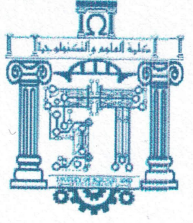




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
جامعة الشهيد الشخير العربي التبسي - تبسة  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الهندسة الميكانيكية



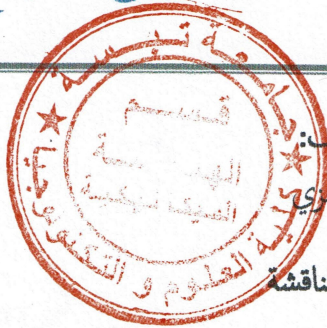
## مذكرة تخرج طور ماستر أكاديمي

تخصص: طاقوية

من اعداد الطالب: براجي عبد الرحيم

تحت عنوان

تصميم وتحليل ومحاكات لمبادل حراري حول فرن  
دوار لمصنع الإسمنت تبسة: تحقيق نموذج أولي



تحت اشراف:

د.مدوكي رمزي

أعضاء لجنة المناقشة

رئيسا - أستاذ محاضر ب-  
مشرفا ومقررا - أستاذ تعليم عالي  
عضوا مناقشا - أستاذ محاضر أ-  
ممثل عن مركز الدعم التكنولوجي والابتكار - جامعة تبسة  
شريك اقتصادي ممثل عن مصنع الإسمنت - تبسة  
شريك اقتصادي ممثلة عن مديرية الصناعة - تبسة

د.عقون راج  
د.مدوكي رمزي  
د.بوعفان عبد الكريم  
د.سوداني محمد الصالح  
عيادي محمد علي  
هادفي تركية

السنة الجامعية

2022/2023

# شكر وعر فان

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، الحمد لله ما تم جهد ولا ختم سعى الا  
بفضله،

وما تخطى العبد من عقبات وصعوبات الا بتوفيقه،

اشكر استاذي الفاضل "مدوكي رمزي" الذي منحني من وقته في توجيهي  
وارشادي لإكمال هذا العمل

كما أتقدم بالشكر لكل من ساعدني من قريب او من بعيد وكانوا مرشدين  
وموجهين لي دائماً.

# إِهْدَاء

الى نورِ يَضِيءُ عُنْمَتِي عِنْدَمَا تُطْفِئُنِي الْاَيامُ وَالظُّرُوفُ...

الى غَيْمَةٍ تُظَلُّنِي وَتَسْقِينِي دُونَ رَغْبَةٍ بِرَدِّي لِجَمِيلِهَا...

الى الْاَيْدِيِ الَّتِي تُؤَدِّي الْعَوْنَ عِنْدَمَا اتَعَثَرْتُ، تَدْفَعُنِي لِمَقَاوِمَةِ كُلِّ هَذِهِ

الْاَشْيَاءِ الَّتِي تَسْتَدْعِي السُّقُوطَ.

الى عَائِلَتِي ♥♥♥

بِراجي عبد الرحيم

## الفهرس:

8	مقدمة
9	I. الفصل الأول:عموميات حول الفرن الدوار والمبادلات الحرارية
11	1.1.الفرن الدوار :
11	1.1.1. تعريف الفرن :
11	2.1.1. مبدا عمل الفرن:
12	3.1.1. خصائص وابعاد الفرن.....
12	4.1.1. الانتقال والتبادل الحراري في الفرن .....
13	1.4.1.1. التوصيل .....
15	4.4.1.1. تمثيل لكميات الحرارة المنتقلة في الفرن .....
16	5.4.1.1. الضياعات الحرارية للفرن .....
17	2. المبادل الحراري.....
17	2.2.1. تصنيف المبادلات الحرارية.....
18	2.2.2.1. التصميم .....
19	3.2.2.1. آلية انتقال الحرارة .....
19	4.2.2.1. اتجاه التيار .....
20	3.2.1. عوامل ومعايير اداء المبادلات الحرارية .....
22	II.الفصل الثاني: ديناميكا الموائع الحاسوبية .....
22	1. II ديناميكا الموائع الحاسوبية CFD :
22	1.1. II مفهوم ديناميكا الموائع الحاسوبية CFD:
23	2.1. II مزايا و عيوب CFD:
23	3.1. II استخدامات ال CFD :
24	4.1. II مراحل عمل CFD :
25	2. II المعالج الأولي Gambit :
26	1.2. II شبكة .....
28	2.2. II معامل التشوه.....
28	3.2. II ارتباط الحل بالشبكة.....
29	3. II برنامج حل المعادلات solveur .....
29	1.3. II برنامج ANSYS Fluent .....
31	III. الفصل الثالث:دراسة الفرن دون مبادل .....
32	1. III الدراسة التحليلية .....
32	1.1. III المعادلة العامة لانتقال الحرارة بالتوصيل .....
33	2.1. III معطيات الدراسة .....
34	3.1. III الحل التحليلي .....
37	2. III الدراسة العددية .....
37	1.2. III شبكة مجال الدراسة .....

38	..... 2.2.III الشروط الحدية
39	..... 3.2.III إعداد برنامج FLUENT
41	..... 4.2.III دراسة تأثير الشبكة
42	..... 5.2.III تحديد قيمة مصدر الحرارة
44	..... IV. الفصل اربع:دراسة الفرن مع المبادل
45	..... 1.IV دراسة ثنائية البعد
46	..... 1.1.IV الدراسة الهندسية
48	..... 1.1.IV المحاكات العددية
50	..... 2.IV دراسة ثلاثية البعد
51	..... 1.2.IV الدراسة الهندسية
53	..... 2.2.IV المحاكات العددية
54	..... خاتمة
55	..... قائمة المراجع

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو انجاز مبادل حراري حول فرن الكلنكر الدوار بهدف استعادة الطاقة الحرارية الضائعة و اعادة تدويرها و ذلك من خلال تحسين أداء اهم اجزاءها العملية اعتمدنا في عملنا على المحاكاة العددية ثنائية البعد وثلاثية البعد باستخدام برنامجي Gambit و Fluent، تم عرض النتائج المتحصل عليها على شكل بياني لتغير فرق درجة الحرارة بين مدخل ومخرج المبادل بدلالة سمك طبقة الهواء

## Résumé

Le but de ce travail est de réaliser un échange de chaleur autour du four rotatif à clinker afin de récupérer l'énergie thermique perdue et de la recycler en améliorant les performances de ses parties importantes. Nous avons utilisé une simulation numérique bidimensionnelle et tridimensionnelle dans notre travail en utilisant les logiciels Gambit et Fluent. Les résultats obtenus ont été présentés graphiquement montrant le changement de différence de température entre l'entrée et la sortie de l'échangeur en fonction de l'épaisseur de la couche d'air.

## Abstract:

The object of this work is to achieve heat exchange around the rotary clinker furnace in order to recover lost heat energy and recycle it by improving the performance of its important parts. We relied on two-dimensional and three-dimensional numerical simulation in our work using the Gambit and Fluent software. The results obtained were presented graphically showing the change in temperature difference between the inlet and outlet of the exchanger as a function of the thickness of the air layer.

## قائمة الأشكال:

- الشكل 1 مراحل عملية طهي الكنكر..... 11
- الشكل 2 رسم تخطيطي لمقطع عرضي يوضح خصائص وأبعاد الفرن..... 12
- الشكل 3 تمثيل لكيفية انتقال الحرارة عبر طبقات الفرن في مقطع عرضي (نظام دائم)..... 15
- الشكل 4 مختلف أنواع المبادلات الحرارية الأنبوبية..... 18
- الشكل 5 مختلف أنماط التدفق 4..... 19
- الشكل 6 خطوات المحاكات العددية..... 24
- الشكل 7 أنواع مختلفة من الشبكات..... 26
- الشكل 8 مثال عن اختبار تقارب الشبكة..... 28
- الشكل 9 رسم توضيحي لأبعاد الفرن المأخوذة في الدراسة..... 33
- الشكل 10 مثال عن شبكة دراسة الفرن..... 37
- الشكل 11 رسم توضيحي لمكان ونوع الشروط الحدية..... 38
- الشكل 12 منحنى بياني يمثل تغيرات نتيجة درجة الحرارة في الجدار الخارجي للفرن ( $T_{p\_ext}$ ) بدلالة عدد العقد في الشبكة المستعملة..... 42
- الشكل 13 منحنى بياني يمثل تغيرات نتيجة درجة الحرارة في الجدار الخارجي للفرن ( $T_{p\_ext}$ ) بدلالة عدد العقد في الشبكة المستعملة..... 42
- الشكل 14 منحنى بياني لتغير درجة الحرارة في الجدار الخارجي للفرن بدلالة كمية الحرارة..... 43
- الشكل 15 منحنى بياني لتغير درجة الحرارة في الجدار الداخلي للفرن بدلالة كمية الحرارة..... 43
- الشكل 16 منحنى تغير فرق درجة الحرارة ( $T\Delta$ ) بدلالة كمية التدفق الحجمي للحرارة  $Q_v$ ..... 43
- الشكل 17 رسم توضيحي للشكل الهندسي في هيئة ثنائية البعد..... 46
- الشكل 18 الشبكة المدروسة للفرن مع المبادل في هيئة ثنائية البعد..... 46
- الشكل 19 رسم توضيحي للشروط الحدية الخاصة بالدراسة..... 47
- الشكل 20 منحنى بياني لتغير فرق درجة الحرارة بين مدخل ومخرج المبادل بدلالة سمك طبقة الهواء..... 49
- الشكل 21 رسم تمثيلي لعينة دراسة من المبادل الحراري المحيط بالفرن..... 51
- الشكل 22 الشبكة المولدة للفرن مع مبادل حراري في هيئة ثلاثية البعد..... 52
- الشكل 23 رسم توضيحي لمدخل ومخرج المانع..... 52
- الشكل 24 رسم بياني لتغير درجة الحرارة على طول المبادل..... 53

# Nomenclature

## Lettres Grecques

$\beta$  : Le coefficient de dilatation volumique du fluide [ $K^{-1}$ ]

$\rho$  : La masse volumique du fluide [ $kg/m^3$ ]

$\mu$  : La viscosité dynamique [ $kg/m.s$ ]

$\nu$  : La viscosité cinématique [ $m^2/s$ ]

$\lambda$  : La conductivité thermique [ $W/m.K$ ]

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzman [ $W/m^2K^4$ ]

$\alpha$  : La diffusivité thermique [ $m^2/s$ ]

$\Phi$  : Le flux de chaleur [ $W$ ]

$Q_v$  : La quantité de chaleur du volume élémentaire par unité du temps en ( $W.m^3$ )

## Lettres latines

$V_\infty$  : Vitesse de l'entrée d'air [ $m/s$ ]

$V_x$  : La composante de vitesse suivant l'axe X [ $m/s$ ]

$V_y$  : La composante de vitesse suivant l'axe Y [ $m/s$ ]

$V_z$  : La composante de vitesse suivant l'axe Z [ $m/s$ ]

$T_\infty$  : Température de l'entrée d'air [ $K$ ]

$T_p$  : Température des tubes [ $K$ ]

$C_p$  : Chaleur spécifique à pression constante [ $J/kg. K$ ]

$P$  : Pression [ $pas$ ]

$S$  : Section [ $m^2$ ]

$h$  : Coefficient d'échange moyen [ $W/m^2K$ ]

$H$  : La hauteur de l'ailette [ $m$ ]

$d$  : L'écartement entre les ailettes [ $m$ ]

$L$  : Largeur de l'ailette [ $m$ ]

$e$  : L'épaisseur de l'ailette [ $m$ ]

$t$  : Le temps en (s)

$U$  : L'énergie interne spécifique en ( $J.Kg^{-1}$ )

$x,y,z$ : Coordonnées cartésiennes



# المقدمة:

تعتبر صناعة الإسمنت من أهم الصناعات في العالم، حيث تلعب دورًا حاسمًا في تطوير البنية التحتية والإنشاءات. ومع ذلك، فإن عملية إنتاج الإسمنت تستهلك كميات كبيرة من الطاقة، مما يتسبب في انبعاثات ضارة للبيئة وهدر للطاقة الحرارية.

واحدة من أكثر المصادر التي تسهم في هدر الطاقة الحرارية في صناعة الإسمنت هي فرن الكلنكر الدوار. يُستخدم هذا الفرن لتسخين خليط الكلنكر والمواد الأخرى بدرجات حرارة عالية تصل إلى آلاف الدرجات المئوية، مما يُنتج عنه طاقة حرارية ضائعة بكميات كبيرة. ونظرًا لأهمية استغلال الموارد والحفاظ على البيئة، فإن إعادة تدوير هذه الطاقة الحرارية الضائعة أصبحت ضرورة ملحة.

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة ومحاكاة وانجاز مبادل حراري حول فرن الكلنكر الدوار بهدف استعادة الطاقة الحرارية الضائعة وإعادة تدويرها. سيتم استخدام تقنيات المحاكاة والنمذجة الحاسوبية لتحليل سلوك الفرن والتعرف على النقاط الحرجة التي يمكن تحسينها وتحسين كفاءة استغلال الطاقة الحرارية.

سيتم في هذه المذكرة تناول أربعة فصول نقوم في أولها بالتطرق للمفاهيم المتعلقة بالفرن والمبادل الحراري، كما سنتطرق في الفصل الثاني إلى المفاهيم الخاصة بالمحاكات والنمذجة الحاسوبية، في الفصل الثالث سنقوم بدراسة الفرن من دون مبادل حراري لتحديد كمية الحرارة المنبعثة لاستغلالها في الفصل الرابع، والذي سنقوم فيه بتحديد البعد الأنسب بين المبادل والفرن من خلال دراسة ثنائية البعد، في نفس الفصل سنتناول دراسة ثلاثية البعد لتقييم أداء المبادل الحراري المقترح.

من خلال تنفيذ هذه الدراسة والمحاكاة، نأمل أن نحقق تحسینًا في كفاءة استغلال الطاقة الحرارية الضائعة من فرن الكلنكر الدوار، وبالتالي تقليل استهلاك الطاقة وانبعاثات الغازات الضارة. يمكن لهذا النهج المبتكر أن يسهم في تحسين الاستدامة البيئية لصناعة الإسمنت وتوفير الموارد الطاقوية.

# الفصل الأول:

عموميات حول الفرن الدوار والمبادلات الحرارية

**1.1 الفرن الدوار :**

يُعتبر الفرن الدوار أحد العناصر الأساسية في صناعة الإسمنت. فهو الجزء المسؤول عن تحويل المواد الخام إلى الكلنكر، الذي يُعتبر المكون الرئيسي في إنتاج الإسمنت. يعد الفرن الدوار هيكلًا هندسيًا معقدًا وفريدًا يتميز بوظيفته الرئيسية في التسخين والتحويل الحراري للمواد الخام.

يعد الفرن الدوار جزءًا حيويًا في عملية إنتاج الإسمنت، ولهذا السبب يلقي اهتمامًا كبيرًا فيما يتعلق بتحسين أدائه وكفاءته. وقد شهدت هذه الصناعة تقنيات حديثة تهدف إلى تقليل الانبعاثات الضارة وتحسين الأداء البيئي للفرن الدوار.

