

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



ميدان: علوم المادة
فرع: فيزياء
تخصص: فيزياء الطاقة و الطاقات المتحددة

كلية: العلوم
قسم: الفيزياء
رقم: PH/ENR/18/2025

مذكرة مقدمة لنيل شهادة الماستر أكاديمي

إعداد الطلبة:

طرافي حورية

لعربي فريال

تحت عنوان

محاكاة عددية لعملية التجفيف داخل مجفف شمسي

تأثير الخصائص الهندسية للمدخنة

تمت المناقشة يوم: 2025/ 09 /21 أمام اللجنة المكونة من:

رئيسا
مشرفا ومقررا
مناقشا

جامعة محمد بوضياف-المسيلة
جامعة محمد بوضياف-المسيلة
جامعة محمد بوضياف-المسيلة

سالمي محمد
بولشفار هشام
بن دراجي رزيق

السنة الجامعية: 2025/2024

أهداء

إلى رفيق دربي وزوجي العزيز، الأستاذ بن اعريعية محمد، السند والداعم في كل خطوة
من مسيرتي،

إلى بناتي الغاليات :زهراء، سارة، هداية، آيات، مريم، منارات حياتي وأجمل عطايا الله
لي،

وإلى ابني العزيز أسامة، فلذة كبدي، الذي أتمنى له مع أخواته النجاح والتوفيق وبلوغ
أسمى المراتب،

إلى أمي الحبيبة أرفيس حدة، نبع الحنان وعنوان التضحية،

وإلى أبي الكريم موسى طرافي، قدوتي ومصدر قوتي،

إلى إخوتي وأخواتي الأعزاء، الذين كانوا دائماً السند والرفقة الصادقة في مسيرة حياتي،

وإلى الأخت شيماء دحماني التي لم تبخل بمساعدتها وساندتنا بصدق وإخلاص،

أهدي هذه المذكرة عربون وفاء وحب وامتنان، واعترافاً بجميلكم الذي لن أنساه ما

حييت.

عزيزتكم طرافي حورية.

أهداء

إلى من غرسًا في قلبي بذور العزيمة والإصرار، إلى من سهر الليالي وضحّيا براحتيهما كي
أكون ما أنا عليه اليوم، إلى والديّ العزيزين: أمي الحنونة مزوزي الكاملة، وأبي الغالي
العربي رمضان، أقدم ثمرة أعوامٍ من الجدّ والاجتهاد عربونَ حبٍّ ووفاء، لا يفني قطرةً من
بحر تضحياتكما العظيمة.

إلى أختيّ الغاليتين عبير وملاك، سندي وملاذي، أهدي هذا النجاح اعترافًا بجميل
دعمكما وتشجيعكما الذي لم يفتر يومًا.

إلى أساتذتي الكرام الذين غمروني بعلمهم ونصحهم، وإلى زملائي وأصدقائي الذين كانوا
خير رفقةٍ في درب العلم والمعرفة، لكم جميعًا خالص الامتنان.

كما أهدي هذه الثمرة لكل من أسدى لي كلمة طيبة، أو نصيحة صادقة، أو دعوة في
ظهر الغيب، فلكم جميعًا فضلٌ لا يُنسى.

العربي فريال.

شكر و عرفان

نتقدم بخالص الشكر والتقدير والاحترام الى السادة الكرام أعضاء لجنة المناقشة على تفضلهم بقبول الاشراف وتقييم هذا العمل العلمي وعلى ما بذلوه من جهد ووقت وما قدموه من ملاحظات علمية قيمة وفي مقدمتهم الأستاذ المحترم **بولشفار هشام** حفظه الله ورعاه الذي تشرفنا بإشرافه على هذا البحث ولما قدمه من توجيهات رشيدة ومتابعة دقيقة وتشجيع مستمر كان له الأثر الكبير في انجاز هذا العمل.

كما نتوجه ببالغ الامتنان والتقدير للأستاذ المحترم **سالمي محمد** لتكرمه برئاسة لجنة المناقشة كما لا يفوتنا أن نتوجه بخالص الشكر والتقدير للأستاذ المحترم **بن دراجي رزيق** على قبوله الانضمام إلى لجنة المناقشة.

قائمة المصطلحات

الرموز الرومانية

[K]	درجة حرارة المائع	T
[K]	درجة الحرارة المرجعية	T ₀
[kg·m ⁻³]	الكتلة الحجمية عند T ₀	ρ ₀
[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	السعة الحرارية الكتلية عند ضغط ثابت	C _p
[m·s ⁻²]	تسارع الجاذبية	g
[m]	إحداثيات ديكارتية (محاور)	x, y
[m·s ⁻¹]	مركبتا سرعة المائع في	u, v
[m·s ⁻¹]	السرعة المميزة/القياسية	U أو V
[m]	طول المجال / مقياس الطول	L
[W·m ⁻²]	التدفق الحراري / كثافة التدفق الحراري	q
	مصفوفة الإجهادات / معامل الإجهاد	k

الرموز اليونانية

[kg·m ⁻³]	الكتلة الحجمية للمائع	ρ
[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	الناقلية / الموصلية الحرارية	λ
[Pa·s]	اللزوجة الديناميكية	μ
[K ⁻¹]	معامل التمدد الحراري عند ضغط ثابت	β

الفهرس

إهداء

شكر و عرفان

i	المصطلحات.....
ii	الفهرس
v	قائمة الأشكال.....
1	المقدمة العامة.....

الفصل الأول عموميات حول المجففات الشمسية

4	1. نبذة تاريخية عن التجفيف الشمسي.....
5	2. أنواع التجفيف
5	1.2 التجفيف الطبيعي
6	2.2 التجفيف
7	3.2 أنواع المجففات حسب طريقة تسخين الهواء
7	1.3.2 المجففات الشمسية المباشرة
8	2.3.2 المجففات الشمسية غير المباشرة
10	3.3.2 المجففات الشمسية المختلطة
10	4.3.2 المجففات الشمسية الهجينة
12	العوامل المؤثرة في عملية التجفيف.....

إيجابيات وسلبيات تجفيف الأغذية والمحاصيل الزراعية 14

1.5 الإيجابيات 14

2.5 السلبيات 16

البحث البيولوجرافي 17

الفصل الثاني: النمذجة الرياضية

1.2 المقدمة 25

2.2 طرح المشكلة 25

3.2 النمذجة الرياضية 26

1.3.2 الصياغة الشعاعية 26

2.3.2 صياغة المعدلات العامة في الاحداثيات الديكارتية 27

3.3.2 فرضيات التبسيط 28

4.3.2 تبسيط المعادلات في الإحداثيات الديكارتية 29

5.2 الشروط الحدية 29

الفصل الثالث : المحاكاة العددية

1.3 المقدمة 32

2.3 نظرة عامة حول برنامج COMSOL 23

1.2.3 التعريف ببرنامج COMSOL 32

2.2.3 ميزات برنامج COMSOL 32

33	3.2.3 خطوات العمل على برنامج COMSOL
----	---

الفصل الرابع : النتائج والمناقشة

42	1.4 مقدمة
42	2.4 الخصائص الهندسية للمجفف محل الدراسة.....
43	3.4 الخصائص الفيزيائية للمائع (الهواء)
44	4.4 تأثير عرض فتحة المدخنة على التوزيع الحراري وسرعة الهواء
49	5.4 مقارنة السرعات عند المخرج بدلالة عرض فتحة المدخنة
51	الخاتمة
52	الملخص
55	قائمة المراجع

قائمة الأشكال

الفصل الأول:

- الشكل (1.1): مخطط التجفيف الطبيعي للمحاصيل الزراعية. 6
- الشكل (2.1): مجفف صناعي يعمل بالكهرباء 7
- الشكل (3.1): التجفيف الشمسي المباشر 8
- الشكل (4.1): التجفيف الشمسي غير المباشر 9
- الشكل (5.1): رسم تخطيطي للمجففات الشمسية المختلطة 10
- الشكل (6.1): المجففات الشمسية الهجينة 11
- الشكل (7.1): مبدأ عمل المجفف الشمسي الهجين 11

الفصل الثاني:

- الشكل (1.2): شكل هندسي لمجفف الشمس على شكل صندوق 25
- الشكل (2.2): مقطع عرضي للمجفف الشمسي 26

الفصل الثالث:

- الشكل (1.3): الواجهة – Navigator Mode 33
- الشكل (2.3): مراحل تحديد بعد ونمط التطبيق للنمو 34
- الشكل (3.3): هندسة المجال الفيزيائي 34
- الشكل (4.3): أمر خاص بإدخال الثوابت 35
- الشكل (5.3): نافذة إعدادات المجال الفرعي في وضع stocks –Navier 36
- الشكل (6.3): نافذة إعدادات المجال الفرعي 36

- الشكل(7.3): تحديد الشروط الحدية للجدران 37
- الشكل(8.3): تحديد الشروط الحدية للمدخل 37
- الشكل(9.3) : تحديد الشروط الحدية لمخرج الجدران 38
- الشكل(10.3): إنشاء شبكة تقسيمات المجال الهندسي (Maillage) 39
- الشكل(11.3): نافذة النتائج 40

الفصل الرابع:

- الشكل(1.4): التوزيع الحراري داخل المجفف الشمسي في حالة استخدام مدخنة 1 45
- الشكل(2.4): حقل السرعات داخل المجفف الشمسي في حالة استخدام مدخنة 1 46
- الشكل(3.4): التوزيع الحراري داخل المجفف الشمسي في حالة استخدام مدخنة 2 47
- الشكل(4.4): حقل السرعات داخل المجفف الشمسي في حالة استخدام مدخنة 2 47
- الشكل(5.4): التوزيع الحراري داخل المجفف الشمسي في حالة استخدام مدخنة 3 48
- الشكل(6.4): حقل السرعات داخل المجفف الشمسي في حالة استخدام مدخنة 3 49
- الشكل(7.4): منحنى بياني لمقارنة سرعة الهواء عند المخرج المدخنة 50

المقدمة

منذ حقبة مثل البحث عن مصادر طاقة نظيفة ومتجددة أحد أبرز التحديات التي تواجه المجتمعات الحديثة في ظل التزايد الكبير للاحتياجات الطاقوية العالمية وتراجع الموارد التقليدية المرتبطة بالوقود الأحفوري. وقد برزت الطاقة الشمسية كأحد أهم البدائل الواعدة، نظراً لوفرتها المجانية وتوزعها الجغرافي الواسع، فضلاً عن كونها صديقة للبيئة ولا تُخلف ملوثات أو انبعاثات مضرّة بالصحة والبيئة. ومن بين التطبيقات المتنوعة للطاقة الشمسية يبرز مجال التجفيف الشمسي الذي يحظى بأهمية متزايدة سواء في القطاع الزراعي أو الصناعي، نظراً لدوره في الحفاظ على جودة المنتجات وتقليل الفوائد وتحسين القيمة المضافة للمنتجات الفلاحية والغذائية.

تُعَدّ عملية التجفيف إحدى العمليات الحرارية القديمة التي استخدمها الإنسان منذ القدم لحفظ الأغذية، غير أن الطرق التقليدية المعتمدة على التجفيف في الهواء الطلق تبقى محدودة الفعالية، حيث تتأثر بالعوامل المناخية الخارجية مثل درجة الحرارة، الرطوبة النسبية، سرعة الرياح، إضافة إلى مشاكل التلوث وفقدان جزء معتبر من القيمة الغذائية للمنتجات. وفي هذا السياق جاءت المجففات الشمسية كحلٍّ تقني يدمج بين البساطة التشغيلية والاعتماد على مصدر طاقي متجدد، مما يسمح بالتحكم في الظروف الحرارية المحيطة بالمنتج وتقليل العوامل السلبية التي تعيق جودة التجفيف.

إن الأداء الحراري للمجففات الشمسية لا يعتمد فقط على الطاقة الشمسية المتاحة، وإنما يتأثر بدرجة كبيرة بخصائص التصميم الهندسي وعناصره المكونة، وخاصة المدخنة التي تُعد جزءاً محورياً في التحكم في تدفق الهواء. فالمدخنة تمثل العنصر المسؤول عن تعزيز ظاهرة الحمل الحراري الطبيعي من خلال خلق فرق في الكثافة بين الهواء الساخن داخل المجفف والهواء الخارجي، وهو ما يؤدي إلى سحب الهواء الرطب وتجديد الوسط الداخلي باستمرار. ومن ثمّ فإن خصائص المدخنة الهندسية (مثل الارتفاع، العرض، مساحة الفتحة) تكتسي أهمية بالغة في تحسين كفاءة عملية التجفيف وضمان توزيع حراري متجانس داخل غرفة التجفيف.

بناءً على ذلك، تتمحور هذه الدراسة حول محاكاة عددية لعملية التجفيف داخل مجفف شمسي مع دراسة تأثير الخصائص الهندسية للمدخنة. وقد تم الاعتماد في هذه المذكرة على برمجية Comsol Multiphysics لكونها أداة فعّالة في حل المعادلات الفيزيائية المرتبطة بانتقال الحرارة والكتلة وديناميكا الموائع الحسابية. حيث تم تطوير نموذج عددي يصف ظاهرة الحمل الحراري الطبيعي للهواء داخل المجفف، مع التركيز على دراسة توزيع درجات الحرارة وسرعة التدفق الهوائي، والهدف النهائي هو تحقيق وسط حراري ملائم للتجفيف.

هذه الدراسة تمثل مساهمة علمية في فهم السلوك الحراري والانسحابي داخل المجففات الشمسية، وهو ما يساعد على تحسين تصميمها وتطويرها لتكون أكثر كفاءة وملاءمة للتطبيقات الزراعية والغذائية في البيئات المحلية. جاءت المذكرة موزعة على أربعة فصول أساسية:

الفصل الأول تقديم عام حول المجفف الشمسي أنواعها، مزاياها ومبدأ عملها والإشكالات المرتبطة باستغلالها وفي النهاية قدمنا بحث بيبلوغرافي حول الأعمال السابقة التي عالجت مثل موضوعنا هذا.

أما الفصل الثاني تم فيه إعداد الصياغة الرياضية في الإحداثيات الديكارتية للظاهرة الفيزيائية المدروسة بالاعتماد على الوصف الهندسي للحيز الفيزيائي، وذلك باستعمال معادلات الاستمرارية والحركة والطاقة، مع اعتماد التبسيطات اللازمة التي تساعد على محاكاة الحمل الحراري الطبيعي للهواء داخل مجفف شمسي.

