل الحراري يشير إلى نقل الحرارة تلقائيًا من منطقة ذات درجة حرارة مرتفعة إلى منطقة ذات درجة حرارة أقل [2].

### 2.2.1. نقل الحرارة بالحمل الحراري

هو نقل الطاقة الحرارية من السطح عن طريق حركة السائل مثل الهواء أو الماء الذي تم تسخينه. تتمدد معظم السوائل عند تسخينها، وبالتالي تصبح أقل كثافة وترتفع مقارنة بأجزاء أخرى من السائل، تكون أكثر برودة لذلك، عندما يسخن الهواء الموجود في غرفة ما، فإنه يرتفع إلى السقف لأنه أكثر دفئًا وأقل كثافة، وينقل الطاقة الحرارية عندما يصطدم بالهواء البارد الموجود في الغرفة، ثم يصبح أكثر كثافة ويهبط مرة أخرى نحو الأرض، تخلق هذه العملية تيارًا حراريًا طبيعيًا أو حرًا.

يمكن أن يحدث الحمل الحراري أيضًا من خلال ما يسمى بالحمل القسري أو المساعد، مثله كمثل ضخ الماء الساخن عبر أنبوب في نظام التسخين المائي [3].

### 3.2.1. نقل الحرارة بالإشعاع الحراري

هو آلية لنقل الطاقة الحرارية تتضمن انبعاث موجات كهرومغناطيسية من سطح أو جسم ساخن على عكس التوصيل والحمل الحراري، لا يحتاج الإشعاع الحراري إلى وسط وسيط لحمل طاقة الموجة جميع الأجسام التي تكون درجة حرارتها أعلى من الصفر المطلق تنبعث منها إشعاعات حرارية في نطاق طيفي واسع عادةً. يحدث عندما ينتقل الحرارة عبر الفراغ أو وسيط مادي غير متماس يستند هذا النقل إلى انبعاث الطاقة في شكل أشعة كهرومغناطيسية من جسم مشع ولا يتطلب وجود وسيط للحرارة للتحرك من الجسم المشع إلى الجسم المستقبل.

هذه الطرق تتفاعل معًا في معظم المبادلات الحرارية، حيث يمكن أن يكون هناك تواجد لأكثر من واحدة منها في نفس الوقت [3].

### 3.1. الدور الأساسي للمبادل الحراري

يكمن دور المبادل الحراري في نقل الطاقة الحرارية من سائل إلى آخر دون خلطهما، في سياق نظام التدفئة أو إنتاج الماء الساخن، يتم استخدام سائل أولي يُسمى "مَحَل حراري" لتسخين السائل الثانوي. لتمكين التبادل الحراري بشكل فعال، يجب أن يكون لدى السائلين درجات حرارة مختلفة، حيث يكون أحدهما ساخنًا والآخر باردًا لتسهيل نقل الحرارة، يتطلب المبادل الحراري مادة موصلة بما يكفي لتحسين التبادل وتقليل فقدان الحرارة، بمجرد أن يتم نقل الحرارة بين السائلين، يكون المبادل الحراري قد أدى وظيفته الأساسية. من المهم أيضًا أن نشير إلى أن المبادل الحراري ليس مُستخدمًا فقط لتسخين السوائل وفقًا للنظام الذي يُدمج فيه، يمكن استخدامه لضمان تبريد السائل كما هو الحال في حالة مكيفات الهواء أو الثلاجات [4].

## الفصل الأول: مفاهيم أساسية حول المبادلات الحرارية

وظيفة المبادل الحراري هي تبادل الحرارة بين وسيطين، وذلك لتبريد أو تسخين السوائل أو الغازات أو السوائل والغازات معًا. على سبيل المثال، في تطبيقات التبريد والتكييف، يتم استخدام المبادلات الحرارية لتبريد الهواء الساخن باستخدام ماء بارد، أو العكس بالعكس، لتسخين الهواء باستخدام ماء ساخن.

هناك أنواع مختلفة من المبادلات الحرارية، مثل المبادلات الحرارية باللوحات، والمبادلات الحرارية الأنبوبية، والمبادلات الحرارية الهوائية، والمبادلات الحرارية المرجحة، كلٌ منها له تصميم واستخدامات خاصة به [1].

### 4.1. تصنيف المبادلات الحرارية

يعتمد تصميم المبادلات الحرارية عمومًا على ثلاثة أنواع رئيسية: الإرجاعية، والمزجية، والتيارية، في المبادلات الإرجاعية، يتم تبادل الحرارة بين سائلين بارد وساخن عند تقاطعهما على نفس السطح بشكل دوري، بينما في المبادلات المزجية، يتم نقل الحرارة مباشرة عن طريق اختلاط السوائل الباردة والساخنة، أما في المبادلات التيارية يتم تبادل الحرارة بين السوائل من خلال جدار يفصل بينهما [6].  
وتُصنف هذه المبادلات أيضًا حسب اتجاه تدفق السوائل إلى تيارية وعكسية، وحسب التصميم إلى مبادلات حرارية أنبوبية ومبادلات حرارية ذات أنابيب بزعانف.

#### 1.4.1. حسب التوصيل

وفي هذا التصنيف نميز بين تكوينين:

##### 1.1.4.1. مبادلات الاتصال المباشر

النوع الأبسط يشتمل على حاوية أو أنبوب يتم فيه خلط السائلين مباشرة ويصلان إلى نفس درجة الحرارة النهائية.

##### 2.1.4.1. مبادلات الاتصال غير المباشر

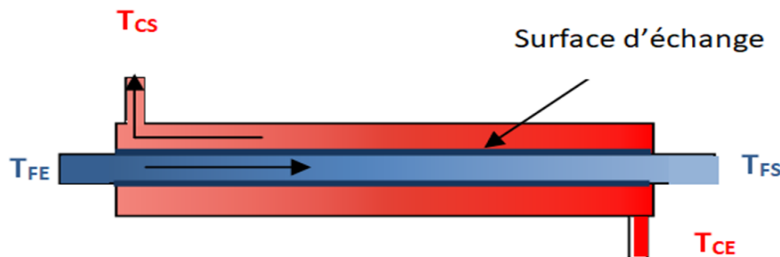
في هذه الحالة، يتدفق السائلان داخل المبادل في مساحات يفصل بينها جدار معدني في أغلب الأحيان.

#### 2.4.1. حسب التدفق

يعتمد هذا التصنيف على الشكل الهندسي واتجاه التدفق لمبادل حراري يعمل بسائلين.

##### 1.2.4.1. مبادلات التيار المعاكس

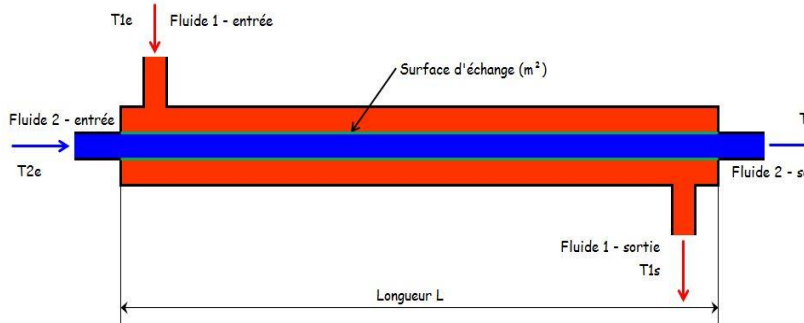
في هذا التكوين، يتدفق السائلان في اتجاهين متعاكسين. يسمى التدفق بالتيار المضاد.



الشكل 1.2: مبدأ المبادل المضاد للتيار.

### 2.2.4.1. مبادل التيار المشترك (الطريقة المضادة)

إذا كان تداول سائلين في نفس الاتجاه، يقال إن التدفق مشترك [2].

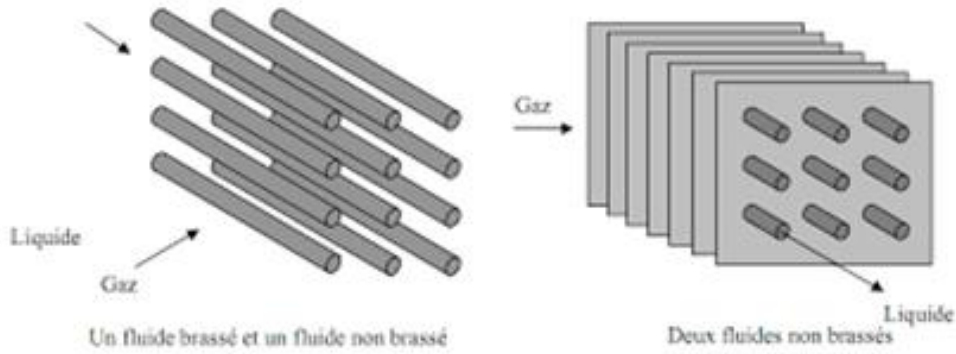


الشكل 1.3: مبدأ المبادل المشترك الحالي.

### 3.2.4.1. مبادل التيار المتقاطع

في هذا النوع، يتدفق السائلان بشكل متعامد مع بعضهما البعض هناك نوعان من هذا التيار، يقال إن الأول غير مختلط إذا كان أحد السوائل يتدفق في الأنبوب المنقسم إلى عدة قنوات متوازية متميزة ذات مقطع صغير ويقال عن الثاني مختلط خلاف ذلك.

التحريك له تأثير تجانس درجات الحرارة في القسم المستقيم من الأنبوب تُستخدم مبادلات التدفق المتقاطع بشكل أكبر للتبادل الحراري بين الغاز الذي يدور في التقويم والسائل الذي يدور في الأنابيب [7].



شكل 1.4: نوعان من التيار المتقاطع

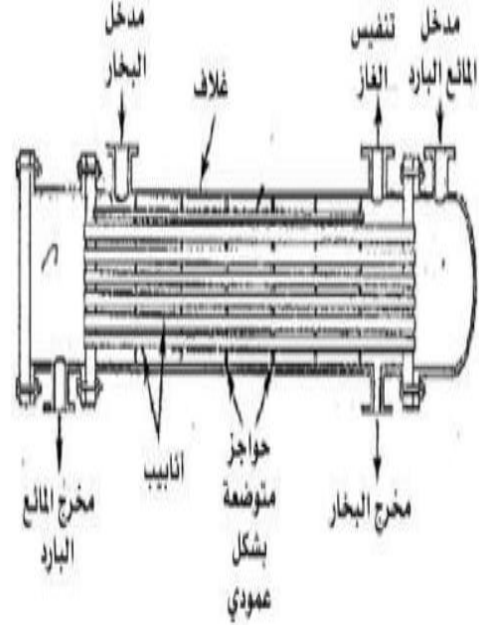
### 3.4.1. حسب التصميم

#### 1.3.4.1. المبادل الحراري الأنبوبي

يتكون هذا المبادل من أنبوب واحد أو حزمة من الأنابيب يتدفق ضمنها أحد المائعين والآخر حولها، ويعد المبادل الحراري متعدد الأنابيب والغلاف من أكثر أنواع المبادلات استخداماً. يمكن ان تتعلق مرونة تصميم هذه المبادلات بعوامل مختلفة كقطر الانبوب، عدد الانابيب، طول الأنبوب، شكل الأنابيب وترتيبها هذه العوامل يمكن التحكم بها وتغييرها حيث أن لهذا النوع استخداماً رائداً في الصناعة فأكثر من 90% من المبادلات الأنبوبية المستخدمة هي مبادلات حرارية أنبوب وغلاف وذلك بسبب:

## الفصل الأول: مفاهيم أساسية حول المبادلات الحرارية

- تستخدم ضمن تشكيلة واسعة من المواد المختلفة
- خبرة تصميم أكثر من 100 عام تقريبا [8].

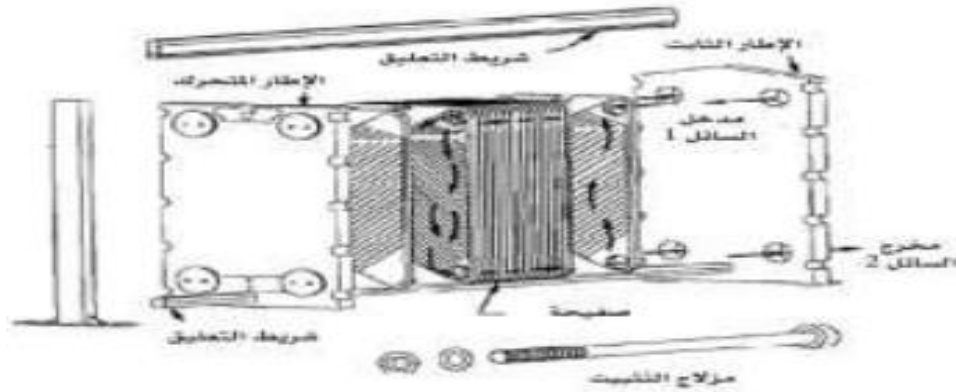


شكل 5.1: مبادل حراري أنبوبي

### 2.3.4.1 المبادل الحراري الصفائحي

هو صفائح مستوية تتوضع على التناوب مع صفائح نافرة أو تكون عبارة عن صفائح مضلعة تجمع على ألواح التثبيت والتي تحتوي على أربع فتحات تعمل كمداخل ومخارج للمائع يوجد أنواع عديدة من المبادل الحراري الصفائحي من بينها المبادل الصفائحي اللوحي.

ان العدد والحجم للصفائح يعود لعدة أسباب منها معدل التدفق المطلوب، الخواص الفيزيائية للسوائل المستعملة، درجة الحرارة وغيرها [8].



الشكل 6.1: مبدأ مبادل حراري صفائحي [8]

### 5.1. تطبيقات المبادلات الحرارية

تطبيقات المبادلات الحرارية متعددة ومتنوعة، وتشمل العديد من الصناعات والمجالات

**صناعة البترول والغاز:** تستخدم في تبريد الزيوت والغازات وتكثيف البخارات في عمليات استخراج وتكرير النفط والغاز.

**صناعة الطاقة:** يتم استخدام المبادلات الحرارية في تبريد مياه التبريد في محطات توليد الطاقة بالبخار، وكذلك في أنظمة التبريد لمحطات الطاقة الشمسية والطاقة النووية.

**الصناعات الكيماوية:** يتم استخدام المبادلات الحرارية في تبريد وتسخين المواد الكيماوية في عمليات التصنيع والتكرير.

**صناعة الأغذية والمشروبات:** تستخدم في تبريد وتسخين السوائل والمواد الغذائية في عمليات التصنيع وتعقيم المنتجات.

**الصناعات الدوائية:** تستخدم المبادلات الحرارية في عمليات التجفيف وتبريد المواد الدوائية وتبريد معاجين التصنيع.

**الصناعات الورقية والمطبوعات:** يتم استخدامها في تبريد وتسخين العجين والمواد الورقية في عمليات الإنتاج.

**التكييف والتبريد:** يتم استخدام المبادلات الحرارية في أنظمة التكييف والتبريد لتبادل الحرارة بين الهواء والسوائل.

**الصناعات النظامية:** تستخدم في تبريد وتسخين الزيوت والسوائل في الآلات الصناعية مثل المحركات والمضخات.

**التكنولوجيا البيئية:** يستخدم في معالجة مياه الصرف الصناعي وتبريدها أو تسخينها قبل التخلص منها، وكذلك في أنظمة استرداد الحرارة لتقليل استهلاك الطاقة.

**الصناعات الإلكترونية:** يستخدم في تبريد المعدات الإلكترونية وضمان حرارة مستقرة لتشغيل الأجهزة الإلكترونية.

**التصنيع الدقيق والصناعات الدقيقة:** يستخدم في تحكم دقيق في درجة الحرارة خلال عمليات التصنيع الدقيقة مثل التصنيع بالليزر وتصنيع الأشباه الموصلة.

**صناعة البلاستيك والمطاط:** يستخدم في تبريد وتجميد المواد البلاستيكية والمطاطية خلال عمليات التشكيل والتصنيع.

**الصناعات الفضائية والطيران:** يستخدم في تبريد أنظمة الطاقة والتحكم الحراري في المركبات الفضائية والطائرات.

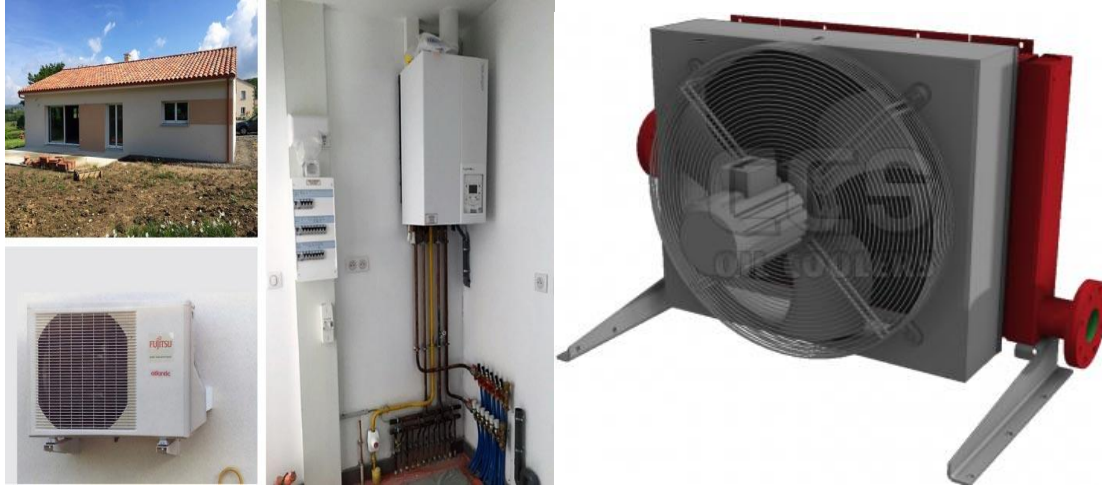
**التصنيع العسكري:** يستخدم في تبريد وتسخين السوائل والمواد في تطبيقات مثل الأسلحة ومركبات الدفاع والهندسة العسكرية.

**لصناعات الصوتية والتسجيلية:** يستخدم في تبريد وتسخين معدات التسجيل وأنظمة الصوت والأجهزة الصوتية الحساسة.

**البناء والهندسة المعمارية:** يستخدم في أنظمة التدفئة والتبريد المركزية للمباني الكبيرة والمجمعات السكنية والتجارية.

**صناعة النسيج والملابس:** يستخدم في تبريد وتسخين المواد النسيجية خلال عمليات التشكيل والصباغة والتجفيف.

الصناعات الفولاذية والمعادن: يستخدم في تبريد وتسخين الفولاذ والمعادن خلال عمليات التشكيل والتشكيل البارد [9].



الشكل 7.1: تطبيقات المبادلات الحرارية

### 6.1. الزعانف

تُستخدم بشكل واسع مبادلات الحرارة ذات الزعانف لتبريد أو تسخين السوائل باستخدام الغاز، أو العكس تناسب هذه المبادلات مجموعة متنوعة من السوائل مثل الماء، ومحاليل الملح، والبخار المشبع، وزيت الهيدروليك، وزيت التشحيم، والزيت الحراري، وموائع التبريد المكثفة أو المتبخرة، وغيرها. تُعتبر مبادلات الحرارة ذات الزعانف فعالة لنقل الحرارة بين السوائل نظرًا لزيادة سطح الاتصال بفضل الزعانف، مما يحسن بشكل كبير عملية نقل الحرارة.