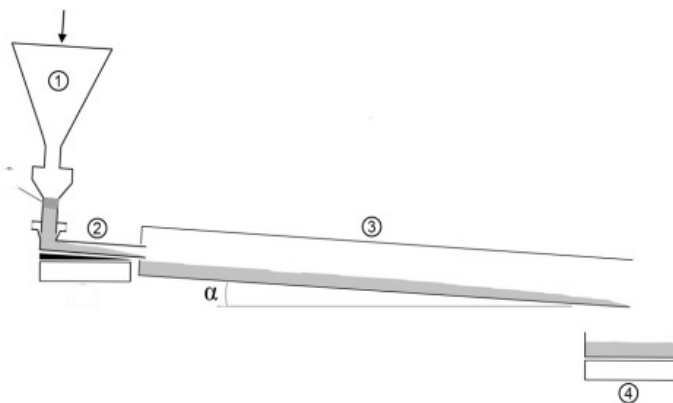
**1.1.1 تعريف الفرن :**

الفرن الدوار هو نوع من أنواع الأفران الصناعية الذي يستخدم فيها الحركة الدائرية لتحريك المواد الخام أثناء التسخين. يتألف الفرن من أنبوب دوار طويل يحتوي على مواد خام تحترق داخله، مع وجود فتحات على الجوانب لإدخال الهواء للسيطرة على عملية الاحتراق وتوفير الأكسجين اللازم. يستخدم الفرن الدوار بشكل رئيسي في صناعة الأسمنت والحديد والصلب والكيماويات، ويعتبر أحد الأفران الأكثر كفاءة وفعالية في استخراج العناصر النقية من المواد الخام!

**2.1.1 مبدا عمل الفرن:**

تمر عملية طهي الكلنكر بعدة مراحل نذكرها باختصار فيما يلي:

- 1 يتم وضع المادة الأولية في مدخنة الفرن وهي عبارة عن قمع يتم فيها التسخين والتجفيف الأولي للمزيج حتى تصل درجة حرارته إلى  $700C^{\circ}$ .
- 2 يتم رفع درجة حرارة المزيج أثناء انتقاله حتى دخوله الفرن بدرجة حرارة  $800C^{\circ}$ .
- 3 للحصول على مادة الكلنكر النقية وذات جودة يتم صهر المزيج في الفرن الدوار أثناء انتقاله نحو مصدر اللهب بفعل الجاذبية والحركة الدائرية للفرن حيث تدور الغازات الساخنة في الاتجاه المعاكس لحركة المادة لترتفع درجة حرارتها إلى حوالي  $1450 C^{\circ}$ .
- 4 يتم تبريد الكلنكر للشروع في عملية طحنه والحصول على المادة النهائية<sup>1</sup>.



الشكل 1 مراحل عملية طهي الكلنكر

**3.1.I خصائص وابعاد الفرن**

الفرن عبارة عن أسطوانة طويلة (68m) مائلة (ميل نمونجي بين 2% و 5%) في دوران دائم (تتراوح غالبًا بين 0.5 و 5 [دورة في الدقيقة]) مما يسمح بإزاحة المواد. يتكون غلاف الفرن الدوار من عدة أقسام بأحجام مختلفة مجمعة باللحام ومبطنة بالأجر الحراري ( $1.2 < \lambda < 4$ ). كل قسم من الفرن له سمك محدد ويتم اختيار المواد لمقاومة الضغوط بسبب الأحمال الميكانيكية والحرارية المطبقة. تتجاوز درجة حرارة الخدمة داخل الفرن 1500 درجة مئوية وتزداد كلما ابتعد المرء عن المدخل، ويتم التحكم فيها باستمرار خارج الغلاف بواسطة جهاز قياس مناسب. بفضل الطلاء المقاوم للصدأ، تبلغ القيمة المرجعية لدرجة الحرارة القصوى للطبقة المعدنية 350 درجة مئوية. تسمح الأفران الدوارة في أعمال الأسمنت بحرق المواد الأساسية للحصول على الكلنكر.

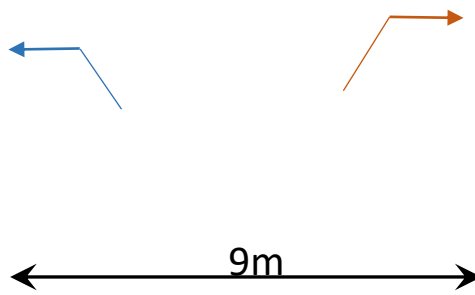
فولاذ حراري:

$$E=0.05m$$

$$\lambda_a=2.5 \text{ W/m.K}$$

$$C_p=682 \text{ J/kg. K}$$

$$\rho=6800 \text{ kg/m}^3$$



الشكل 2 رسم تخطيطي لمقطع عرضي يوضح خصائص وأبعاد الفرن

**4.1.I الانتقال والتبادل الحراري في الفرن**

إن كفاءات انتقال الحرارة في أجزاء الفرن ومحيطه الخارجي يعتمد أساساً على فروقات درجات الحرارة بينها، يكون هذا الانتقال غالباً في الاتجاه القطري حيث يمكن إهمال انتقال الحرارة في الاتجاه المحوري والزوايا للفرن، وذلك لأن تغير درجات الحرارة في الاتجاهين غير ظاهر أمام التغير في درجات الحرارة في الاتجاه القطري.

يكون هذا الانتقال من داخل الفرن إلى خارجه بجميع أشكال الانتقال الحراري (التوصيل الحمل والإشعاع) حيث تتمثل

كميات الحرارة المنتقلة فيما يلي:

## 1.4.1.I التوصيل

توصيل الحرارة هو نقل الحرارة بين جسمين متصلين مباشرة. في حالة أفران الإسمنت، يحدث التوصيل الحراري بين الجدران الداخلية للفرن والمواد الخام المتواجدة داخله. يتم حساب التوصيل الحراري باستخدام القانون الأساسي لتوصيل الحرارة الذي يُعرف بقانون فورييه، والذي يُعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \quad .1$$

حيث:

$Q$  هو معدل تدفق الحرارة ( $w$ )

$\lambda$  هو معامل التوصيل الحراري ( $w/m.k$ )

$A$  هو مساحة مقطع عرض الجدار الداخلي للفرن ( $m^2$ )

$\frac{dT}{dx}$  هو تدرج الحرارة في الاتجاه  $x$  ( $k/m$ )

يمكن استخدام قانون فورييه لحساب معدل التوصيل الحراري عبر الجدار الداخلي للفرن، والذي يعتمد على قيمة معامل التوصيل الحراري ومساحة المقطع العرضي للجدار. يتم تقليل توصيل الحرارة عن طريق استخدام مواد عازلة ذات معامل توصيل حراري ضعيف  $1: 4(w/m.k)$

## 2.4.1.I الإشعاع

الإشعاع الحراري هو الإشعاع الكهرومغناطيسي الذي ينتقل من الجسم بسبب درجة حرارته وطاقته الداخلية. لذلك فإن الإشعاع الحراري له نفس طبيعة الضوء المرئي والأشعة السينية وموجات الراديو. الفرق بينهما يكمن في أطوال موجاتهم ومصدر توليدهم. جميع المواد الصلبة أو السوائل المسخنة، بالإضافة لبعض الغازات، تنبعث منها إشعاعات حرارية. يتطلب نقل الطاقة بالتوصيل وجود وسيط مادي، أما بالنسبة للإشعاع. فإن النقل الإشعاعي يحدث بكفاءة أكبر في الفراغ. على المستوى العياني، يعتمد حساب الإشعاع الحراري على قانون Stefan-Boltzmann ، الذي يربط تدفق الطاقة المنبعث من جسم مشع مثالي (جسم أسود) بالقوة الرابعة لدرجة الحرارة المطلقة

$$q = \sigma T^4 \quad .2$$

حيث  $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} (W/m^2K^4)$  هو ثابت ستيفان بولتزمان.

بشكل عام، لا تعمل الأسطح الحقيقية كمشعات مثالية، حيث يتم تعديل القانون أعلاه على النحو التالي:

$$q = \varepsilon \sigma T^4 \quad .3$$

يُطلق على المعامل  $\varepsilon$  اسم معامل انبعاث السطح وله قيمة بين 0 و 1. عندما يتبادل جسمان أسودان بالإشعاع، فإن صافي التبادل الحراري يتناسب مع الاختلاف في  $T_4$ . يتم الحصول على التبادل الحراري الصافي بين جسمين 1 و 2 بواسطة المعادلة التالية: (Rohsenow، et al، 1998)<sup>2</sup>.

$$q = \sigma(T_1^4 - T_2^4) \quad .4$$

#### 3.4.1.I الحمل الحراري

هي العملية التي يتم من خلالها نقل الطاقة بين الأسطح الصلبة والموائع التي في حالة حركة. سواء أكانت الحركة ناتجة عن قوى فعلية (covection forcé) أو ناتجة عن تغير الكتلة الحجمية للمائع (convection naturel)، حيث يرتفع المائع ذو الكتلة الحجمية الأقل متأثراً بدرجة حرارته المرتفعة ليحل محله جزء آخر من المائع ذو كتلة حجمية أثقل ودرجة حرارة أقل بفعل ثقله يتم تسخين السائل المتدفق عبر السطح ثم يتم إزالة الحجم المسخن بسبب تدفق السائل مع استبداله بسائل بارد جديد. يسمى نقل الحرارة هذا بالتبريد أو التسخين بالحمل الحراري. سيعتمد معدل إزالة الحرارة على كل من اختلاف درجة حرارة جدار السائل وسرعة وخصائص السائل. لذلك يمكن التعبير عن تدفق الحرارة ك (sen، 2008)

$$q = h(T_s - T_f) \quad .5$$

حيث تتناسب كثافة التدفق الحراري مع الفرق بين درجة حرارة السطح ودرجة حرارة المائع،  $T_s$  و  $T_f$ ، على التوالي. يُعرف هذا التعبير بقانون تبريد نيوتن وتسمى المعامل  $h$  معامل نقل الحرارة بالحمل الحراري. يعتمد هذا المعامل على الظروف في الطبقة الحدية، والتي تتأثر بهندسة السطح، وطبيعة حركة السوائل، ومجموعة من الديناميكا الحرارية وخصائص النقل للسائل.

### 4.4.1.I تمثيل لكميات الحرارة المنتقلة في الفرن

$Q_{RGB}$  كمية الحرارة المنتقلة عن طريق الاشعاع بين الغاز والطوب الحراري

$Q_{CGB}$  كمية الحرارة المنتقلة عن طريق الحمل بين الغاز والطوب الحراري

$Q_{RGb}$  كمية الحرارة المنتقلة عن طريق الاشعاع بين الغاز والكلنكر

$Q_{CGb}$  كمية الحرارة المنتقلة عن طريق الحمل بين الغاز والكلنكر

$Q_{RBb}$  كمية الحرارة المنتقلة عن طريق الاشعاع بين الكلنكر والطوب الحراري

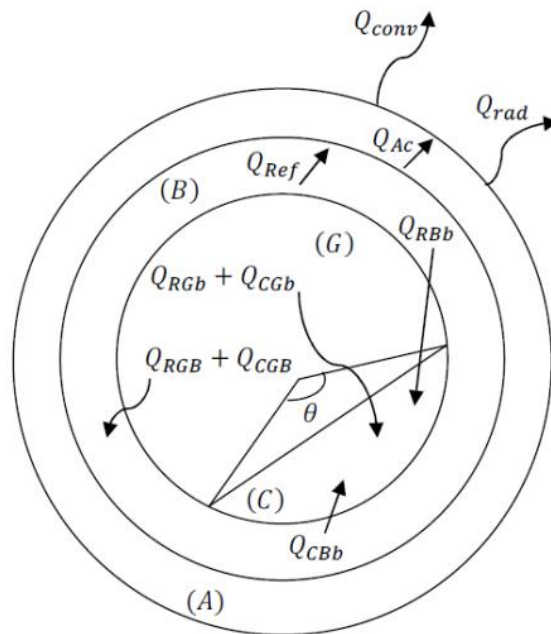
$Q_{CBb}$  كمية الحرارة المنتقلة عن طريق التوصيل بين الكلنكر والطوب الحراري

$Q_{Ref}$  كمية الحرارة المنتقلة عن طريق التوصيل داخل الطوب الحراري

$Q_{Ac}$  كمية الحرارة المنتقلة عن طريق التوصيل داخل القشرة المعدنية

$Q_{rad}$  كمية الحرارة المنتقلة عن طريق الاشعاع بين القشرة المعدنية والمحيط الخارجي

$Q_{conv}$  كمية الحرارة المنتقلة عن طريق الحمل بين القشرة المعدنية والمحيط الخارجي



الشكل 3 تمثيل لكيفية انتقال الحرارة عبر طبقات الفرن في مقطع عرضي (نظام دائم)

**5.4.1.I الضياعات الحرارية للفرن**

هناك العديد من الخسائر الحرارية الرئيسية المنبعثة من أفران الأسمنت، والتي يمكن استخدامها بكفاءة. وتشمل هذه، على وجه الخصوص: غازات المداخن من الفرن، الهواء الساخن من مبردات الكلنكر، التدفق الحراري من سطح الفرن الدوار. حيث ان الخسارة الأكبر للمحتوى الحراري للفرن يحملها غاز المداخن الذي يساوي حوالي 20% من المحتوى الحراري. بالإضافة الى الطاقة الحرارية الضائعة أثناء تبريد الكلنكر التي تزيد عن 12%، حيث يتم استغلال كليهما عادة في التسخين الأولي للمادة الأولية قبل دخولها الفرن. كما يمثل فقدان الحرارة من السطح حوالي 10% من المحتوى الحراري للفرن والتي نهتم بها في هذه الدراسة.



## 2.I المبادل الحراري

يمر جزء كبير من الطاقة الحرارية المستخدمة في العمليات الصناعية عبر مبادل حراري مرة واحدة على الأقل، سواء في العمليات نفسها أو في أنظمة استرداد الطاقة الحرارية لهذه العمليات، وبالتالي فإن سخانات المبادلات الحرارية هي أجهزة مستخدمة على نطاق واسع في الحياة الصناعية.

تستخدم المبادلات الحرارية بشكل شائع في مجموعة واسعة من التطبيقات: فهي موجودة في قطاعات متنوعة للغاية على الرغم من نفس الوظيفة الأساسية وهي نقل الطاقة الحرارية بين سائلين أو أكثر عند درجات حرارة مختلفة. هم موجودون في القطاع الصناعي (الكيمائيات والبتروكيمائيات والأغذية الزراعية والكهرباء وما إلى ذلك) ، والقطاع السكني (التدفئة وتكييف الهواء) ، وكذلك قطاع النقل (السيارات ، والبحرية ، وما إلى ذلك).<sup>3</sup>

### 1.2.I تعريف المبادل الحراري

المبادل الحراري عبارة عن جهاز يهدف إلى نقل تدفق الحرارة من سائل ساخن إلى سائل بارد (بين سائلين أو أكثر)، عن طريق تمريرها في قنوات محددة الأبعاد والخصائص (سمك منخفض، مساحة سطح التبادل كبيرة، ناقلية كبيرة ...)