الفصل الثالث خصص للمحاكاة العددية باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics مع عرض خطوات العمل والنماذج المعتمدة.

بعدها تم عرض النتائج المتحصل عليها من المحاكاة العددية، مناقشتها في الفصل الرابع.

يختتم هذا العمل بمحصلة نستعرض فيها أبرز ما توصلنا إليه من نتائج.

الفصل الأول

عموميات حول المجففات الشمسية.

مقدمة:

التجفيف هو إحدى العمليات الحيوية التي تمثل أقدم وأهم الوسائل المستخدمة لحفظ الأغذية والمنتجات المختلفة حيث يعتمد على إزالة نسبة كبيرة من الماء أو الرطوبة الموجودة في المواد مما يحد من نشاط الكائنات الحية الدقيقة والبكتيريا التي تسبب التلف.

يعتبر التجفيف خطوة أساسية في صناعة الأغذية والصناعات الدوائية والصناعات الكيميائية بالإضافة إلى استخدامه في العديد من العمليات الزراعية.

1- نبذة تاريخية عن التجفيف الشمسي:

التجفيف الشمسي يُعتبر من أقدم أساليب حفظ الأغذية التي عرفها الإنسان حيث تعود بداياته إلى آلاف السنين حيث استغل الإنسان أشعة الشمس لتقليل محتوى الماء في الأغذية مثل الفواكه، الحبوب، اللحوم والأسماك، مما ساعد على حفظها لفترات طويلة ومنع تلفها بسبب البكتيريا أو العفن.

فمثلا في العصور القديمة، استخدمت الحضارات القديمة هذه الطريقة على نطاق واسع كالحضارة المصرية التي استخدمت الشمس لتجفيف التمور والأسماك، حيث كانت هذه الأطعمة مصدراً رئيسياً للطاقة. أما حضارات بلاد ما بين النهرين فاستخدمت التجفيف لحفظ الحبوب والفواكه. كما أن في الحضارة الرومانية كان الناس يعلقون الأعشاب والفواكه في الأماكن المفتوحة لتجفيفها.

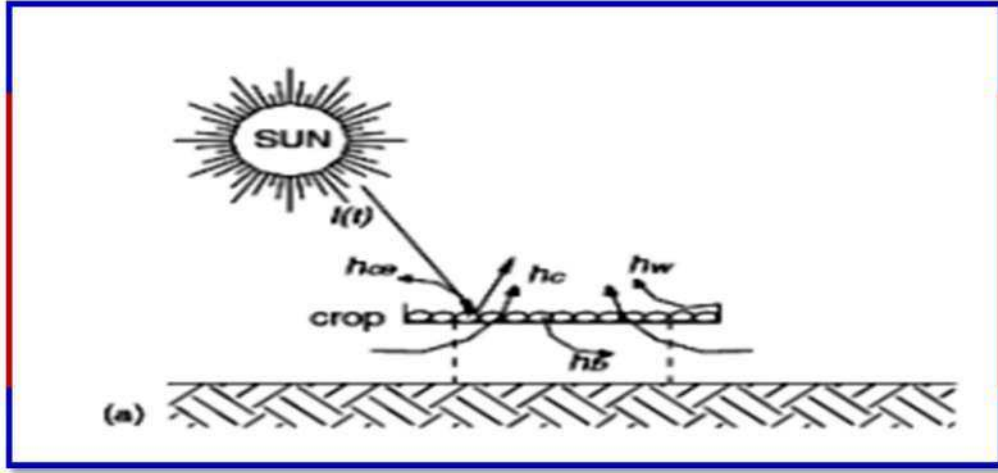
اعتمد الهنود الحمر في الأمريكيتين على التجفيف الشمسي لحفظ اللحوم مثل "البيمكان" وخليط من اللحم المجفف والدهون [1]. كما استخدم الصينيون التجفيف لحفظ الشاي والنباتات الطبية بالإضافة إلى الأغذية. أما في العصور الوسطى فقد استمر التجفيف كوسيلة أساسية لحفظ الأغذية خاصة في المناطق التي يصعب فيها الحصول على الغذاء الطازج على مدار العام، استخدم البحارة التجفيف كوسيلة لحفظ اللحوم والأسماك خلال رحلاتهم الطويلة.

خلال فترة الثورة الصناعية شهدت تقنيات التجفيف تطورا كبيرا مع ظهور آلات صناعية مخصصة لهذه العملية مثل التجفيف بالهواء الساخن والتجفيف بالتجميد مما أتاح تجفيف كميات أكبر من المواد الغذائية بشكل أسرع وأكثر كفاءة. أما في العصر الحديث ومع التقدم التكنولوجي أصبحت تقنيات التجفيف أكثر تطورا ودقة، ظهرت طرق جديدة مثل التجفيف بالرش والتجفيف باستخدام الموجات الدقيقة وأصبح التجفيف يستخدم ليس فقط في الأغذية بل أيضا في الصناعات الدوائية والكيميائية والزراعة. [2]

2 -أنواع التجفيف:

2-1 التجفيف الطبيعي:

التجفيف الطبيعي من أقدم طرق حفظ الأغذية وأبسطها، وتعتمد هذه الطريقة على تعريض المحصول للهواء وحرارة الشمس الطبيعية بوضع المحاصيل على سطح أسود مما يسمح للشمس والرياح تجفيف المنتج، والموضح في الشكل (1.1). [3]



الشكل (1.1): مخطط التجفيف الطبيعي للمحاصيل الزراعية. [4]

2-2- التجفيف الصناعي:

وهذا النوع يتم بلامسة الهواء الساخن مع المادة الرطبة، وتستخدم هذه الطريقة في الأماكن التي يقل فيها الإشعاع الشمسي وكانت تعتمد على الكتلة الحيوية، وذلك بوضع المحصول في وعاء خاص ويتم تعرضه إلى هواء حار نتيجة حرق الأخشاب أو غيرها من الكتلة الحيوية. وبالرغم من توفر العديد من المجففات الصناعية في السوق إلا أنها تشترك في مصدر الحرارة، ومنظم للحرارة، ونظام لتدفق الهواء. وقد تطورت هذه الطريقة باستخدام الأفران الحرارية التي

تعتمد عن الطاقة الكهرباء أو الغاز وهذا ما يوضحه الشكل (2.1). [5]



الشكل (2.1): مجفف صناعي يعمل بالكهرباء. [6]

2-3- أنواع المجففات الشمسية حسب طريقة تسخين الهواء :

2-3-1- المجففات الشمسية المباشرة:

التجفيف الشمسي المباشر يعتمد على حالة الجو، إذا كان الجو مشمساً في أحد الأيام و غائماً في اليوم التالي، فقد يصبح لزاماً على المرء أن يكمل عملية التجفيف باستخدام طريقة أخرى، وذلك لأن الغذاء قد يفسد أثناء التجفيف بسبب احتوائه على رطوبة كافية لنمو الكائنات الدقيقة. ولهذا السبب أيضاً ينصح بإدخال الغذاء إلى داخل المبنى في الليالي الباردة.

ومن العيوب الرئيسية لطريقة التجفيف الشمسي المباشر أنها تستغرق وقتاً طويلاً نسبياً في التجفيف. فالمادة الغذائية التي تحتاج من 6 إلى 10 ساعات لتجفيفها باستخدام طريقة تجفيف أخرى قد تحتاج من 3 إلى 5 أيام لتجفيفها في الشمس. ومن أجل تجنب "احتراق" المواد الغذائية أثناء التجفيف ينصح بنقل المواد الغذائية إلى الظل لاستكمال عملية التجفيف عندما يصل مستوى التجفيف فيها إلى 65% [6]، كما هو موضح في الشكل (3.1).



الشكل (3.1): التجفيف الشمسي المباشر. [7]

أ- مبدأ عمل المجفف الشمسي المباشر:

تعتمد المجففات في عملية التجفيف على وضع المواد المراد تجفيفها على صواني على شكل رفوف داخل صندوق المجفف، حيث أن المواد تتلقى أشعة الشمس مباشرة. كما يعمل المجفف إلى امتصاص الهواء من خلال الثقوب السفلية وخروج الهواء الرطب من فتحات التهوية العلوية.

2-3-2- المجففات الشمسية غير المباشرة:

وتشبه التجفيف الشمسي المباشر غير أن المواد المراد تجفيفها لا تتعرض لأشعة الشمس، وفي هذه الطريقة يتم تركيز أشعة الشمس بواسطة المجمع الشمسي مما ينتج عن درجات حرارة أعلى، الأمر الذي يقلل من الفترة اللازمة للتجفيف. وكلما كانت فترة التجفيف أقصر قلت

فرص تمكن الكائنات الدقيقة لإتلاف المادة الغذائية [6]، كما هو موضح في الشكل
الشكل(4.1).



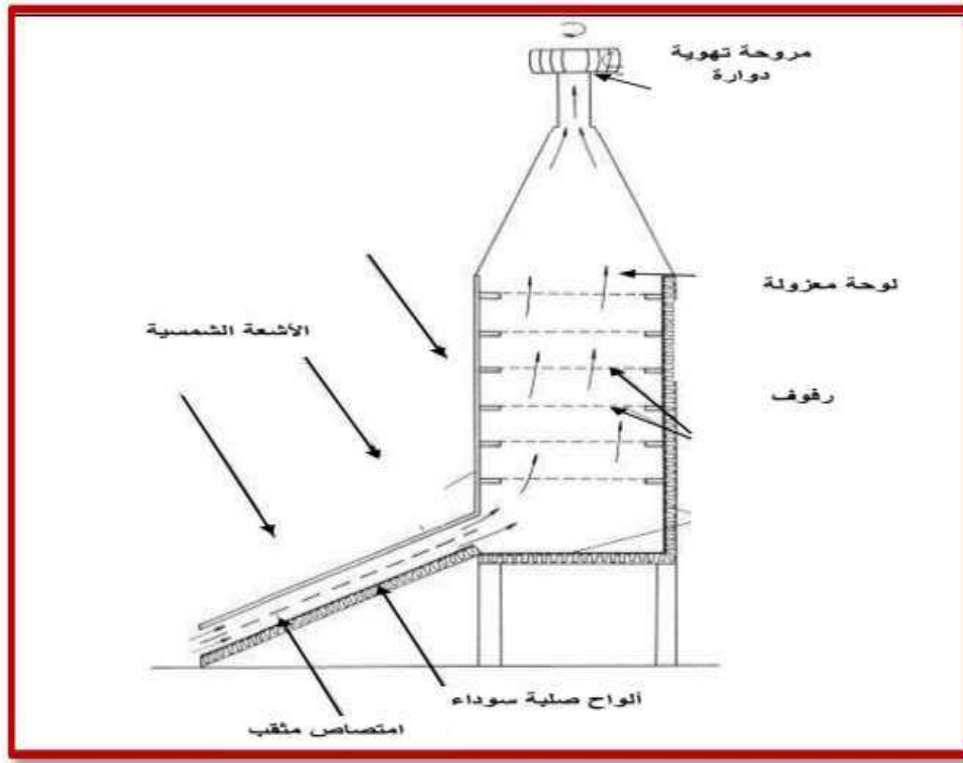
الشكل(4.1): التجفيف الشمسي غير المباشر. [6]

أ. مبدأ عمل المجفف غير المباشر:

يتم تسخين الهواء الجاف من الخارج بمروره تحت المجمع الزجاجي الذي يصل الأخير إلى مدخل غرفة التجفيف وقبل المرور عبر الرفوف يتم تسخين الهواء بواسطة مصدر حراري الذي يوفر طاقة إضافية لضمان درجة حرارة تجفيف عالية، تقوم المدخنة بسحب هواء التجفيف إلى الخارج [8].

2-3-3 - المجففات الشمسية المختلطة:

هذا التركيب عبارة عن مجفف مباشر وغير مباشر في نفس الوقت، فالهواء يسخن بواسطة المجمع الشمسي وعندما يدخل غرفة التجفيف تزداد سخونته فهو يساعد في رفع درجة الهواء بالنسبة للمجفف غير المباشر، لهذه المجففات نفس تركيبة المجففات غير المباشرة (مجمع شمسي، غرفة التجفيف، مدخنة) .

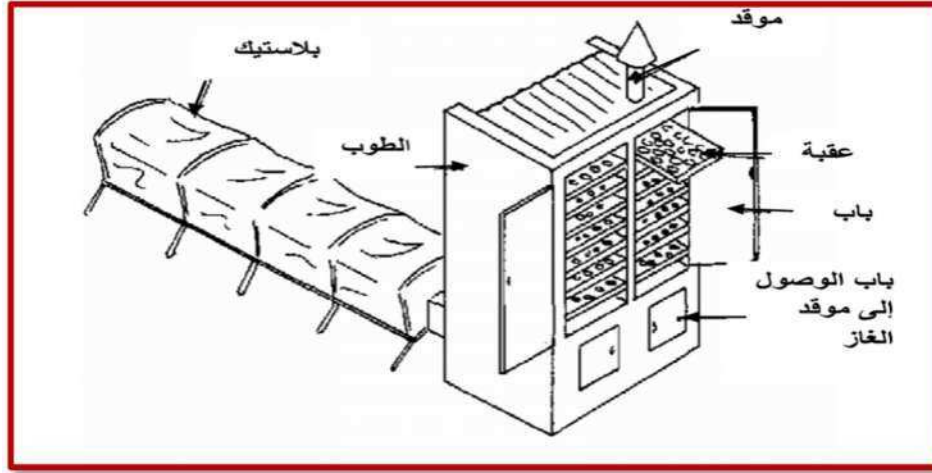


الشكل (5.1): رسم تخطيطي للمجففات الشمسية المختلطة. [9]

2-3-4 - المجففات الشمسية الهجينة:

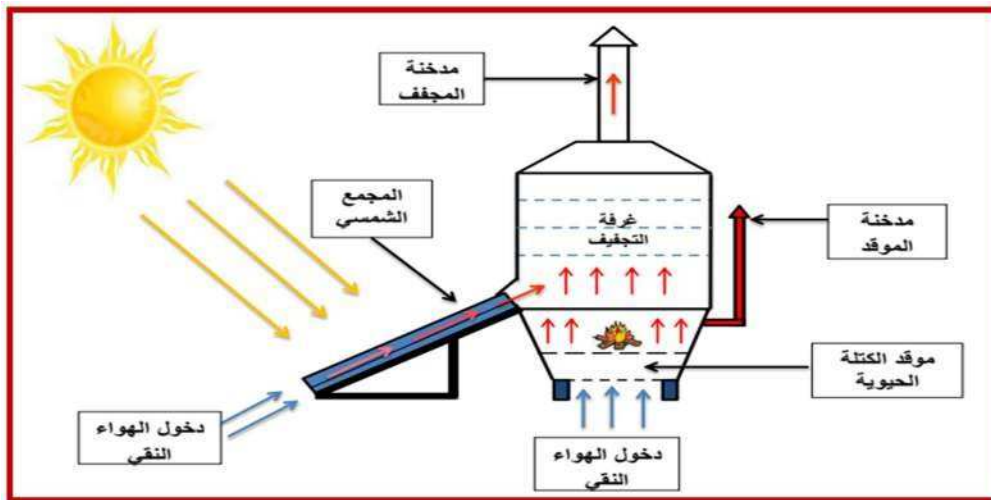
في هذا النوع من المجففات يتم جمع بين خصائص كل المجففات الشمسية المباشرة والمجففات الغير مباشرة، حيث تكون عملية التجفيف عن طريق جمع الشعاع الشمسي وتدفق الهواء

المسخن في مجمع الطاقة الشمسية. قد يستغرق المجفف الهجين وقت أقل من المجففات الأخرى، ومع ذلك فإن تكلفة الصيانة لديه عالية جداً. وتستخدم هذه الطريقة عادة للمنتجات التي تتطلب تجفيف سريع مع الحفاظ على الجودة [10].