#### 1.6.1. تعريف الزعانف

الزعنفة عبارة عن جهاز حراري يهدف إلى زيادة سطح التلامس مع السائل الخارجي لتكثيف تبادلات الحمل الحراري وخط التدفق وبالتالي نقل الحرارة، تنتشر الحرارة عن طريق التوصيل عبر الزعنفة التي يتم تبريدها أو تسخينها عن طريق الحمل الحراري بواسطة السائل المحيط. من ناحية أخرى، تتيح الزعنفة أيضًا إمكانية إحداث اضطرابات في تدفق السائل المحيط بالزعنفة تجعل من الممكن زيادة مستوى الاضطراب واختلاط التدفق وبالتالي تعمل على تكثيف نقل الحمل الحراري في الجزء الخارجي من الزعنفة [2].

الزعانف تشير إلى التجاويف أو الأسطح الممتدة التي تساعد في زيادة كفاءة نقل الحرارة بين الوسيطين الذين يتم تبادل الحرارة بينهما، تُستخدم الزعانف لزيادة مساحة سطح التبادل وبالتالي تحسين كفاءة النقل الحراري [10].

### 2.6.1. أنواع الزعانف

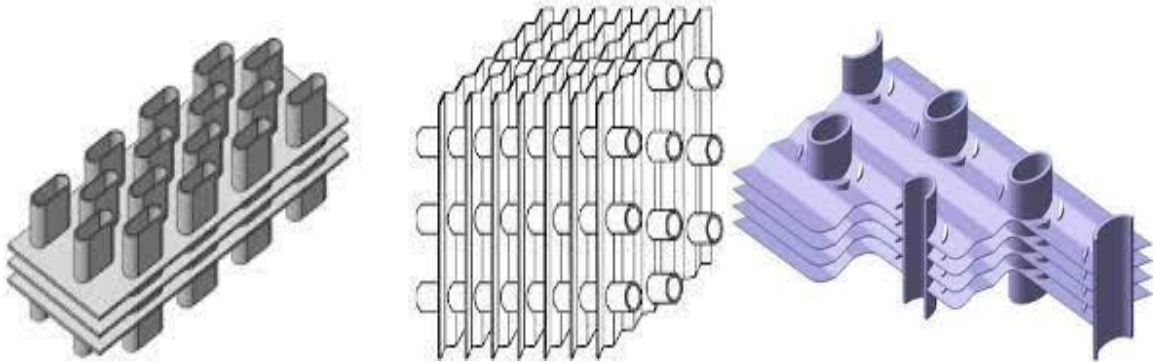
توجد أنواع مختلفة من الزعانف تستخدم في المبادلات الحرارية، مثل الزعانف المستقيمة والزعانف الملتفة والزعانف المتعرجة. يتم تصميم تلك الزعانف بشكل يسمح بتحسين تدفق الهواء أو السائل حولها، مما يزيد من كفاءة نقل الحرارة.

يتم تجميع الأنواع المختلفة من الزعانف إلى قسمين رئيسيين:

- زعانف مستمرة
- زعانف مستقلة [2].

#### 1.2.6.1. الزعانف المستمرة

تتكون الزعانف المستمرة بواسطة عدة أنابيب ذات شكل دائري أو بيضاوي أو مسطح وغالبًا ما يتم تصنيعها عن طريق الختم ثم يتم تثبيتها عن طريق توسيع الأنابيب، يعمل الطوق على إصلاح المسافة بين الزعانف ويمكن أن تكون مسطحة أو مموجة، يسبب التمدد اضطرابًا في التدفق مما يعزز التبادل الحراري بالحمل الحراري [11].



الشكل 1.8: تصميمات مختلفة للزعانف المستمرة [11].

#### 2.2.6.1. الزعانف المستقلة

الزعانف المستقلة هي نوع من الزعانف المستخدمة في المبادلات الحرارية والتي تتميز بكونها متصلة بقاعدة مباشرة دون أن تكون متصلة ببعضها البعض. يُعرف أيضًا هذا النوع من الزعانف بالزعانف المفصولة. توفر الزعانف المستقلة سطحًا أقل لنقل الحرارة ومزج أفضل للتدفق، وهي عادةً مصنوعة من مواد مثل الألمنيوم أو النحاس أو الفولاذ المقاوم للصدأ. يتم تثبيت الزعانف على سطح الأنابيب بحيث تقوم بتعزيز التواصل الحراري بين المائع والسطح الذي يراد تبريده أو تسخينه [12].



الشكل 9.1: زعانف مستقلة [11].

**7.1. بحث بيولوجرافي حول تحسين كفاءة المبادلات الحرارية**  
تحسين كفاءة مبادلات الحرارة يشمل عدة جوانب مختلفة، ويمكن العمل على تحسينها من خلال تطبيق مجموعة متنوعة من الاستراتيجيات والتقنيات منها:

**تصميم مبادل الحرارة بشكل صحيح:** يتضمن ذلك اختيار أنواع المبادلات المناسبة وتحديد الأبعاد الهندسية والمواد المستخدمة بدقة.

**تحسين تصميم السطوح الحرارية:** يشمل زيادة المساحة السطحية لتحسين نقل الحرارة، مثل استخدام أنابيب مملوءة أو زعانف مسننة.

**تحسين توزيع التدفق:** ضمان توزيع متساوٍ وفعال للوسائط الحرارية داخل المبادل.

**استخدام مواد متقدمة:** استخدام مواد حرارية عالية الكفاءة مثل المواد الحرارية النانوية لتحسين نقل الحرارة.

**تحسين التصميم الهيدروليكي:** تقليل مقاومة التدفق الهيدروليكي داخل المبادل لزيادة كفاءة التبادل الحراري.

**تحسين التحكم في درجة الحرارة:** ضمان تحكم دقيق في درجة حرارة الوسيط الحراري لزيادة كفاءة التبادل الحراري.

**تنظيف وصيانة دورية:** يجب الاهتمام بصيانة منتظمة وتنظيف لضمان عدم تراكم الرواسب أو الأوساخ التي قد تؤثر سلبيًا على أداء المبادل.

تجمع هذه الطرق والتقنيات بين الجوانب الهندسية والمادية وعمليات التحكم والصيانة لتحقيق أقصى استفادة من مبادلات الحرارة وتحسين كفاءتها [12].

### 1.7.1. دراسة تأثير الأبعاد الهندسية وتدفق السوائل

عند دراسة مبادل حراري، يهدف الباحثون إلى تحقيق كفاءة تبادل حراري محددة، دراسة تأثير الأبعاد الهندسية وتدفق السوائل على المبادل الحراري تعتبر جزءاً مهماً من تصميم وتحسين أداء المبادلات الحرارية.

**1.1.7.1. الأبعاد الهندسية:** تشمل الأبعاد الهندسية للمبادل الحراري مثل الطول، العرض، والارتفاع، بالإضافة إلى هندسة السطح الفعالة مثل تصميم الزعانف والتجويف، تؤثر هذه الأبعاد مباشرة على كمية السطح المتاح لنقل الحرارة، وبالتالي على كفاءة المبادل الحراري. على سبيل المثال، زيادة طول المبادل الحراري قد تزيد من سعة التبادل الحراري، ولكنها قد تزيد أيضاً من مقاومة تدفق السائل.

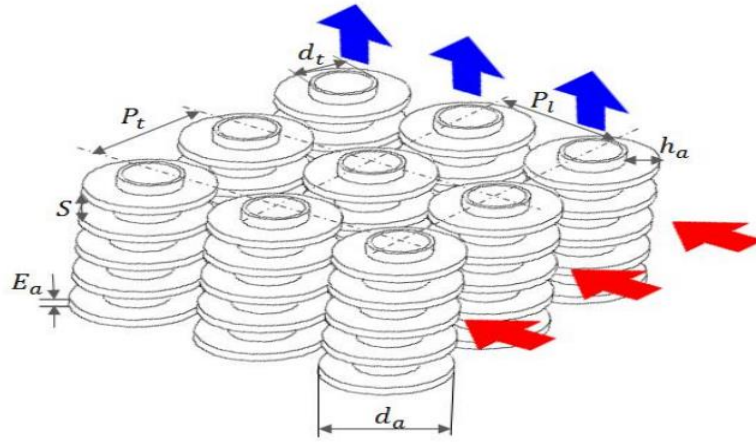
**2.1.7.1. تدفق السائل:** يشير تدفق السائل إلى كمية السائل التي تمر عبر المبادل الحراري في وحدة الزمن. يؤثر تدفق السائل بشكل كبير على كفاءة التبادل الحراري، حيث يؤدي زيادة تدفق السائل عادةً إلى زيادة سرعة التبادل الحراري. ومع ذلك، يجب مراعاة أيضاً أن زيادة التدفق قد تزيد من مقاومة تدفق السائل وبالتالي تتطلب زيادة في الطاقة المطلوبة لتحريك السائل.

**3.1.7.1. التصميم الهندسي:** يمكن تحسين أداء المبادل الحراري من خلال تصميم هندسي محسن، بما في ذلك تصميم الأنابيب، والزعانف، والقنوات الداخلية، على سبيل المثال يمكن تصميم زعانف معينة بشكل يعزز تحريك التدفق وبالتالي يزيد من كفاءة التبادل الحراري.

**4.1.7.1. الخواص الفيزيائية للسائل:** تؤثر خواص السائل مثل الكثافة واللزوجة والحرارة النوعية على تدفقه وبالتالي على كفاءة التبادل الحراري.

يُعتبر إضافة الزعانف إلى مبادل الحرارة أسلوباً شائعاً جداً لزيادة كفاءة نقل الحرارة على جانب الغاز، الذي يمكن أن يكون أصغر بمقدار 10 إلى 100 مرة من الجانب السائل.

تشير الدراسات المتعددة إلى أن توزيع التدفق وخصائص نقل الحرارة ترتبط ارتباطاً وثيقاً بشكل وترتيب الزعانف والأنابيب، بالإضافة إلى ذلك، هناك عوامل مهمة عدة تؤثر على نقل الحرارة وفقد الضغط في مجموعة الأنابيب ذات الزعانف، وتفاعل هذه العوامل يخلق مشكلة معقدة للغاية [10].



شكل 1.10: مختلف الاحداثيات الهندسية التي تحدد مبادل حراري.

### 2.7.1. تأثير المسافة بين الزعانف

المسافة بين الزعانف يمكن أن تؤثر بشكل كبير على أداء المبادل الحراري، عادةً ما يتم وضع الزعانف بشكل متناوب لتحقيق أقصى كفاءة في نقل الحرارة، حيث يتم تحقيق تيار هوائي أفضل وتقليل مقاومة التدفق.

تقليل المسافة بين الزعانف يمكن أن يؤدي إلى زيادة في كفاءة النقل الحراري، ولكن قد يزيد أيضاً من مقاومة التدفق للسائل أو الغاز الذي يمر في المبادل الحراري. بالإضافة إلى ذلك، قد يزيد تقريب الزعانف بشكل كبير من التكلفة والتعقيد في التصنيع.

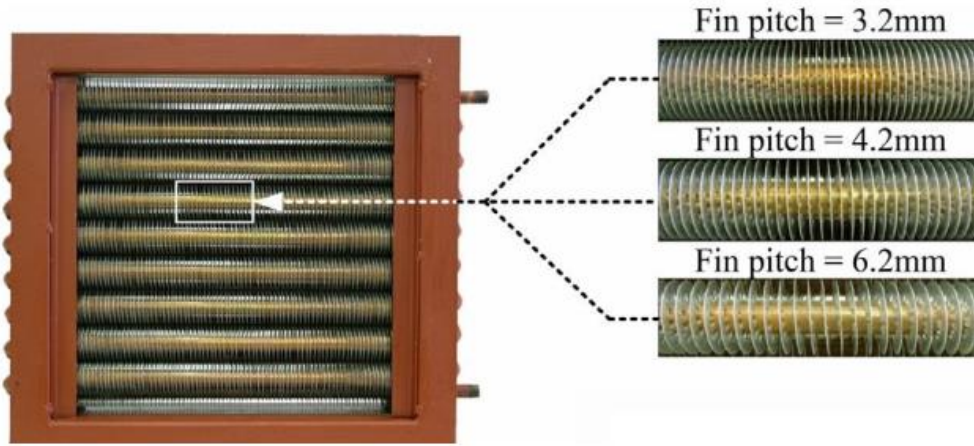
بشكل عام، يجب إجراء دراسات دقيقة لتحديد المسافة المثلى بين الزعانف لتحقيق التوازن المثالي بين كفاءة نقل الحرارة ومقاومة التدفق والتكلفة. يستخدم المهندسون والباحثون أدوات محاكاة الديناميكا الحرارية المحسنة بالحوسبة لتحليل أداء المبادلات الحرارية وتحديد العوامل المؤثرة على أدائها، بما في ذلك المسافة بين الزعانف [7]. في المبادلات الأنبوبية ذات الزعانف، يعد اختيار التباعد الصحيح بين الزعانف  $S_z$  أمراً ضرورياً لتحسين الأداء الحراري الهيدروليكي وذلك لأن انتقال الحرارة يعتمد بشدة على حجم الطبقة الحدودية على أسطح الزعانف، والتي بدورها ستتأثر بالمسافة بين الزعانف. وقد قام العديد من الباحثين بدراسة تأثير هذه المعالم الهندسية تجريبياً وعددياً على الأداء الحراري الهيدروليكي.

لمعرفة كيفية تأثير المسافة بين الزعانف على كفاءة جهاز تبادل الحرارة، قام العديد من الباحثين بإجراء أبحاث تجريبية ورقمية مكثفة أجرى كل من **Mon** و **Gross** [17]. محاكاة رقمية ثلاثية الأبعاد على نموذج لجهاز تبادل حراري، يحتوي على أنابيب مع زعانف دائرية، مع أربع صفوف من الأنابيب أظهرت أن معامل نقل الحرارة وانخفاض الضغط يتغير اعتماداً على: نسبة التباعد بين الزعانف بالنسبة لارتفاعها، عدد رينولدز، ونوع ترتيب الأنابيب.

## الفصل الأول: مفاهيم أساسية حول المبادلات الحرارية

لمعرفة كيفية تأثير المسافة بين الألواح على كفاءة جهاز تبادل الحرارة، أجرى الباحثون العديد من التجارب التجريبية والحسابات الرقمية. في حالة الترتيب بشكل متقاطع، نجد أن معامل نقل الحرارة يزداد حتى يصل إلى قيمة معينة، ثم يبقى ثابتاً تقريباً مع انخفاض طفيف (حوالي 1.4٪)، بينما في حالة ترتيب الأنابيب في خط واحد، يزداد معامل نقل الحرارة في جميع الحالات المدروسة مع زيادة النسبة  $S_a/h_a$ .

بالنسبة للحزم المكونة من ستة صفوف من الأنابيب ذات الزعانف المسطحة، ذكر Kong وآخرون [18] أن معامل انتقال الحرارة وانخفاض الضغط ينخفض مع زيادة  $S_a$ ، ولكن عندما يتغير معامل النقل الحراري قليلاً، بالنسبة للزعانف الحلقيّة المختلفة (الدائرية البسيطة والزعنفة الحلزونية المجعدة والزعنفة المسننة) والزعانف المستمرة (الزعنفة المسطحة والزعنفة المموجة والزعنفة ذات المولدات الدوامة)، لاحظ Kumar وآخرون [19] أن معامل انتقال الحرارة ينخفض مع زيادة  $S_a$ ، بسبب زيادة قناة مرور التدفق عبر المبادل الحراري.



الشكل 11.1: أمثلة لمسافات فاصلة بين زعانف حلزونية ومسننة.

### 3.7.1. تأثير شكل الأنابيب وقطره

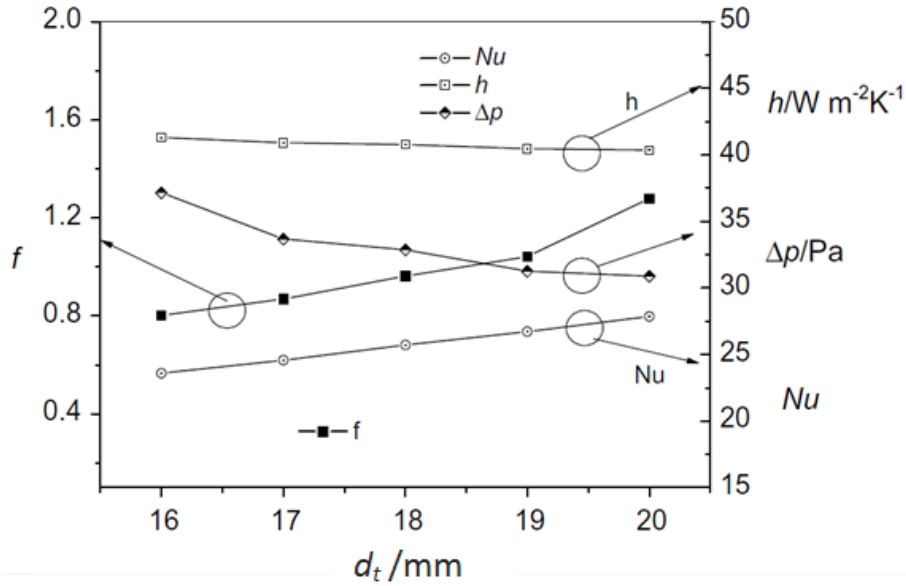
تتأثر منطقة دوران السوائل وفقدان الضغط في المناطق الميتة حرارياً خلف الأنابيب بسبب قوة الاصطدام إلى حد كبير بشكل الأنابيب، وأيضاً حسب تعبير رقم رينولدز فإن لقطر الأنابيب تأثيراً مباشراً وكبيراً على قيمة  $Re$ ، وبالتالي على طبيعة نظام تدفق الموائع (الصفحي أو المضطرب)، لذلك، يعد تغيير أشكال وأقطار الأنابيب في مبادلات الأنابيب ذات الزعانف من بين التقنيات الواعدة لتحسين معدل نقل الحرارة وتقليل فقد الضغط.

أشار Torikoshi و Xi [9] أن معامل نقل الحرارة  $h$  وانخفاض الضغط  $\Delta P$  يعتمدان بشكل أساسي على قطر الأنابيب وأن معامل نقل الحرارة وفقدان الضغط يتناقصان مع زيادة قطر الأنابيب، بينما تزيد كفاءة الزعنفة  $\eta$ . أظهرت النتائج أن زيادة قطر الأنابيب من 13.59 ملم إلى 24 ملم يؤدي إلى انخفاض في انخفاض الضغط بنسبة 66.7% للترتيب المحاذي و 61.1% للترتيب المتداخل.