### 2.2.I تصنيف المبادلات الحرارية

يمكن تصنيف المبادلات الحرارية وفق عدة معايير:

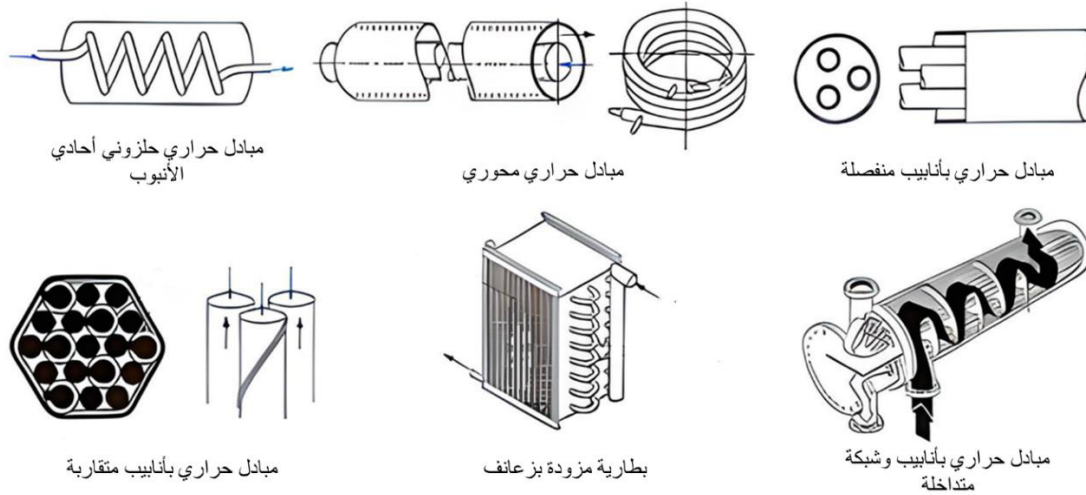
#### 1.2.2.I عملية التبادل الحراري

- المبادلات ذات الاتصال المباشر: هو أبسط نوع من أنواع المبادلات يتم فيه خلط السوائل مباشرة، للوصول إلى درجة الحرارة النهائية (درجة حرارة التوازن).
- المبادلات مع الاتصال غير المباشر: يتدفق السائلان في قنوات مفصولة بجدار.

## 2.2.2.I التصميم

## المبادلات الحرارية الأنبوبية

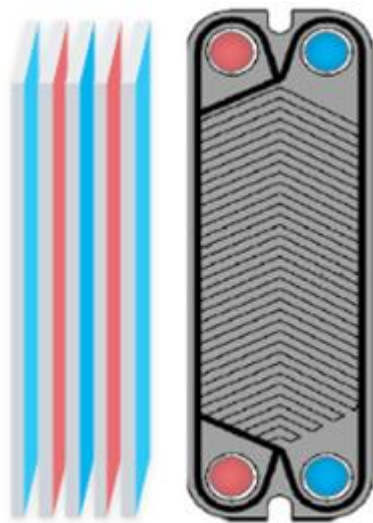
لأسباب اقتصادية، فإن المبادلات التي تستخدم الأنابيب كمكون رئيسي لجدار التبادل هي الأكثر شيوعًا في الصناعة. يمكننا تمييز العديد من الأنواع وفقًا لعدد الأنابيب وترتيبها وكذا شكلها، المصممة دائمًا للحصول على أفضل كفاءة ممكنة لاستخدام معين:



الشكل 4 مختلف أنواع المبادلات الحرارية الأنبوبية

## المبادلات الحرارية اللوحية

تتمثل الوظيفة الرئيسية للمبادل الحراري اللوح في نقل الطاقة الحرارية من مائع إلى آخر أثناء وجودهم في تدرجات حرارة مختلفة. هذا النوع من المبادلات الحرارية بفضل سطح التبادل الكبير لديه كفاءة عالية في استخدام الطاقة مع حجم صغير. من ناحية أخرى، فهي حساسة بشكل خاص للقاذورات ويكون انخفاض الضغط الداخلي كبيرًا في بعض الأحيان.



تتكون المبادلات الحرارية اللوحية من عدة ألواح مصنوعة من الألومنيوم أو الفولاذ المقاوم للصدأ أو المواد الاصطناعية. عادة ما تكون الألواح مضلعة أو محززة (متعرجة). يتم تجميعها عن طريق اللحام أو يمكن أيضًا ضغطها مع بعضها البعض في إطار مع وصلات.

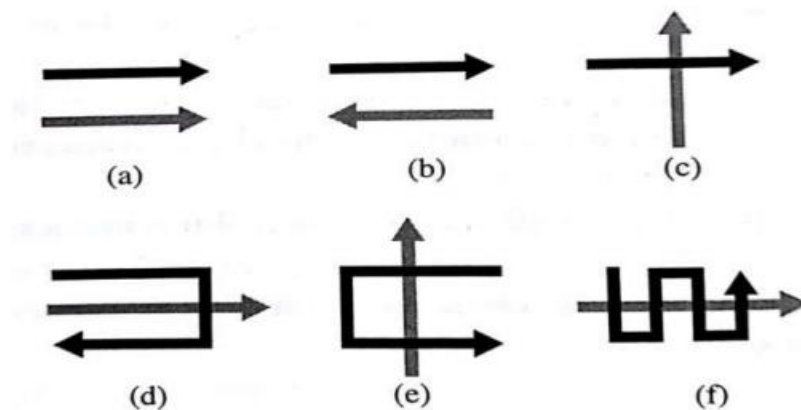
### 3.2.2.I آلية انتقال الحرارة

- المبادلات الحرارية بدون تغيير الطور: تتمثل في المبادلات التي يبرد فيها أحد السوائل لتسخين المائع الثاني دون أن يكون هناك تغيير في الطور. لذلك فإن درجات حرارة السوائل متغيرة، على طول المبادل.
- مبادل مع تغيير الطور: تتغير الحالة الفيزيائية للمائع اثناء اكتسابه أو فقدانه للحرارة تميز منها ثلاث حالات مختلفة:
- يتكثف أحد الموائع بينما يتبخر الآخر: وتوجد هذه المبادلات في ماكينات التبريد.
- يتبخر المائع الثانوي بتلقي الحرارة من المائع الأولي الذي لا يخضع لتغيير حالته. يطلق عليهم المبخرات.
- يتكثف المائع الأولي بإعطاء حرارته الكامنة إلى المائع الثانوي الأكثر برودة، والذي لا يخضع لأي تحول في الحالة.

### 4.2.2.I اتجاه التيار

يمكن أن يكون جريان المائع في المبادلات الحرارية على عدة أشكال، تتمثل فيما يلي:

- التيار المتوازي (a) : عندما تدخل الموائع الأولية والثانوية من نفس النهاية، في نفس الاتجاه وتخرج من نفس النهاية.
- التيار المعاكس (b): عندما يدخل المائع إلى المبادل من الطرف المقابل، يكون لها اتجاه معاكس لتدفق المائع الاخر وتخرج من الجهاز من الطرف الاخر.
- التيار متقاطع (c): عندما تكون اتجاهات تدفق الموائع متعامدة مع بعضها البعض.
- التيار المختلط (d,e,f): عندما يغير أحد السوائل اتجاه أو اتجاه التدفق عدة مرات أمام الآخر. يمثل هذا النوع من التداول في الواقع مزيجًا من الأنواع الثلاثة الأخر



الشكل 5 مختلف أنماط التدفق 4

### 3.2.I عوامل ومعايير أداء المبادلات الحرارية

يتحكم في عملية التبادل الحراري داخل المبادل كما وكيفا العديد من العوامل منها ما يخص المبادل ومنها ما يخص المائع حيث تؤثر هذه العوامل في معايير أداء المبادل الحراري، وتتمثل أهم هاته العوامل في:

#### عوامل خاصة بالمائع:

- درجة حرارة المائع: حيث أن انتقال الحرارة بين الموائع الموجودة داخل المبادل يعتمد أساسا على الفروقات في درجة الحرارة
- السعة الحرارية للمائع: تعبر عن قدرة استجابة المائع لتغيير درجة حرارته
- الناقلية الحرارية للمائع: تعبر عن قدرة المائع على نقل الحرارة
- تدفق المائع: حيث ان توزيع كميات الحرارة التي يستقبلها المائع يعتمد اساسا على كمية المائع الذي يمر داخل المبادل

#### عوامل خاصة بالمبادل:

- سطح التبادل: حيث كلما زاد سطح التبادل الذي تنتقل عبره كميات الحرارة كلما زادت كمية الحرارة المنقولة في المبادل
- الناقلية الحرارية للمبادل: تستعمل المواد ذات الناقلية حرارية مرتفعة في صناعة المبادلات لضمان كفاءة جيدة للمبادل

اما معايير الأداء فهي مجموعة القيم المتحصل عليها في ظروف محددة تحدد كفاءة المبادل الحراري:

ثابت الناقلية الحرارية عن طريق الحمل

كمية الحرارة المنتقلة

درجة حرارة خروج المائع المستهدف

ثابت وحدة الانتقال الحراري

كفاءة المبادل

# الفصل الثاني

ديناميكا الموائع الحاسوبية

**مقدمة**

أصبح استخدام الحاسوب والتقنيات الحاسوبية مهماً وضرورياً جداً في البحث والصناعة من أجل دراسة جريانات الموائع من خلال دقة الحلول والحجم الكبير للنتائج التي تمنحها. هذا الفصل مخصص لتعريف ديناميكيات الموائع الحاسوبية (CFD). يبدأ بوصف موجز لهذا الأخير واستخدامه كأداة تحليل وتحسين أساسية لجل التطبيقات الهندسية. يتم أيضاً تقديم العناصر الرئيسية لبرامج CFD مع الخوارزميات والطرق العددية الأكثر استخداماً. ينتهي الفصل بمناقشة المعادلات الحاكمة مع توضيح لكل منها.

**1.II ديناميكيا الموائع الحاسوبية CFD :****1.1.II مفهوم ديناميكيا الموائع الحاسوبية CFD:**

هو اختصار للعنوان "Computational Fluid Dynamics" ويشير هذا المصطلح إلى استخدام الحاسوب والتقنيات الحاسوبية لحل المعادلات الخاصة بحركة السوائل، وهو يستخدم في الهندسة الميكانيكية والصناعية والجوية والفضائية وغيرها من المجالات التي تتعامل مع السوائل والغازات. وتشمل تقنيات ديناميكيا الموائع الحاسوبية النمذجة الرياضية للجريانات السائلة والغازية، وحل المعادلات باستخدام تقنيات حسابية مثل الأساليب العددية والتقنيات المتقدمة للمحاكاة والتحليل العددي. وتتيح ديناميكيا الموائع الحاسوبية دراسة وتحليل خصائص الجريانات السائلة والغازية، مثل السرعة والضغط ودرجة الحرارة وشدة الاضطراب، وتحسين تصميم الأجسام والأنظمة والأجهزة التي تعمل في هذه البيئة.

**2.1.II مزايا وعيوب CFD:**

بالرغم من انتشار استعمال هذه التقنية واعتمادها في الكثير من الدراسات الا أن لها بعض العيوب مقارنة بالمنهج التجريبي، يوضح الجدول التالي بعض مزايا وعيوب CFD مقارنة بالمنهج التجريبي:

المزايا	العيوب	المقاربة
• دراسة حقيقية للظواهر	• المواد المطلوبة • صعوبات في القياس • تكلفة تصميم عالية	تجريبية
• يسمح للمصمم بمحاكاة الظروف المختلفة • يمكن حل الظواهر الفيزيائية المعقدة • تقييم سريع للتغيرات التصميم • كم كبير للنتائج	• لا تمثل الواقع الفيزيائي عموماً (محدودة بالنموذج المدروس) • صعوبة توليد النماذج المعقدة • يمكن أن يطول وقت الحساب للظواهر المعقدة	حوسبة ديناميكية السوائل CFD

الجدول 1 : مقارنة بين المقاربات التجريبية والرقمية

**3.1.II استخدامات الـ CFD :**

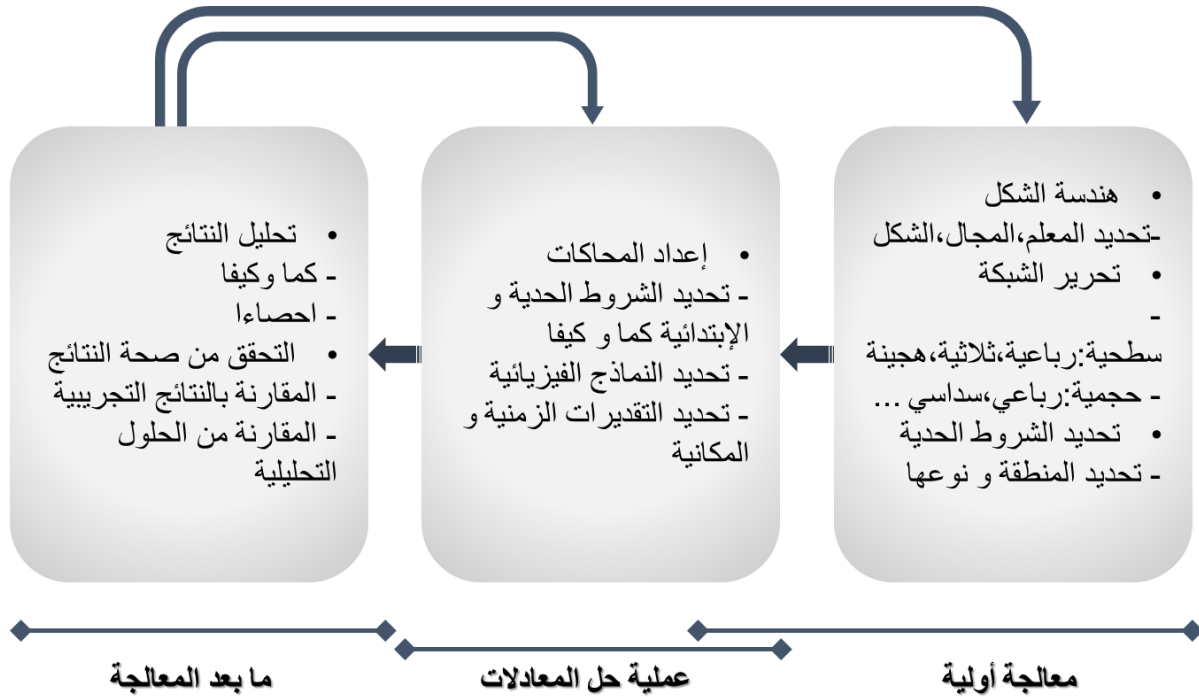
يتم استخدام ديناميكا الموائع العددية الحاسوبية (CFD) للتنبؤ بجريان السوائل والغازات ودراسة تأثيرها على المواد المحيطة بها. وتستخدم CFD عادة في مجالات الهندسة الميكانيكية والصناعية والجوية والفضائية وغيرها من المجالات التي تتعامل مع جريانات الموائع. ومن بين أهم الأهداف من استخدام CFD هي:

- 1- تحسين تصميم المنتجات والأجهزة: يمكن استخدام CFD لتحسين تصميم المنتجات والأجهزة التي تعمل في بيئة تؤثر فيها الموائع، وذلك عن طريق دراسة الجريانات المختلفة والتغيرات في الضغط والسرعة والحرارة والاهتزازات وتحليلها وتحديد الأماكن التي يمكن تحسينها وتحسين تصميم المنتج أو الجهاز بشكل عام.
- 2- تقليل التكاليف: يمكن استخدام CFD لتقليل التكاليف المرتبطة بالتجارب العملية، حيث يمكن استخدام التحليلات العددية بدلاً من التجارب التجريبية المكلفة التي تتطلب مواد ومعدات.
- 3- تحسين الأداء والكفاءة: يمكن استخدام CFD لتحسين الأداء والكفاءة للأجسام والأجهزة والعمليات التي تعمل في بيئات السوائل والغازات، وذلك عن طريق تحليل وتحسين جريانات الموائع في هذه الأجسام والأجهزة وتحديد الأماكن التي يمكن تحسينها لتحقيق الكفاءة الأمثل.