الشكل (6.1): المجففات الشمسية الهجينة. [11]

أ. مبدأ عمل المجفف الشمسي الهجين:



الشكل (7-1): مبدأ عمل المجفف الشمسي الهجين. [12]

4- العوامل المؤثرة في عملية التجفيف: [13]

يوجد ثلاثة أنواع من العوامل التي تؤثر إيجاباً أو سلباً في سير عملية التجفيف، منها ما يتعلق بهواء التجفيف، ومنها ما يتعلق بالمادة المراد تجفيفها، وكذلك تصميم المجفف يستطيع أن يؤثر على سير العملية.

أ- تأثير العوامل المتعلقة بالهواء على حركية التجفيف:

تتمثل عوامل هواء التجفيف التي يمكن أن تتغير خلال عملية التجفيف في: درجة الحرارة، والسرعة (التدفق)، والضغط، والرطوبة.

ب- تأثير درجة حرارة الهواء على عملية التجفيف:

إن تأثير درجة حرارة الهواء له أثر مباشر في سرعة عملية التجفيف و نوعية المنتج المجفف. هذا التأثير متعلق بكمية الحرارة التي تكتسبها المادة و يتم من خلالها تبخر كمية الماء داخل المادة.

ج- تأثير سرعة الهواء على عملية التجفيف:

لسرعة هواء التجفيف كذلك لها تأثير في خفض زمن التجفيف، غير أن هذا التأثير يكون جلياً وواضحاً في درجات الحرارة المنخفضة بالمقارنة بالدرجات المرتفعة.

د- تأثير ضغط الهواء على عملية التجفيف:

حسب دراسة فحلول وآخرون (2009) عند تجفيف مادة البطاطس من نوع سبونتا، تبين أن لضغط الهواء تأثيراً أيضاً في تقليص مدة التجفيف. إلا أن هذا التأثير كان واضحاً إذا تم خفض الضغط إلى 20 سم زئبقي (0.026 ضغط جوي)، بينما لم يلاحظ أي تأثير عند التجفيف تحت ضغط 40 و 60 سم زئبقي (0.052 و 0.079 ضغط جوي). ويبقى هذا التأثير أقل أهمية من تأثير درجة حرارة هواء التجفيف.

هـ- تأثير رطوبة هواء التجفيف:

تلعب نسبة الماء في الهواء دوراً مهماً في سير حركية التجفيف في عدد من المواد، مثل سرعة الهواء. هذا التأثير يكون واضحاً في بداية التجفيف وينخفض بارتفاع درجة حرارة الهواء. غير أن هذا العامل طبيعي ولا يمكن التحكم فيه.

العوامل المتعلقة بالمادة المراد تجفيفها المؤثرة في عملية التجفيف:

يوجد العديد من العوامل المتعلقة بالمادة المراد تجفيفها التي تؤثر في سير عملية

التجفيف، منها:

أ- رطوبة المادة الابتدائية:

تختلف الرطوبة الابتدائية من عينة إلى أخرى، لذا يجب اختيار عينات لها نفس الرطوبة الابتدائية.

ب-سمك المادة : كلما زاد سمك عينات التجفيف، زادت مدة التجفيف، وهذا ما أثبتته العديد من الدراسات. .

د-شكل المادة : بينت الدراسات أن بنفس مساحة عينة التجفيف التي تقدر 20 سم، شرائح البطاطس المربعة كانت أسرع تحفيها من الشرائح الدائرية وهذا راجع لتوفيرها مساحة جانبية أكبر من الشكل الدائري.

5 -إيجابيات وسلبيات تجفيف الاغذية والمحاصيل الزراعية

5-1-الايجابيات : [14]

أ- مزايا التجفيف الطبيعي:

لتجفيف الطبيعي العديد من المزايا نذكر منها :

- يمكن لأي فرد القيام به لأنها تقنية سهلة وبسيطة.
- توفر الطاقة الشمسية طوال السنة وبدون تكلفة.
- إعطاء نوعية لا بأس بها من الأغذية التي تم تجفيفها.
- قليلة التكلفة لأنها لا تحتاج إلى معدات باهظة الثمن.

ب -مزايا التجفيف الصناعي:

يتميز التجفيف الصناعي بعدة مزايا نذكر منها:

-تتوفر فيه النظافة والشروط الصحية.

-يستغرق وقت أقل من التجفيف الطبيعي.

-الأغذية المجففة المتحصل عليها تكون أكثر جودة من الأغذية المجففة طبيعياً.

-الحفاظ على المنتج من عوامل التلوث.

-إمكانية استمرار عملية التجفيف ليلاً، كذلك في الأيام التي تشهد تقلبات جوية.

ج- مزايا المجفف الشمسي المباشر:

-حماية أفضل بكثير من الغبار والحشرات والحيوانات والمطر مقارنة بالتجفيف التقليدي.

-إمكانات التصميم رائعة.

-غير مكلفة كثيراً وسهلة التركيب.

-سهلة لا تحتاج مهارة في اليد العامل

هـ- مزايا المجفف الشمسي غير المباشر:

يتميز المجفف الشمسي غير المباشر بالمزايا التالية:

-تكلفة بناء هذا النوع من المجففات منخفضة.

-حماية المنتج وعدم تعرضه لأشعة الشمس المباشرة.

-لا يتطلب تشغيله لأي طاقة خارجية مثل الكهرباء والوقود.

-يحافظ منتج على قيمته الغذائية ولونه وخاصة الفيتامينات (أ و ج).

د- مزايا المجففات الهجينة:

-لا يستهلك الكثير من الطاقة مقارنة بالمجفف الصناعي.

-التحكم الجيد في سرعة الحرارة داخل المجفف وكذلك درجة الحرارة.

-زيادة بكترة في نسبة الإنتاج مقارنة بالمجفف الشمسي.

5-2-السلبيات : [15]

أ- سلبيات التجفيف الطبيعي: لهذه الطريقة العديد من العيوب نذكر منها:

- عدم التحكم في الرطوبة النهائية للمادة المجففة.

- التعرض للأتربة نهارا والندى ليلا والإصابة بالحشرات مما يؤدي إلى تشوه منظرها.

- تعرض الأغذية إلى تغير لونها الطبيعي بفعل الأنزيمات المؤكسدة مما ينتج عنه انواعية

رديئة.

- تحتاج إلى مساحة كبيرة.

-من الصعب الحصول على مستوى منخفض من الرطوبة في الثمار.

ب: سلبيات التجفيف الصناعي:

كما يوجد في هذه الطريقة عدة عيوب نذكر منها:

-لا يمكن استخدامها في المناطق الريفية لبعدها عن محطات التزويد بالطاقة والشبكة

الكهربائية.

-لاعتمادها في تسخين الهواء على الغاز أو الطاقة الكهربائية مما جعل تكليف التشغيل.

ج- عيوب المجفف الشمسي المباشر: [16]

-تدهور الجودة عن طريق التعرض المباشر لأشعة الشمس التي تدمر الفيتامينات.

-هشاشة مواد البولي إيثيلين التي يجب تغييرها بانتظام.

-تغير لون الخضروات

-ضعف دوران الهواء مما تحد من سرعة التجفيف .

هـ - عيوب المجفف الشمسي غير المباشر:

ولهذا المجفف عدة عيوب نذكر منها:

-سرعة التجفيف متغيرة جداً حسب الظروف المناخية وتصميم المجفف.

-معقد في عملية تركيبه.

-مكلف بالنسبة لمجفف الشمسي المباشر.

د - عيوب المجففات الهجينة:

-يحتاج إلى يد عاملة ماهرة للصيانة.

- ارتفاع تكاليف الإنتاج والاستثمار.

-ضرورة تزويده بمصادر الطاقة (الكهرباء والوقود).

7- البحث البيبليوغرافي

المجففات الشمسية لها دور كبير وقد أجريت العديد من الدراسات حول توزيع الحرارة وتدفق الهواء الطبيعي داخل أنواع مختلفة منها، نذكر فيما يلي بعض البحوث والدراسات السابقة التي تناولت هذا الموضوع.

[17] هذا العمل اعتمد إجراء دراسة تجريبية لاستكشاف سلوك عملية التجفيف الشمسي لثلاثة منتجات غذائية متنوعة، وذلك تحت تأثير الحمل الحراري باستخدام مجفف شمسي غير مباشر تم تصميمه وتصنيعه مسبقاً باستخدام مواد محلية تركز هذه الدراسة على عملية تجفيف البطاطا والجزر والتفاح بواسطة طبقة رقيقة، حيث تم قطعها إلى شرائح دائرية بثلاثة سموكات مختلفة تم استخدام البيانات التجريبية لاستخلاص نموذج رياضي لنسبة الرطوبة، وتمت مقارنته مع نماذج أخرى مثل النموذج اللوغاريتمي ونموذج نيوتن ونموذج بابيس و هيندرسون. فقد أظهرت النتائج أن حركيات عملية التجفيف تعتمد على سمك وحجم العينات، بالإضافة إلى أن النموذج اللوغاريتمي كان الأكثر فعالية في وصف سلوك عملية التجفيف هذه، بناءً على المقارنة مع النماذج الأخرى.

[18] يقدم هذا العمل نتائج دراسة تجريبية ونظرية للمجفف الشمسي المباشر، سواء كان مزودا بتكامل مبادل حراري أم بدونه، والذي يتصل بجهاز محاكاة للمياه الحرارية الأرضية بدرجة حرارة عالية. يمكن استخدام هذا الجهاز كمصدر للحرارة لتشغيل المجفف الشمسي بعد غروب الشمس. يقوم الجهاز بزيادة درجة حرارة مكونات المجفف المباشر، مما يضمن استمرارية عملية التجفيف في الليل وخلال الطقس الغائم.

تمت عمليات محاكاة رقمية باستخدام برنامج فلونت لتوضيح تأثير التكامل الحراري على الأداء الحراري للمجفف الشمسي المباشر أظهرت النتائج أن التبادل الحراري بين الهواء الساخن وهواء المجفف الشمسي يسهم في زيادة تجانس درجات حرارة مكونات المجفف الشمسي المباشر.

[19] تقدم هذه الأطروحة دراسة رقمية لمجفف شمسي مخصص لعملية تجفيف المنتجات الزراعية، وتحديدًا المنتجات مثل التين. يعتمد هذا الجهاز على تحويل ضوء الشمس إلى طاقة حرارية لتسخين الهواء، الذي يُرسل بعد ذلك لتنفيذ عملية التجفيف شمسي غير مباشر). يعتمد المجفف على تدفق الهواء بشكل طبيعي نظام سلبي).

تناول الجزء الأول من الأطروحة تحليل مجفف شمسي يتضمن غرفة للتجفيف متصلة بلوحة ماصة ومدخنة شمسية. تم تحليل وحل المعادلات التفاضلية القائمة على نموذج التدفق المضطرب باستخدام طريقة الحجوم المتناهية باستخدام برنامج **Ansys-Fluent**

أما الجزء الثاني، فيقوم بتحليل تأثير إضافة وحدة للتخزين الحراري على شكل سرير مملوء بالحصى إلى غرفة التجفيف. تم تصميم السرير كوسيط مسامي قابل للاختراق. بالإضافة إلى ذلك، تقترح هذه الدراسة استخدام مدخل ثاني للهواء في غرفة التجفيف لضمان توزيع حراري أكثر تجانساً على مستوى الرفوف وضمان تجفيف أكثر تناسقاً.

[20] تناولت هذه الأطروحة تحديد الفعالية المتفوقة بين أنواع معينة من مجمعات الألواح المسطحة الهوائية الشمسية، سواء كانت تتضمن ممراً واحداً أو مزدوج الممرات، والتي يتم استخدامها لتهوئة غرفة التجفيف بشكل طبيعي. كما قامت الدراسة بفحص تأثير المقاسات الهندسية، مثل الطول والعرض على حصول درجات حرارة مناسبة لتكييف نظام التجفيف وضمان تجانس درجات الحرارة داخل مجففات الطاقة الشمسية غير المباشرة.

تظهر النتائج التجريبية أن المستقطب الشمسي أحادي الممر الهوائي يتفوق على المستقطب الشمسي ثنائي الممر بنسبة 8% تحت ظروف تشغيل مشابهة. أما التحليل العددي باستخدام **CFD**، الذي تم إجراؤه باستناد إلى اختلافات في أبعاد المجمع الشمسي لظروف مناخية متغيرة، فكشف أيضاً عن تحسين في الأداء الحراري لنظام التجفيف وتمديد وقت التشغيل بمقدار ساعتين عند دمج مادة تغيير الطور (**PCM**) مع المجمع الشمسي، بهدف استمرار عملية التجفيف بعد غروب الشمس أو في الأيام الغائمة.