## الفصل الأول: مفاهيم أساسية حول المبادلات الحرارية

استخدم Jin-yeon Kim وآخرون [18]، تقنية تسامي النفتالين لتحليل تأثير النسبة بين المسافة بين الأنابيب وأقطارها  $(S/d_t)$  لقيمتي رقم رينولدز 1770 و2660 على انتقال الحرارة في مبادل حراري ذو صفين من الأنابيب ذات الزعانف المسطحة المستمرة، ووجدوا أنه مع زيادة النسبة  $(S/d_t)$ ، يزداد انتقال الحرارة والكتلة عبر الزعانف ويصل إلى التشبع عند  $(S/d_t) = 0.5$ . بالنسبة لقيم  $Re$  الكبيرة، يصبح تأثير هذه الأحداثيات على انتقال الحرارة مهمًا جدًا.

ولمعرفة تأثير القطر الخارجي للأنبوب على كفاءة المبادل الحراري، أجرى Xie وآخرون [9] تحليلًا عدديًا على نموذج مبادل حراري مع ثلاثة صفوف من الأنابيب ذات الزعانف المسطحة، تتراوح أقطار الأنابيب من 16 إلى 20 ملليمترًا، يمكن ملاحظة زيادة عدد نوسيلت وعامل الاحتكاك مع زيادة قطر الأنبوب، ومع ذلك ينخفض معامل انتقال الحرارة وانخفاض الضغط مع زيادة قطر الأنبوب (أنظر الشكل أسفله).



شكل 12.1: تأثير قطر الأنبوب على عدد نوسيلت وعامل الاحتكاك ومعامل انتقال الحرارة وانخفاض الضغط [20].

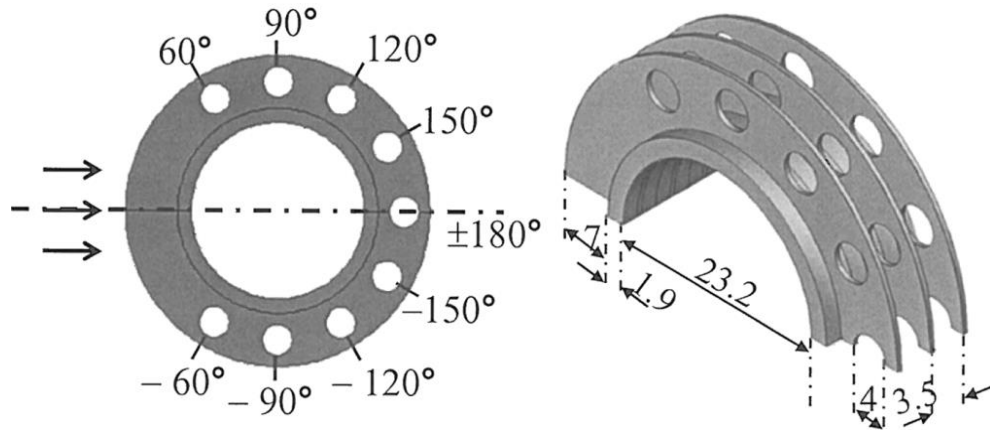
### 4.7.1. تأثير شكل الزعانف

تؤدي إضافة الزعانف إلى زيادة سعر المبادلات ووزنها وقدرة ضخ السائل المطلوبة في حالة الحمل القسري. لهذا السبب، هناك الكثير من الأبحاث الموجودة حول تحسين الأداء العام للزعانف.

تم فحص تأثير إدخال الثقب وموقعه الزاوي على انتقال الحرارة تجريبياً بواسطة [21] R. Karabacak و G. Yakar حيث لاحظوا أن رقم نسلت  $Nu$  أعلى بحوالي 12% بالنسبة للزعانف الدائرية المثقوبة مقارنة بالزعانف الصلبة التقليدية. بالإضافة إلى ذلك، Banigri وآخرون [22] درسوا عددياً أنبوباً به زعانف حلقيّة مثقوبة لتحسين

## الفصل الأول: مفاهيم أساسية حول المبادلات الحرارية

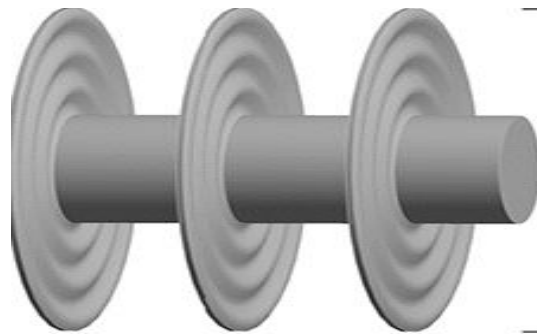
نقل الحرارة وتقليل فقدان الضغط ووجودوا أن معامل نقل الحرارة والتدفق الحراري للزعانف المثقوبة يزيدان بنسبة 7.07% و 5.96% على التوالي.



شكل 13.1: أنبوب مزود بزعانف مثقوبة [20].

Kumar وآخرون [19] استخدموا برنامج الحساب Open FOAM-2 لمقارنة السمات الهيدروليكية الحرارية التابع لشكل زعانف حلقيّة (دائري، زعنفة حلزونية مجعدة، زعنفة مسننة) وزعانف ذات شكل مستمر (مسطحة وموجة و زعنفة مع زوج من مسننات دلتا) مع رقم رينولدز ثابت، أظهرت نتائج هذا العمل البحثي أن نسبة انتقال الحرارة إلى قوة الضخ للزعانف الحلقيّة أعلى من الزعانف وخلصوا إلى أنه يمكن تصميم مبادل حراري مدمج باستخدام زعانف مستمرة ولكن مع قوة ضخ أعلى.

في الأونة الأخيرة Siddhartha and Das [23] أجروا دراسة رقمية الأداء الحراري لأسطوانة أفقية ذات زعانف حلقيّة بموجات دائرية. تم إجراء الحسابات لمختلف المعلمات الهندسية وظروف التدفق في انتقال الحمل الحراري الطبيعي وفي النظام الصفحي أظهرت النتائج أن أداء الزعانف المموجة أفضل من الزعانف المسطحة عند رقم راييلي عالي القيمة.

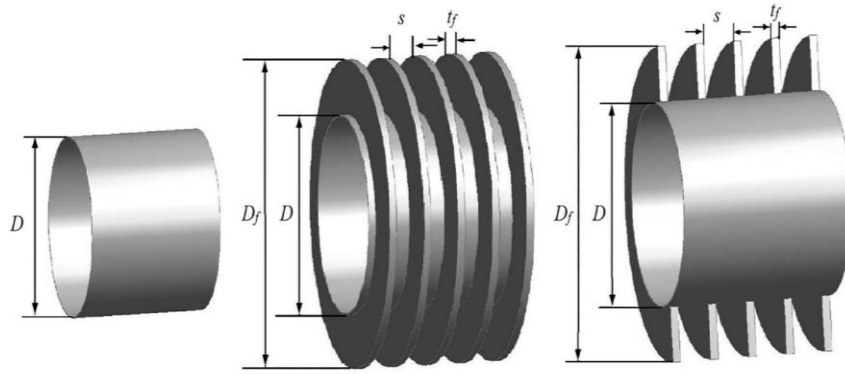


الشكل 14.1: أشكال هندسية لمبادل أنبوبي بزعانف حلقيّة مموجة [23].

تم إجراء دراسة عديدة بواسطة Dhiman and Raje [24] لتحديد أداء ثلاثة أشكال هندسية للمبادلات الحرارية: أنابيب بدون زعانف، أنابيب ذات زعانف دائرية وأنابيب ذات زعانف مقطوعة في اتجاه التدفق. تعطي الأنابيب ذات الزعانف المقطوعة قيمة أقل لتدفق الحرارة وانخفاض الضغط مقارنة بالزعانف الدائرية الكاملة، ومع ذلك، فإن

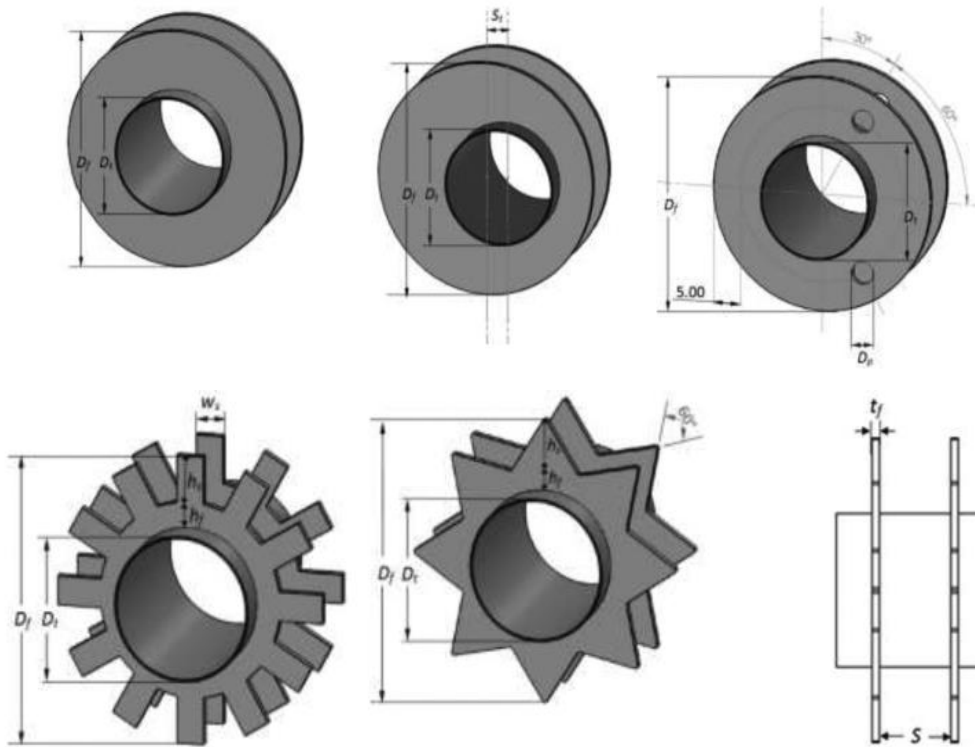
## الفصل الأول: مفاهيم أساسية حول المبادلات الحرارية

معياري تقييم الأداء للزعنفة المقطوعة أعلى من الزعنفة الكاملة بنسبة 30-46% للتباعد بين الزعانف 2 مم، بينما للتباعد 4 مم يكون أعلى من 21 إلى 23%.



الشكل 1.15: هندسة المبادلات الحرارية المدروسة في المرجع [24].

في الأونة الأخيرة، تم إجراء دراسة عددية مفصلة بواسطة Tahrouz وآخرون [25] لمقارنة الأداء الحراري الهيدروليكي لخمسة أشكال هندسية للزعانف الحلقية: زعنفة دائرية متحدة المركز مع الأنبوب، وأنبوب بزعنفة ذات مركز مختلف، وزعنفة مثقوبة، وزعنفة مسننة، وزعنفة على شكل نجمة. بالنسبة لجميع الزعانف، تمت دراسة تأثير التباعد بين الزعانف ورقم رينولدز على الخصائص الحرارية والديناميكية لحزمة من ثلاثة صفوف من الأنابيب ذات من حيث معيار الأداء الشامل للكتلة  $M_{GPC}$ ، توفر الزعنفة النجمية قيما أعلى بنسب 41-73% مقارنة بالزعنفة متحدة المركز و أعلى من الزعنفة اللامركزية بنسب 29-54% من الزعانف المثقوبة.

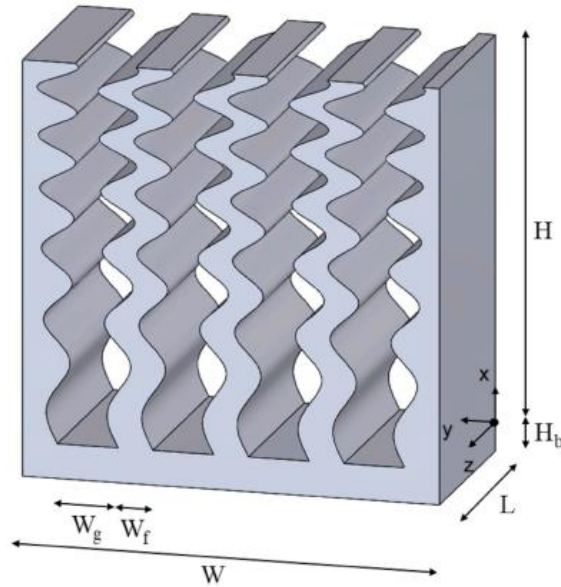


الشكل 1.16: رسم تخطيطي لتصاميم الزعانف التي تمت دراستها.

#### 4.7.1. تأثير السعة والطول الموجي

في التبادل الحراري عن طريق الحمل القسري بين السائل والغاز، تكون المقاومة الحرارية الكبيرة على جانب الغاز حيث تم استخدام زعانف معدنية لتحسين التبادل الحراري على جانب الغاز. من بين الأشكال الهندسية المختلفة المتاحة، تم استخدام الزعانف المموجة على نطاق واسع في أنظمة تكييف الهواء والتبريد. توفر الزعانف المموجة سطحًا كبيرًا للتبادل الحراري مع فقدان ضغط معتدل بسبب الخلط الفعال للسائل الناتج عن الدوامات. وانغ وآخرون [26] أجروا تجارب واسعة النطاق على الخصائص الحرارية والديناميكية لمبادل حراري ذي الزعانف المموجة. يقوم الباحثون بتحليل التأثير لسماكة والتباعد بين الزعانف، عدد الصفوف وقطر الأنابيب، المسافة العرضية والطولية بين الأنابيب على أداء المبادل الحراري لمجموعة واسعة من عدد رينولدز. تم إجراء مجموعة من الاختبارات التجريبية والمحاكاة العددية بواسطة Dong وآخرون [27] لأشكال مختلفة من الزعانف المتموجة تبين أن السعة والطول الموجي لهما تأثير واضح على خصائص التدفق والتبادل الحراري للزعنفة يمكن للارتباطات المقترحة المستمدة من طريقة الانحدار الخطي المتعدد التنبؤ بما يصل إلى 95% من بيانات الاختبار في حدود  $\pm 10\%$ .

في الأونة الأخيرة، Lin وآخرون [28] و Huang وآخرون [29]. فحصوا تأثير الطول الموجي و/أو السعة على التبادل الحراري الصفحي في المشتت الحراري لقناة مكرومتريّة متموجة على طول اتجاه التدفق تحت قوة ضخ مستمر. وخلصوا إلى أن الشكل الأمثل للقنوات المكرومتريّة ذات الزعانف المتموجة يمكن تصميمه من خلال زيادة القيمة المطلقة لفرق الطول الموجي أو فرق السعة بين موجتين متجاورتين في نفس الوقت.



الشكل 17: رسم تخطيطي لتصميم زعانف مكرومتريّة متموجة بشكل غير منتظم [29].

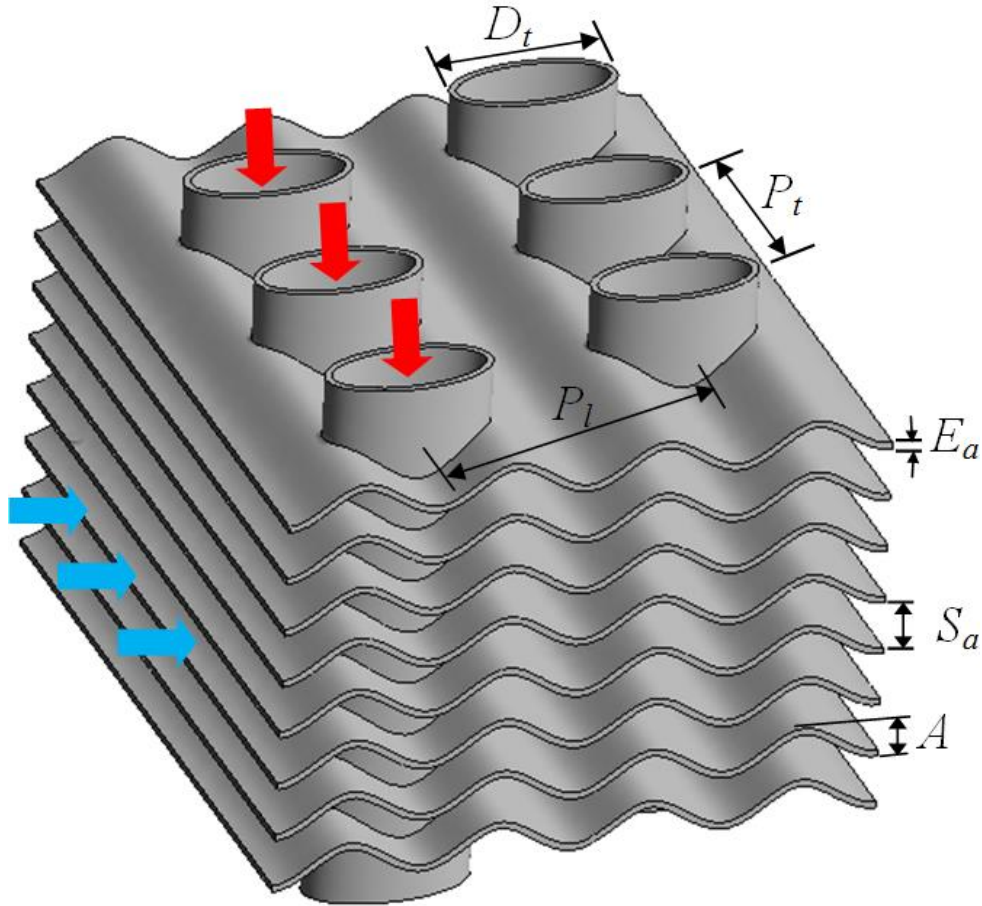
# الفصل الثاني: دراسة عددية

## الفصل الثاني: دراسة عددية

### 1.2 مقدمة

يقدم في هذا الفصل الوصف الفيزيائي والرياضي لحل مشكلة مبادل الأنابيب الدائرية ذات الزعانف المموجة (انظر الشكل 1.2)، بالإضافة إلى أبعاد المبادل والشروط الحدية التي تخدم هذه المشكلة. وقد تم أخذ هذه الشروط بعين الاعتبار لحل معادلات انتقال الحرارة وديناميكية الموائع والحصول على النتائج المرجوة. الحل التحليلي لهذه المعادلات ليس سهلاً، لذلك استخدمنا المحاكاة العددية بواسطة برنامج الحساب Fluent V.6.2 المثبت على جهاز الكمبيوتر لتوفير الوقت والتكلفة للعمليات الحسابية.

لتحديد السرعة ومجال درجة الحرارة تم استخدام البرنامج المتاح لمحاكاة تدفق الموائع على طريقة الحجم المنتهية الخاصة ببرنامج الحساب Fluent 6.2 حيث يتطلب من المستخدم توفير شبكة للهندسة المدروسة، الخصائص الفيزيائية للمواد المستعملة والشروط الحدية.



الشكل 1.2: هندسة مبادل حراري ذو أنابيب دائرية بزعانف متموجة.