4- فهم أفضل للظواهر الفيزيائية: يمكن استخدام CFD لدراسة الظواهر الفيزيائية المختلفة التي تحدث في الظواهر المرتبطة بالموائع.

## 4.1.II مراحل عمل CFD :

تتكون برامج CFD من خوارزميات عديدة يمكنها حل مسائل جريانات الموائع. لتوفير وصول سهل إلى حلول المعادلات المتحكم في الجريان، تشتمل جميع برامج CFD التجريبية على واجهات مستخدم متطورة لإدخال معلومات المشكلة ولمراجعة النتائج. لذلك، تحتوي جميع البرامج على ثلاثة عناصر رئيسية: (1) المعالجة العددية السابقة، (2) المعالجة العددية و (3) المعالجة العددية اللاحقة. يوضح الشكل التالي أهم خطوات المحاكاة العددية



الشكل 6 خطوات المحاكات العددية



**2.II المعالج الأولي Gambit :**

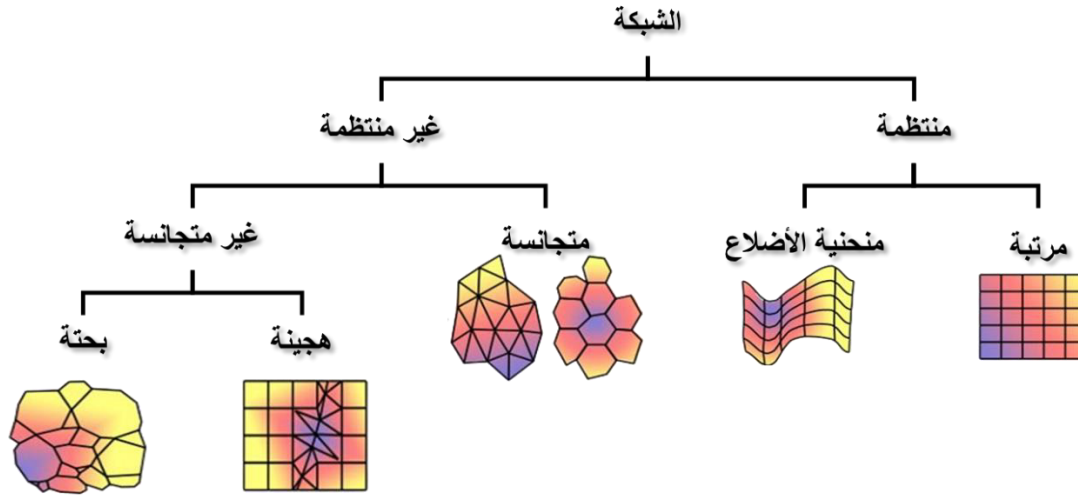
يتكون المعالج الأولي أو المعالج المسبق من مدخلات مشكلة في برنامج CFD عن طريق واجهة سهلة الاستخدام وتحويل هذه المدخلات إلى نموذج مناسب للاستخدام من قبل برنامج حل المعادلات الخاصة بالنموذج (solveur). تشمل العمليات الخاصة بمرحلة ما قبل المعالجة:

- تعريف الهندسة: مجال الحساب.
- تقسيم المجال إلى اجزاء صغيرة تعرف بشبكة الحساب.
- تحديد شروط الجريان على مستوى الخلايا المنسوبة الى حدود المجال.

يتم تحديد حل المعادلات المتعلقة بحركة الموائع (السرعة والضغط ودرجة الحرارة وما إلى ذلك) في عقد الشبكة. حيث تتعلق دقة حل CFD بعدد هاته العقد في الشبكة. بشكل عام، للحصول على حل دقيق بشبكة من عدد معقول من العقد، من الضروري إنشاء شبكة مهيكلة تكون رقيقة في مناطق التدرج العالي للمتغيرات (P، V، T ... إلخ) وغلظة في المناطق التي يكون فيها تدرج المتغيرات صغيراً أو ثابتاً. يتم استخدام العديد من البرامج لإنشاء الشبكات مثل PATRAN و IDEAS و POINTWISE وبرنامج Gambit الذي استخدمناه في دراستنا. الذي يمكننا من تشكيل الشبكات الهندسية. يتضمن gambit ثلاث وظائف: بناء هندسة الوسط المدروس وتعريف مجال الحساب، تشكيل الشبكة والتحقق منها، وتعريف الحدود نوع شروط الحدود.

## 1.2.II شبكة

يعد إنشاء الشبكة (ثنائية الأبعاد أو ثلاثية الأبعاد) مرحلة مهمة جدًا في تحليل الظواهر، نظرًا لتأثيره على الحل المحسوب. تعتبر الشبكة ذات الجودة العالية أمرًا ضروريًا للحصول على نتيجة حسابية دقيقة. كما تؤثر جودة الشبكة في تقارب الحل وزمن الحساب. تكون الشبكة إما منظمة أو غير منظمة، أو مزيج من النوعين (شبكة هجينة).



الشكل 7 أنواع مختلفة من الشبكات

أ) شبكة مهيكلة

هي شبكة سهلة التوليد يكون من الأسهل إنشاؤها في الهندسة المجزأة

**مزاياها:**

- اقتصادية في عدد العناصر، إذ تحتوي على عدد أقل من الخلايا مقارنةً بشبكة غير مهيكلة.
- يقلل من مخاطر الأخطاء العددية لأن الجريان يتماشى مع الشبكة.

**سلبياتها:**

- يصعب توليدها في حالة الهندسة المعقدة
- من الصعب الحصول على جودة شبكة جيدة لبعض الأشكال الهندسية المعقدة

ب) شبكة غير مهيكلة

يتم إنشاء عناصر هذا النوع من الشبكات دون أي قيود فيما يتعلق بترتيبها.

**مزاياها:**

- يمكن تشكيلها في الأشكال الهندسية المعقدة مع الحفاظ على معامل تشوه منخفض
- خوارزميات التوليد لهذا النوع من الشبكات (ثلاثي / رباعي)

**سلبياتها:**

- تحتوي على عدد أعلى من العقد مقارنة بالشبكة المهيكلة
- يولد أخطاء عددية والتي يمكن أن تزيد من ترتيب النتائج عند مقارنتها بالشبكة المهيكلة

ج) شبكة هجينة

هي شبكة يتم إنشاؤها بواسطة مزيج من عناصر من أنواع مختلفة، مثلثة أو رباعية في ثنائية الأبعاد أو مكعبية، موشورية و هرمية في الأشكال الهندسية ثلاثية الأبعاد. فهو يجمع بين مزايا الشبكات المهيكلة وغير المهيكلة.

تقنية توليد الشبكات العامة

في التطبيقات العملية، لا توجد قاعدة محددة لإنشاء شبكة مثالية، ولكن هناك طرق مختلفة تجعل من الممكن الحصول على شبكة مقبولة. يمكننا تلخيص هذه القواعد على النحو التالي:

- الحفاظ على معامل تشوه منخفض.
- ضمان دقة جيدة في مناطق التدرج العالي.
- ضمان تجانس جيد في مناطق الانتقال بين أجزاء الشبكة الدقيقة وأجزاء الشبكة الخشنة.
- تقليل العدد الإجمالي للعناصر.

## 2.2.II معامل التشوه

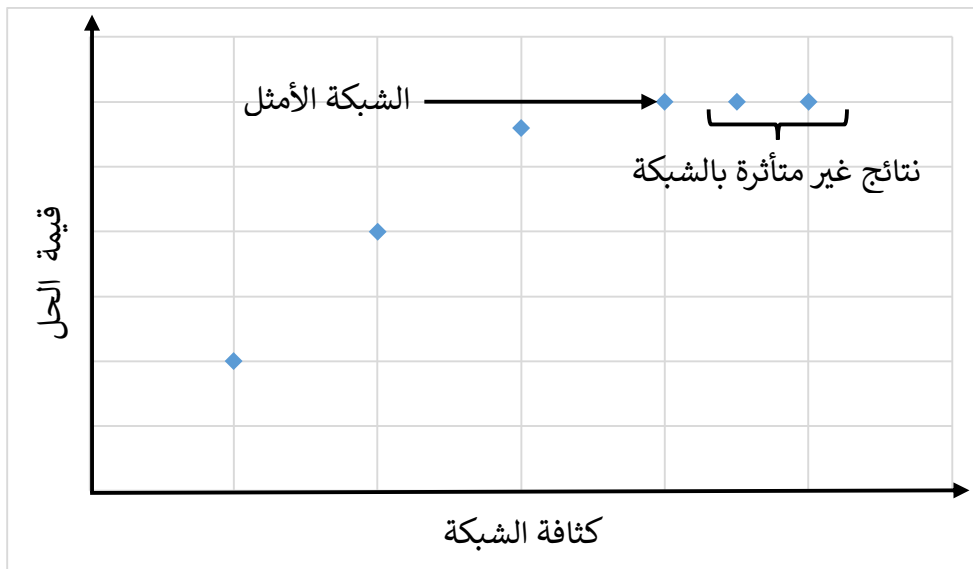
يكون معامل التشوه معدوم في العناصر "الكاملة" (المربعات، المثلثات متساوية الأضلاع). بينما يختلف عن الصفر عند تغيير هيأتها، إن القيم الكبيرة لمعامل التشوه تؤدي إلى حدوث أخطاء في الحساب وتبطن بشكل كبير من عملية التقارب. يمكن تحمل بعض التشوهات إذا كانت موجودة في مناطق التدرج المنخفض. يوضح الجدول التالي التباين في جودة عناصر الشبكة بدلالة قيم معامل التشوه:

معامل التشوه	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.99	0.99-1.00
جودة الشبكة	ممتازة	جيدة	مقبولة	رديئة	رديئة جداً	سيئة

الجدول 2 علاقة الجودة بمعامل التشوه (دروس CFD 2023)

## 3.2.II ارتباط الحل بالشبكة

في نمذجة CFD، يجب أن يكون الحل مستقلاً عن كثافة الشبكة للتأكد من واقعية الحل الذي يقدمه الحساب بعد التقارب. بشكل منهجي، لأي حساب بواسطة CFD، يجب على المرء إجراء اختبار تقارب شبكة وتقديمه، من خلال الإبلاغ عن تطور الكمية، طالما أن المرء يرغب في القياس من خلال المحاكاة الجارية (معامل الاحتكاك عند الجدار، الاختلاف في الرأس الهيدروليكي عند أطراف المضخة، معامل انتقال الحرارة) كدالة بالنسبة لحجم الشبكة (انظر الشكل 8)



الشكل 8 مثال عن اختبار تقارب الشبكة

## 3.II برنامج حل المعادلات solveur

## 1.3.II برنامج ANSYS Fluent

برنامج ANSYS Fluent هو برنامج تحليل حسابي للديناميكا الموائع العددية (Computational Fluid Dynamics - CFD)، وهو منتج من شركة ANSYS، وهي شركة رائدة في مجال برامج الهندسة العامة والتحليل الهندسي. يتم استخدام ANSYS Fluent لحل مشاكل جريان الموائع ومسائل النقل الحراري في مجموعة واسعة من التطبيقات الهندسية والصناعية. يتيح البرنامج إجراء تحليلات متقدمة للجريانات، التبادل الحراري، التلوث، الاحتراق، التآكل، وغيرها من الظواهر لفيزيائية. من خلال ANSYS Fluent، يمكنك تحليل التدفق والتغيرات في الحرارة والضغط والسرعة وغيرها من المتغيرات المرتبطة بجريان المائع. كما يتيح أيضًا دراسة التأثيرات الديناميكية والتفاعلات الكيميائية في تدفق السوائل. يستخدم ANSYS Fluent تقنية تعتمد على حجم المراقبة لتحويل معادلة النقل إلى معادلة جبرية يمكن حلها عدديًا. تتكون تقنية حجم التحكم من دمج معادلة النقل حول كل حجم.

يمكن تحديد المعادلات الحاكمة بسهولة أكبر من خلال النظر في معادلة الانحفاظ غير الدائمة لنقل كمية سلمية  $\phi$ . يتضح ذلك من خلال المعادلة التالية المكتوبة بشكل تكاملي لحجم المراقبة  $V$  على النحو التالي

$$\int_V \frac{\partial \rho \phi}{\partial t} dV + \oint \rho \phi \vec{v} d\vec{A} = \oint \Gamma_\phi \nabla_\phi d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad .6$$

حيث:

$\vec{v}$  هو شعاع السرعة  
 $\vec{A}$  هو شعاع السطح  
 $\Gamma_\phi$  هو معامل الانتشار ل  $\phi$   
 $\nabla_\phi$  هو تدرج  $\phi$   
 $S_\phi$  هو المنبع  $\phi$  المنسوب لوحدة الحجم

يتم تطبيق المعادلة (6) على كل وحدة أو خلية مراقبة في المجال الحسابي. يعطي تفصيل المعادلة (6) على خلية معينة ( ANSYS ، 2020):

$$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V + \sum_f^{N_{faces}} \rho_f \vec{v}_f \phi_f \vec{A}_f = \sum_f^{N_{faces}} \Gamma_\phi \nabla_{\phi_f} \vec{A}_f + S_\phi V \quad .7$$

$N_{faces}$  هو عدد الوجوه المحيطة بالخلية

$\phi_f$  هي قيمة  $\phi$  عبر الوجه  $f$

$\rho_f \vec{v}_f \vec{A}_f$  هو تدفق الكتلة عبر الوجه  $f$

$\vec{A}_f$  هو السطح المتجه للوجه  $f$

$\nabla_{\phi_f}$  هو تدرج  $\phi$  عند الوجه  $f$

$V$  هو حجم الخلية

$\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} V$  هو المعدل الزمني لتغير الكمية  $\phi$  داخل حجم المراقبة

تأخذ المعادلات التي تم حلها بواسطة ANSYS نفس الشكل العام كما هو مذكور أعلاه ويمكن تطبيقها على نظام

متعدد الأبعاد.

# الفصل الثالث:

دراسة الفرن وون مبادل

## مقدمة:

لدراسة الضياعات الحرارية عبر سطح الفرن وتحديد كمية الحرارة المنبعثة من داخل الفرن بهدف استغلالها كمدخل من مدخلات الدراسة الموائية سنقوم بدراسة الفرن بدون مبادل حراري رياضيا وتأكيدا عدديا باستعمال CFD، خلال هذه الدراسة، سنقوم بتحليل أسطوانة الدوارة متعددة الطبقات (مصدر الحرارة، الطوب، الفولاذ) في الهواء الساكن وذلك بإهمال الرياح والعوامل الخارجية الأخرى كالرطوبة. الهدف هو تحديد قيمة التدفق الحراري الحجمي اللازم، الذي يصدره الفرن للحصول على قيم درجات الحرارة متوافقة مع القيم التجريبية، وذلك بتبسيط الظواهر الفيزيائية الحادثة داخل الفرن باعتبارها مصدر حرارة.