[21] في هذه الرسالة تم تسليط الضوء على عملية التجفيف بأخذ ثلاثة عوامل رئيسية في اعتبارنا، وهي درجة الحرارة، والرطوبة، وسرعة هواء التجفيف. تمت إجراء دراسة تجريبية لتقييم أداء مجفف الدفيئة الشمسية غير المباشر، حيث تم تسجيل وتسجيل البيانات المتعلقة بالإشعاع الشمسي، ودرجة الحرارة المحيطة، وسرعة الرياح، ودرجات حرارة مدخل ومخرج المستشعر، ودرجة حرارة غرفة الامتصاص والتجفيف، وكذلك الرطوبة النسبية. يظهر أن

النتائج المحصلة تتفق بشكل ملحوظ مع النتائج النظرية المتوقعة، مما يبرز نجاح عملية التجفيف بشكل فعال

[22] في هذه الرسالة تمت دراسة الجوانب الحرارية والديناميكية لمجفف شمسي غير مباشر على مستوى مختبر (LENREZA) في جامعة ورقلة تم السعي إلى تحسين توزيع الحرارة داخل غرفة التجفيف وزيادة كفاءته من خلال تحسين سرعة استخراج الهواء وتحديد درجة الحرارة المثلى لعملية التجفيف. تم اعتماد طريقة المخططات التجريبية MPE و منهجية سطح الاستجابة MSR لدراسة مجموعة من العوامل المؤثرة. وبعد إجراء المحاكاة العددية للتجارب، أظهرت النتائج تحسناً ملحوظاً في الاستجابات المدروسة مقارنة بأداء المجفف قبل التحسين.

[23] في هذا العمل تم إجراء دراسة رقمية للحمل الحراري الطبيعي في نظام مضطرب حيث يتألف التجويف من هواء ثنائي الأبعاد يحتوي على مدخل سفلي للهواء ومخرج علوي لطرد الهواء. تم تسخين التجويف من الأعلى باستخدام مصدر حرارة من خلال زجاج مكشوف يتجه نحو أشعة الشمس. اختار الباحثون في دراستهم أن تكون درجة حرارة الشمس ثابتة، وأن تكون الجدران الجانبية مصنوعة من الفولاذ، بينما يظل الجدار الداخلي ثابت الحرارة تم حل المعادلات الحاكمة عددياً باستخدام طريقة الحجوم المحدودة باستخدام البرنامج التجاري للديناميكيات الحرارية الحاسوبية (CFD) أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن النظام المضطرب يتمتع بكفاءة أعلى من حيث التبريد.

[24] في هذه الرسالة كان الهدف من الدراسة تحسين الكفاءة الطاقية لمجفف شمسي مباشر يعمل بالحمل الحراري الطبيعي عبر دمج نوعين من مصادر الطاقة الإضافية. يتضمن النوع الأول مصدراً للماء الساخن من مياه جوفية متصل بمبادل حراري، بينما يمثل النوع الثاني سمناً مانياً شمسياً متصلاً بالمبادل الحراري السابق أظهرت نتائج هذا البحث أن دمج الطاقة الإضافية في المجفف الشمسي المباشر يسهم في زيادة الكفاءة الطاقية خلال الأيام المشمسة والغائمة، بالإضافة إلى فترات الليل

[25] في هذه الرسالة كانوا مهتمين بتصميم وتصنيع منضدة اختبار لتجفيف المنتجات الغذائية، وهو مجفف حراري يستخدم الإزالة الرطوبة من المواد الصلبة قمنا باختيار النموذج الأولى الذي تم تصنيعه من خلال إجراء دراسة تجريبية تهدف إلى فهم عمل المجفف الحراري ودراسة حركية التجفيف للمنتج المقصود أجريت تجارب القياس متغيرات مختلفة مثل درجة الحرارة والرطوبة ودوران الهواء لتجفيف عينات الطماطم تم الحصول على حركات التجفيف كدالة لانخفاض الكتلة بمرور الوقت أظهرت النتائج أن الحصول على المنتج المجفف يتم بفترة أقصر عندما تكون درجة حرارة التجفيف أعلى وهذا يدعمه المنتج المراد تجفيفه تتيج النتائج المحصلة تحسين عملية التجفيف وتقديم توصيات لتحسين مجفف الحمل الحراري

[26] في هذه الأطروحة تم إجراء تقييم تجريبي شامل لأداء نموذج جديد من مجفف الطاقة الشمسية بتدفق طبيعي (ISD) لتجفيف المنتجات في ظروف صيفية في المجر يتضمن المجفف الجديد مكونات رئيسية ثلاثة مجمع هواء شمسي وغرفة تجفيف ومدخنة شمسية. تم اختبار تأثير ارتفاع المدخنة وأسماك الهواء المختلفة على أداء المجفف، مع مقارنة مع المجفف التقليدي وجمعت البيانات في ظروف التحميل وعدم التحميل، وتضمنت إشعاع الشمس ودرجة الحرارة ونسبة الرطوبة وسرعة تدفق الهواء استخدمت معايير مثل تحليل الطاقة والفعالية وفقد المنتج وكفاءة التجفيف واستهلاك الطاقة الخاص لتقييم الأداء

الحرارة تم حل المعادلات الحاكمة عددياً باستخدام طريقة الحجوم المحدودة باستخدام البرنامج التجاري للديناميكيات الحرارية الحاسوبية (CFD) أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن النظام المضطرب يتمتع بكفاءة أعلى من حيث التبريد.

[27] في هذه الأطروحة تمت دراسة تجريبية وديناميكية حول عملية التجفيف الشمسي باستخدام مجفف شمسي مختلط واسع النطاق الخمسة منتجات مختلفة (الطماطم، المشمش البطاطا التين، والفلفل الأحمر الحلو) تهدف الدراسة إلى فهم حركية التجفيف والخصائص الديناميكية الحرارية للمنتجات خلال التجفيف تم استخدام معادلة **Fick** الحساب معامل الانتشارية الفعال باستناد إلى البيانات التجريبية، ودرست سبع نماذج نظرية التوصيف عملية تجفيف المنتجات، مع تأكيد دقة نموذجين بدون أبعاد في جزء آخر من الدراسة، تم تحليل انتقال

الحرارة في اللاقط الحراري الشمسي وحركة الهواء داخل الدفيئة باستخدام تقنيات محاكاة رقمية هدف التحليل كان تحسين انتقال الحرارة باستخدام عقيات مثبتة على الجدران المعزولة أظهرت النتائج أن العقيات بزاوية 45 درجة تؤثر إيجابيا على انتقال الحرارة وتدفق الهواء كما تم اختيار مسافة بين الرفوف وسرعة الدخول كقيم أمثل، وأظهرت النتائج أن مسافة 20 سم بين الرفوف وسرعة 2 م/ث هي الحالة الأمثل لحركة الهواء داخل المجفف الشمسي

[28] تناول هذا العمل وفي إطار التحفيز لحماية البيئة واستغلال الفضلات الناتجة عن محطات تصفية المياه المستعملة، أجريت هذه الدراسة التجريبية التي تشمل إقامة نموذج بسيط المجفف شمسي يحمل طبيعي واختيار شروط عمله من خلال دراسة العوامل الفيزيائية التالية زمن احتجاز الوحل داخل المجفف، درجة حرارة الهواء المجفف، والرطوبة النسبية بالإضافة إلى نسبة الماء في الوحل تم التحقق من فعالية المجفف من خلال تحليل نتائج التجربة، حيث أظهرت النتائج ارتفاعا ملحوظا في درجة حرارة داخل المجفف، وتوحيدا ملموسا في عملية تجفيف الوحل.

[29] هذا العمل يقدم نتائج دراسة نظرية حول حركية تجفيف البطاطس في مجفف شمسي غير مباشر تم تطوير نموذج رياضي يحاكي عملية التجفيف في نظام بالحمل الطبيعي. تم التحقق من صحة هذا النموذج من خلال عدة دراسات على البطاطس، حيث تستخدم البطاطس بعد تجفيفها وطحنها في صناعة الأغذية، خاصة في إنتاج الدقيق تم استخدام طريقة الفروق المحدودة للحل العددي خضعت النتائج لتأثير الكتلة وقطر المنتج ودرجة حرارة الهواء، وعلى وقت التجفيف.

[30] يهدف هذا العمل دراسة تأثير نموذج المجفف الشمسي من نوع الدفيئة بالحمل الطبيعي على سرعة تجفيف الأعشاب الطبية، مثل النعناع، والحفاظ على جودتها تمت مقارنة عملية تجفيف أوراق النعناع الأخضر بطريقة طبيعية مع تجفيفها باستخدام مجفف الدفيئة وأظهرت النتائج أن الفترة الزمنية المطلوبة لتجفيف أوراق النعناع الأخضر في يوم واحد بمتوسط اشعاع شمسي قدره 680 واط متر مربع في 6 ساعات في مجفف الدفيئة و 9 ساعات في المجفف

الطبيعي يعتبر المجفف من نوع الدفينة وسيلة فعالة حيث يقوم بتسريع عملية التجفيف ويحافظ على سلامة المنتج من العوامل الطبيعية التي قد تؤثر في جودته

[31] هدف هذا البحث إلى إجراء دراسة تجريبية حول عملية تجفيف المحاصيل الزراعية مثل الطماطم، في جهاز تجفيف شمسي غير مباشر بحمل طبيعي يتناول الهدف الرئيسي في هذه الدراسة فحص حركية تجفيف الطماطم والمقارنة بين عملية نقل الحرارة أثناء تجفيف الطماطم تحت أشعة الشمس مباشرة وتحقيقها في جهاز تجفيف شمسي غير مباشر

أظهرت النتائج التجريبية أن حركية تجفيف الطماطم تظهر وجود المرحلة الثالثة فقط (التباطؤ) كما أظهرت أن التحفيف غير المباشر يخفض وقت تجفيف الطماطم مقارنة بالتجفيف المباشر تحت أشعة الشمس.

[32] - في هذا العمل يتم تقديم محاكاة نقل حراري رقمي المجفف شمسي غير مباشر مع الحمل الحراري الطبيعي. يتكون المجفف الشمسي من مجمع هواء شمسي وغرفة تجفيف. يقارن الجزء الأول من هذا العمل الكفاءة الحرارية النوعين من اللواقط المسطحة والمسامية وتأثير المسامية على درجة الحرارة والسرعة عند نهاية المجمع تم إجراء المحاكاة من أجل تحديد المجالات الديناميكية والحرارية لتدفق الهواء عبر المجفف الشمسي يتم تحديد معادلات الحفظ القائمة على نموذج التدفق المضطرب ke القياسي مع حلها بطريقة الحجم المحدود باستخدام **Fluent** الجزء الثاني يحلل تأثير دمج وحدة تخزين حراري على سلوك التدفق في المجفف.

الفصل الثاني:

النمذجة الرياضية

1.2. المقدمة:

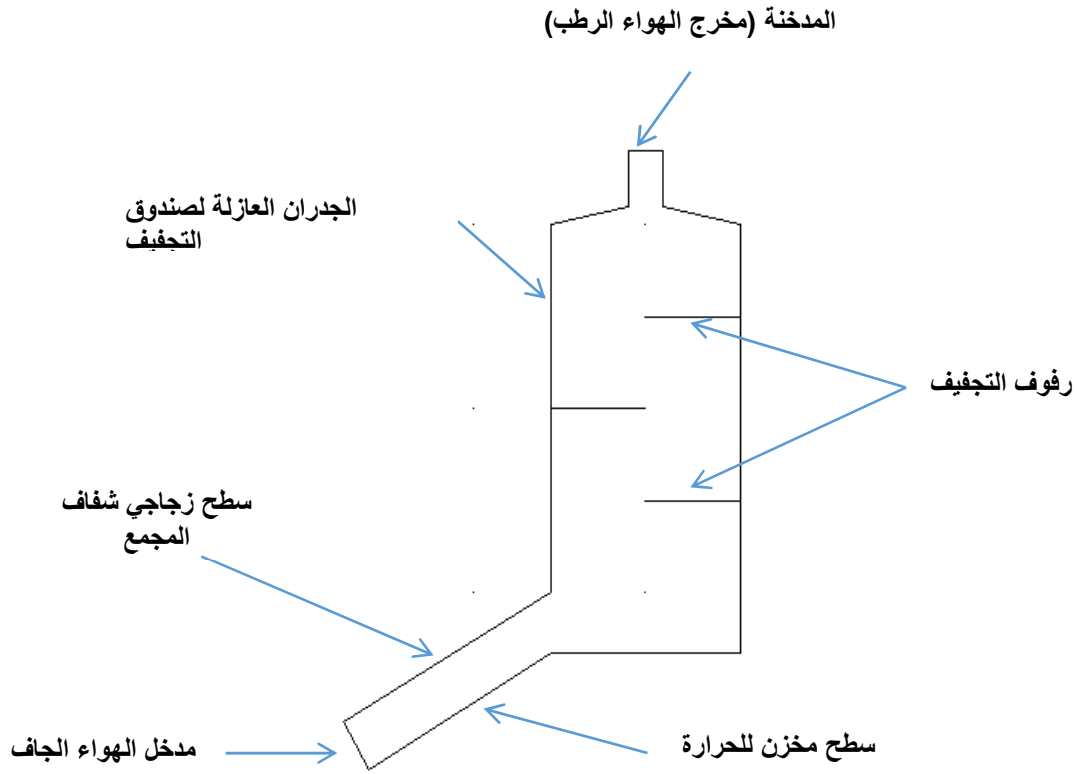
في هذا الفصل قمنا بإعداد صياغة للمعادلات الرياضية لدراسة الظاهرة الفيزيائية وهذا بالاعتماد على الوصف الهندسي للحيز الفيزيائي وكذلك المعادلات التفاضلية الواصفة لحركة الهواء و انتقال الحرارة و هي معادلات الاستمرارية، الحركة والطاقة.

2.2. طرح المشكلة:

نقوم بدراسة توزع الحرارة و حركة الهواء تحت تأثير الحمل الحراري الطبيعي للهواء داخل مجفف شمسي على شكل صندوق مع مراعاة الافتراضات و التبسيطات المناسبة.



الشكل (1.2): شكل هندسي للمجفف الشمسي.



الشكل (2.2): مقطع عرضي للمجفف الشمسي

3.2 النمذجة الرياضية:

المعادلات للنموذج الرياضي يتم التعبير عنها في البداية في شكلها الشعاعي ثم يتم كتابتها في الإحداثيات الديكارتية مع أخذ بعين الاعتبار الفرضيات التبسيطية.