## 2.2 المعادلات المتعلقة بالمشكلة المدروسة

في هذه الدراسة، تم اختيار نظام التدفق المضطرب لجميع الحسابات. يتم تحديد رقم Reynolds على أساس سرعة مدخل الهواء والقطر الخارجي للأنايبب، وهذا يعطي اختلافاً في رقم Reynolds في المجال (1200 < Re < 10800) لذلك، تم افتراض أن التدفق في حزمة الأنايبب ذات الزعانف: ثلاثي الأبعاد، غير قابل للضغط، لا يتعلق بالزمن ومضطرب. انطلاقاً من هذه الفرضيات تعطى مختلف معادلات الانحفاظ كالاتي:

❖ الاستمرارية:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{avec} \quad i = (x, y, z) \quad (1.2)$$

❖ كمية الحركة:

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho u_i u_j + P \delta_{ij} - \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) + \overline{\rho u'_i u'_j} \right) = 0 \quad (2.2)$$

تم تعريف اجهاد Reynolds وفق تقريب ( Boussinesq ) على النحو التالي :

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left( \rho k + \mu_t \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \delta_{ij} \quad (3.2)$$

❖ معادلة الطاقة:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( u_i (\rho E + P) \right) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( (\lambda_{air} + \lambda_t) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (4.2)$$

وفي المنطقة الصلبة من الزعانف، تأخذ معادلة الطاقة التي تم حلها في الحالة المستقرة الشكل التالي:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( \lambda_{al} \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = 0 \quad (5.2)$$

$\lambda_{at}$  و  $\lambda_t$  هي، على التوالي، موصلية الزعنفة والتوصيل الحراري المضطرب [30].

### 3.2 طرق حل المعادلات التفاضلية الجزئية

تخضع جميع الظواهر الفيزيائية لنظام من المعادلات التفاضلية الجزئية أعلاه والتي يجب حلها لمعرفة خواص المجال الحراري ومجال التدفق. ومن المؤسف أنه من المستحيل عمليا إيجاد حل تحليلي ودقيق لمثل هذه الأنظمة لأن هذه المعادلات معقدة للغاية، أي أنها غير خطية من جهة ومرافقة من جهة أخرى. في هذه الحالة يكون استخدام الطرق العددية ضروريا ويجب اختيار الطريقة العددية المناسبة للحصول على النتائج الصحيحة مع مراعاة القيود والشروط الأولية. هناك ثلاث طرق أساسية لحل هذه المعادلات:

- طريقة الفروق المحدودة (MDF)
- طريقة الحجم المنتهية (MVF)
- طريقة العناصر المحدودة (MEF)

اختيار استخدام طريقة رقمية معينة يعتمد بشكل أساسي على نوع وتعقيد المشكلة التي يجب حلها: طبيعة السائل، والسلوك الحراري، ونمذجة الوسط، وطبيعة الحالة (ثابتة أم غير ثابتة).

في هذه الدراسة، سوف نستخدم طريقة الحجم الحدية (المنتهية)، لأنها تقدم مزايا كبيرة بسبب بساطتها، وموثوقيتها عندما يتعلق الأمر بالنتائج، وتكيفها مع المشكلة الفيزيائية، وضمانها للحفاظ على كتلة الحركة وكمية أي متغير يمكن نقله عبر كل حجم تحكم وفي كل مجال حسابي، وهو ما لا يتوفر في حالة الطرق الرقمية الأخرى.

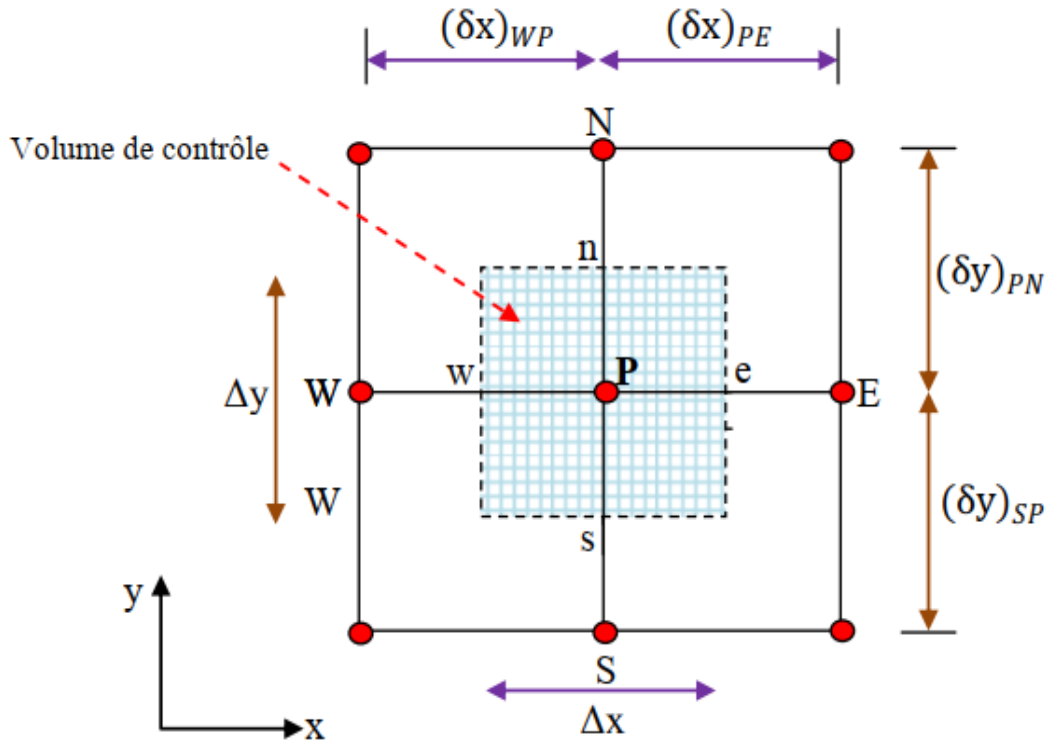
### 4.2. طريقة الحجم الحدية

طريقة الحجم الحدية (Finite Volume Method) هي إحدى الطرق الرقمية المستخدمة في حل المعادلات التفاضلية للتبادلات الحرارية والكتلية في الأنظمة الهندسية المعقدة، يتم في هذه الطريقة تقسيم المجال إلى حجوم صغيرة، ويتم تقدير القيمة المتوسطة للمتغيرات في كل حجم، ثم يتم تطبيق قوانين الانحفاظ والتغير على حدود هذه الحجوم لحساب تدفق الكتلة والطاقة والتغير في الخصائص عبر هذه الحدود. تعتمد دقة الحل على كمية التقسيمات والتقدير المستعملة، وتعتبر هذه الطريقة شائعة الاستخدام في مجالات الهندسة الميكانيكية والمدنية والبيئية.

طريقة الحجم المنتهية تستخدم في حل معادلات الحركة الحرارية والكتلية، مثل معادلة Navier-Stokes للحركة ومعادلة التوازن الكتلي، تعتمد الطريقة على تقسيم المجال إلى مجموعة من الخلايا أو الحجوم الصغيرة، وتقدير القيمة المتوسطة للمتغيرات في كل حجم، ثم يتم تطبيق قوانين الإنحفاظ والتغير على حدود هذه الحجوم لحساب تدفق الكتلة والطاقة والتغير في الخصائص عبر هذه الحدود.

## الفصل الثاني: دراسة عددية

نقسم المجال الحسابي إلى عدد محدود من المجالات الفرعية الأولية، تسمى أحجام التحكم، كما يشمل كلٌ منها عقدة تُعرف بالعقدة الرئيسية P، حيث تكون النقطتان (W و E) الشرق والغرب هما النقطتان المجاورتان في الاتجاه x، بينما النقطتان (S و N) الشمال والجنوب هما النقطتان في الاتجاه y، يظهر حجم التحكم المحيط بالنقطة P بالخطوط المتقطعة، تقع أوجه حجم التحكم عند النقطتين w و e في الاتجاه x، و n و s في الاتجاه y (الشكل 2.2).



شكل 2.2: حجم التحكم النموذجي لحالة ثنائية الأبعاد.

هناك عدة خطوات رئيسية في تطبيق طريقة الحجوم الحدية:

- **تقسيم المجال:** يتم تقسيم المجال الذي يتم دراسته إلى مجموعة من الخلايا أو الحجوم المنتهية. تكون هذه الخلايا عادة متعددة الأضلاع في الأبعاد الثلاثة.
- **تقريب المعادلة الأساسية:** يتم تقريب المعادلة الأساسية (مثل معادلة الانتقال الحراري أو معادلة نافير-ستوكس) داخل كل خلية عن طريق تقريب الانتقالات والتغيرات في المقادير عبر حواف الخلية.
- **تقريب التفاضلات:** يتم تقريب التفاضلات الجزئية للمعادلات داخل كل خلية.

## الفصل الثاني: دراسة عددية

- **حساب التدفقات عبر الحدود:** يتم حساب التدفقات للمتغيرات الحاسوبية عبر حواف الخلية باستخدام قوانين نقل معينة (مثل قانون فيك أو قانون دارسي).
- **تحديث الحل:** يتم تحديث القيم الحاسوبية للمتغيرات داخل كل خلية باستخدام التدفقات المحسوبة.
- **التحكم في الوقت والمساحة:** يتم تحديد خطوة الوقت وحجم الخلية بحيث يضمن الدقة الكافية للحل.
- **التقييم والتحليل:** يتم تقييم النتائج وتحليلها لضمان صحة ومنطقية الحل.

تطبيق طريقة الحجم الحدية يتطلب فهمًا عميقًا للمعادلات الفيزيائية التي تصف الظواهر المراد دراستها، بالإضافة إلى مفاهيم الرياضيات العددية والبرمجة الحاسوبية [31].

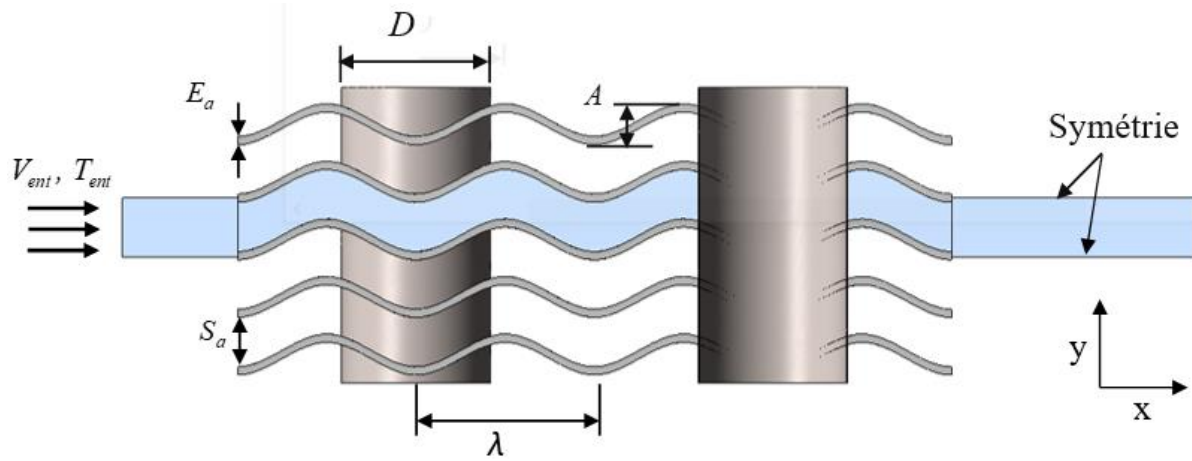
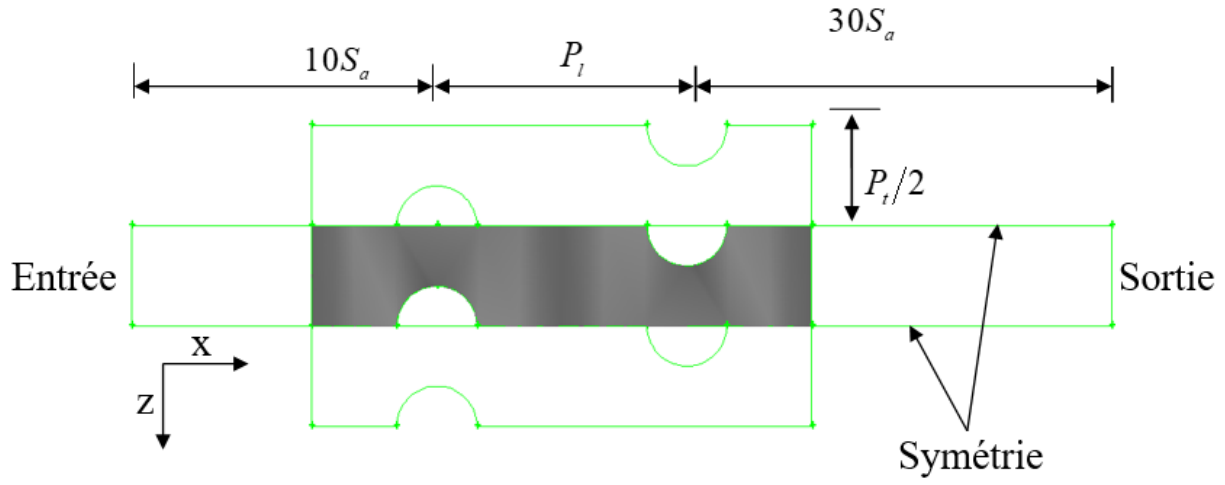
### 5.2 محاكاة العددية

المحاكاة العددية هي عملية حسابية يتم إجراؤها على جهاز الكمبيوتر (محاكاة ظاهرة فيزيائية وترجمتها إلى مجموعة من القوانين) عندما تنفذ البرمجة نموذجًا رياضيًا لنظام فيزيائي. تعد عمليات المحاكاة العددية ضرورية لدراسة سلوك الأنظمة التي تكون نماذجها الرياضية معقدة للغاية بحيث لا يمكنها تقديم حلول تحليلية، كما هو الحال في معظم الأنظمة غير الخطية. تكون المحاكاة فعالة كلما اقتربت من الواقع (كلما زاد احترامها لقوانين الفيزياء).

#### 1.5.2 مجال الحساب

يوضح الشكل 3.2 تكوين المبادل الحراري للأنايبب الدائرية ذات الزعانف الجيبية. يكون الهواء البارد بين الزعانف الجيبية بينما يسري السائل الساخن داخل الأنايبب. الأجسام الصلبة التي تتكون من الزعانف المموجة الجيبية مصنوعة من الألومنيوم مع ناقلية حرارة  $\lambda=202.4 \text{ W/m.K}$ . يتم تلخيص قيم المعلمات الهندسية الأساسية لمجموعة من صفيين من الأنايبب ذات الزعانف الجيبية في الجدول 1.2.

درسنا في هذا العمل ساعات وأطوال موجية مختلفة. يظهر في الشكل 4.2 المجال الحسابي ثلاثي الأبعاد بأبعاده وشروطه الحدودية للمحاكاة. المجال الحسابي الذي سيتم النظر فيه في هذه الدراسة محدد بخطوط مستقيمة تمثل شروط التناظر. في الاتجاه (y)، تمر خطوط التناظر عبر المستويات التي تتوسط زعنفتين متجاورتين. على طول المحور (z)، تمر خطوط التناظر عبر مراكز الأنايبب والمستوى المتمركز بين خطين متجاورين من الأنايبب. للحصول على سرعة تدفق منتظمة عند المدخل، يتم تمديد منطقة المدخل 10 أضعاف المسافة بين الزعانف، ومع ذلك، يتم تمديد منطقة المخرج 30 مرة لتجنب التدفق العكسي.

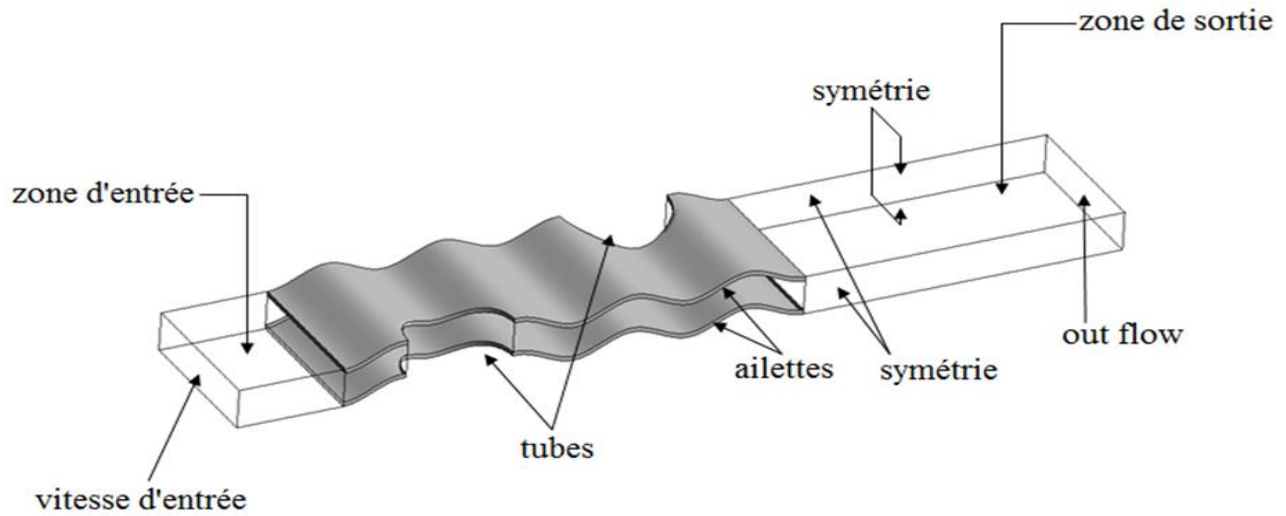


الشكل 3.2 مقطع أفقي وعمودي لمجال الحساب لمبادل أنبوبي بزعانف جيبية.

## الفصل الثاني: دراسة عددية

| المقادير                         | الطول (mm)                  |
|----------------------------------|-----------------------------|
| تغير سعة الموجة $\Delta A$       | +0,25 ; -0,25 ; +0,5 ; -0,5 |
| تغير طول الموجة $\Delta \lambda$ | +3 ; -3 ; +6 ; -6           |
| البعد بين الزعانف $S_a$          | 1,7                         |
| قطر الانبوب $D_t$                | 8                           |
| سمك الزعنفة $E_{ail}$            | 0,4                         |
| المسافة عرضية بين الأنابيب $P_t$ | 20                          |
| المسافة طولية بين الأنابيب $P_l$ | 25                          |

الجدول 1.2 أبعاد المبادلات الحرارية المستخدمة في هذه الدراسة.



الشكل 4.2 مجال الحساب ثلاثي الأبعاد والشروط الحدية.