في البداية، من الضروري البدء بطرح النموذج الرياضي للمشكلة. لذلك سنكتب مبدئياً المعادلات الأساسية التي تحكم انتقال الحرارة في مشكلتنا وحلها. ثم سنقوم بمحاكات النموذج وعرض النتائج ومقارنتها وبالتالي، في نهاية هذا الفصل، سنكون قد حددنا كمية الحرارة المنبعثة من داخل الفرن والحرارة الضائعة التي يمكن استغلالها

## 1.III الدراسة التحليلية

## 1.1.III المعادلة العامة لانتقال الحرارة بالتوصيل

وتنص المعادلة العامة لانتقال الحرارة على أنه عند أي نقطة من الجسم المتجانس فإن المعدل الصافي لانتقال الحرارة في جزء ما مضافاً إليه المعدل المتجانس فإن المعدل الصافي لانتقال الحرارة في جزء ما مضافاً إليه المعدل الحجمي لتوليد الحرارة في هذا الجزء لا بد وان يتساوى مع معدل التغير في الطاقة المخزونة في هذا الجزء. وهناك صور كثيرة ومبسطة للمعادلة العامة لانتقال الحرارة في الإحداثيات الأسطوانية يمكن الحصول عليها بإجراء بعض الفروض المناسبة فمثلاً إذا فرضنا أن معامل التوصيل الحراري ثابت ولا يعتمد على درجة الحرارة فإن المعادلة العامة يمكن كتابتها على الصورة:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial \vartheta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{Q_v}{\lambda_s} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad .8$$

حيث  $\alpha$  معامل الانتشار الحراري:  $\alpha = \frac{k}{\omega \cdot Cp}$



يمكن تبسيط المعادلة العامة لانتقال الحرارة بالتوصيل إذا فرضنا أن نظام الانتقال دائم وفي الاتجاه القطري فقط  $r$  لتصبح المعادلة على الصورة:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{Q_v}{\lambda_s} = 0 \quad .9$$

في حالة عدم وجود مصدر حرارة يمكن كتابة المعادلة على الشكل:

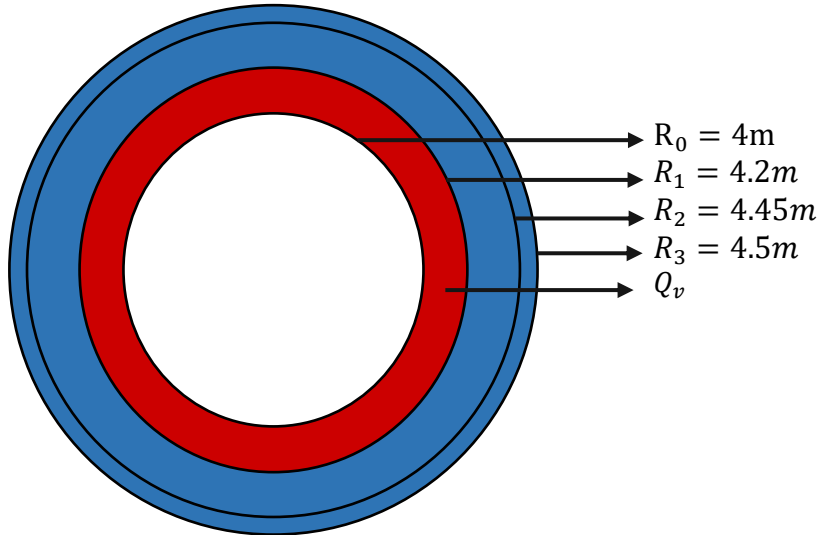
$$\frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0 \quad .9$$

### 2.1.III معطيات الدراسة

لتبسيط المقاربة نعتبر درجة الحرارة ثابتة في الجدار الداخلي والخارجي على طول الفرن حيث نأخذ القيمة المتوسطة في الحالتين والتي تقدر بـ:

$$T_1 = 1453 \text{ k}^\circ (1180 \text{ C}^\circ) \text{ درجة الحرارة في الجدار الداخلي للفرن:}$$

$$T_3 = 500 \text{ k}^\circ (227 \text{ C}^\circ) \text{ درجة الحرارة في الجدار الخارجي للفرن:}$$



الشكل 9 رسم توضيحي لأبعاد الفرن المأخوذة في الدراسة

## 3.1.III الحل التحليلي

يمكن إيجاد عبارة توزيع الحرارة على المحور  $r$  في مصدر الحرارة المفروض داخل الفرن بمكاملة العبارة 9 حيث نجد:

$$Ts(r) = \frac{-Q_v}{4\lambda_s} r^2 + C_1 \ln(r) + C_2 \quad .10$$

حيث  $C_1$  و  $C_2$  ثوابت التكامل والتي يمكن ايجادها من خلال الشروط الحدية التالية:

$$\left\{ \begin{array}{l} r = R_0 \rightarrow \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_0} = 0 \\ r = R_1 \rightarrow T = T_1 \end{array} \right. \quad .11$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r = R_0 \rightarrow \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_0} = 0 \\ r = R_1 \rightarrow T = T_1 \end{array} \right. \quad .12$$

$$C_1 = \frac{Q_v}{2\lambda_s} R_0^2 \quad .13$$

$$C_2 = T_1 - \frac{Q_v}{2\lambda_s} \left( \ln R_1 - \frac{R_1^2}{2} \right) \quad .14$$

بتعويض  $C_1$  و  $C_2$  في 11:

$$Ts(r) = T_1 + \frac{Q_v}{2\lambda_s} \left( R_0^2 \ln r - \frac{r^2}{2} - \left( R_0^2 \ln R_1 - \frac{R_1^2}{2} \right) \right) \quad .15$$

لحساب  $v$  يمكن مساواة التدفق الحراري الصادر من مصدر الحرارة مع نضيره في الطبقة الطوب:

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_1} = -\lambda_b \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_1} \quad .16$$

لإيجاد مشتقة معادلة توزيع درجة الحرارة  $\frac{\partial T}{\partial r}$  في طبقة الطوب نقوم بمكاملة 10 لعدم وجود مصدر حرارة داخل

الطوب، لنجد:

$$Tb(r) = C_1 \ln r + C_2 \quad .17$$

حيث  $C_1$  و  $C_2$  ثوابت التكامل والتي يمكن إيجادها من خلال الشروط الحدية التالية:

$$\begin{cases} r = R_1 \rightarrow T = T_1 \\ r = R_2 \rightarrow T = T_2 \text{ (غير معروفة)} \end{cases}$$

$$C_1 = \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad .19$$

$$C_2 = T_1 - \frac{T_2 - T_1}{\ln\frac{R_2}{R_1}} \ln R_1 \quad .20$$

بتعويض  $C_1$  و  $C_2$  في 18:

$$Tb(r) = \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \ln r + T_1 - \frac{T_2 - T_1}{\ln\frac{R_2}{R_1}} \ln R_1 \quad .18$$

لإيجاد 2 نقوم بمساواة التدفق الحراري لطبقتي الطوب والفولاذ

$$Q_{cond \text{ brique}} = Q_{cond \text{ metal}}$$

$$-\lambda_b \frac{dT}{dr} \Big|_{R_1}^{R_2} = -\lambda_m \frac{dT}{dr} \Big|_{R_2}^{R_3} \quad .19$$

$$\lambda_b \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = \lambda_m \frac{T_2 - T_3}{\ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)}$$

$$\frac{\lambda_b}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = k_b \quad .20$$

$$\frac{\lambda_m}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = k_m \quad .21$$

$$T_2 = \frac{\lambda_b T_1 + \lambda_m T_3}{k_m + k_b} = 617.18 \text{ C}^\circ \quad .22$$

بالعودة الى 17:

$$-\lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_1} = -\lambda_b \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{R_1} \quad .23$$

$$-\lambda_s \left( \frac{Q_v R_1}{2\lambda_s} + \frac{Q_v R_0^2}{2\lambda_s R_1} \right) = -\lambda_b \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \frac{1}{R_1} \quad .24$$

$$Q_v = \lambda_b \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \frac{2}{(R_1^2 - R_0^2)} \quad .25$$

$$Q_v = 31997.74 \text{ w/m}^3 \approx 32 \text{ kw/m}^3 \quad .29$$

## 2.III الدراسة العددية

## مقدمة:

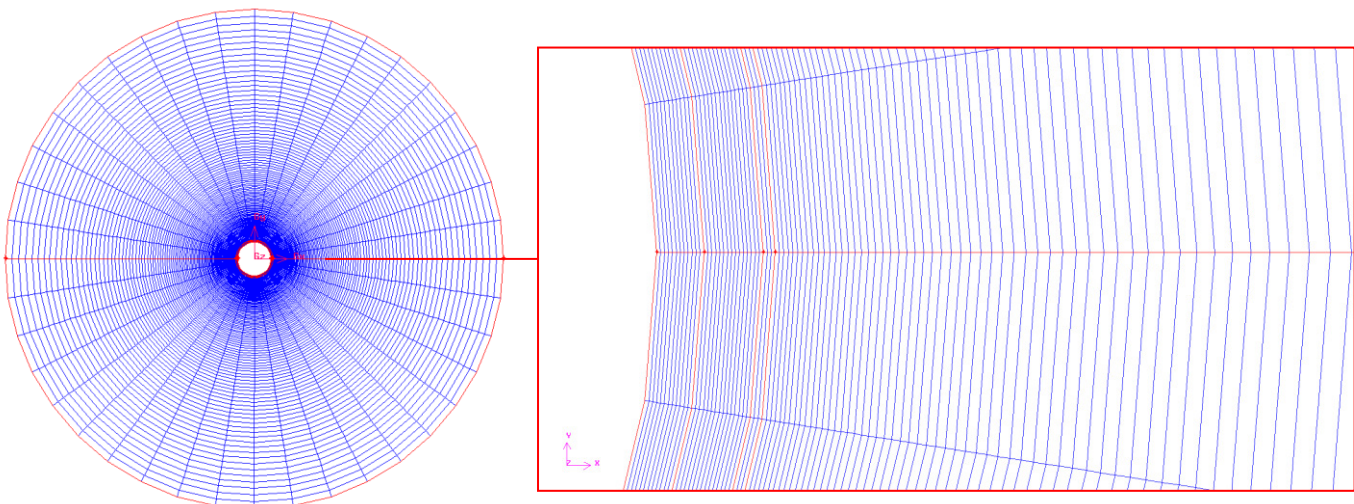
بعد تحديد النموذج الرياضي الخاص بدراستنا، نقوم بإعداد نموذج رقمي ثنائي البعد باستخدام برامج CFD. في الواقع، نريد حل معادلات الحفظ بالشروط الحدية التي سنقوم بوصفها لاحقاً عن طريق المحاكاة العددية. يتعلق الأمر هنا بتقديم جميع المعلومات الضرورية للقارئ للسماح بإعادة إنتاج عمليات المحاكاة العددية التي سيتم إجراؤها في استمرار الدراسة. سنقدم أولاً مجال دراستنا، الشروط الحدية وخصائص شبكة، ثم معايير المحاكاة التي ستجعل من الممكن حل معادلات الحفظ. وبالمثل، بالنسبة لكل معيار معني، سيتم تحديد الأسباب التي تملئ اختيارهم، من أجل تسهيل فهم القارئ.

## 1.2.III شبكة مجال الدراسة

في البداية، من الضروري تحديد المجال وشبكته، والذي يتضمن نوع الشبكات وحجمها وتوزيعها. يجب أن نكون قادرين على الاستفادة المثلى من هندسة مجال دراستنا. وذلك للسماح لبرنامج المحاكاة بحساب جميع الاختلافات في التدفق، يجب أن تستهدف عقد الحساب مناطق التدرج العالي.

لتسهيل وضع الشبكة فإن الشكل الأمثل لمجال الدراسة هو دائرة محيطة بالفرن، وبما أن التغيرات التي تحدث حول الاسطوانة تتلاشى تدريجياً بالابتعاد عنها يمكننا تحديد المناطق المحيطة بالفرن كمناطق ذات تدرج عالي على خلاف المناطق بعيدة عنه، يمكن استخدام أنواع مختلفة من الشبكات لربط مجال: شبكات من النوع "الثلاثي"، أو تلك من النوع "الرباعي" أو حتى مزيج من الاثنين. في حالتنا، لتبسيط الشبكة مع رؤية هندسة المجال، يفضل استخدام الشبكات ذات العقد الرباعية، والمعروفة باسم النوع "الرباعي". سيسمح استخدام شبكة من هذا النوع بمزيد من التجانس للشبكة. مع الحفاظ على دقة حسابات عالية

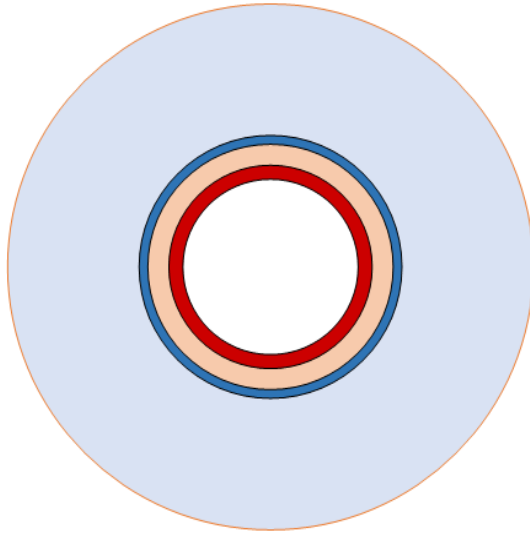
في هذه الدراسة نقوم بتوليد شبكة باستعمال برنامج GAMBIT حول دائرة بقطر مماثل للقطر الداخلي للفرن (8.4 متر)، مع اضافة مصدر حرارة مفترض وكذا طبقتي الفرن كما هو ممثل في الشكل أدناه يكون توزيع العقد فيها متجانسا اما بالنسبة للاتجاه القطري فانه من الأفضل ان يكون التوزيع تدريجي لتقليل الأنوية في المناطق البعيدة من الفرن.



الشكل 10 مثال عن شبكة دراسة الفرن

## 2.2.III الشروط الحدية

للحصول على نتائج أكثر دقة وواقعية يجب أن تكون الشروط الحدية متوافقة مع حقيقة الدراسة وبناء على ما سبق ذكره من الدراسة فإن الشروط الحدية التي سنقوم بوضعها هي كالتالي:



خروج ضغط (Pressure outlet)	—
حائط (wall)	—
مائع "هواء" (fluid « air »)	□
صلب "فولاذ مقاوم للصدأ" (solid « acier refractair »)	□
صلب "طوب مقاوم للصدأ" (solid « brique refractair »)	□
صلب "مصدر الحرارة" (solid « source de chaleur »)	□

الشكل 11 رسم توضيحي لمكان ونوع الشروط الحدية

## 3.2.III إعداد برنامج FLUENT

يمكننا برنامج المحاكاة العددية FLUENT بهيئة ثنائية البعد، من حل المعادلات التفاضلية، معادلة الاستمرارية، معادلة كمية الحركة في الاتجاهين (ox) و (oy) ومعادلة الطاقة، الخاصة بالظاهرة المدروسة (8،9،11،13) لهذا الغرض يتطلب برنامج fluent لتوفير شبكة لمجال الدراسة المنجزة سابقا مع تحديد نوع وقيم الشروط الحدية.

بالنسبة لطريقة الحل فإن الخوارزمية الأكثر توافقا مع الحالة المدروسة هي: خوارزمية الاقتران ( coupled algorithm) تستخدم لحل مشكلات تتضمن توصيل (Coupling) بين متغيرات مختلفة في النظام الذي يجري تحليله. على سبيل المثال، في مشكلة تحليل الديناميكا الحرارية لنظام، يجب توصيل متغيرات الحرارة والتدفق والضغط والكثافة وغيرها من المتغيرات المرتبطة ببعضها البعض.