1.3.2 الصياغة الشعاعية :

➤ معادلة الاستمرارية:

المعادلة التي تعبر عن قانون انحفاظ المادة هي كالتالي :

(2.1)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{v}) = 0$$

➤ معادلة الحركة:

مبدأ انحفاظ كمية الحركة يسمح بكتابة معادلة الحركة بالشكل التالي:

$$(2.2) \quad \rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}) \vec{v} \right) = -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \Delta \vec{k}$$

g : تسارع الجاذبية.

k : مصفوفة الإجهادات.

➤ معادلة الطاقة:

يتم الحصول على معادلة انحفاظ الطاقة من المبدأ الأول للديناميكا الحرارية:

$$(2.3) \quad \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \overrightarrow{\text{grad}}) T = \frac{\lambda}{\rho C_P} \nabla^2 T$$

حيث:

T : درجة حرارة المائع.

λ : الموصلية الحرارية للمائع.

C_P : السعة الحرارية الكتلية عند ضغط ثابت من المائع.

2.3.2 صياغة المعادلات العامة في الإحداثيات الديكارتية:

➤ معادلة الاستمرارية:

$$(2.4) \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \overrightarrow{\text{grad}}(\rho) \cdot \vec{v} = 0$$

➤ معادلة الحركة:

إسقاط المعادلة (2.2) على كلا المحورين (x) و (y) يعطينا المعادلتين التاليتين:

وفق المحور (ox):

$$(2.5) \quad \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho g(x) + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

وفق المحور (oy) :

(2.6)

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho g(y) + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

➤ معادلة الطاقة :

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + (2.7) \frac{\partial T}{\partial t}$$

3.3.2 فرضيات التبسيط :

من أجل تبسيط النموذج الرياضي ، اخترنا بعض الفرضيات وهي كالتالي :

➤ المائع (الهواء) نيوتوني وغير قابل للضغط.

➤ نعرّف بأن التدفق ثنائي الأبعاد، دائم وصفحي (خطي).

➤ نعتبر تبديد اللزوجة وعمل قوى الضغط مهملان في معادلة الحرارة.

➤ كثافة المائع في حالة القوى الحجمية تتغير خطيا مع درجة الحرارة T وفقا لتقريب بوسينسك.

يعطى تقريب بوسينسك على الشكل التالي :

$$\rho(T) = \rho_0(1 - \beta_T(T - T_0))$$

➤ الخصائص الفيزيائية للموائع في الحالات الأخرى للمعادلات ثابتة وتحدد بدرجة الحرارة

المرجعية T_0

حيث :

ρ : الكتلة الحجمية للمائع.

β_T : معامل التمدد الحراري في ضغط ثابت.

T_0 : درجة الحرارة المرجعية.

ρ_0 : الكتلة الحجمية عند T_0 .

4.3.2 تبسيط المعادلات في الإحداثيات الديكارتية:

باستعمال فرضيات التبسيط، تصبح المعادلات (2.4)، (2.5)، (2.6) و (2.7) على النحو التالي:

➤ معادلة الاستمرارية:

$$(2.8) \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

➤ معادلة الحركة:

وفق المحور (ox) :

$$(2.9) \quad \rho(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2})$$

وفق المحور (oy) :

$$(2.10) \quad \rho(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g(y) + \mu(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2})$$

➤ معادلة الطاقة:

$$(2.11) \quad u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\lambda}{\rho C_p} (\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2})$$

5.2 الشروط الحدية :

الشروط الحدية عند مدخل الهواء :

$$T = T_f, u = u_0, v = 0$$

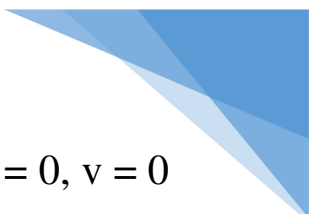
الشروط الحدية عند مخرج الهواء :

$$\frac{\partial u}{\partial y} = \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial y} = 0$$

الشروط الحدية بالنسبة للأرضية:

$$T = T_c, u = 0, v = 0$$

الشروط الحدية بالنسبة للسطح الماص للحرارة:


$$T = T_f, u = 0, v = 0$$

الشروط الحدية بالنسبة للزجاج وللسطوح الثابتة الحرارة :

$$T = T_f, u = 0, v = 0$$

الشروط الحدية بالنسبة لجدران المعزولة حراريا :

$$\frac{\partial T}{\partial x} = 0$$

الفصل الثالث:

المحاكاة العددية

مقدمة:

لحل المشاكل المتعلقة بالظواهر الفيزيائية التي يصعب حل معادلاتها تحليلياً نلجأ إلى استعمال المحاكاة العددية كحل تقريبي باستخدام البرمجة المباشرة أو أحد البرامج المتاحة والمستعملة في تطبيقات الموائع وحركتها مثل Ansys Fluent OpenFOAM ،
Comsol Multiphysics حيث استعملنا هذا الأخير لإجراء المحاكاة العددية لظاهرة الحمل الحراري الطبيعي للهواء داخل المجفف الشمسي.

نظرة عامة حول برنامج COMSOL

التعريف ببرنامج COMSOL :

هو برنامج محاكاة عددية يعتمد على طريقة العناصر المنتهية (FEM) حيث يسمح بالمحاكاة للعديد من التطبيقات الفيزيائية والهندسية، ولا سيما الظواهر المقترنة أو المحاكاة متعددة الظواهر الفيزيائية. هذا ما جعله يعد كبيئة تفاعلية قوية لنمذجة وحل جميع أنواع المشكلات العلمية والهندسية القائمة على المعادلات التفاضلية الجزئية (PDES) من خلال تقسيم المجال إلى عدد كبير من العناصر لتتحول المعادلات التفاضلية إلى معادلات جبرية يسهل حلها بالطرق الحسابية عن طريق عدد كبير من التكرار يستخدم هذا البرنامج في عدة مجالات من بينها النقل الحراري، الجيوفيزياء، تدفق الوسائط المسامية، انتشار الموجات ديناميكيات الموائع ... إلخ.

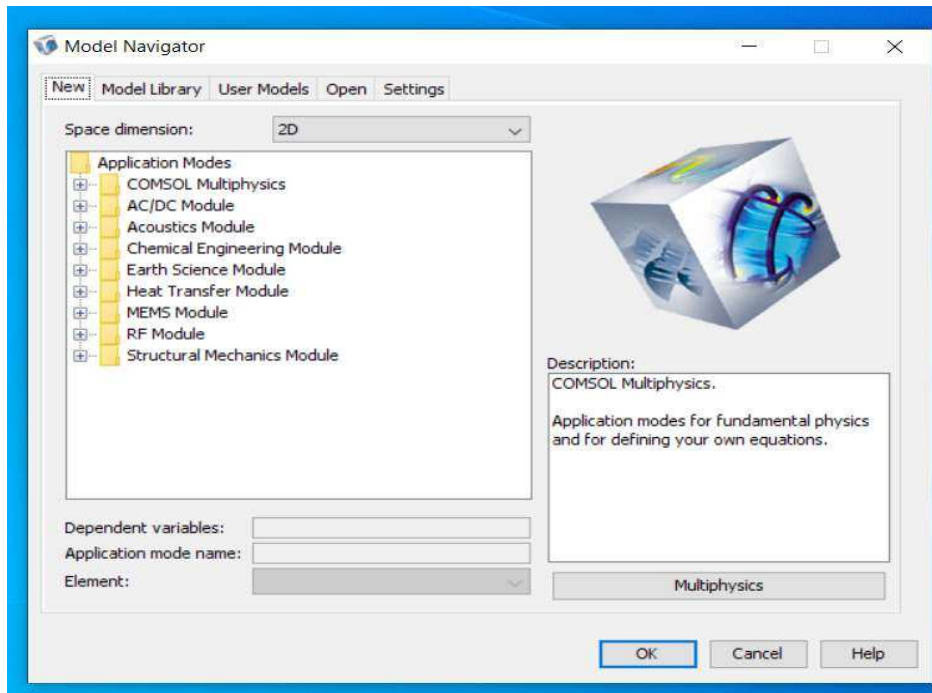
مميزات برنامج COMSOL :

- حل الأنظمة الأحادية والثنائية والثلاثية الأبعاد.
- قدرته على جعل اقتران المجالات ذات الأبعاد المختلفة للمساحة في نفس المشكلة ممكن و هذه المرونة لا تبسط النمذجة فحسب بل تقلل من وقت التنفيذ كذلك.
- توسيع النماذج التقليدية لنوع واحد من الفيزياء إلى نماذج متعددة الفيزياء.

- البنية الرياضية الأساسية فيه هي نظام من المعادلات التفاضلية الجزئية. 3.3

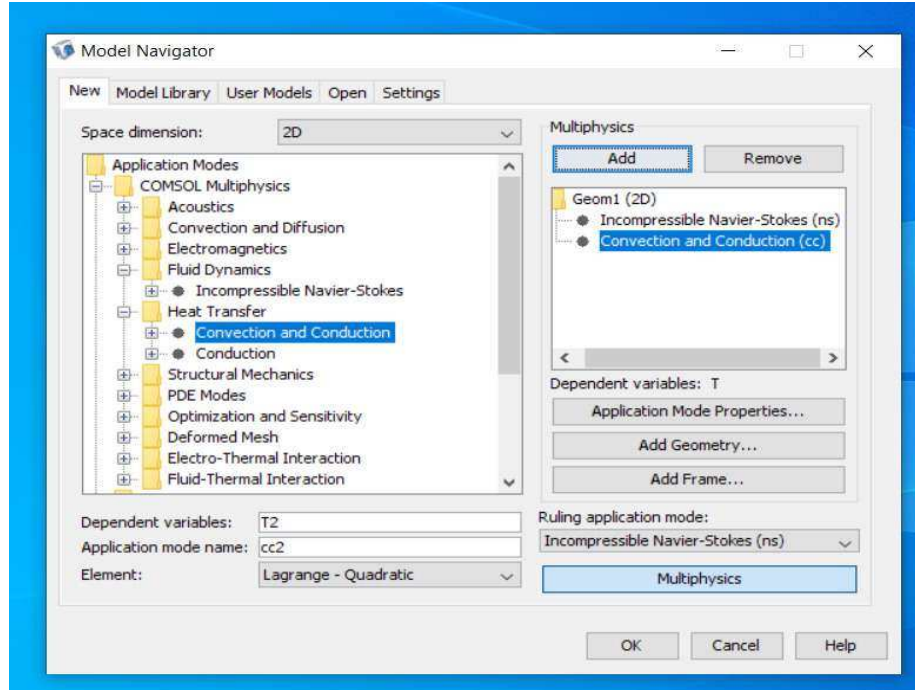
خطوات العمل على برنامج COMSOL :

الخطوة 01 : تشغيل برنامج COMSOL حيث عند بدء تشغيله يتم الاستقبال بواسطة واجهة Model Navigator هنا تبدأ عملية النمذجة والتحكم في جميع إعدادات البرنامج، تتيح لنا تحديد البعد وأنماط التطبيق للبدء في العمل على نموذج جديد، أو فتح نموذج موجود سابقا.



الشكل (1.3): الواجهة Navigator Mode .

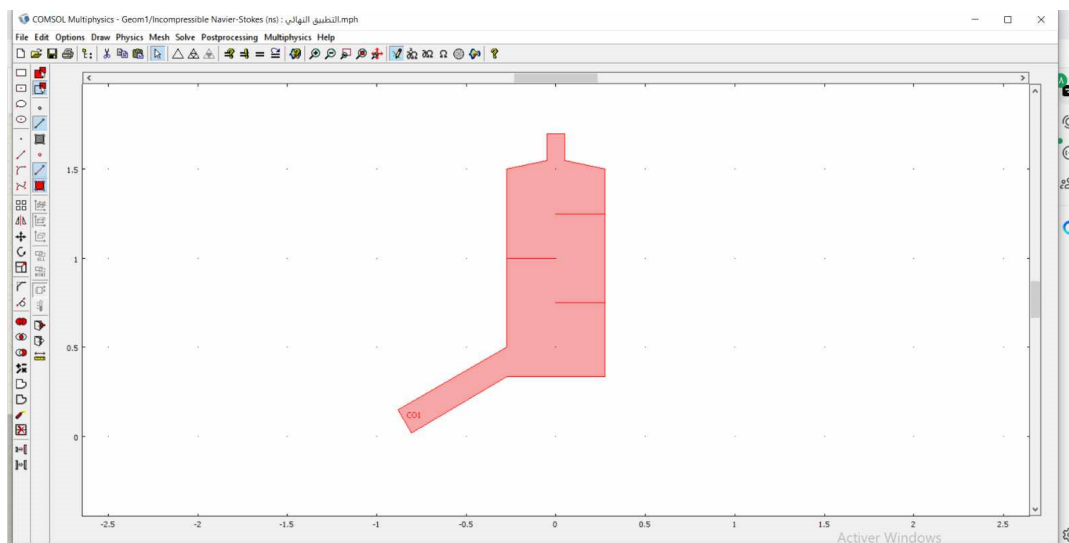
الخطوة 02 : تحديد بعد ونمط التطبيق للنموذج و تتضمن هذه الخطوة اختيار الوضع المناسب وأبعاد الفضاء في حالتنا (D2) وتحديد المتغيرات من Multiphysics



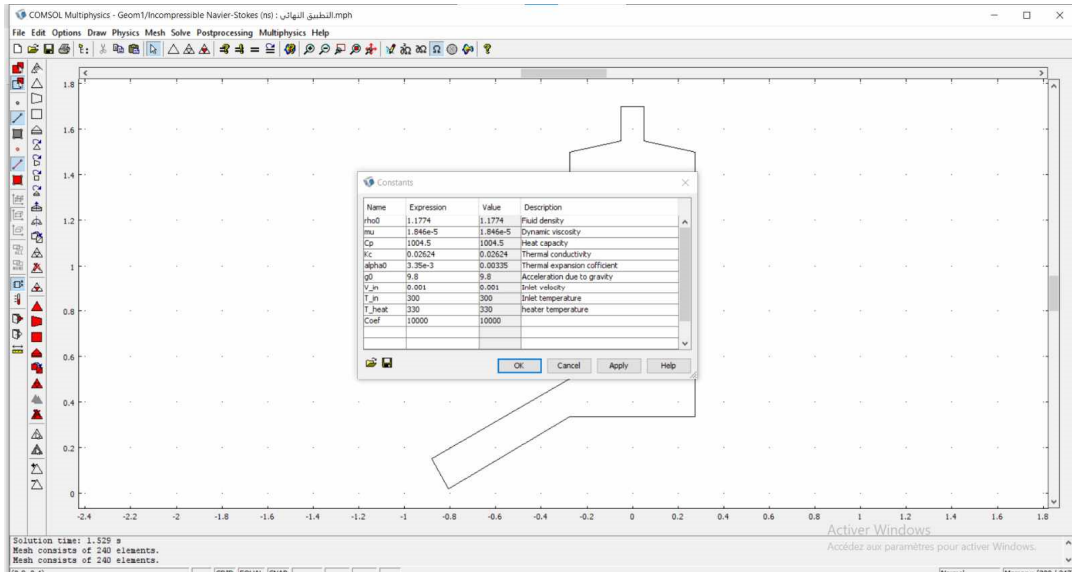
الشكل (2.3): مراحل تحديد بعد ونمط التطبيق للنموذج.