## الفصل الثاني: دراسة عددية

### 2.5.2 الشروط الحدية

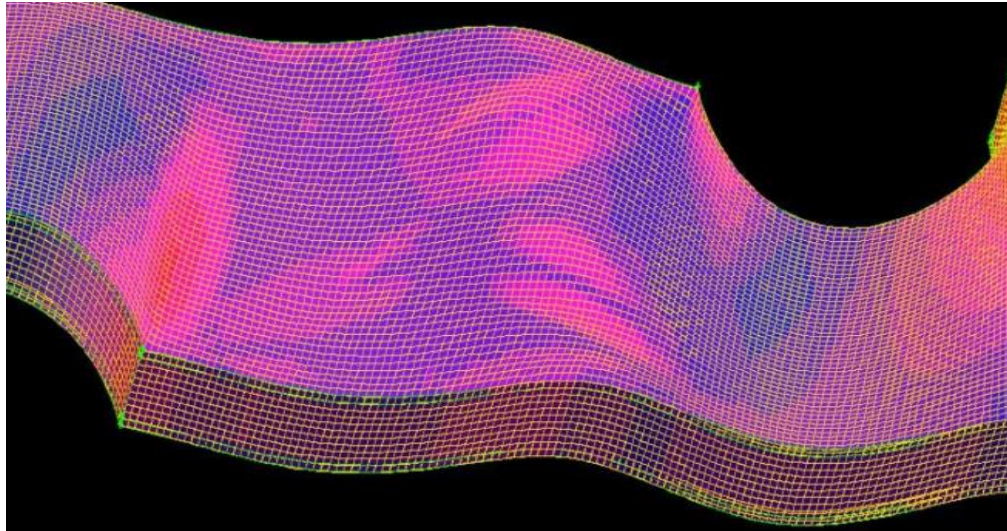
لتقييم انتقال الحرارة وكمية الحركة في المبادل الحراري، يجب وضع الشروط الحدية على جميع حدود مجال التصميم، وترد تفاصيل الشروط الحدية، الموضحة في الشكل 2-4، في الجدول 2-2.

| السطح الفيزيائي                  | درجة الحرارة                        | السرعة  | الضغط                               |
|----------------------------------|-------------------------------------|---|-------------------------------------|
| الدخول                           | قيمة ثابتة<br>( 293 k )             | السرعة ثابتة<br>(2-18 m/s)  | الضغط الجوي                         |
| سطح الزعفة                       | محسوب بواسطة Fluent                 | 0 =   | محسوب بواسطة Fluent                 |
| الأسطح الخارجية للأنايب          | قيمة ثابتة<br>(353K)                | 0 =   | محسوب بواسطة Fluent                 |
| أوجه علوية وسفلية متماثلة        | $\frac{\partial T}{\partial y} = 0$ | $\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial w}{\partial y} = 0, v = 0$                          | $\frac{\partial p}{\partial y} = 0$ |
| الجانب الأيمن والأيسر من التماثل | $\frac{\partial T}{\partial z} = 0$ | $\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial v}{\partial z} = 0, w = 0$                          | $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$ |
| الخروج                           | $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$ | $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = 0$ | $\frac{\partial P}{\partial x} = 0$ |

الجدول 2.2 الشروط الحدية.

### 3.5.2 الشبكة

تم إنشاء جميع الأشكال الهندسية وشبكاتها باستخدام برنامج "Gambit". يعد إنشاء الشبكة ودمج الشروط الحدودية أمرًا ضروريًا قبل البدء في أي هدف آخر. يعد تحسين الشبكات وتوليدها أمرًا مهمًا للتنبؤ بالخصائص الحرارية الهيدروليكية في الأشكال الهندسية المعقدة. ضمن Gambit ، يمكننا استخدام عدة أنواع من الشبكات: الشبكات المنظمة أو غير المنظمة أو الهجينة. تم إجراء دراسة للشبكة للتأكد من أن النتائج التي تم الحصول عليها بعد الحسابات لم تتأثر بحجم الشبكات. ولهذا قمنا بتحديد قيم التدفق الحراري المتبادل وهبوط الضغط لشبكات مختلفة من المجال المدروس. بالنسبة لجميع عمليات المحاكاة، يتغير عدد الخلايا المستخدمة بين 280,000 - 1,200,000 خلية من النوع السداسي (انظر الشكل 2.5).



شكل 5.2 : مقطع من الشبكة المنجزة.

### 4.5.2 الخصائص الفيزيائية

إن حساب الأعداد عديمة الأبعاد مثل: رقم Reynolds، رقم Nusselt، وعامل Colburn ومعامل الاحتكاك يعتمد على الخواص الفيزيائية للمائع العامل والتي تعتمد بشكل عام على درجة الحرارة والضغط.

## الفصل الثاني: دراسة عددية

في العمل الحالي، يُفترض أن خصائص مائع العمل ثابتة ويتم أخذها لمتوسط درجة حرارة الهواء في جميع أنحاء المجال الحسابي المحدد. ولذلك، فإن الخصائص الحرارية الفيزيائية للهواء هي :  $\lambda_{air} = 0,0242 W/m.K$  ,

$$\mu = 1,7894 \times 10^{-5} kg/m.s \text{ و } \rho = 1,225 kg/m^3 , C_p = 1006,43 J/kg.K$$

في المبادلات الحرارية، عادة ما تكون الأنابيب مصنوعة من النحاس بسبب قابليته للطرق والليونة. الزعانف مصنوعة من الألومنيوم وجميع الأسطح الصلبة نظيفة دون أي مقاومة حرارية إضافية. الخصائص الحرارية الفيزيائية للألمنيوم

$$\text{هي : } C_p = 871 J/kg.K , \rho_{al} = 2719 kg/m^3 , \lambda_{al} = 202,4 W/m.K$$

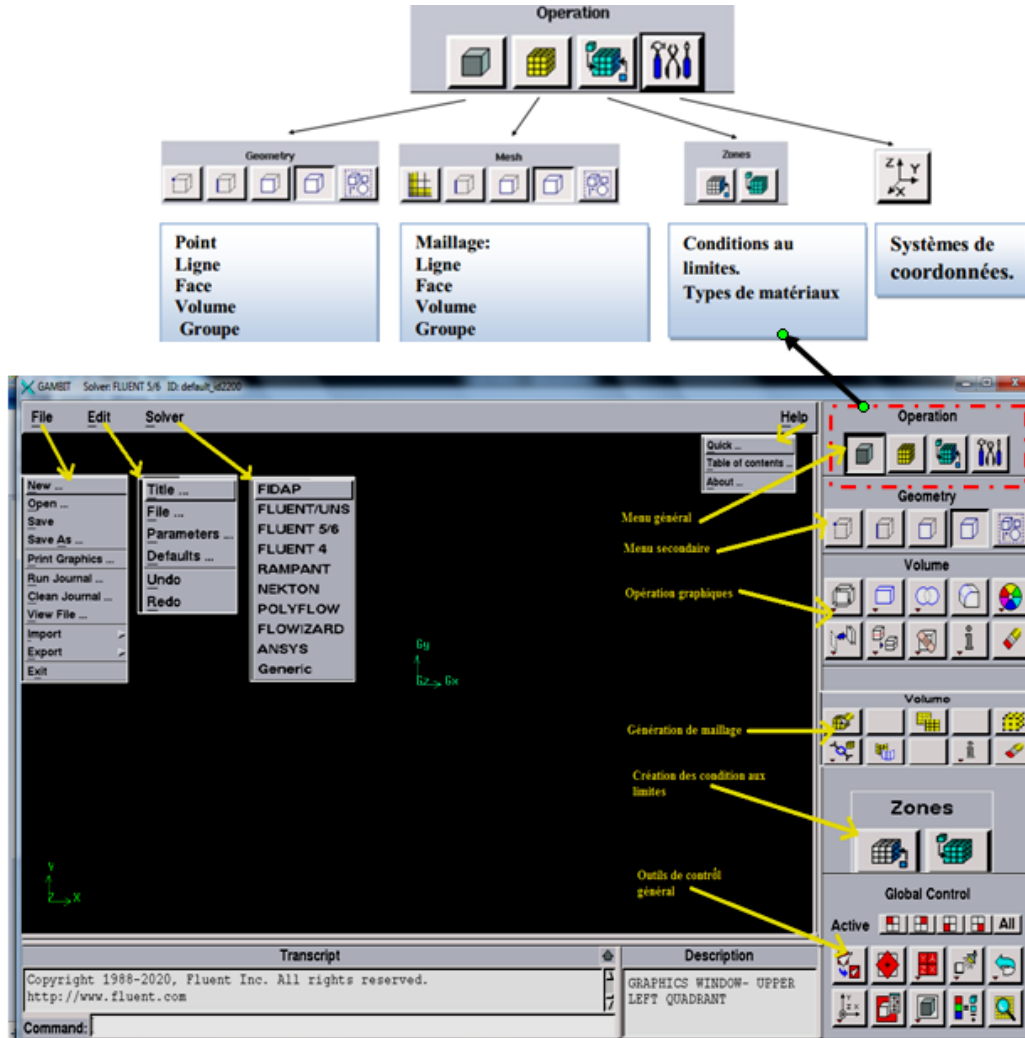
### 6.2 أدوات المحاكاة FLUENT و GAMBIT

#### GAMBIT 1.6.2

Gambit و Fluent عبارة عن برمجيات مرخصة تجارياً يمكن استخدامها لتنفيذ عمليات محاكاة ميكانيكا الموائع ثنائية الأبعاد أو ثلاثية الأبعاد، بدءاً من بناء الشبكات باستخدام Gambit إلى حل معادلة Navier-Stokes والمعالجة اللاحقة باستخدام Fluent إن برنامج Gambit هو برنامج مُشكّل ثنائي الأبعاد/ثلاثي الأبعاد؛ وهو معالج مسبق يقوم بتشكيل أشكال هندسية. يمكنه إنشاء شبكة منظمة أو غير منظمة في الإحداثيات الديكارتية القطبية أو الأسطوانية. يمكن أن ينتج شبكات معقدة في اثنين أو ثلاثة شبكات مستطيلة أو مثلثة، يمكن تقسيم الشكل الهندسي إلى عدة أجزاء لتوليد شبكة منظمة بدلاً من ذلك، ينشئ Gambit تلقائياً شبكة غير منظمة تتكيف مع نوع الهندسة التي يتم إنشاؤها. باستخدام أدوات التحقق من الشبكة، يمكن اكتشاف الأخطاء بسهولة يمكن استخدامه أيضاً لبناء هندسة وإنشاء شبكتها. يُستخدم Gambit على نطاق واسع في الصناعة (السيارات، والطيران، والفضاء، وغيرها) بسبب واجهته الرسومية القوية، ويمكن استخدامه أيضاً لإنشاء جميع أنواع الهندسة المعقدة (الثابتة أو المتحركة) المرتبطة بالشبكات الثابتة أو المتكيفة. يتضمن مجموعة كاملة من الأدوات لتوليد شبكات السطح والحجم ودمج الشروط الحدية [32].

#### 1.1.6.2 شرح عام

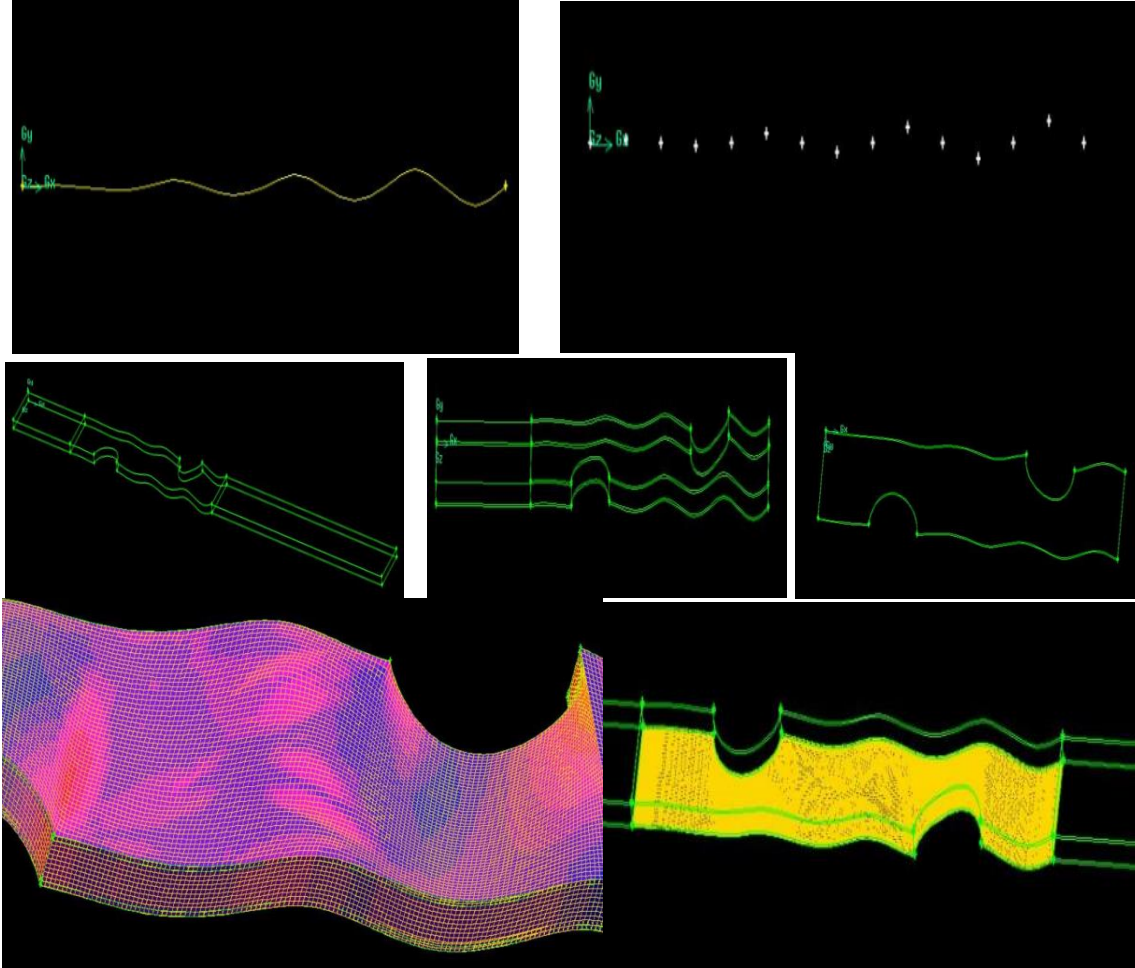
بعد تشغيل البرنامج، تظهر واجهة المستخدم كما هو موضح في الشكل 2.6 :



شكل 6.2: عرض عام لنافذة برنامج Gambit

### 2.1.6.2 طريقة إنشاء الهندسة

تم تصميم هندستنا ثلاثية الأبعاد في Gambit بالنظر إلى تعقيد الشكل المتموج للزعنفة اخترنا رسمها نقطة بنقطة، ثم ربطها لإنشاء خط متموج، تُشكل عملية سحب الخط في اتجاهات مختلفة الزعنفة الحلقية المتموجة.

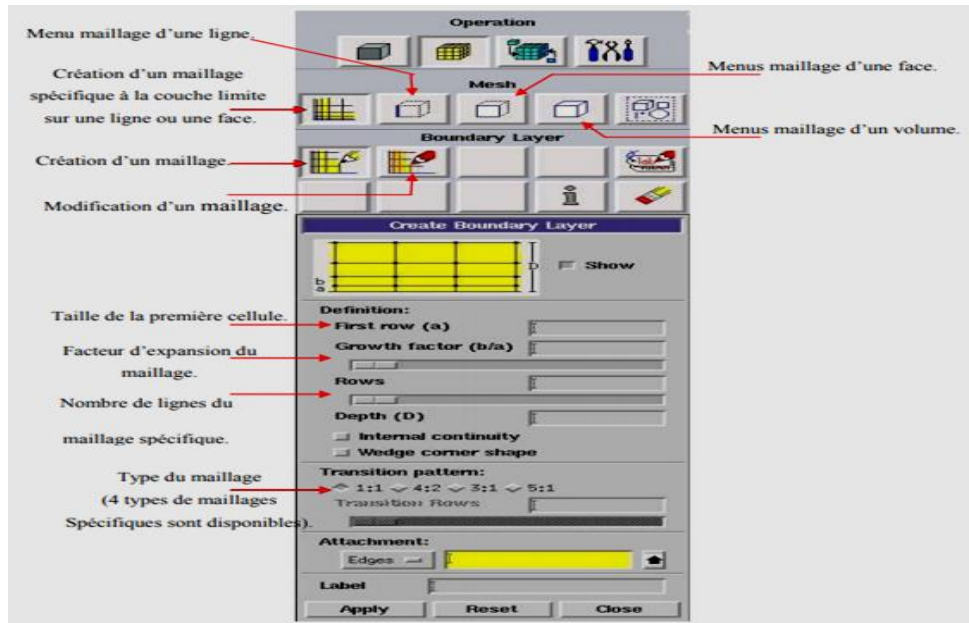


شكل 7.2: خطوات رسم الأشكال الهندسية في Gambit

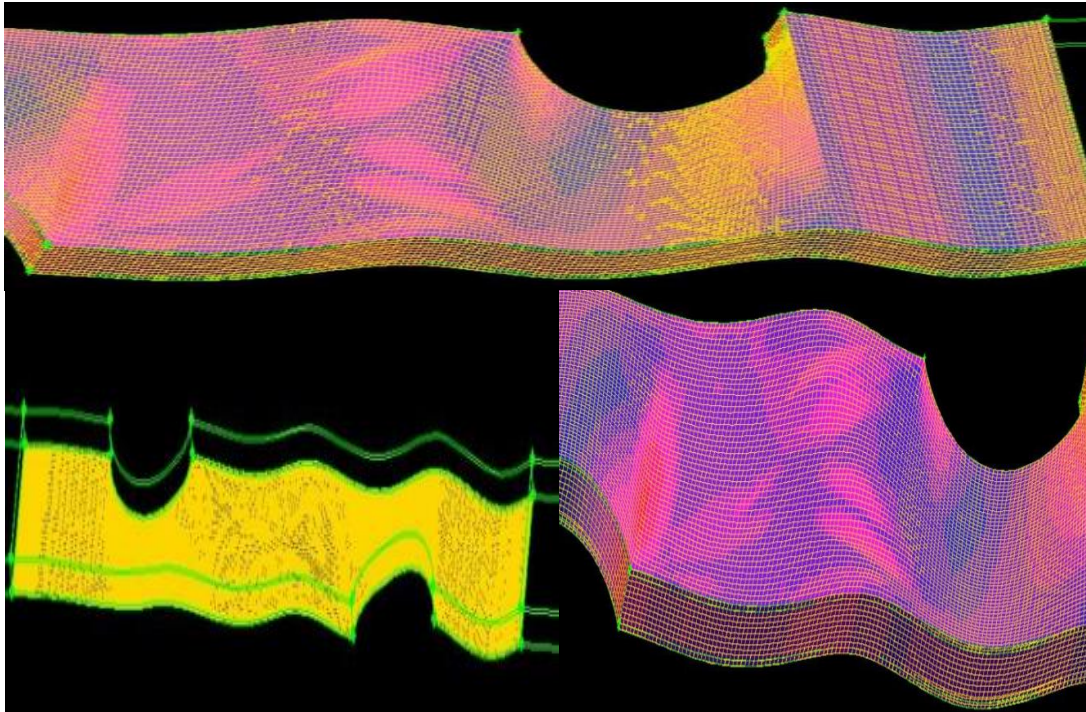
### 3.1.6.2 الشبكة

يمكن استخدام هذه الأداة لتوليد جميع أنواع الشبكات (الشبكات الخطية والسطحية والحجمية) وحتى لإنشاء طبقة حدية.