تستخدم الخوارزميات المقترنة للتعامل مع هذه المشكلات عن طريق إنشاء نماذج رياضية تتضمن معادلات توصيل بين هذه المتغيرات. وتحتوي هذه الخوارزميات على خوارزميات فرعية مختلفة مخصصة لحل كل متغير بشكل منفصل، وتستخدم تقنيات الحل الترابطي لضمان التوافق بين القيم التي يتم استنتاجها لكل متغير.

في النهاية، يتم الحصول على حل كامل للمشكلة باستخدام خوارزمية مقترنة بعد مرور عدة خطوات لحل المعادلات المختلفة المتضمنة في النموذج الرياضي.

أما بالنسبة للتقسيم المكاني (spatial discretization) وهو تقسيم المجال إلى شبكة من النقاط أو العناصر (elements)، حيث يتم تقريب الحل في كل عنصر على حدة باستخدام نماذج رياضية فمن الأفضل استخدام مخطط من الدرجة الثانية للتقسيم المكاني لمعادلات الضغط وكمية الحركة والطاقة. يمكن أن يعقد هذا المخطط أحيانا تحقيق التقارب في الحسابات، ولكنه يسمح بتقليل التشتت الرقمي.

في الحالة التي تهمنا، نترك القيم الافتراضية لعوامل إرخاء الشبكة، والتي تُستخدم لتثبيت العملية التكرارية لحل أنظمة المصفوفة. ومع ذلك، بالنسبة لبعض عمليات المحاكاة التي يواجه فيها الحل صعوبة في التقارب، قد يكون من الضروري تقليل عوامل إرخاء الشبكة لفرض التقارب.

كما يجدر بنا تفعيل كل من معادلات النقل الحراري وانظمة اضطراب التدفق واعتماد نظام "k\_epsilon realizable" حيث يعد هذا النموذج "تعديلاً لنموذج "k-epsilon" الأصلي، والذي يوفر تقديراً محسناً للتدفقات الحدودية للسوائل الذاتية المعقدة". ويوفر تحسينات مهمة في الأداء عند تطبيقه على حل مسائل التدفقات الحدودية للسوائل.

تعد الضياعات الحرارية عن طريق الإشعاع جانب من الجدير عدم إهماله في الدراسة نظرا للحجم الهائل للفرن لذلك نقوم بتفعيل معادلات النقل الحراري عن طريق الإشعاع حيث نختار نموذج "discreteordinates" تستخدم لنمذجة انتقال الإشعاع عبر وسط متعدد الأبعاد. يستخدم هذا النموذج تقنية التقسيم إلى متعددات الحوسبة الزاوية لتقسيم الاتجاهات الممكنة لتحرك الإشعاع إلى عدد محدد من الاتجاهات الثابتة. يتم تطبيق هذا النموذج عن طريق تقسيم الفضاء الإشعاعي إلى خلايا، ويتم حساب تدفق الإشعاع في نقاط محددة داخل كل خلية لحساب التدفق الإشعاعي في الاتجاهات الثابتة.

يتم استخدام هذا النموذج في العديد من التطبيقات، مثل حساب درجات الحرارة والانبعاثات الإشعاعية في مفاعلات الطاقة النووية والفضاء الجوي والأجهزة الطبية وغيرها. ويعتبر هذا النموذج من أكثر النماذج دقةً في حساب التدفق الإشعاعي في الوسط، إلا أنه يحتاج إلى الكثير من الوقت والموارد الحاسوبية للحصول على نتائج دقيقة.

بعد ذلك، يجب أن نحدد حدًا للحساب التكراري لإيقافه عندما يمكن اعتبار الحل جيدًا بدرجة كافية. وذلك بفرض معايير للتقارب حيث نختار درجة الحرارة الجدار الداخلي و الخارجي للفرن كمعايير التقارب مع تدقيق الحسابات، حيث يستخدم برنامج Fluent الفروقات في النتائج الحسابية في التكرارات الأخيرة للحكم على حالت التقارب ، لذلك نقوم بإعطائه قيم مرجعية صغيرة ( $10^{-5}$ ) للحصول على نتائج دقيقة.

نقوم بإدخال الشروط الحدية المذكورة سابقا مع القيم الثابتة في الدراسة (سرعة دوران الفرن  $0.2\text{rad/s}$ )، الجاذبية  $(9.81)$ ، درجة حرارة المحيط  $(293\text{k})$ ، الضغط الجوي  $(101325\text{pa})$ ، كمية الحرارة افتراضية النابعة عن المصدر  $(32000)$   $\text{w/m}^3$

نقوم أيضا بإدخال خصائص المواد المذكورة في الدراسة ، لمراعات التيار الطبيعي الناتج عن فروقات درجات الحرارة في التيار المحاذي للفرن الناتج عنه تيار قابل للانضغاط ونقوم بإدخال نموذج بوسينك .



### 4.2.III دراسة تأثير الشبكة

تأثير الشبكة على النتائج هو مسألة هامة في الحسابات الرقمية الحديثة وخاصة في مجال الديناميكا الحرارية والميكانيكا الحيوية. وفي دراسة تأثير الشبكة على النتائج في الدراسة المطبقة باستخدام برنامج Fluent ، يتم توليد شبكة مناسبة للمسألة المطروحة ومن ثم تطبيق النموذج الرياضي على هذه الشبكة. ويتم مقارنة النتائج المتحصل عليها مع بيانات تجريبية أو نتائج حسابية أخرى لشبكة أكثر كثافة للتأكد من صحة النتائج.

وتعد دراسة تأثير الشبكة على النتائج مهمة للغاية في الحصول على نتائج دقيقة وموثوقة في الحسابات الحرارية والميكانيكية، وتحسين فهم الظواهر الفيزيائية التي يتم دراستها

لذلك قبل الشروع في أي محاكاة، ينبغي أولاً دراسة استقلالية النتائج عن الشبكة. سيسمح لنا هذا بتحديد عدد العقد الكافية، بحيث لا يكون للشبكة تأثير كبير على نتائجنا، بشرط ألا يكون عاليًا جدًا، لأن هذا سيؤدي إلى أوقات حساب عالية.

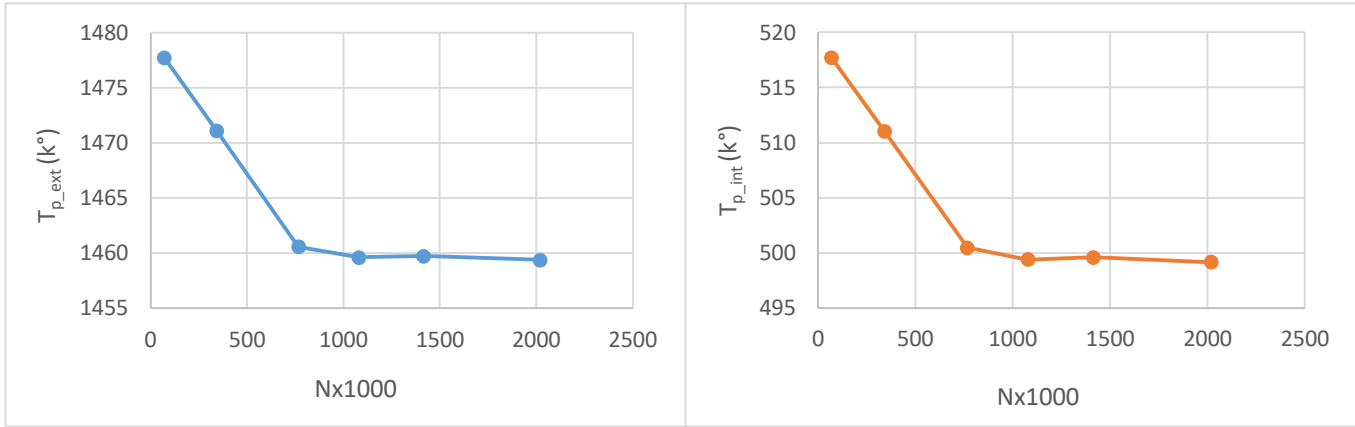
بمجرد أن يصبح تأثير زيادة عدد أنوية الشبكة على نتائج شروط التقارب المذكورة سابقاً صغيراً بدرجة كافية، سنكون قادرين على اعتبار أن النتائج مستقلة عن الأخطاء الناتجة عن الشبكة.

يمكن استخدام عدد الأنوية كمؤشر لكثافة الشبكة لذلك نقوم بدراسة تغير النتائج في كل عدد عقد متحصل عليه في شبكة أكثر دقة، النتائج موضحة في الجدول أدناه:

عدد العقد N	71000	341760	768000	1079000	1416000	2020000
درجة الحرارة داخل الفرن ( $T_{p\_int}$ )	1477,7	1471,1	1460,57	1459,6	1459,73	1459,38
درجة الحرارة خارج الفرن ( $T_{p\_ext}$ )	517,7	511,04	500,46	499,4	499,59	499,17

الجدول 3 النتائج المتحصل عليها في كل عدد من العقد

كما تمثل المنحنيات التالية تغير النتائج المتحصل عليها في كل عدد من الخلايا التي تحتويها الشبكة المستعملة:



الشكل 12 منحنى بياني يمثل تغيرات نتيجة درجة الحرارة في الجدار الخارجي للفرن (T<sub>p\_ext</sub>) بدلالة عدد العقد في الشبكة المستعملة

الشكل 13 منحنى بياني يمثل تغيرات نتيجة درجة الحرارة في الجدار الخارجي للفرن (T<sub>p\_ext</sub>) بدلالة عدد العقد في الشبكة المستعملة

حيث نلاحظ من خلال البيانات ثبوت النتائج نسبيا انطلاقا من 768 ألف عقدة، لتفادي أخطاء الحساب في التي يمكن أن تحدث في الدراسات الموالية والتي سنستخدم فيها شبكة مماثلة نختار شبكة أكثر دقة والتي توافق عدد أنوية موالي للعدد السابق ذكره (1079 ألف عقدة).

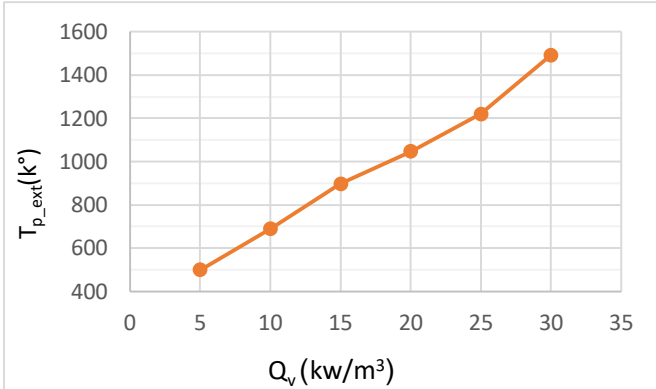
### 5.2.III تحديد قيمة مصدر الحرارة

إن مصدر الحرارة هو العامل الوحيد الذي يمكننا من خلاله الانتقال من النظام المفتوح (دون مبادل حراري) إلى النظام المغلق (في وجود مبادل حراري) حيث ان من خلاله يتم تحديد باقي المتغيرات في النظام ولهذا نقوم بإدخال قيم مختلفة له ومراقبة تغير درجات الحرارة ليتم لاحقا أخذ القيمة التي توافق درجات الحرارة المعقولة والأقرب للواقع.

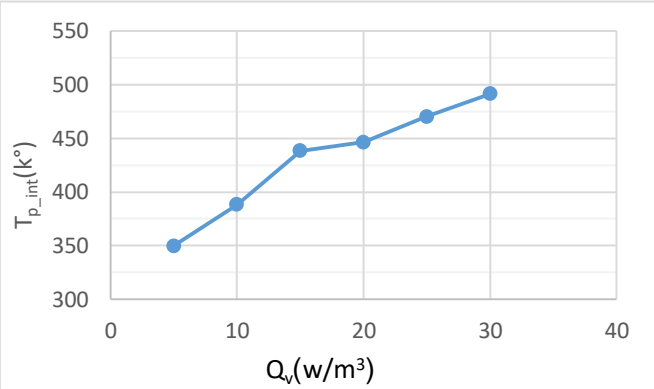
بعد القيام بالعملية تحصلنا على النتائج التالية:

32000	30000	25000	20000	15000	10000	5000	مصدر الحرارة (Q <sub>v</sub> /m <sup>3</sup> )
499.4	491.5	470.2	446.4	439.6	388.4	349.8	درجة الحرارة خارج الفرن (T <sub>p_ext</sub> (k°))
1460	1392	1220	1047	896.7	688.4	499.8	درجة الحرارة داخل الفرن (T <sub>p_int</sub> (k°))
960.1	900.2	750.1	600.1	477.1	300	150	الفرق في درجة الحرارة (ΔT (k°))

من خلال هذه النتائج يمكننا رسم منحنيات بيانية لتغير درجات الحرارة في الجدار الداخلي ( $T_{pint}$ ) و الخارجي ( $T_{pext}$ ) للفرن بدلالة قيم كمية الحرارة المطبقة في مصدر الحرارة.



الشكل 14 منحنى بياني لتغير درجة الحرارة في الجدار الخارجي للفرن بدلالة كمية الحرارة



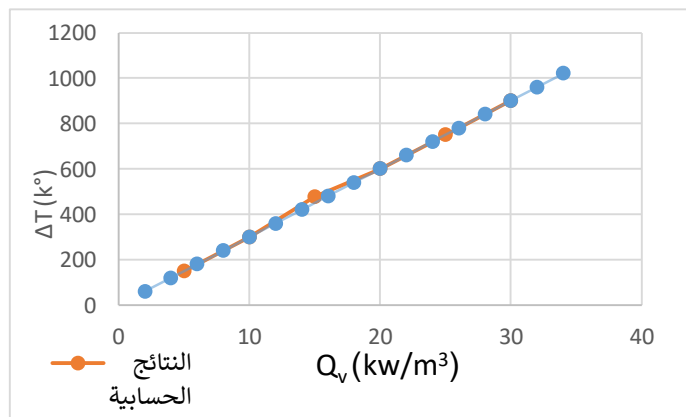
الشكل 15 منحنى بياني لتغير درجة الحرارة في الجدار الداخلي للفرن بدلالة كمية الحرارة

اعتمادا على نفس القيم المرجعية لدرجة الحرارة المستعملة في الدراسة التحليلية

في الجدار الخارجي للفرن:  $500\text{ k}^\circ$  ( $227\text{ C}^\circ$ )

في الجدار الداخلي للفرن:  $1453\text{ k}^\circ$  ( $1180\text{ C}^\circ$ )

يمكن اعتبار ان كمية الحرارة  $32\text{ kw/m}^3$  هي القيمة التي يمكن الاستناد لها في باقي الدراسة التي بدورها مساوية للقيمة المتحصل عليها في الدراسة التحليلية مما يؤكد صحة النتائج، كما يمكن التأكد من النتائج برسم منحنى تغير فرق درجة الحرارة ( $\Delta T$ ) بدلالة كمية التدفق الحجمي للحرارة في الحالتين



الشكل 16 منحنى تغير فرق درجة الحرارة ( $\Delta T$ ) بدلالة كمية التدفق الحجمي للحرارة  $Q_v$

من خلال البيان (الشكل 16) يمكن القول أن النتائج الحسابية والتحليلية متوافقة مع بعضها البعض و يمكن الاعتماد عليها، كما يمكننا التأكد من خلو الطريقة من الأخطاء عدا الطفيفة منها والتي لا تؤثر على صحة النتائج، أي أنه يمكننا اعتماد نفس الطريقة (الحسابية) في باقي الدراسة.