الخطوة 03 :إنشاء الشكل الهندسي .

في هذه المرحلة، يتم إجراء التصميم الهندسي باستخدام الأدوات في قائمة الرسم، عن طريق اختيار نقاط ذات إحداثيات مناسبة، ثم ربطها بخطوط بحيث تشكل هندسة المجفف.



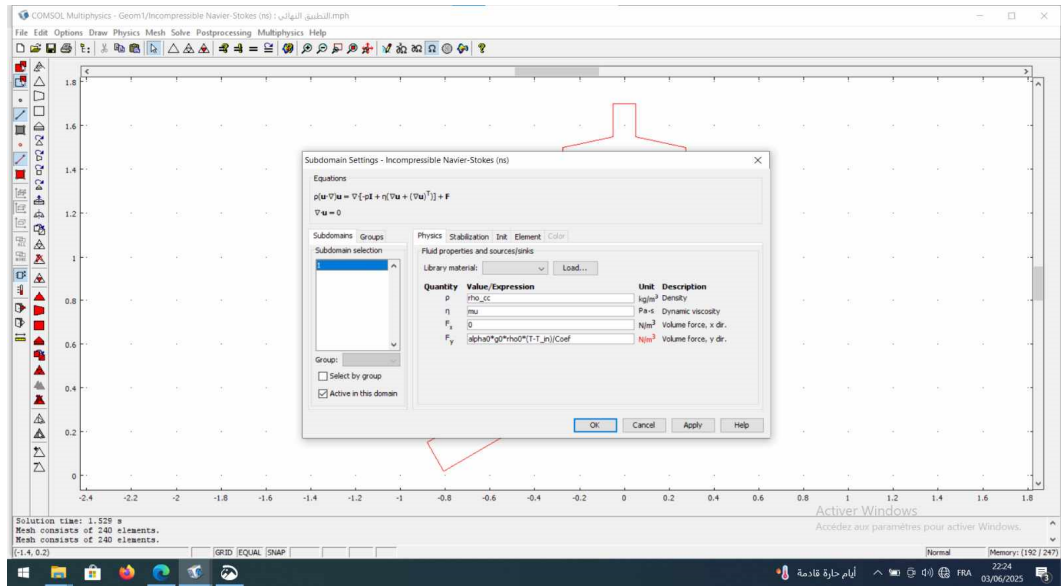
الشكل (3.3): هندسة المجال الفيزيائي.



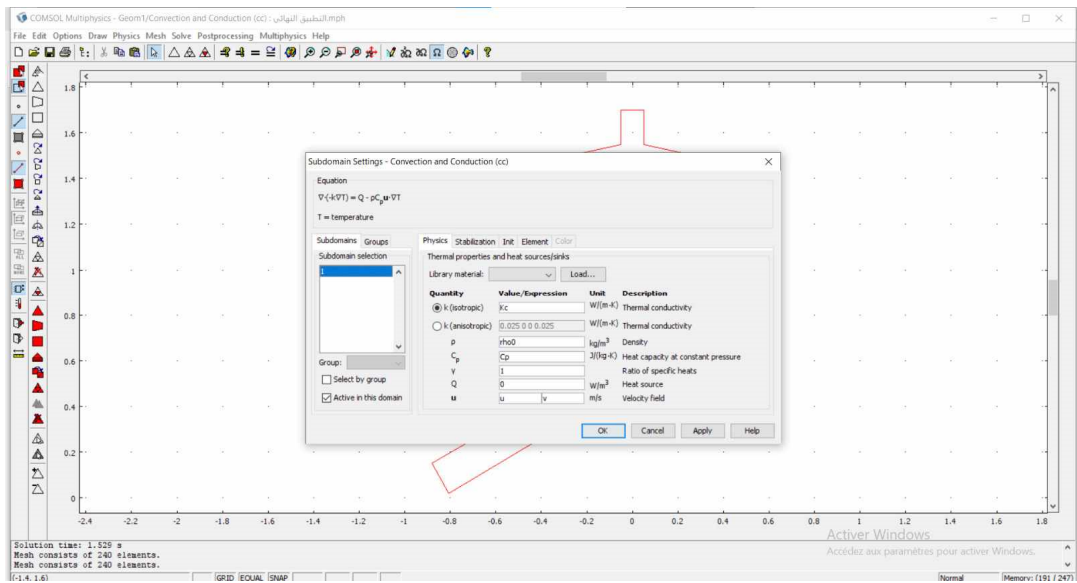
الشكل (4.3): أمر خاص بإدخال الثوابت.

الخطوة 05 : تحديد المعلومات الخاصة بالمجال الفيزيائي لكل نمط .

هذه الخطوة تتضمن تعريف كافة الإعدادات والمعادلات الفيزيائية في النموذج.

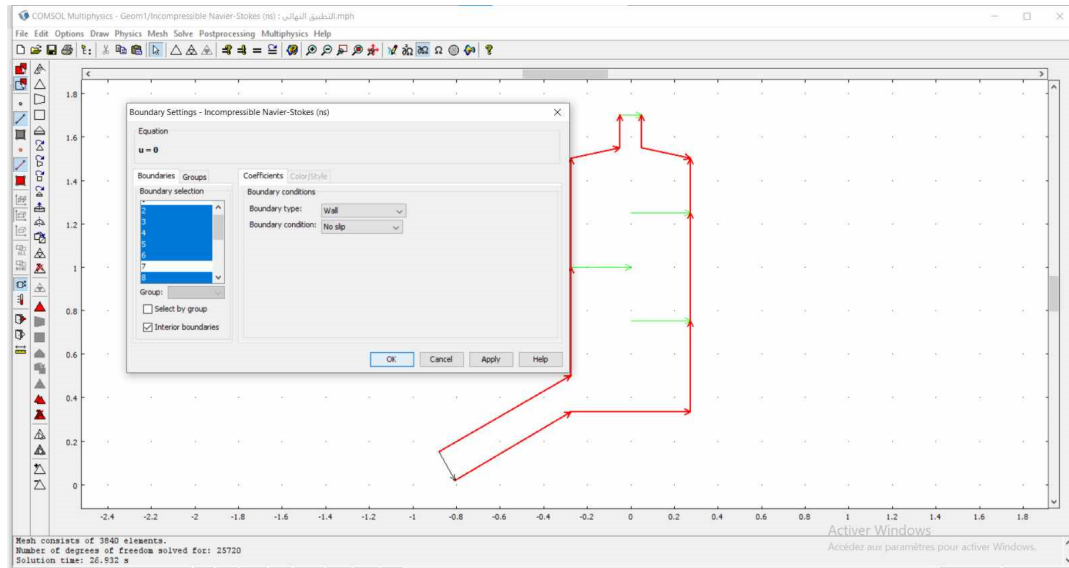


الشكل (5.3): نافذة إعدادات المجال الفرعي في وضع Navier-Stokes.

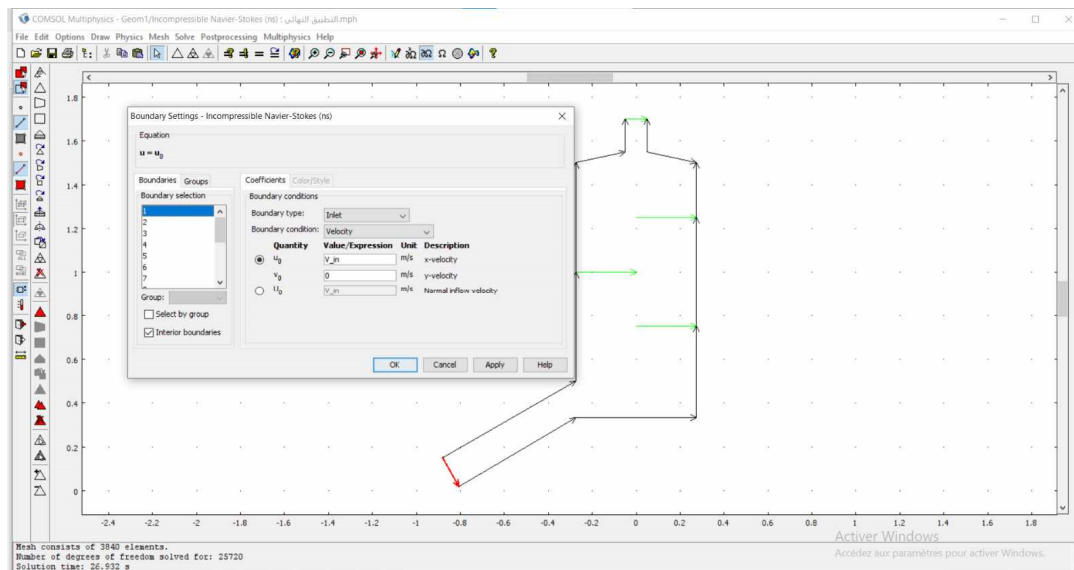


الشكل (6.3): نافذة إعدادات المجال الفرعي.

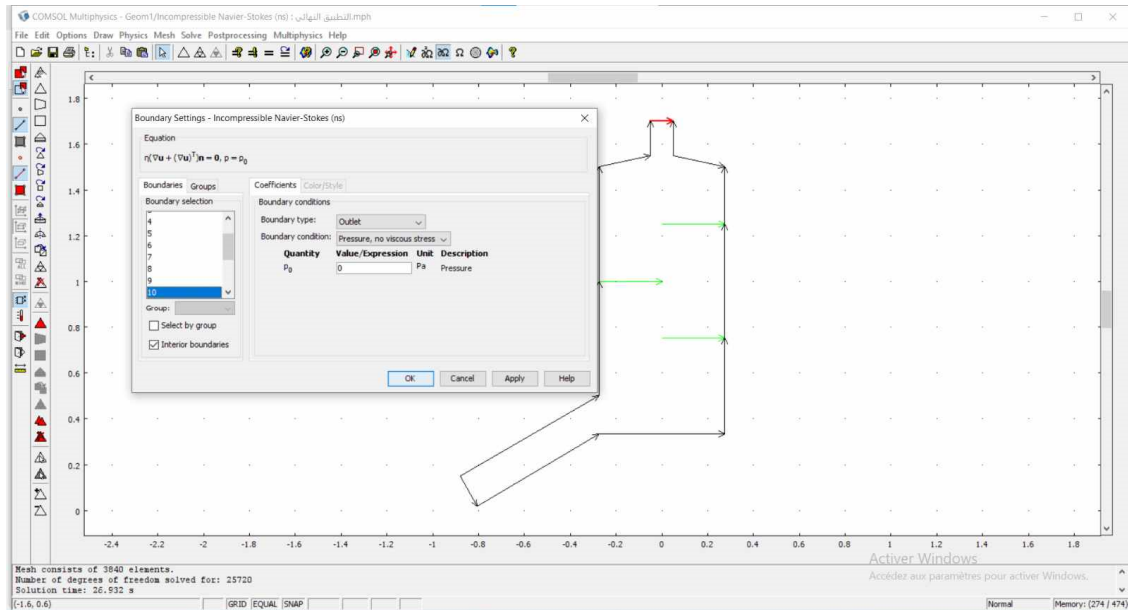
الخطوة 06: تحديد الشروط الحدية (تحديد وظيفة كل سطح وخصائصه) لكل نمط.



الشكل (7.3): تحديد الشروط الحدية للجدران.

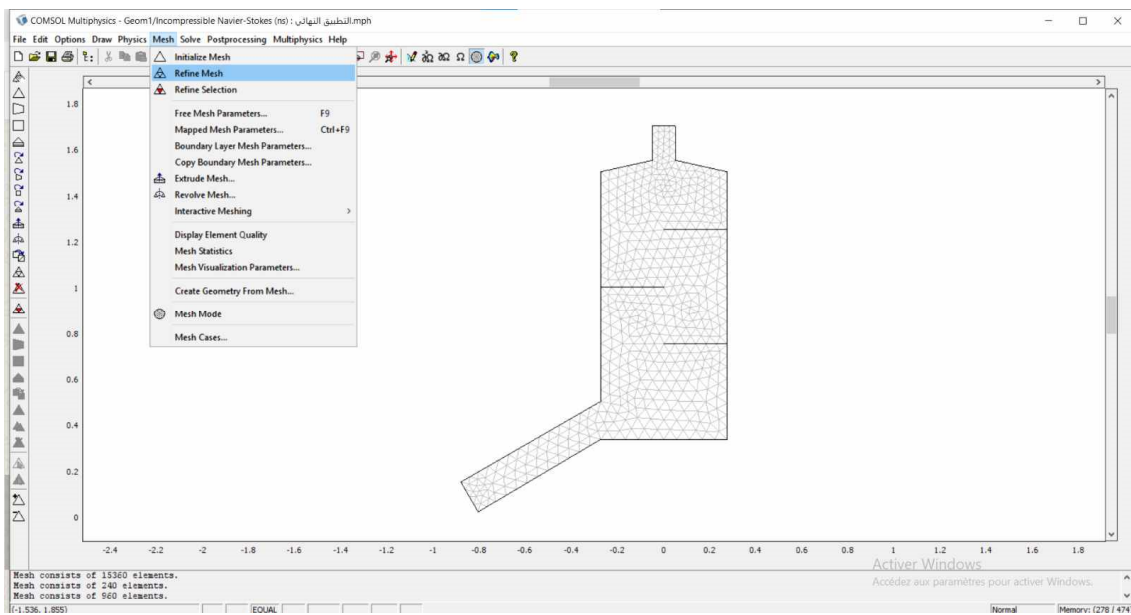


الشكل (8.3): تحديد الشروط الحدية للمدخل.