## الفصل الثاني: دراسة عددية



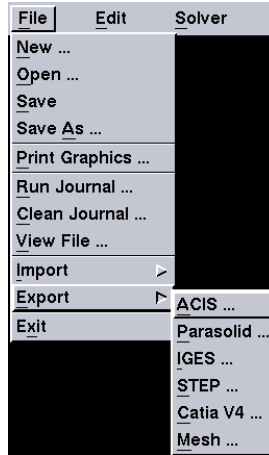
شكل 8.2: قائمة إنشاء الشبكات



شكل 9.2: مقاطع توضيحية في الشبكة المنجزة.

### 4.1.6.2. طريقة الحفظ

بمجرد إنشاء الشكل الهندسي وتحديد الشروط الحدية، يجب حفظ الشبكة كملف msh حتى يتمكن Fluent من قراءته واستخدامه. كما يمكن أيضا حفظ الشكل الهندسي على شكل ملف Gambit لإجراء تعديلات عليه لاحقا إذا وجب ذلك.



شكل 10.2: حفظ الملف في برنامج Gambit .

### 2.6.2. شرح برنامج Fluent وتوضيح مراحل الحساب

برنامج فلوانت (Fluent) هو برنامج متقدم لحل مشاكل ديناميك الموائع (CFD)، وهو أحد فروع الهندسة الحسابية يستخدم لحل وتحليل التدفقات السائلة والغازية والحرارية. يعد Fluent من بين الأدوات الأكثر استخداماً في الصناعات التي تتطلب تحليل تدفقات السوائل والهواء والاحتراق، مثل السيارات والطيران والطاقة والبيئة والتصنيع. يتميز برنامج Fluent بواجهة مستخدم بديهية وقوية تسمح للمهندسين والباحثين بتحليل ومحاكاة التدفقات بسهولة. يتضمن البرنامج مجموعة واسعة من الأدوات التي تتيح للمستخدمين تخصيص النماذج والمحاكاة بما يتناسب مع احتياجاتهم الخاصة.

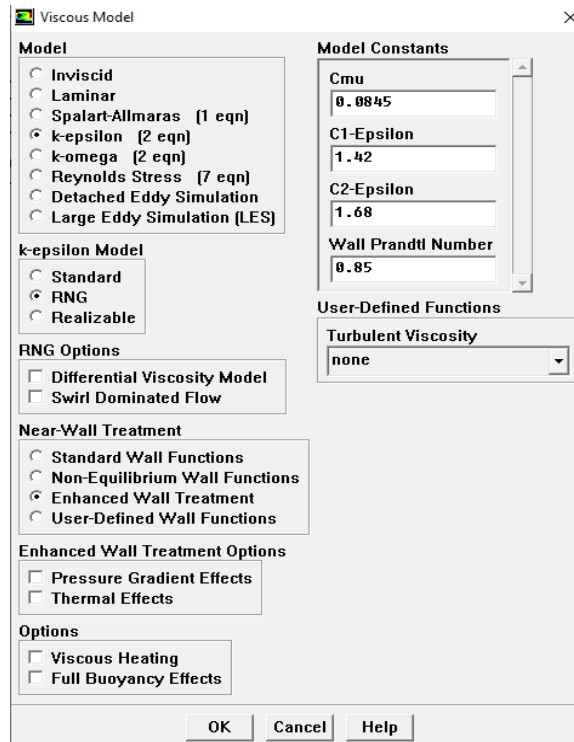
Fluent عبارة عن برنامج حسابي يحاكي تدفقات الموائع مع أو بدون نقل الحرارة، يستخدم Fluent طريقة الحجوم المنتهية ويتطلب من مستخدم Gambit توفير شبكة مجال الحساب ونوع المجال (صلب أو مائع) والشروط الحدية. تستخدم بنية تسمح بتشغيلها كعمليات متزامنة متعددة على محطة عمل واحدة أو على أجهزة متوازية. يمكننا برنامج Fluent من التعامل مع مجموعة واسعة من المشاكل في عدة مجالات: التدفقات في المناطق المشوهة و/أو المتحركة، والاضطرابات، انتقال الحرارة، التدفقات التفاعلية، الاحتراق غير المختلط، والاحتراق قبل الخط.

يمكن تلخيص المراحل المختلفة لهذا النهج العددي على النحو التالي:

- بدء تشغيل الإصدار 3ddp من FLUENT

## الفصل الثاني: دراسة عددية

- قراءة الملف مثال N=4.msh:
- **File → Read → Case → N=4.cas → OK**
- التحقق من وحدة أبعاد مجال الحساب :
- **Grid → Scale → mm → Scale → Colse**
- تفعيل استخدام معادلة الطاقة :
- **Define → Models → Energy**
- اختيار نموذج الاضطراب المناسب:
- **Define → Models → Viscous**
- تحديد خصائص المواد:
- **Define → Materials → Solid/fluid**
- تحديد الظروف المرجعية: تقديم ظروف التشغيل:
- **Define → Operating conditions → Gravity**

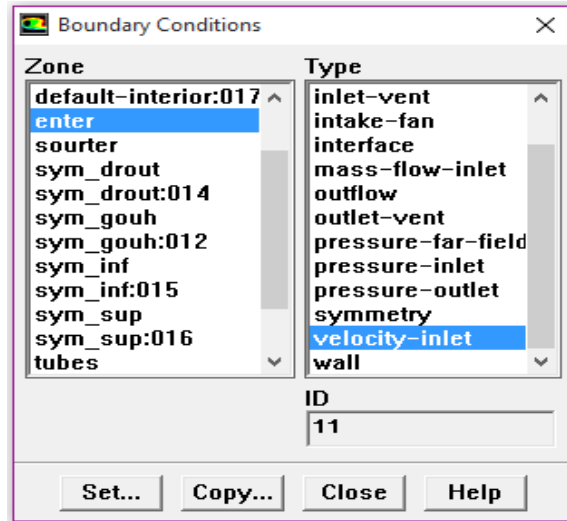


شكل 11.2 : تعريف نموذج الاضطراب.

## الفصل الثاني: دراسة عددية

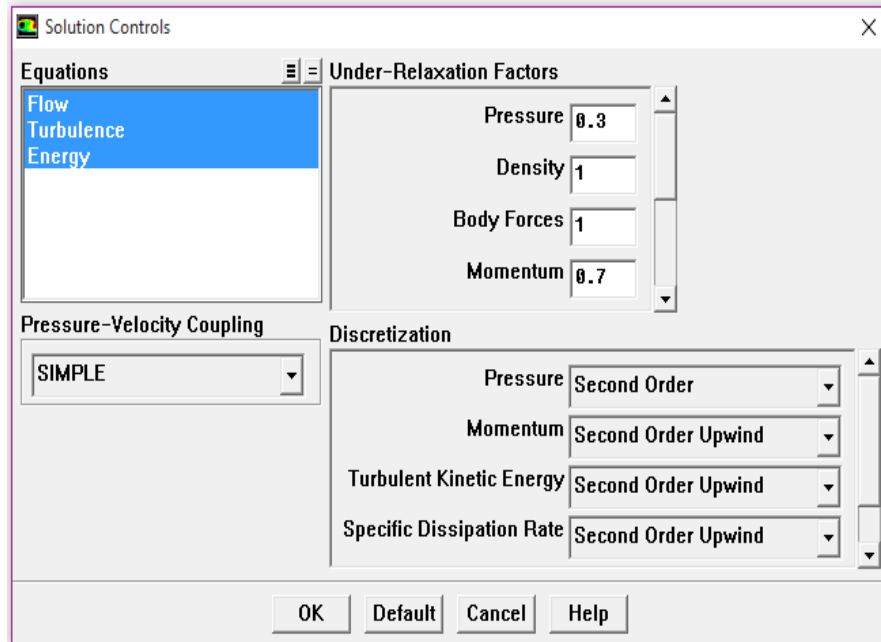
- تحديد الشروط الحدية: يتم تحديد الشروط الحدية لكل سطح في مجال الحساب

Define → Boundary condition



شكل 12.2: مواصفات الشروط الحدية.

- اختيار نموذج الحساب:



شكل 13.2: اختيار نموذج الحساب.

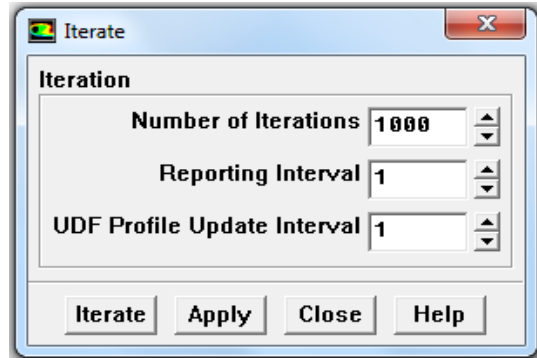
## الفصل الثاني: دراسة عددية

- تهيئة العمليات الحسابية وحفظ البيانات

### Solve → Initialize

- تشغيل العمليات الحسابية: قم بتشغيل التكرارات حتى التقارب، ثم احفظ النتائج لبدء مرحلة الرسم البياني.

### Solve → Iterate



شكل 14.2 : بدء الحسابات.

# الفصل الثالث

النتائج والمناقشة

### 1.3 مقدمة

نظرًا للقيمة الضعيفة لانتقال الحرارة التي يوفرها الهواء، كان استخدام الأسطح الموسعة (الزعانف) ضرورة في تصميم المبادلات الحرارية. ومن بين الهندسات المختلفة المتاحة، استُخدمت الزعانف المموجة على نطاق واسع في التطبيقات الحرارية، مثل الطاقة الشمسية (Singh وآخرون [1])، مشتتات الحرارة (Nilpueng وآخرون [2])، مشعات السيارات (Habibian وآخرون [3])، ومكيفات الهواء (Liu وآخرون [4]). تولد هذه الزعانف دوامات ثلاثية الأبعاد في التدفق، وتدمر الطبقة الحدودية، وتزيد من خلط التدفق، لذلك، من المهم تحليل بنية التدفق بناءً على التغيير في سعة وطول أمواج هذا النوع من الزعانف. تقدم في هذا الفصل النتائج العددية لتأثير تغيير أبعاد الموجات على شدة انتقال الحرارة المضطربة وانخفاض الضغط عبر حزمة من صفين متداخلين من الأنابيب. تم عرض النتائج من حيث تباين التدفق الحراري  $\phi$  وانخفاض الضغط  $\Delta P$  ومعامل الفاعلية  $K$  في مجال عدد رينولدز ( $1200 \leq Re \leq 10800$ ). بالإضافة إلى تحليل تأثير أبعاد الزعانف الجيبية على التبادل الحراري وانخفاض الضغط في هذه الأجهزة، تم توضيح ومناقشة نتائج توزيع درجات الحرارة المحلية بشكل منفصل.

### 2.3 حساب مختلف المقادير

حساب التدفق:

$$\phi = \dot{m} C_p (T_s - T_e) \quad (1.3)$$

$$\phi = \dot{m} (h_s - h_e) = H_s - H_e \quad (2.3)$$

أو

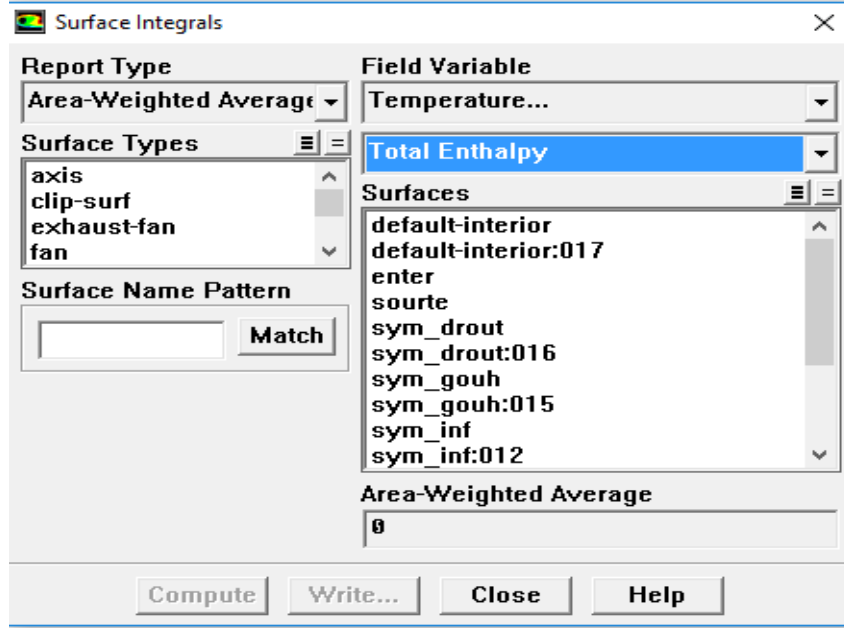
$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot S$$

$\dot{m}$  هو معدل التدفق الكتلي لتدفق الهواء.

$H_s$  و  $H_e$  هي التوالي معدلات التدفق الكتلي الحراري عند مخرج ومدخل مجال الحساب، والتي يتم تحديدها باستخدام برنامج Fluent :

$$H = \int h \rho V dS \quad (3.3)$$

Report > Surface integrals



الشكل 1.3 طريقة حساب الإنتالبي الكلي.

معرفة انخفاض الضغط يجعل من الممكن تحديد طاقة الضخ المطلوبة لتشغيل المبادل الحراري. لذلك من الضروري توصيف انخفاض الضغط من أجل تصميم هذه الأجهزة الحرارية بشكل صحيح. تم تحديد انخفاض الضغط من خلال العلاقة التالية:

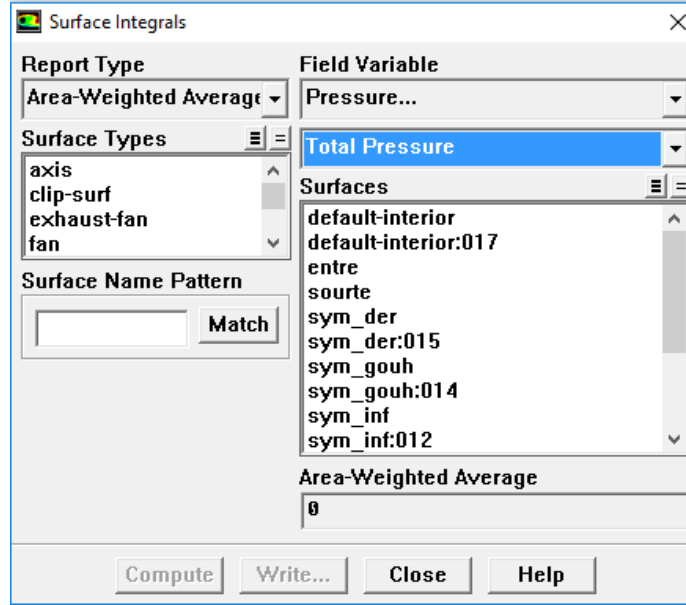
$$\Delta P = P_{ent} - P_{sor} \quad (4.3)$$

تم تقييم الضغط الكلي عند مدخل منطقة الدراسة ومخرجها على النحو التالي:

$$P = \frac{\int P \cdot dS}{\int dS} \quad (5.3)$$

$P_{ent}$  ،  $P_{sor}$  : يمثلان على التوالي ضغط المائع الكلي عند مدخل ومخرج مجال الحساب.

➤ Report → Surface Integrals:



الشكل 2.3 طريقة حساب الضغط الكلي

في هذه الدراسة، يُستخدم معامل الفاعلية الكلي أيضًا لتحديد الكفاءة الكلية للمبادل الحراري بحجم معين. ويعرّف بأنه الريح في التدفق الحراري المتبادل لكل وحدة من استهلاك الطاقة [5]:

$$K = \frac{\varphi}{\Delta P \cdot \dot{V}} \quad (6.3)$$

$\dot{V}$  (m<sup>3</sup>/s): هو معدل التدفق الحجمي لسريان المائع.

### 3.3 النتائج والمناقشة

#### 1.3.3 تأثير تغيير سعة الموجة

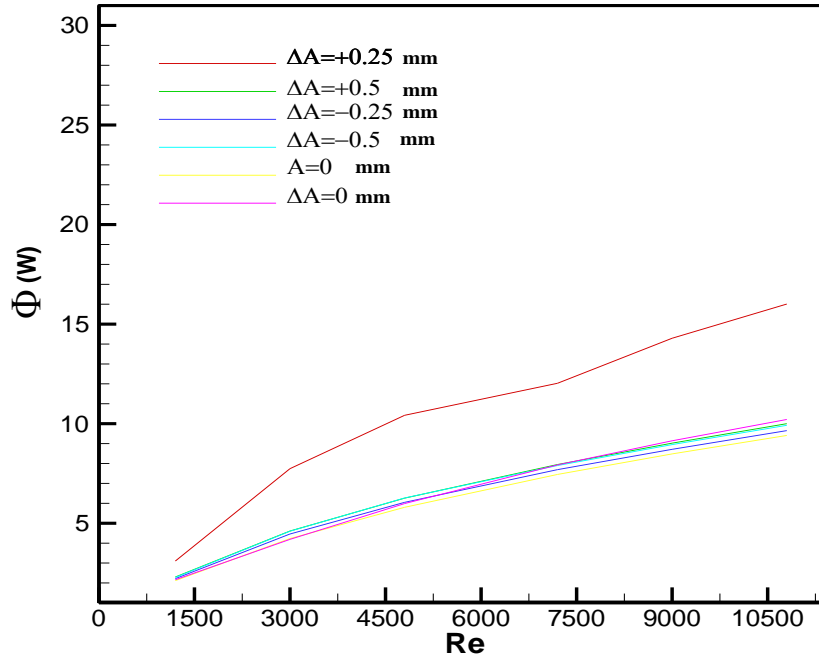
من أجل مسافة فاصلة بين الزعانف ( $S_a = 1,7\text{mm}$ ) ثابتة، طول موجات ثابت ( $\lambda = 12,5\text{mm}$ ) وفي مجال ( $1200 \leq Re \leq 10800$ ) سيتم عرض وتحليل تأثير تغيير سعة الموجة ( $\Delta A$ ) على أداء المبادل الحراري في هذا الجزء

## الفصل الثالث: النتائج ومناقشتها

من المذكورة. يظهر في الشكل 1.3 تغير التدفق الحراري المتبادل مع رقم رينولدز لقيم تغير سرعة الموجة من 0,5- مم إلى 0,5 مم.

منحنيات هذا الشكل تبين أن الزعانف المتموجة بتغير سعة ( $\Delta A=+0.25$ ) تقدم أعلى وأحسن قيم للتدفق الحراري بينما الحالات الأخرى تكون متقاربة في قيمة التدفق الحراري. من جهة أخرى فإن الزعنف المستوية ( $A=0$ ) تقدم أدنى قيم للتبادل الحراري مهما كانت قيمة  $Re$ .