# الفصل الرابع:

دراسة الفرن مع المبادل

**مقدمة:**

في هذا الفصل، سنقوم بتحليل رياضي عن طريق برنامج Fluent بالاعتماد على برنامج Gambit لرسم الأشكال الهندسية وشبكته لأسطوانة دوارة يحيط بها مبادل حراري يفصل بينهما طبقة من الهواء في هيئة ثنائية البعد (2D) و ثلاثية البعد (3D) وذلك بإهمال الرياح والعوامل الخارجية الأخرى كالرطوبة. الهدف من الدراسة ثنائية البعد هو تحديد البعد الأنسب والمثالي للمبادل الحراري عن الفرن مع مراعات عامل دوران الفرن. أما بالنسبة للدراسة ثلاثية البعد فالهدف منها هو إيجاد النتائج النهائية المتعلقة بالمبادل الحراري.

نستند في هذه الدراسة على مخرجات الدراسة السابقة والمتمثلة في قيمة الدفق الحراري الحجمي المنبعث من داخل الفرن ( $32\text{kw/m}^3$ )

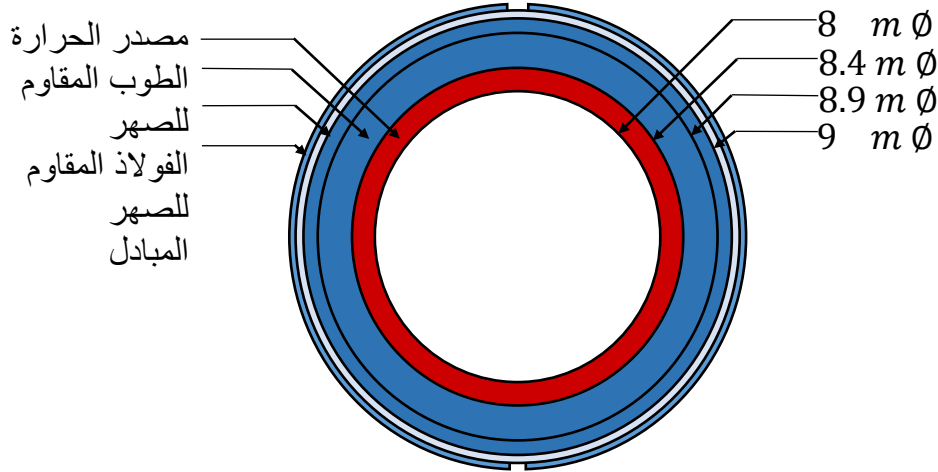
**1.IV دراسة ثنائية البعد**

لدراسة الظاهرة، بدايتاً نقوم بإعداد الشكل الهندسي للنموذج ثنائي البعد باستخدام برنامج Gambit. ثم نقوم بدراستها لاحقاً عن طريق المحاكاة العددية. يتعلق الأمر هنا بتقديم جميع المعلومات الضرورية للقارئ للسماح بإعادة إنتاج عمليات المحاكاة العددية التي سيتم إجراؤها في الدراسة. سنقدم أولاً مجال دراستنا، الشروط الحدية وخصائص شبكة، ثم معايير المحاكاة التي ستجعل من الممكن حل معادلات الحفظ. والتي تتوافق مع الدراسة السابقة حتى تكون الدراسة متناسقة.

## 1.1.IV الدراسة الهندسية

## 1.1.1. IV الشكل الهندسي

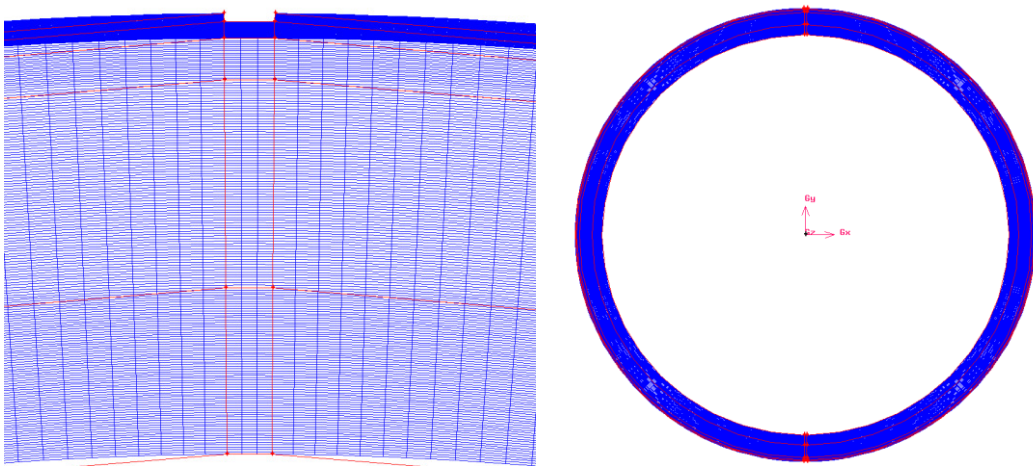
يتمثل الشكل الهندسي هنا في الفرن بطبقتيه، مصدر الحرارة، المبادل الحراري المتمثل في انبوبين محيطين بالفرن، طبقة من الهواء والتي تفصل المبادل عن الفرن و التي تسمح لفرن بالدوران كما هو ممثل في الشكل التالي:



الشكل 17 رسم توضيحي للشكل الهندسي في هيئة ثنائية البعد

## 2.1.1.IV شبكة مجال الدراسة

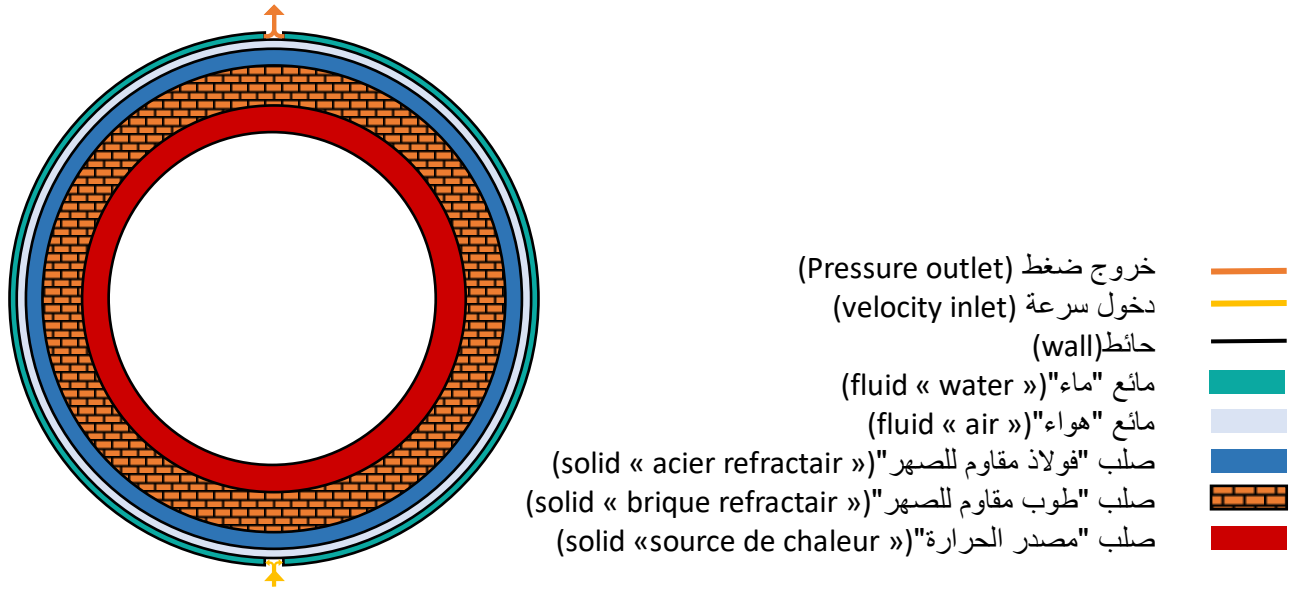
بعد تحديد الشكل الهندسي المراد دراسته نقوم بتوليد شبكة مقارنة للشبكة المختارة في الدراسة السابقة من حيث عدد العقد، مع تركيز عدد العقد في المبادل وطبقة الهواء كما هو مبين في الشكل أدناه. لتحديد المسافة الأنسب بين المبادل والفرن نقوم بتغيير سمك طبقة الهواء في كل مرة مع مراعات تناسب الشبكة.



الشكل 18 الشبكة المدروسة للفرن مع المبادل في هيئة ثنائية البعد

## 3.1.1. IV الشروط الحديدية

للحصول على نتائج أكثر دقة وواقعية يجب أن تكون الشروط الحديدية متوافقة مع حقيقة الدراسة وبناء على ما سبق ذكره من الدراسة فإن الشروط الحديدية التي سنقوم بوضعها هي كالتالي:



الشكل 19 رسم توضيحي للشروط الحديدية الخاصة بالدراسة

## 1.1.IV المحاكات العددية

## 1.1.1.IV اعدادات المحاكات ومدخلاتها

للوصول الى نتائج نقوم بتصدير شبكتنا إلى برنامج محاكاة. العددية Fluent مع شروطها الحدية لحل معادلات انحفاظ الطاقة، بهيئة ثنائية البعد، مع دقة عالية من أجل نتائج دقيقة لجريان غير قابل للانضغاط، يمكننا برنامج المحاكاة العددية من حل المعادلات التفاضلية ، معادلة الاستمرارية، معادلة كمية الحركة .

بالنسبة لإعدادات فيجب الحفاظ على نفس الإعدادات المستعملة في الجزء الأول من الدراسة وهي كالتالي:

طريقة الحل: خوارزمية الإقتران (coupledalgorithm)

القيم الافتراضية لعوامل ارخاء الشبكة

انظمة اضطراب التدفق: نظام " k-epsilonrealizable "

نموذج انتقال الأشعاع: نموذج "discreteordinates"

القيم مرجعية للتقارب: ( $10^{-5}$ )

كما نقوم بإدخال الشروط الحدية المذكورة سابقا مع القيم الثابتة في الدراسة (سرعة دوران الفرن (0.2rad/s)، الجاذبية (9.81)، درجة حرارة المحيط (293k)، الضغط الجوي (101325pa)، كمية الحرارة افتراضية النابعة عن المصدر ( $32000 \text{ w/m}^3$ )، بالإضافة الى سرعة دخول المائع 0.5 m/s

نقوم أيضا بإدخال خصائص المواد المذكورة في الدراسة، لمراعات التيار الطبيعي الناتج عن فروقات درجات الحرارة في التيار المحاذي للفرن الناتج عنه تيار قابل للانضغاط نقوم بإدخال نموذج بوسينك (Boussinesq Model) وهو نموذج رياضي يستخدم في تحليل التيارات الحرارية والحركية للسوائل. يستند هذا النموذج إلى افتراض أن كثافة المادة الوسطية ثابتة على مدار نطاق درجات الحرارة والضغط المحلية، وذلك باستثناء التغيرات الطفيفة في الكثافة الناتجة عن تغير درجة حرارة المادة.



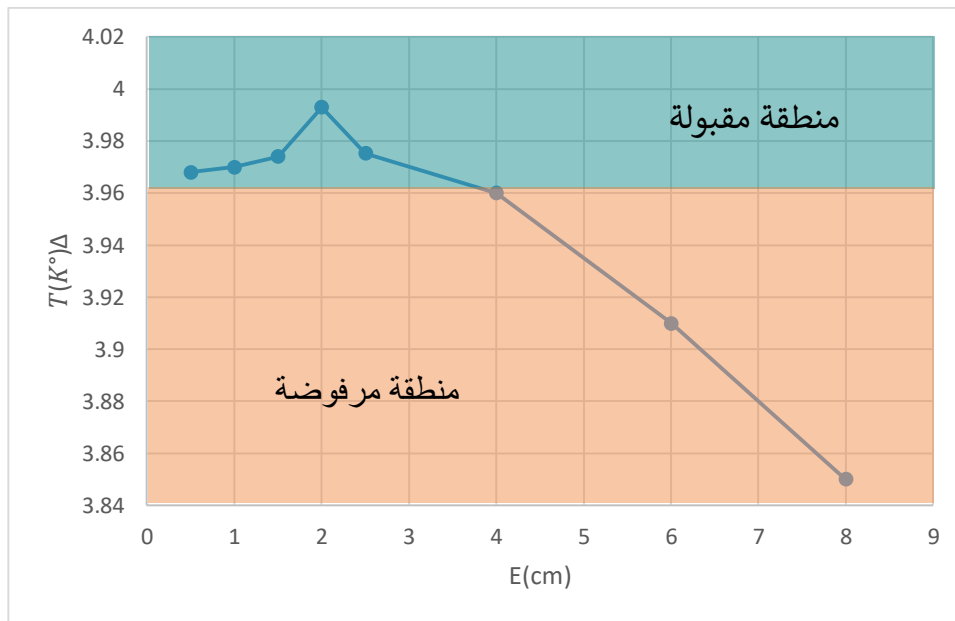
## 2.1.1.IV نتائج المحاكات

لتحديد المسافة المثالية، نقوم بتكرار عملية المحاكات مع جميع الحالات التي نقوم فيها بتغيير سمك طبقة الهواء ونسجل التغير في درجة الحرارة بين مدخل ومخرج المبادل، بعد القيام بذلك نتحصل على النتائج التالية

8	4	2.5	2	1.5	1	0.5	E(cm) سمك طبقة الهواء
296.85	296.94	296.97	296.99	296.98	296.97	296.96	درجة الحرارة في المخرج $T_s(K^\circ)$
3.85	3.94	3.97	3.99	3.98	3.97	3.96	فرق درجة الحرارة $\Delta T(K^\circ)$

الجدول 4 فرق درجة الحرارة بين مدخل ومخرج المبادل بدلالة سمك طبقة الهواء.

من خلال هذه النتائج يمكننا رسم منحنى بياني لتغير فرق درجة الحرارة بين مدخل ومخرج المبادل  $\Delta T(K^\circ)$  بدلالة سمك طبقة الهواء.



الشكل 20 منحنى بياني لتغير فرق درجة الحرارة بين مدخل ومخرج المبادل بدلالة سمك طبقة الهواء

تمثل منطقة المقبولة القيم التي يكون فيها التبادل الحراري مرتفع حيث نقبل 10% من أعلى قيمة يمكننا الحصول عليها بينما تمثل المنطقة الحمراء عكس ذلك حيث تكون فيها القيم منخفضة.

نلاحظ من المنحنى وجود قيمة قصوى فرق درجة الحرارة  $\Delta T = 3.99 K^\circ$  موافقة لسمك يقدر بـ  $E = 2 \text{ cm}$ ، كما يشير المنحنى الى انخفاض طفيف في فرق درجة الحرارة عند تقريب المبادل أكثر من القيمة السابقة، نفس ذلك بأن تقليل سمك طبقة الهواء يمنع جزيئاته من التحرك بحرية مما يتسبب في تثبيط عملية نقل الحرارة بالحمل الطبيعي، كما نلاحظ أن زيادة سمك الهواء الذي يعمل كعازل يثبط عملية النقل الحراري.