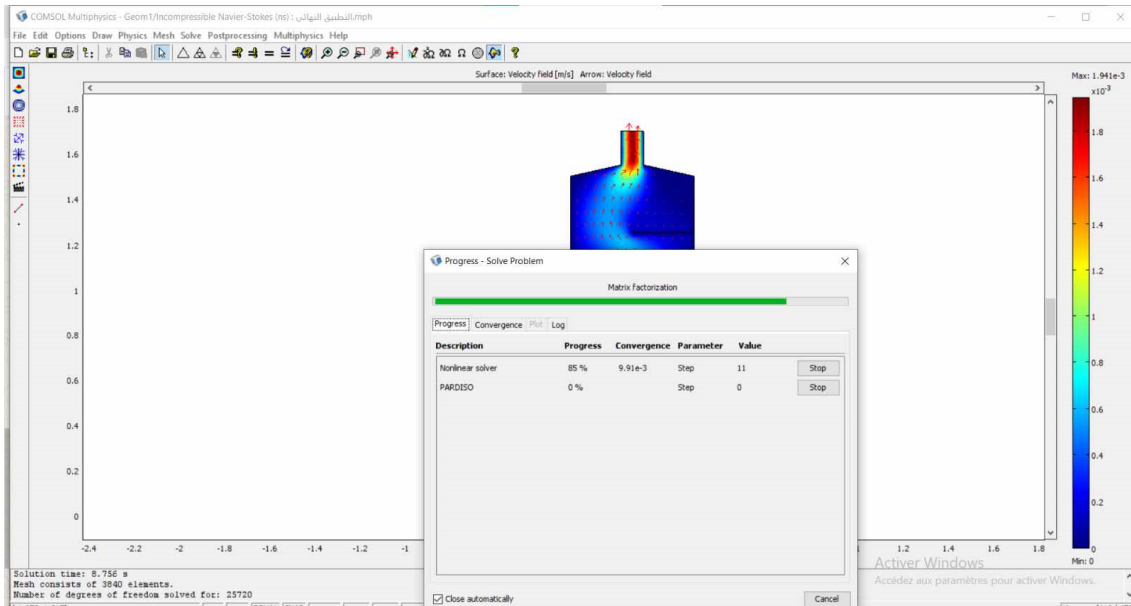
الشكل (9.3): تحديد الشروط الحدية لمخرج الجدران.

الخطوة 07 : تقسيم الحيز الهندسي (Maillage).



الشكل (10.3): إنشاء شبكة تقسيمات المجال الهندسي (Maillage).

الخطوة 08 : حل النموذج الحساب والمعالجة.



الشكل (11.3): نافذة النتائج

الفصل الرابع:
النتائج والمناقشة

1.4 مقدمة:

يتناول هذا الفصل عرضًا شاملاً وتحليلاً معمقاً لنتائج المحاكاة العددية التي تم تنفيذها باستخدام برنامج مختص بنمذجة الجريان وانتقال الحرارة داخل مجفف شمسي. وقد تم توجيه الاهتمام بشكل خاص نحو دراسة سلوك التوزيع الحراري وخصائص تدفق الهواء داخل غرفة التجفيف، باعتبارهما من العوامل المحورية في تحديد جودة وكفاءة عملية التجفيف. تهدف هذه الدراسة إلى تحقيق وسط حراري مثالي يضمن ظروفًا مناسبة لتجفيف المنتجات الزراعية، وذلك من خلال الوصول إلى توزيع متجانس لدرجات الحرارة داخل الحجرة، وتدفق هوائي منتظم وكاف يغطي مختلف مناطق التجفيف.

تُبنى هذه الأهداف على أساسين فيزيائيين رئيسيين، هما:

- الحمل الحراري، الذي يمثل آلية نقل الحرارة عبر الهواء داخل الحجرة نتيجة لاختلاف درجات الحرارة، سواء بشكل طبيعي أو قسري.
 - وظاهرة الاحتباس الحراري، التي تسهم في حبس الحرارة داخل المجفف، مما يؤدي إلى رفع درجة حرارة الوسط الداخلي والحفاظ عليها عند مستوى مناسب.
- من خلال فهم تفاعل هذين المبدئين، يمكن تحسين أداء المجفف الشمسي وتطوير تصميمه بما يحقق أقصى فعالية في نقل الحرارة وتجديد الهواء، وبالتالي رفع كفاءة التجفيف مع الحفاظ على جودة المنتجات.

2.4 الخصائص الهندسية للمجفف محل الدراسة:

تم تصميم المجفف الشمسي على هيئة هيكل صندوقي مزود بجدران معزولة حراريًا بهدف تقليل الفواقد الحرارية وتعزيز كفاءة التجفيف. ويشتمل النظام على غرفة تجفيف مغطاة بغطاء شفاف، ومزودة من الأعلى بمدخنة مستطيلة الشكل تعمل على تصريف الهواء الرطب الناتج

عن عملية التجفيف. أما المجمع الشمسي فقد تم تصميمه على شكل صندوق مغطى بسطح زجاجي شفاف، ما يسمح بالتقاط أكبر قدر ممكن من الإشعاع الشمسي من مختلف الاتجاهات. وقد اعتُبرت قاعدة المجمع سطحًا ممتصًا للحرارة لتحسين تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية تُوظف داخل حجرة التجفيف.

تم اعتماد أبعاد المجفف المدروس بناءً على معايير مستخلصة من نماذج مجففات شمسية تجارية، بالإضافة إلى نتائج الدراسات السابقة والبحوث البيبليوغرافية ذات الصلة، وذلك بهدف ضمان توافق التصميم مع الشروط العملية والوظيفية لعملية التجفيف. كما رُوعي في اختيار الأبعاد إمكانية تصنيع نموذج أولي يُستخدم لاحقًا في تجارب مخبرية وتحاليل تطبيقية للتحقق من فعالية الأداء. ويُعرض في ما يلي ملخص للأبعاد الهندسية المعتمدة في تصميم المجفف.

عرض غرفة التجفيف: 0.55 m

طول غرفة التجفيف: 1m

طول المجمع الشمسي: 0.7m

ارتفاع المجمع الشمسي: 0.35 m

المسافة بين المجمع الزجاجي ومدخل الهواء: 0.15 m

3.4 الخصائص الفيزيائية للمائع (الهواء):

تم اختيار الهواء الجاف كمائع تشغيل في هذه الدراسة، نظرًا لتوفره وسهولة التعامل معه في تطبيقات التجفيف. وقد تم اعتماد خصائصه الفيزيائية عند درجة حرارة مرجعية 25°C ، بحيث تؤخذ بعين الاعتبار الثوابت اللازمة للمحاكاة العددية وهي ملخصة في الجدول الموالي.

اعتمدنا في هذا الفصل على عرض ومناقشة النتائج على مرحلتين: أولها يعتمد على دراسة تأثير عرض فتحة المدخنة على حقل درجات الحرارة وحقل السرعات، وثانيها مقارنة سرعات الهواء عند المخرج مع تغيير عرض فتحة المدخنة.

الجدول (1.4): الخصائص الفيزيائية للهواء عند 25⁰

المائع	الكتلة الحجمية Kg/m ³	اللزوجة الديناميكية Kg/m.s	السعة الحرارية j/kg.k	الناقلية الحرارية W/m.k	معامل التمدد الحراري k ⁻¹	عدد براندت P _r
الهواء	1.184	1.849 10 ⁵	1007	0.02551	3.38 10 ⁻³	0.7296

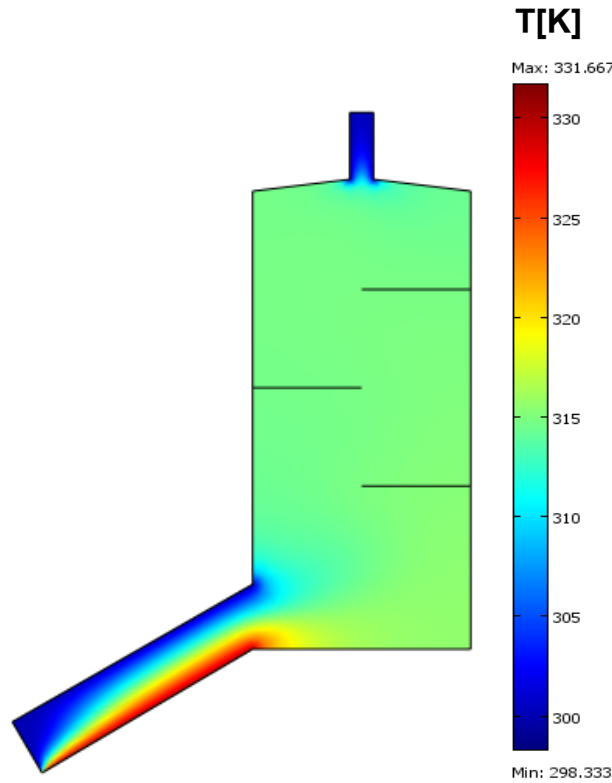
4.4 تأثير عرض فتحة المدخنة على التوزيع الحراري وسرعة الهواء:

تُظهر الأشكال المحاكاة العددية لتوزيع خطوط تساوي الحرارة وحقل السرعات داخل مجفف شمسي، وذلك ضمن ثلاث حالات تختلف فيها الهندسة الهندسية للمدخنة. يتجلى الاختلاف بين الحالات الثلاث في شكل المدخنة، حيث تم اختبار ثلاثة تصاميم مختلفة:

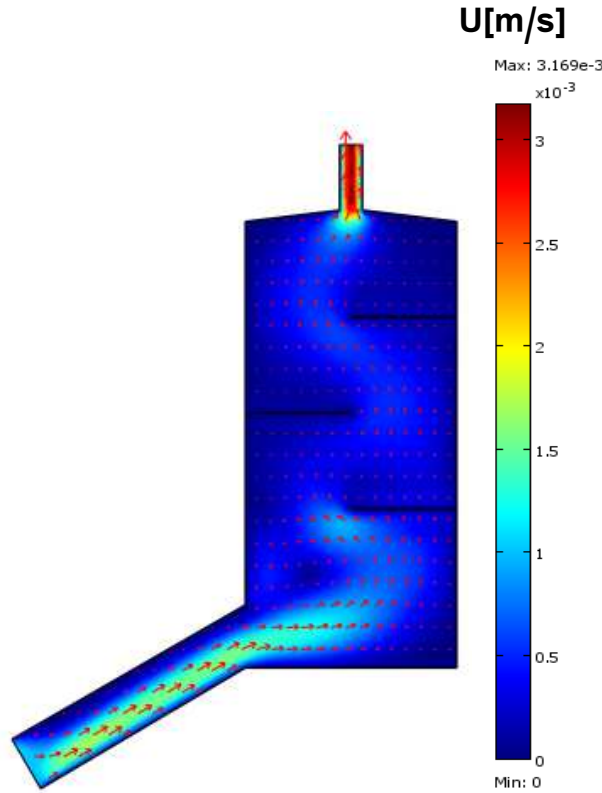
- ✓ المدخنة 1 : مدخنة ضيقة.
- ✓ المدخنة 2 : مدخنة أوسع قليلاً.
- ✓ المدخنة 3 : مدخنة عرض فتحتها واسع.

يظهر الشكل (1.4) الخريطة الحرارية حيث أن الحجرة الداخلية للمجفف تتميز بتدرج لوني شبه موحد، يغلب عليه اللون الأخضر، مما يدل على توزيع حراري متجانس للغاية داخل المجفف. هذا التجانس يشير إلى أن الهواء الساخن يتم سحبه بسرعة وفعالية باتجاه المخرج، دون أن تتشكل مناطق ذات حرارة مرتفعة بشكل محلي، وهو ما يُعتبر دلالة على كفاءة عالية في تصريف الحرارة. شكل المدخنة الضيقة يعزز من ظاهرة السحب الطبيعي، حيث أن فرق الكثافة الحرارية بين الداخل والخارج يزيد من سرعة تدفق الهواء الساخن عبر المدخنة نحو الخارج.

أما في خريطة السرعة الشكل (2.4) فيلاحظ أن الجريان يتجه بوضوح نحو المدخنة، مع انخفاض ملحوظ في حجم الدوامات الداخلية، مما يعني أن الانسياب منظم وأكثر توجيهًا. بالإضافة إلى ذلك، تم تسجيل أعلى سرعة قصوى للجريان في هذه الحالة مقارنة بالحالات الأخرى، مما يدعم كفاءة حركة الهواء الساخن نحو المخرج. هذا السلوك يدل على فعالية هذا التصميم في تعزيز التهوية الداخلية، وتصريف الهواء الساخن بسرعة مما يقلل من الفقد الحراري ويحسن أداء التجفيف داخل المجفف الشمسي.