في الحالة  $Re=1200$  نلاحظ أن كل أشكال الزعانف تمنح تقريبا نفس التبادل الحراري  $\Phi$ . في الحالة  $Re=10800$  الزعنف ذات التموج المنتظم  $\Delta A=0$  تمنح تبادل حراري اعلى بنسبة 8,50 % من الزعنف المستوية، يرجع السبب ان الزعنف المستوية تقدم سطح تبادل حراري أقل من الزعانف المتموجة. يرجع السبب الا أن الزعنف المستوية  $A=0$  مساحة سطحها أقل بنسبة 6,7% من الزعنف  $\Delta A=0$  كما أن الزعانف المتموجة تجعل المزج جيد للمائع مقارنة بالزعنف المستوية.

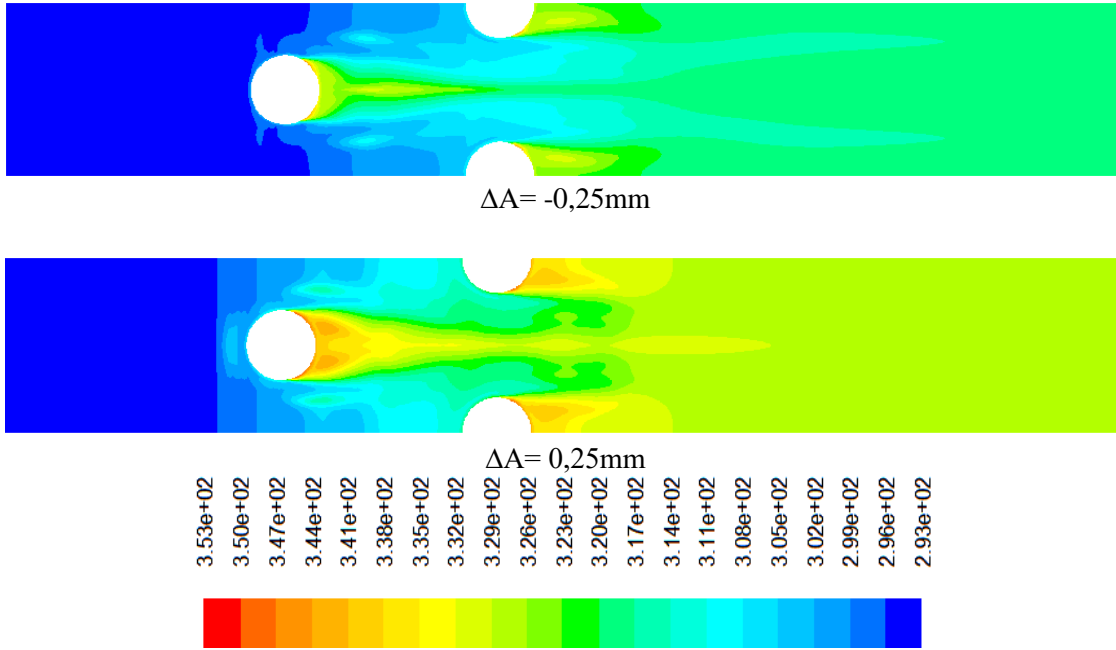


الشكل 3.3 تأثير تغير سرعة الموجة على التدفق الحراري.

الشكل 4.3 يظهر توزيع درجات الحرارة في الحالتين  $\Delta A=0,25$  mm و  $\Delta A=-0,25$  mm من أجل  $Re=10500$ .

## الفصل الثالث: النتائج ومناقشتها

هذا التوزيع خاص بالمقطع الطولي على مستوى  $y=S_a/2$ . يمكننا أن نرى بوضوح أن هناك تدرجًا كبيرًا في درجة الحرارة مع الاتجاه الطولي للتدفق الخاص بالزعنفة  $\Delta A=0,25mm$  مقارنة بالزعنفة المستوية، مما يشير إلى زيادة شدة التبادل الحراري بين أسطح الأنابيب ذات الزعانف المتموجة و الهواء المحيط.



الشكل 4.3 توزيع درجات الحرارة من أجل  $\Delta A = -0,25mm$  و  $\Delta A = 0,25mm$  ( $Re = 10800$ ).

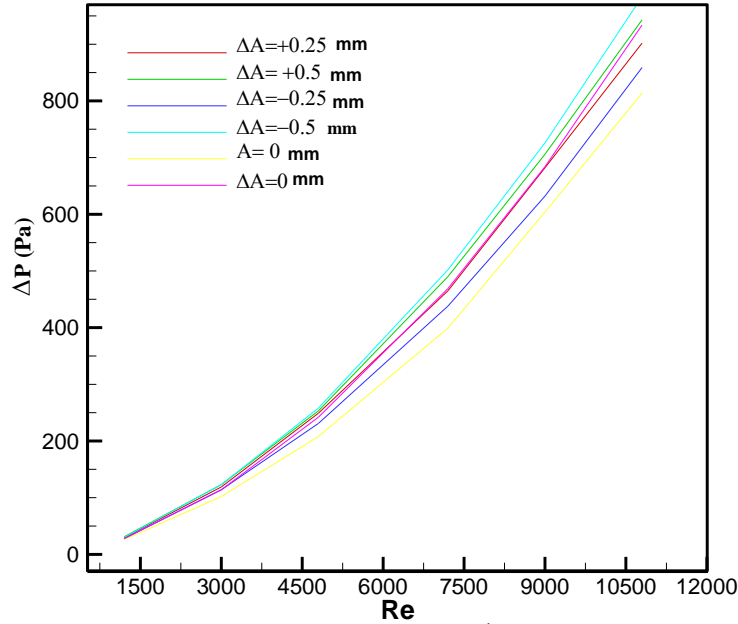
الهدف في تصميم المبادلات الحرارية هو توفير نقل كبير للحرارة مع تقليل قوة الضخ (قيمة أقل لانخفاض الضغط  $\Delta P$ ). ولذلك، من المهم معرفة تأثير التموج غير المنتظم للزعانف على هذه الخاصية للمبادلات الحرارية. يوضح الشكل 5.3 تأثير تغيير سعة الموجات على انخفاض الضغط من أجل كل قيم  $Re$ . نلاحظ أنه كلما زادت قيمة رينولدز  $Re$  يصبح تأثير سعة الموجة أكبر على انخفاض الضغط.

تظهر النتائج أن الزعنفة ذات التموج ( $\Delta A = -0.5$ ) تنتج انخفاض ضغط أكبر مقارنة بالزعانف الأخرى وهذا راجع إلى بداية التموج بسعة كبيرة ( $A = 1,75mm$ ). من جهة أخرى الزعنفة المستوية ( $A = 0$ ) تقدم انخفاض ضغط ضعيف مهما كان رقم رينولدز  $Re$ .

في حالة رينولدز  $Re = 10800$  الزعنفة ذات التموج ( $\Delta A = -0,5mm$ ) تقدم ضغط أعلى بنسبة 20,9% من الزعنفة المستوية ( $A = 0$ ). كل الزعانف المتموجة تقدم انخفاض ضغط أكبر مقارنة بالزعنفة المستوية ( $A = 0$ ) لأن هناك ما يعرف بقوة الاضطدام.

### الفصل الثالث: النتائج ومناقشتها

نلاحظ أيضا أنه كلما زادت قيمة عدد رينولدز  $Re$  فإن انخفاض الضغط يزيد وهذا راجع الى زيادة قوة اصطدام الهواء مع الأنابيب والزعانف.



الشكل 5.3 تأثير تغير السعة على انخفاض الضغط.

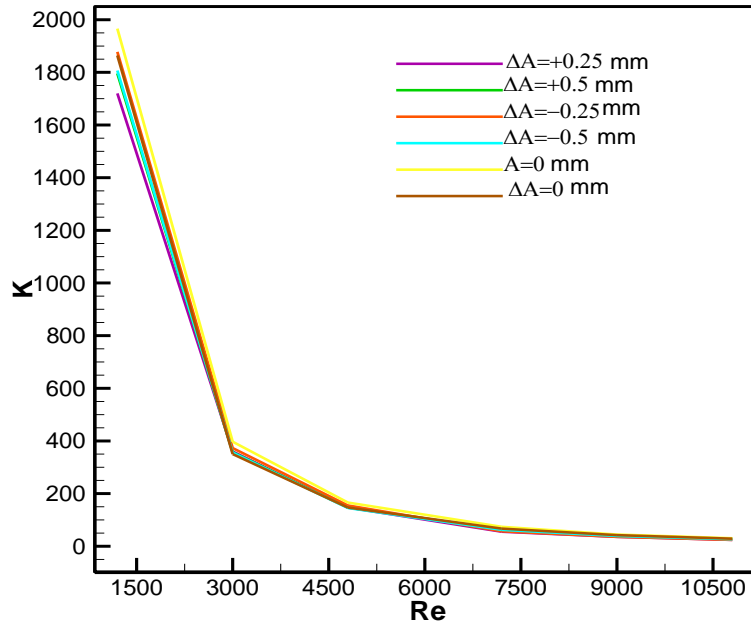
يتم استخدام معامل الأداء  $K$  هنا لتقييم تأثير تغير السعة وطول الموجات على الكفاءة الإجمالية للمبادلات الحرارية. مع زعانف بأربعة موجات، يوضح الشكل أدناه تغير  $K$  مع تغير سعة الموجة ورقم رينولدز.

بغض النظر عن اختلاف قيمة  $\Delta A$ ، فإن قيمة  $K$  تتناقص مع زيادة  $Re$  بسبب الزيادة السريعة في انخفاض الضغط مع عدد  $Re$ .

في القيم المرتفعة لعدد رينولدز فإن تقريبا كل اشكال الزعانف تقدم نفس معامل الفاعلية. من أجل قيم منخفضة لعدد رينولدز  $Re=1200$  الزعنفة المستوية تقدم معامل فاعلية أعلى مقارنة بالزعانف المتموجة.

في حالة رينولدز  $Re=10800$  الزعنفة المستوية ( $A=0$ ) تنتج معامل فاعلية أكبر بنسبة (25,92%) من الزعنفة ذات التموج ( $\Delta A=+0.25$ ).

## الفصل الثالث: النتائج ومناقشتها



الشكل 6.3 تأثير تغير السعة على معامل الفاعلية.

### 2.3.3 تأثير تغيير طول الموجة

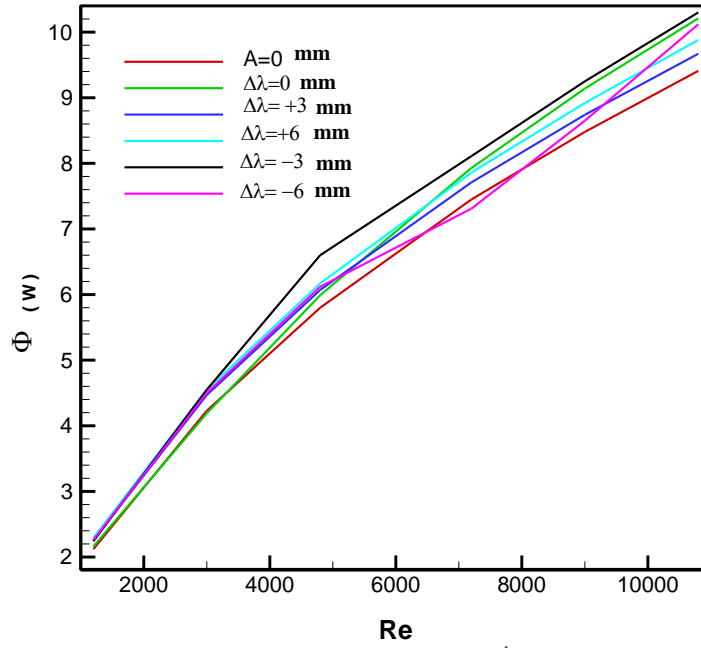
من أجل مسافة فاصلة بين الزعانف  $S_a = 1,7 \text{ mm}$  ثابتة، سعة موجة ثابتة  $A = 0,75 \text{ mm}$  الشكل أدناه (7.3) يمثل تأثير طول الموجة على التدفق الحراري في مجال عدد رينولدز ( $1200 < \text{Re} < 10800$ ).. منحنيات هذا الشكل تبين أن الزعانف المتموجة بتغير سعة ( $\Delta A = 0$ ) تقدم أعلى وأحسن قيم للتدفق الحراري فيما يخص الحالات الأخرى تكون متقاربة في قيمة التدفق الحراري. في حين أن الزعنفه المستوية ( $A = 0$ ) تقدم أدنى قيم للتبادل الحراري.

مثلا من أجل  $\text{Re} = 10800$  التدفق الحراري في حالة ( $\Delta \lambda = 0 \text{ mm}$ ) أكبر بنسبة 5,58% من الحالة ( $\Delta \lambda = +3$ )

في الحالة  $\text{Re} = 1200$  نلاحظ أن كل أشكال الزعانف تمنح تبادل حراري متقارب بينما يزداد الفرق في قيم أداء التبادل الحراري مع زيادة  $\text{Re}$ ، مثلا في حالة  $\text{Re} = 10800$  الزعنفه ذات التموج المنتظم  $\Delta A = 0$  تمنح تبادل حراري اعلى بنسبة 8,50% من الزعنفه المستوية.

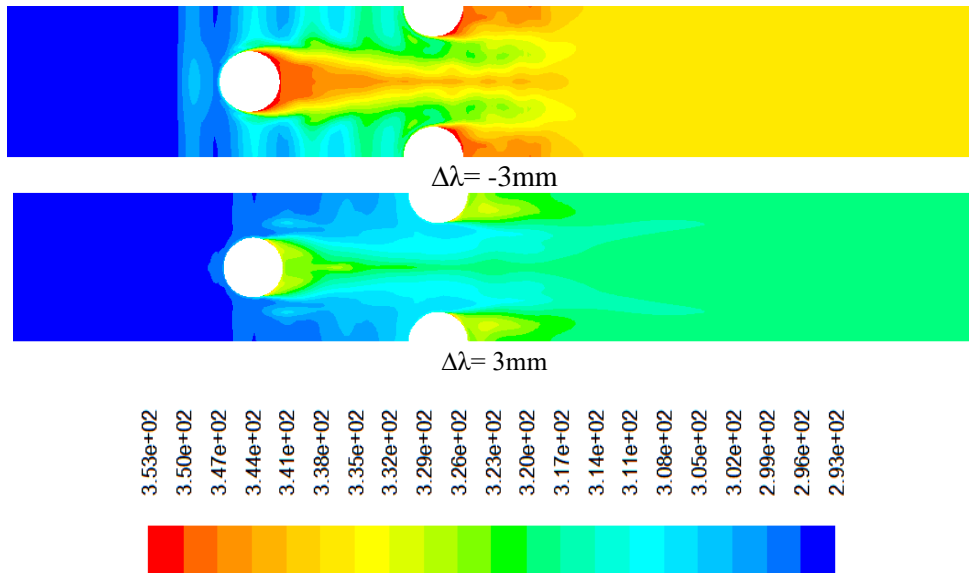
نتائج هذا الشكل تظهر أيضا أنه مهما كانت قيمة  $\text{Re}$  فان الزعانف المتموجة تمنح أفضل تبادل حراري مقارنة بالزعانف المستوية.

## الفصل الثالث: النتائج ومناقشتها



الشكل 7.3 تأثير تغير طول الموجة على التدفق الحراري.

يظهر الشكل 8.3 توزيع درجات الحرارة في الحالتين  $\Delta\lambda = 3\text{mm}$  و  $\Delta\lambda = -3\text{mm}$  من أجل  $Re = 10500$ . هذا التوزيع خاص بالمقطع الطولي على مستوى  $y = S_a/2$ . يمكننا أن نرى بوضوح أن هناك تغيرا كبيرا في درجة حرارة الهواء عند مروره عبر الزعانف  $\Delta\lambda = -3\text{mm}$  مقارنة بالزعانف ذات تغير طول الموجة  $\Delta\lambda = 3\text{mm}$ ، مما يدل على زيادة كمية التبادل الحراري بين أسطح الأنابيب ذات الزعانف المتموجة والهواء المحيط.



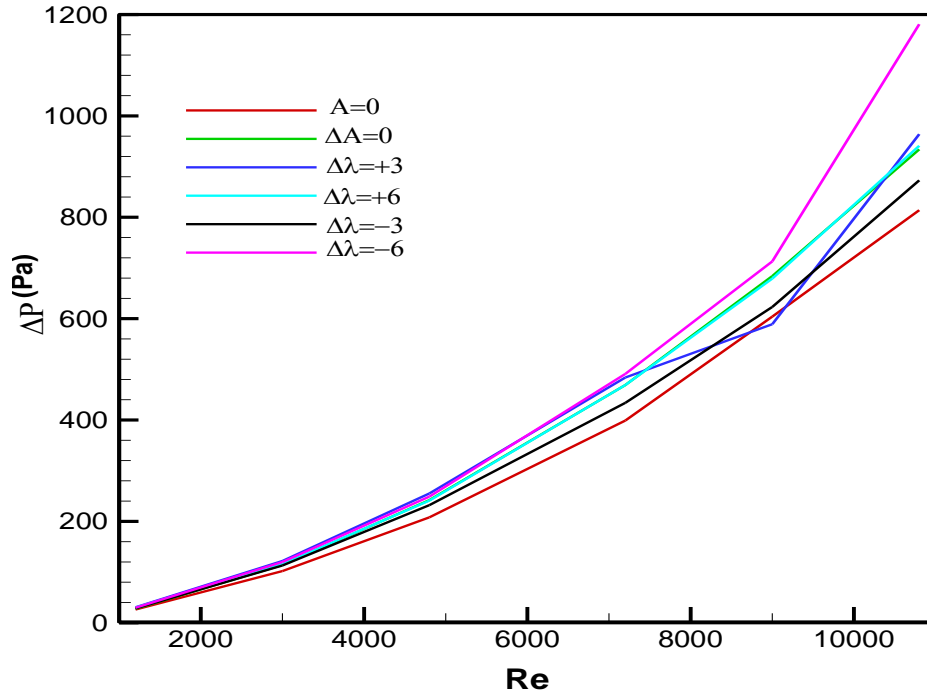
الشكل 8.3 توزيع درجات الحرارة من أجل  $\Delta\lambda = 3\text{mm}$  و  $\Delta\lambda = -3\text{mm}$  ( $Re = 10800$ ).

## الفصل الثالث: النتائج ومناقشتها

كما يظهر في الشكل 9.3 تغير طول الموجة في اتجاه جريان الهواء له تأثير كبير على انخفاض الضغط  $\Delta P$ . نلاحظ أنه كلما زاد عدد رينولدز  $Re$  يصبح تأثير طول الموجة أكبر على انخفاض الضغط.

الزعنفة ذات التموج ( $\Delta\lambda=-6\text{mm}$ ) تنتج انخفاض ضغط أكبر مقارنة بالزعنفة الأخرى من جهة أخرى الزعنفة المستوية ( $A=0$ ) تقدم انخفاض ضغط ضعيف مهما كان رقم رينولدز  $Re$ .

في حالة رينولدز  $Re=10800$  الزعنفة ذات التموج ( $\Delta\lambda=-6$ ) تقدم ضغط أعلى بنسبة % 45,08 من الزعنفة المستوية ( $A=0$ ). في حالة رينولدز  $Re=1200$  الزعنفة ذات التموج ( $\Delta\lambda=-6\text{mm}$ ) تقدم ضغط أعلى بنسبة % 7,06 من الزعنفة ذات التموج  $\Delta\lambda=0\text{mm}$ .