للمحافظة على مسافة أمان بين المبادل الحراري و الفرن نظرا للحالة الديناميكية للفرن (دوران الفرن) و بعض العوامل الأخرى كإنبعاغ السطح الخارجي للفرن بسبب الحرارة نأخذ أعلى قيمة لسمك طبقة الهواء مع مراعات عملية التبادل

الحراري حيث نحافظ على البقاء في المنطقة المقبولة من المنحنى السابق. نظراً لهته العوامل نأخذ قيمة 4cm كبعد ثابت بين المبادل والفرن في باقي الدراسة.

## 2.IV دراسة ثلاثية البعد

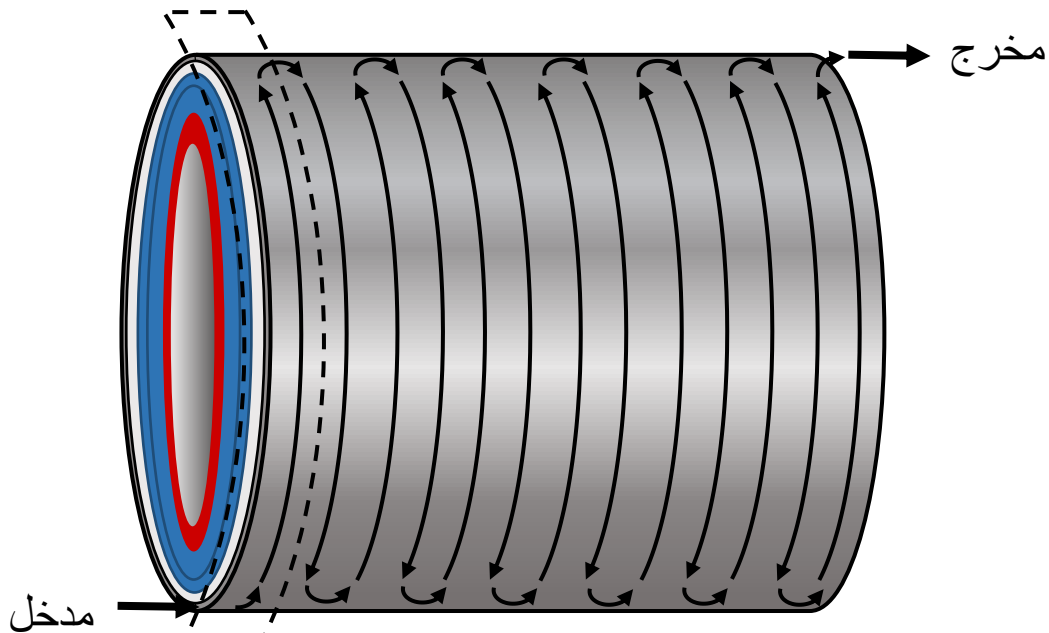
### مقدمة:

بعد تحديد البعد بين المبادل والفرن نقوم بدراسة الظاهرة في الهيئة ثلاثية البعد، حيث نقوم بإعادة نفس الشكل الهندسي في صيغة ثلاثية البعد لدراستها عن طريق المحاكاة العددية. يتعلق الأمر هنا بتقديم الإضافات اللازمة للسماح بإعادة إنتاج عمليات المحاكاة العددية التي سيتم إجراؤها في الدراسة. سنقدم أولاً مجال دراستنا، الشروط الحدية وخصائص شبكة، ثم معايير المحاكاة التي ستجعل من الممكن حل معادلات الحفظ. والتي تتوافق مع الدراسة السابقة. وذلك لتحديد الطاقة الحرارية المعاد تدويرها، تحديد درجة حرارة الماء عند مخرج المبادل ودراسة تأثير المبادل على الفرن

## 1.2.IV الدراسة الهندسية

## 1.1.2.IV الشكل الهندسي

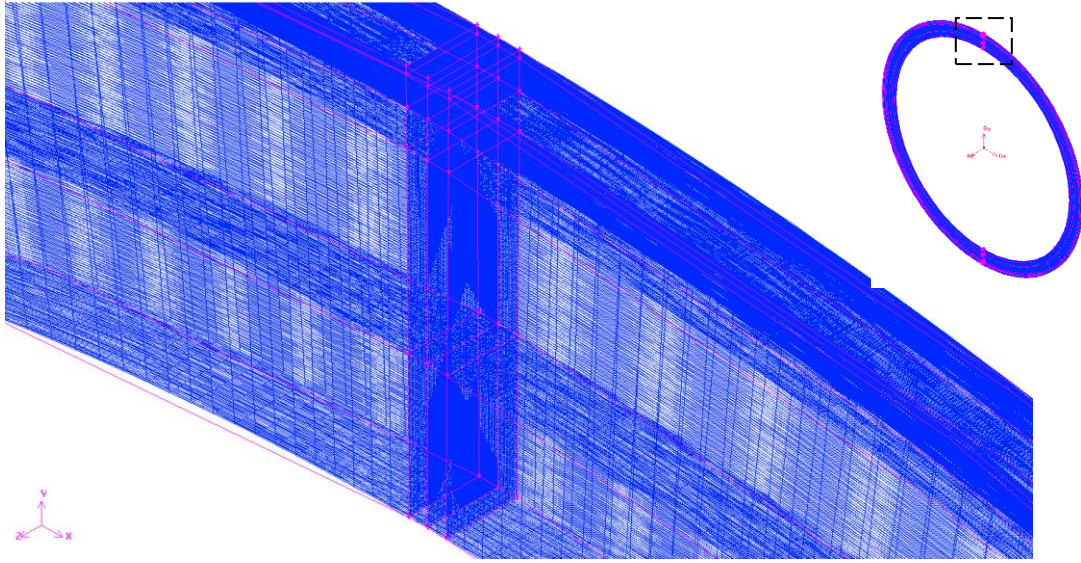
لصعوبة دراسة المبادل على طول الفرن (68m) نقوم بدراسة عينة متمثلة في وحدة واحدة من المبادل المتمثلة في (10cm) لذلك نقوم بإعادة الشكل الهندسي المنتقى سابقا (البعد بين المبادل والفرن 4cm) مع زيادة البعد الثالث مع بعض التغييرات الطفيفة ليتمشى مع حقيقة الدراسة، كما هو موضح في الشكل (19)



الشكل 21 رسم تمثيلي لعينة دراسة من المبادل الحراري المحيط بالفرن

## 2.1.2.IV شبكة مجال الدراسة

يمكننا الانطلاق في بتوليد شبكة مقارنة للشبكة المختارة في الدراسة السابقة في هيئة ثلاثية البعد كما هو مبين في الشكل أدناه.

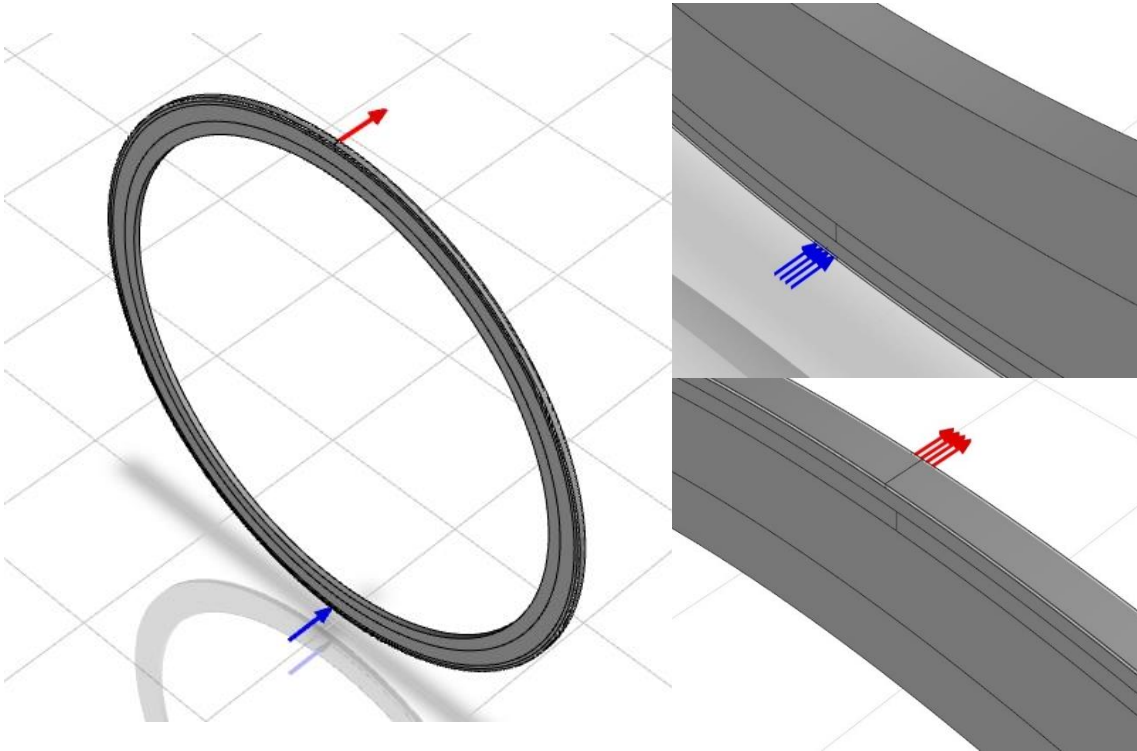


الشكل 22 الشبكة المولدة للفرن مع مبادل حراري في هيئة ثلاثية البعد

## 3.1.2.IV الشروط الحدية :

الشروط الحدية في هيئة ثلاثي البعد هي مماثلة لسابقتها ثنائية البعد باختلاف المدخل والمخرج فقط كما هو مبين في

الشكل:



الشكل 23 رسم توضيحي لمدخل ومخرج المائع

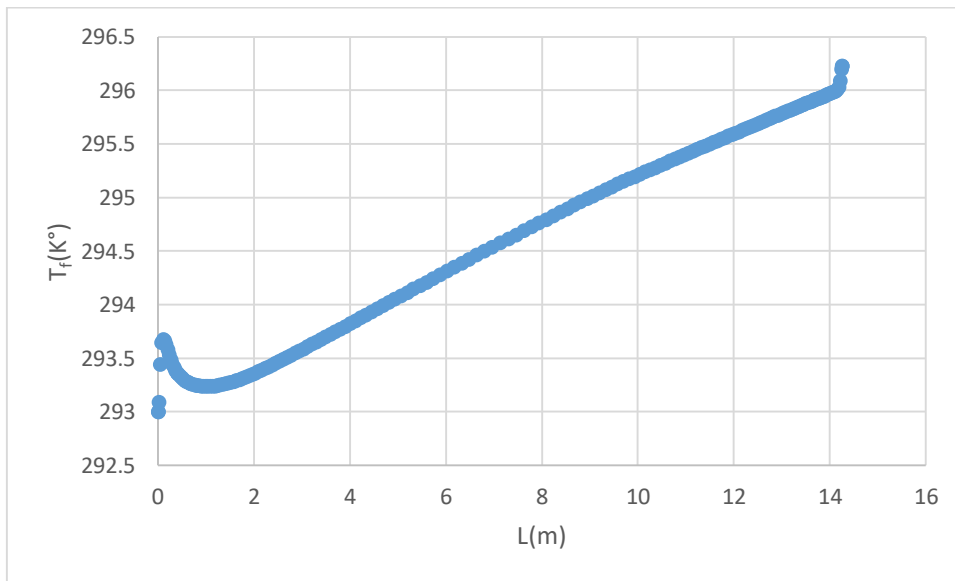
## 2.2.IV المحاكات العددية

## 1.2.2.IV اعدادات المحاكات ومدخلاتها

للوصول الى نتائج نقوم بتصدير شبكتنا إلى برنامج محاكاة. العددية Fluent مع شروطها الحدية لحل المعادلات الحاكمة في هيئة ثلاثية البعد. بالنسبة لإعدادات فيجب الحفاظ على نفس الإعدادات المستعملة في الجزء السابق من الدراسة (دراسة ثنائية البعد)

## 2.2.2.IV نتائج المحاكات

بعد القيام بالمحاكات العددية لعنصر واحد من المبادل يمكن رسم تغير درجة الحرارة ( $T_f$ ) على طول هذا الجزء من المبادل حيث نعبر على المسافة التي يقطعها الماء داخل المبادل بـ ( $L$ )



الشكل 24 رسم بياني لتغير درجة الحرارة على طول المبادل

نلاحظ من خلال البيان ارتفاع معتبر لدرجة الحرارة مقدر بـ 3 درجات بالنسبة للمسافة المقطوعة من طرف المائع والمتمثلة في 680/1 من المسافة الكلية.

## الخاتمة:

أن استعادة الطاقة الحرارية الضائعة وإعادة تدويرها في صناعة الإسمنت ليست مجرد مبادرة بيئية، بل هي أيضاً استثمار ذكي يمكن أن يؤدي إلى تحسين الأداء الاقتصادي للشركات وتعزيز مكانتها في السوق. من خلال تحسين أداء أحد أهم أجزاء العملية حيث تبين من الدراسة أن يمكّننا تطبيق المبادل من استعادة 93% من الطاقة الحرارية الضائعة كما أنه يزيد من عزل الفرن حرارياً من خلال طبقة الهواء الفاصلة بين المبادل والفرن.

يمكن استغلال الطاقة التي يمتصها المبادل في مجالات عدة نخص بالذكر منها الاستعمال المباشر للمياه التي تم تسخينها في التدفئة المركزية كأمثل طريقة في الشتاء، وتربينات البخار لإنتاج الكهرباء في فصل الصيف، حيث يتم تزويد المبادل بأجهزة وأدوات قياس تسمح بالتحكم في مدخلات المبادل حسب الحاجة.

في الختام، يعد التصميم المقترح للمبادل الحراري استثماراً بسيطاً ونسبياً غير مكلف وسهل التركيب. حيث لا يتطلب استبعاد الفرن الدوار أثناء عملية التركيب. بالإضافة إلى ذلك، فإن المبادل لا يؤثر على الفرن أو المادة المنتجة تأثيراً سلبياً. لكن هذا الاستثمار يحتاج إلى تدقيق طاقي ودراسة أكثر تعمقاً لتحديد جميع تفاصيله حسب احتياجات المصنع.

## قائمة المراجع:

1. Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P., & Cho, Y.I. (1998). Handbook of heat transfer. McGraw-Hill.
2. J.P. Saxena, "The Complete Technology Book on Minerals & Mineral Processing." Asia Pacific Business Press Inc., 2005. Rohsenow, W.M., Hartnett, J.P., & Cho, Y.I. (1998). Handbook of heat transfer. McGraw-Hill.
3. John Wiley & Sons, 2006. Incropera, Frank P., and David P. DeWitt. "Fundamentals of Heat and Mass Transfer
4. Holman, J.P. "Heat Transfer." McGraw-Hill Education, 2010.
5. Kays, W.M., London, A.L., Crawford, M.E. "Convective Heat and Mass Transfer." McGraw-Hill Education, 2012.
6. John Wiley & Sons, 2003. Shah, R.K., Sekulic, D.P. "Fundamentals of Heat Exchanger Design."
7. Cours CFD et Logiciels (2023)
8. H.K. Versteeg W. Malalasekera An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method
9. Jiri Blazek. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications
10. Blazek, J., & Felcman, J. (2015). Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Elsevier. 79 الصفحة.
11. Dong, B. (2000). Validation and comparison of turbulence models for flow over a backward-facing step. Journal of Fluids Engineering, 122(4), 771-780. doi: 10.1115/1.1288398
12. Yilmaz, İ., Özdemir, M., & İcier, F. (2017). Effect of mesh size on numerical results in solidification process of a two-component molten droplet. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 127(2), 1325-1334.