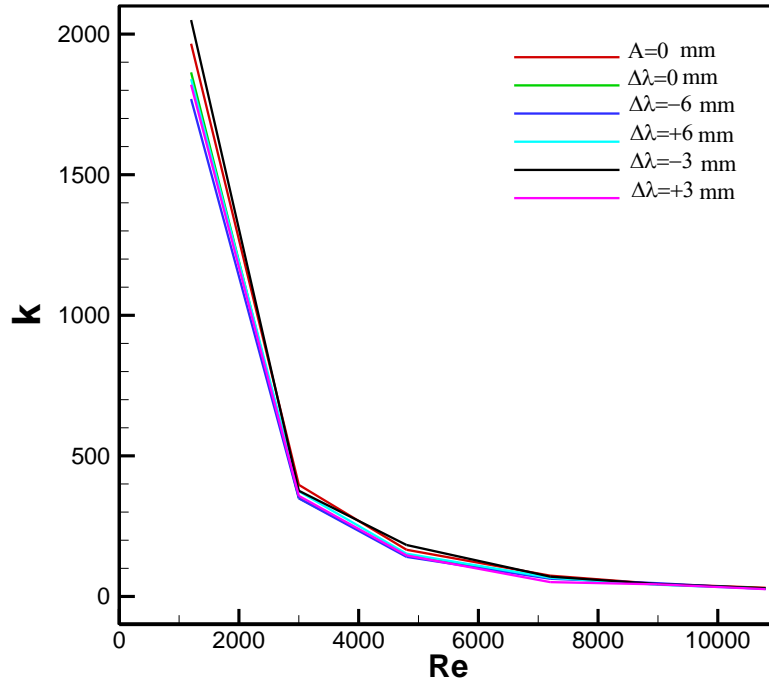


الشكل 9.3 تأثير تغير طول الموجة على انخفاض الضغط.

لقد ثبت مسبقاً أنه مع اختلاف الطول الموجي، يتغير نقل الحمل الحراري وفقدان الضغط. لذلك، من المهم استخدام معامل الأداء الإجمالي  $K$  لاختيار أفضل تمويج للزعنفة.

الشكل رقم 10.3 يمثل تأثير تغير طول الموجة وعدد رينولدز  $Re$  على معامل الفاعلية ( $K$ ). في القيم المرتفعة لعدد رينولدز فان تقريباً كل أشكال الزعانف تقدم نفس معامل الفاعلية. من أجل قيم منخفضة لعدد رينولدز  $Re=1200$  الزعنفة ذات التموج ( $\Delta\lambda=-3\text{mm}$ ) تقدم معامل فاعلية أعلى مقارنة بالزعنفة المتموجة. في حالة رينولدز  $Re=10800$  الزعنفة المستوية ( $A=0$ ) تنتج معامل فاعلية أكبر بنسبة % 16,79 من الزعنفة ذات التموج  $\Delta\lambda=-6\text{mm}$ .

## الفصل الثالث: النتائج ومناقشتها



الشكل 10.3 تأثير تغير طول الموجة على معامل الفاعلية.

### 3.3.3 تأثير رقم رينولدز

وكما ذكرنا في قسم البحث الببليوغرافي فإن الاختلاف في قيمة رقم رينولدز له تأثير مباشر على أداء المبادلات الحرارية. يعتمد هذا الرقم بدون أبعاد (الذي يمثل النسبة بين القوى الديناميكية وقوى اللزوجة) على سرعة التدفق، وهندسة الجسم الصلب، وكذلك طبيعة السائل.

تمثل الجداول (1.3) و (2.3) على التوالي تغير خصائص المبادل الحراري مع تغير قيمة رقم رينولدز لقيمتين من السعة  $\Delta A$  و  $\Delta \lambda$ . تؤكد النتائج الواردة في هذه الجداول أنه بالنسبة لجميع قيم تغير السعة وطول الموجة، فإن التدفق الحراري وانخفاض الضغط يزدادان مع رقم رينولدز. بالنسبة للحالة  $\Delta A = 0,25 \text{ mm}$  فإن زيادة Re بين 4800 و 10800 تؤدي إلى زيادة التبادل الحراري بنسبة 52% وانخفاض الضغط بنسبة 260%. وتظهر نتائج هذه الجداول أيضًا أنه مهما كانت هندسة الزعفة المتموجة، فإن المعامل K يتناقص مع زيادة Re.

### الفصل الثالث: النتائج ومناقشتها

| رقم رينولدز      | $\Delta A = 0,25 \text{ mm}$ |                 |      | $\Delta A = -0.5 \text{ mm}$ |                 |      |
|------------------|------------------------------|-----------------|------|------------------------------|-----------------|------|
|                  | $\phi (W)$                   | $\Delta P (Pa)$ | $K$  | $\phi (W)$                   | $\Delta P (Pa)$ | $K$  |
| <b>Re= 1200</b>  | 3.1                          | 29.5            | 1720 | 2.28                         | 30              | 1807 |
| <b>Re= 4800</b>  | 10.42                        | 249             | 147  | 6.27                         | 502             | 145  |
| <b>Re= 10800</b> | 16.01                        | 902             | 24.3 | 9.92                         | 948             | 26.7 |

الجدول 1.3 تأثير رقم رينولدز على خصائص المبادل الحراري لقيمتين من  $\Delta A$ .

| Re               | $\Delta \lambda = 3 \text{ mm}$ |                 |       | $\Delta \lambda = 6 \text{ mm}$ |                 |      |
|------------------|---------------------------------|-----------------|-------|---------------------------------|-----------------|------|
|                  | $\phi (W)$                      | $\Delta P (Pa)$ | $K$   | $\phi (W)$                      | $\Delta P (Pa)$ | $K$  |
| <b>Re= 1200</b>  | 2.26                            | 30.49           | 1769  | 2.26                            | 29.55           | 1820 |
| <b>Re= 4800</b>  | 6.07                            | 255             | 141   | 6.12                            | 249             | 146  |
| <b>Re= 10800</b> | 9.67                            | 964             | 26.54 | 10.12                           | 1181            | 26.2 |

الجدول 2.3 تأثير رقم رينولدز على خصائص المبادل الحراري لقيمتين من  $\Delta \lambda$ .

### خاتمة

خصص هذا العمل البحثي لدراسة ظاهرة انتقال الحرارة وميكانيكا الموائع والمحاكاة العددية في مبادلات حرارية ذات صفيين من الأنابيب الدائرية بزعانف متموجة بشكل غير منتظم. هذا العمل البحثي يقدم ويحلل بالتفصيل تأثير تغير سعة الموجة  $-6\text{mm} \leq \Delta\lambda \leq +6\text{mm}$  و طول الموجة  $-0,5\text{mm} \leq \Delta A \leq +0,5\text{mm}$  على أداء الطاقة لمبادل حراري.

تم إجراء سلسلة من عمليات المحاكاة العددية باستخدام برنامج الحساب Fluent 6.2 من أجل العثور على الهندسة المثالية للزعنفة المتموجة.

تم تحليل عشرة أشكال هندسية في مجال تغير عدد رينولدز  $1200 \leq Re \leq 10800$ . كما أظهرت الدراسة الحالية النتائج العددية لتأثير تغير سعة وطول الموجة على توزيع درجة الحرارة بين الأنابيب والزعانف.

النتائج المتحصل عليها يتم تلخيصها في النقاط الآتية:

- الزعنفة ذات التموج ( $\Delta A = +0,25$ ) تقدم أحسن تدفق حراري مقارنة بالزعانف الأخرى.
- الزعنفة المستوية  $A=0$  تقدم أدنى قيم  $\Delta P$  مهما كانت قيمة  $Re$  في حين أن الزعنفة المتموجة  $\Delta A = -0,5\text{mm}$  تقدم أعلى قيم لانخفاض الضغط.
- من بين الزعانف المتموجة، يمنح شكل الزعنفة  $\Delta A = -0,25\text{mm}$  أفضل قيم معامل الأداء  $K$ . مهما كانت قيمة  $Re$ ، كما تنخفض قيمة  $K$  مع زيادة عدد  $Re$ .
- من بين الزعانف المتموجة تقدم الزعانف ذات تغير طول الموجة  $\Delta\lambda = -3\text{mm}$  أفضل قيم تدفق الحرارة وأدنى قيم  $\Delta P$ .
- في جميع الحالات التي تم فحصها، يزداد انتقال الحرارة وانخفاض الضغط برقم رينولدز.

- [01] Etude comportement dynamique et thermique de deux écoulements de fluide dans un échangeur de chaleur , F. Taourit, Mémoire de master en génie mécanique, University Abou Bakr Belkaid-TLEMCEM, 2013, pp. 78
- [02] Modélisation et optimisation des échangeurs de chaleur à ailettes indépendantes, F. TAHROUR, " in *Thèse de doctorat, Faculté des sciences*: El Hadj Lakhdar -Batna, 2016.
- [03][https://www.thomasnet.com/articles/process-equipment/understanding-heat-exchangers/Understanding Heat Exchangers - Types, Designs, Applications and Selection Guide](https://www.thomasnet.com/articles/process-equipment/understanding-heat-exchangers/Understanding%20Heat%20Exchangers%20-%20Types,%20Designs,%20Applications%20and%20Selection%20Guide)
- [04] Analyse numérique du comportement thermo-convectif d'un écoulement de nanofluide à travers un échangeur de chaleur en présence des ailettes MEZOUAR Khaled MERABET Bilal; Faculté de TECHNOLOGIE ;Université Boubaker Belkaïd– Tlemcen
- [05] The story of the Alfa Laval Plate Heat Exchanger and the Spiral Heat Exchanger, Magnusson, B. and Samuelson, B, NorstedtsTryckeri, Stockholm, 1985.
- [06] Fundamentals of Heat Exchanger Design. Ramesh k.Shah and DusanP.Sekulic Copyright 2003 John Wiley & Sons.Inc
- [07] Heat Exchanger Design Handbook, A series of Textbook and Reference Books, founding Editor L.L.Faulkner.Columb Division, Battelle Memorial Institute and Department of Mechanical Engineering. The Ohio State University, Columbus.
- [08] Comparaison de différents types d'échangeurs de chaleur pour optimiser leurs performances Tishreen University Journal of Engineering Sciences Vol. 33 No. 2011
- [09] A numerical study of flow and thermal fields in finned tube heat exchangers, K. Torikoshi and G. N. Xi, presented at ASME Heat Transfer Division, 1995.
- [10] College of Design and Engineering, V. Wong Kaufui Omar De Leon Department of Mechanical Engineering National University of Singapore, fevrier 2023.
- [11] Experimental study on the air-side thermal-flow performance of additively manufactured heat exchangers with novel fin designs, S. Unger, M. Beyer, S. Gruber, R. Willner, and U. Hampel, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 146, pp. 106074, 2019.

[12] Optimiser l'efficacité des échangeurs de chaleur, smith ;j ;R/johnson ;A ;B/ patel ;k ;c  
Journal of Heat and Heat Exchange Technology, Numéro 23, Vol 5;Date de publication Juin  
2023

[13] Une étude numérique du transfert de chaleur du côté de l'air et de la chute de pression dans  
les échangeurs de chaleur à tubes à ailettes circulaires. Allemagne: Bergische Universität  
Wuppertal, 2003

[14] Enhanced heat transfer evaluation inside a four-row finned tube bundle for an air-cooled  
steam condenser, R. K. Banerjee, M. Karve, J. H. Ha, D. H. Lee, and W. Cho Numerical Heat  
Transfer, Part A 61, pp. 735-753, 2011.

[15] Encyclopédie de l'énergie; F. Mebarek-Oudina Article 055 : les échangeurs de  
chaleur.2014

[16] Echangeurs de chaleur - description des échangeurs, A. Bontemps, A. Garrigue, C.  
Goubier, et J. Huetz, in Technologies de l'ingénieur, vol. 055. Grenoble, 1995, p. 37.

[17] Numerical study of fin-spacing effects in annular-finned tube heat exchangers, M. S. Mon  
and U. Gross, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 47, pp. 1953-1964, 2004.

[18] Impacts of geometric structures on thermo-flow performances of plate fin-tube bundles,  
Y. Q. Kong, L. J. Yang, X. Z. Du, and Y. P. Yang, *International Journal of Thermal Sciences*,  
vol. 107, pp. 161-178, 2016.

[19] A comparison of thermal-hydraulic performance of various fin patterns using 3D CFD  
simulations, A. Kumar, J. B. Joshi, and A. K. Nayak, *International Journal of Heat and Mass  
Transfer*, vol. 109, pp. 336-356, 2017.

[20] Parametric study and multiple correlations on air-side heat transfer and friction  
characteristics of fin-and-tube heat exchangers with large number of large-diameter tube rows,  
G. Xie, Q. Wang, and B. Sunden *Applied Thermal Engineering*, vol. 29, pp. 1-16, 2009.

[21] Forced convection heat transfer and pressure drop of a horizontal cylinder with vertically  
connected non-perforated and perforated circular fins, Karabacak et G. Yakar, *Energy  
Conversion and Management*, vol. 52, pp. 2785-2793, 2011.

[22] Evaluation of enhanced heat transfer within a four-row finned tube array for an air-cooled  
vapour condenser, R.K. Banerjee, M. Carvey, J.H. Ha, D.H. Lee, et Y. Zhou, " Numerical Heat  
Transfer, vol. A61, pp. 735-753, 2011.

- [23] Thermal performance of a horizontal cylinder with undulating annular fins in natural convection for electronic cooling application, Dash, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 128, pp. 105623, 2021.
- [24] Three-dimensional analysis of thermal and hydraulic performance of finned and non-finned tubes in a stepped array, M. Raje AK Dhiman, *Thermal Science and Engineering Advances*, vol. 36, pp. 101532, 2022.
- [25] Three-dimensional numerical study and comparison of heat flow performance of different ring-fin tube designs, F. Tahrou, H. Ahmed, H. Amour, T. Saeed, H. Abu Zanada, Y. Moni, *Journal of Ocean Engineering and Science* 2022.
- [26] Heat transfer and friction characteristics of fin and tube model heat exchangers, CC Wang, WL Fu, et CCT- 26-, *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 14, pp. 174-186, 1997
- [27] Experimental and numerical investigation of the thermal-hydraulic performance in finned and flat wavy tube heat exchangers, J. Dong et J. Chen -27, *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 1377-1386.
- [28] Heat transfer enhancement in microchannel heat sink by wavy channel with changing wavelength/amplitude, L. Lin, J. Zhao, G. Lu, X.-D. Wang, and W.-M. Yan, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 118, pp. 423-434, 2017.
- [29] Numerical and experimental studies on an optimum Fin design problem to determine the deformed wavy-shaped heat sinks, C.-H. Huang and P.-W. Tung, *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 151, pp. 106282, 2020.
- [30] Numerical Study of Flow Over Annular-Finned Tube Heat Exchangers by Different Turbulent Models, H. Nematy and M. Moghimi, *CFD Letters*, vol. 6, pp. 101-112, 2021.
- [31] Interaction des structures tourbillonnaires avec la couche limite dans une cavité différentielle ment chauffée, M. CHaour, Constantine, 2010.
- [32] Modélisation de la convection naturelle laminaire dans une enceinte avec une paroi chauffée partiellement, G.Mabrouk, Constantine, 2010.

في هذه الدراسة لدينا عشرة نماذج من المبادلات الحرارية بصفين من الأنابيب مع زعانف متموجة بشكل غير منتظم تم دراستها باستخدام نموذج تدفق الهواء المضطرب (RNG) K-ε لبرنامج Fluent. الهدف من هذه الدراسة هو دراسة تأثير تغير سعة الموجات ( $-0,5\text{mm} \leq \Delta A \leq +0,5\text{mm}$ ) و تغير طول الموجات ( $-6\text{mm} \leq \Delta \lambda \leq +6\text{mm}$ ) على الخصائص الحرارية و الهيدروليكية لمبادل حراري في المجال  $1200 \leq Re \leq 10800$ . لوحظ أن الزعنف ذات التموج ( $\Delta A = +0,25$ ) تقدم أحسن تدفق حراري مقارنة بالزعانف الأخرى. من بين الزعانف المتموجة، يمنح شكل الزعنف  $\Delta A = -0,25\text{mm}$  أفضل قيم معامل الأداء الحراري K مهما كانت قيمة Re، كما تنخفض قيمة K مع زيادة عدد Re. من بين الزعانف المتموجة تقدم الزعانف ذات تغير طول الموجة  $\Delta \lambda = -3\text{mm}$  أفضل قيم التدفق الحراري وأدنى قيم  $\Delta P$ .

**الكلمات المفتاحية:** مبادل حراري، زعنف متموجة، تغير طول الموجات، تغير سعة الموجات، فلونت.

## Abstract

In this study, ten configurations of finned-tube heat exchangers with non-uniform undulations are examined numerically using the K-ε (RNG) turbulence model of Fluent. The purpose of the present investigation is to analyze the influence of wave amplitude variation ( $-0,5\text{mm} \leq \Delta A \leq +0,5\text{mm}$ ) and waves length ( $-6\text{mm} \leq \Delta \lambda \leq +6\text{mm}$ ) on the thermal-flow characteristics for a range of  $1200 \leq Re \leq 10800$ . It has been observed that the fins  $\Delta A = +0,25\text{mm}$  give the highest values of thermal exchange rate. Among the wavy fins, the fin shape  $\Delta A = -0,25\text{mm}$  the best values of K whatever the Re value. The K value decreases with increasing of Re. Among the wavy fins, the fins with wavelength change  $\Delta \lambda = -3\text{mm}$  present the best heat flux values and the lowest  $\Delta P$  values.

**Keywords:** Heat exchanger, wavy fin, wavelength change, wave amplitude change, Fluent.

## Résumé

Dans cette étude, dix géométries d'échangeurs thermiques à deux rangées de tubes avec des ailettes à ondes non-uniformes sont numériquement examinées à l'aide du modèle de turbulence K-ε (RNG) de Fluent. L'objectif de cette investigation est d'analyser l'effet de la variation d'amplitude ( $-0,5\text{mm} \leq \Delta A \leq +0,5\text{mm}$ ) et la longueur d'ondes ( $-6\text{mm} \leq \Delta \lambda \leq +6\text{mm}$ ) sur les caractéristiques thermo-hydrauliques d'un pour l'intervalle  $1200 \leq Re \leq 10800$ . Il a été observé que les ailettes avec  $\Delta A = +0,25\text{mm}$  donnent le bon échange thermique. Parmi les ailettes ondulées, la forme de l'ailette  $\Delta A = -0,25\text{mm}$  présente les meilleures valeurs de K quelle que soit la valeur de Re. Aussi, la valeur de K diminue avec l'augmentation de Re. Parmi les ailettes ondulées, les ailettes avec changement de longueur d'onde  $\Delta \lambda = -3\text{mm}$  présentent les meilleures valeurs de flux thermique et les valeurs plus basses de  $\Delta P$ .

**Mots-clés :** Echangeur de chaleur, Ailette ondulée, Variation d'amplitude, Variation de la longueur d'onde, Fluent.