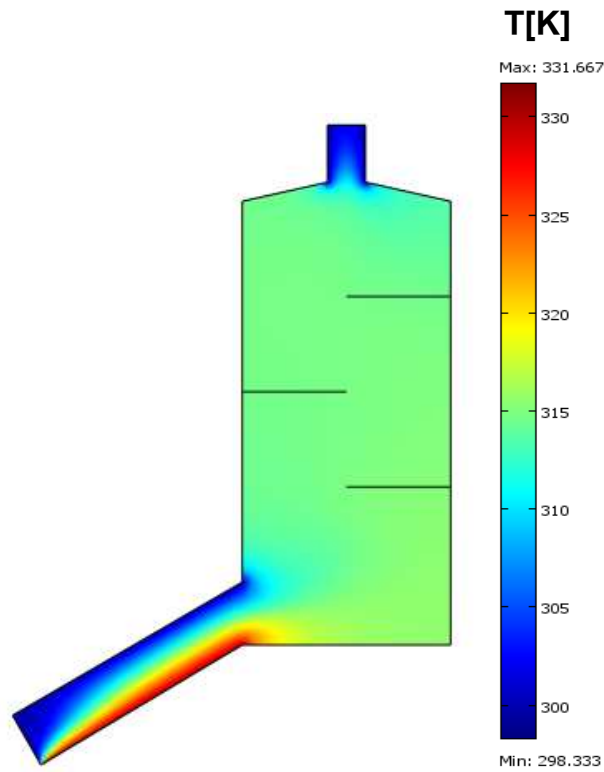


الشكل (1.4) : التوزيع الحراري داخل المجفف الشمسي في حالة استخدام مدخنة 1

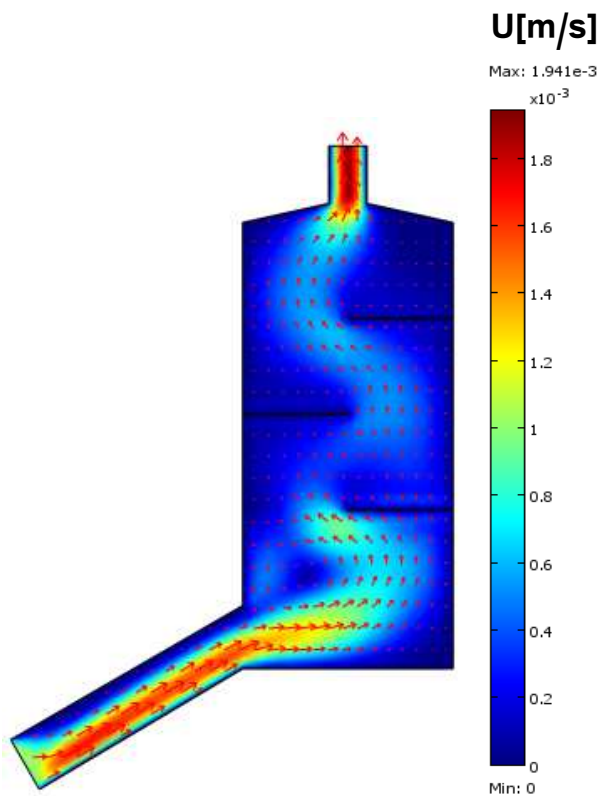


الشكل (2.4) : حقل السرعات داخل المجفف الشمسي في حالة استخدام مدخنة 1

عند الانتقال إلى الحالة الثانية، والتي تتضمن مدخنة أوسع بقليل من سابقتها، نلاحظ من خلال الشكل (3.4) استمرار هيمنة اللون الأخضر داخل الحجرة، وهو مؤشر على أن التجانس الحراري ما يزال جيداً، إلا أن هذا التوزيع يبدو أقل اتساقاً مقارنة بالحالة الأولى للمدخنة 1، حيث أن توسيع عرض فتحة المدخنة ساهم في تقليل تأثير السحب الطبيعي نسبياً مما أدى إلى انخفاض سرعة تصريف الهواء الساخن، وبالتالي بقاء الحرارة لفترة أطول داخل الحجرة . في الشكل (4.4) فيلاحظ أن الجريان أصبح أقل توجيهاً نحو المخرج، مع ظهور دوامات داخلية واضحة، خصوصاً في مناطق ما بين الحواجز. هذه الدوامات تعكس اضطراباً في حركة الهواء وتدفقاً غير منتظم، ما قد يؤدي إلى تقليل كفاءة التجفيف، خاصة في المناطق التي لا تصلها تيارات الهواء المتجددة بشكل فعال. كما أن السرعة القصوى للجريان قد انخفضت مقارنة بالمدخنة الأولى، وهو ما يعكس تراجعاً في كفاءة إخراج الحرارة.



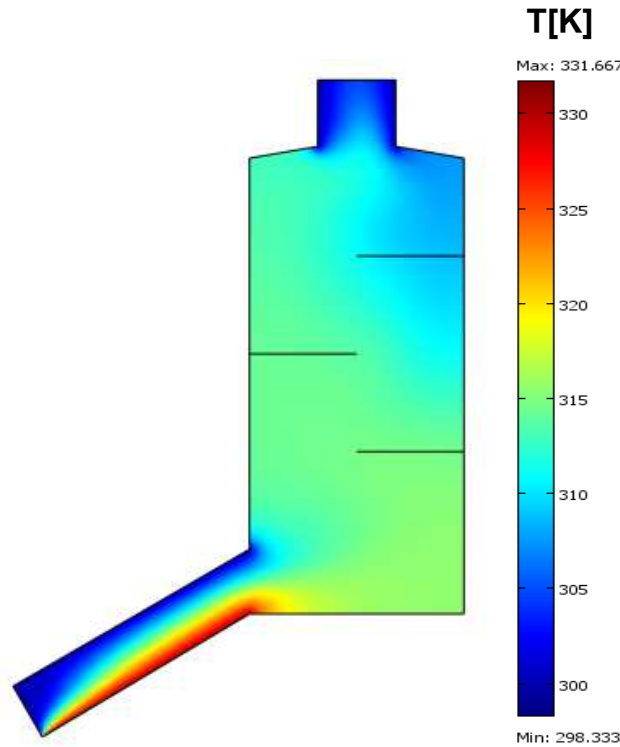
الشكل (3.4): التوزيع الحراري داخل المجفف الشمسي في حالة استخدام مدخنة 2



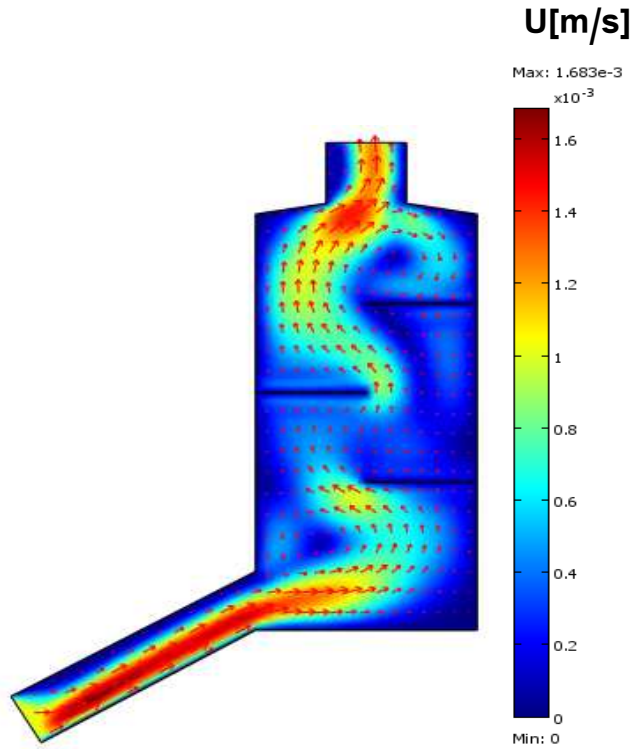
الشكل (4.4): حقل السرعات داخل المجفف الشمسي في حالة استخدام مدخنة 2.

في الشكل (5.4) تدرجاً حرارياً أكثر وضوحاً، حيث تقل سيطرة اللون الأخضر، ويبدأ اللون الأحمر في الظهور قرب منطقة المدخل. هذا يشير إلى تراكم الحرارة في المناطق السفلية من المجفف، نتيجة ضعف عملية السحب الطبيعي. المدخنة الواسعة تتيح خروجاً أبطأ للهواء الساخن، حيث يقل فرق الضغط المؤدي إلى اندفاع الهواء نحو الخارج. وبالتالي، فإن الهواء الساخن يبقى لفترة أطول في الجزء السفلي، ما يؤدي إلى عدم تجانس حراري ملحوظ داخل الحجرة، وهو عامل غير مرغوب فيه في أنظمة التجفيف.

في الشكل (6.4) فنُظهِر أن السرعة القصوى تتركز بشكل واضح عند منطقة المدخل، تتناقص بشكل تدريجي كلما اقتربنا من المخرج، مع زيادة في حجم الدوامات الداخلية. هذه الدوامات تدل على اضطراب في الجريان، وتُعد مؤشراً على وجود مناطق راكدة يمكن أن تعيق انتقال الحرارة وتجدد الهواء، مما يقلل من كفاءة المجفف في هذه الحالة. وبالتالي، فإن شكل المدخنة الواسع لا يساهم بالضرورة في تحسين عملية التجفيف، بل قد يؤدي إلى فقد فعالية التهوية.



الشكل (5.4): التوزيع الحراري داخل المجفف الشمسي في حالة استخدام مدخنة 3



الشكل (6.4): حقل السرعات داخل المجفف الشمسي في حالة استخدام مدخنة 3

IV- 5 مقارنة السرعات عند المخرج بدلالة عرض فتحة المدخنة:

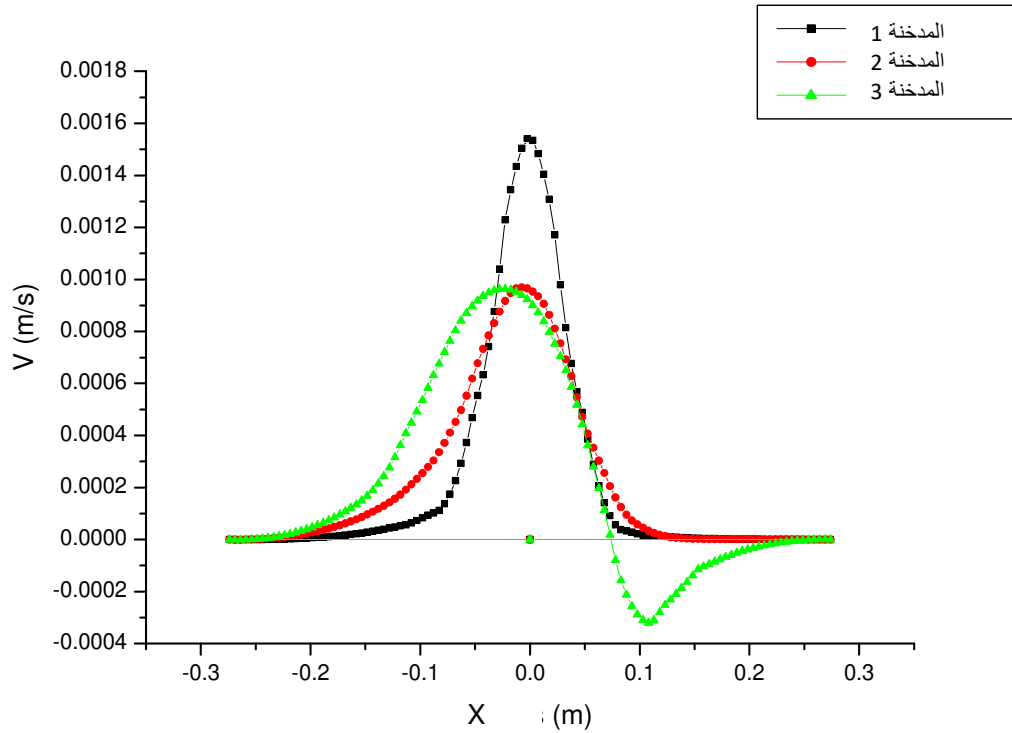
يمثل الشكل المرفق منحنيات السرعة العمودية عند مخرج المدخنة وذلك لثلاث حالات تختلف في قطر فتحة المدخنة. تهدف هذه المقارنة إلى دراسة تأثير شكل المخرج الهندسي على سرعة تدفق الهواء الخارج من المجفف، وهو عامل حاسم في كفاءة التهوية ونقل الحرارة.

من خلال تحليل المنحنيات، نلاحظ أن:

- المدخنة الأولى (اللون الأسود والتي تتميز بأنها أضيق من باقي المداخل، تُظهر أعلى قيمة لسرعة الجريان عند مركز فتحة الخروج. هذه الزيادة الواضحة في السرعة تشير إلى أن تضيق المقطع العرضي للمدخنة يؤدي إلى زيادة تسارع الهواء الخارج بفعل تقليص المساحة المتاحة للجريان. وفقاً لمبدأ الاستمرارية.
- أما المدخنة الثانية (اللون الأحمر، ذات القطر المتوسط، فتُظهر سرعة متوسطة عند المركز، وهي أقل من المدخنة الأولى ومساوية تقريباً لسرعة المدخنة الأوسع. يدل ذلك

على وجود توازن بين المحافظة على الهواء الساخن داخل المجفف لحصول التجفيف وبين القدرة على تدفق مستمر للهواء الرطب وتجده.

- في المقابل، المدخنة الثالثة والتي تمثل أوسع فتحة للدخنة، تُظهر تكون تيار عكسي يرجع الهواء إلى داخل المجفف. ويُعزى هذا السلوك إلى أن المقطع العرضي الكبير يسمح بمرور كمية هواء كبيرة بسرعة أقل الهواء بحرية أكبر وبالتالي تتناقص درجة حرارة عند المدخنة وتتكون تيارات معاكسة نتيجة الحمل الحراري هذا ينعكس سلبيًا على كفاءة التهوية، خاصة في أنظمة تعتمد على السحب الطبيعي.



الشكل (7.4): منحنى بياني لمقارنة سرعة الهواء عند مخرج غرفة التجفيف

الخاتمة

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة سلوك التوزيع الحراري وخصائص تدفق الهواء داخل غرفة تجفيف لمجفف شمسي غير مباشر مع التركيز على تأثير الخصائص الهندسية للمدخنة باعتبارها عنصراً أساسياً في تعزيز السحب الطبيعي وتحسين كفاءة التجفيف.

أظهرت نتائج المحاكاة أن توزيع درجة حرارة داخل غرفة التجفيف أكثر انتظاماً وشمولاً في حالة المدخنة الأولى و الثانية حيث تبلغ القيمة المتوسطة لدرجة الحرارة في الغرفة حوالي 318 K و مع زيادة فتحة المدخنة في الحالة الأخيرة انخفضت درجة الحرارة المتوسطة إلى 312 K مع توزيع غير متجانس للحرارة داخل غرفة التجفيف خاصة في جزئها العلوي ما يدل على أن الخصائص الهندسية للمدخنة تؤثر على التوزيع الحراري كما و كيفاً. في المقابل لوحظ تأثير واضح على سرعة تدفق الهواء والذي يلعب دوراً مهماً في عملية التجفيف؛ حيث سجلت المدخنة الأولى سرعة قصوى للهواء عبر المدخنة بلغت 0.00155 m/s مقارنة بالمدخنة الثانية والثالثة حيث أن سرعتهم متساوية تقريباً تقدر ب 0.001 m/s.

يظهر منحنى السرعة للمدخنة الثالثة أن هناك تيار عكسي للهواء الرطب إلى داخل المجفف وهذا يعود سلباً على نتائج عملية التجفيف.

إن أهمية هذه النتائج تكمن في إبراز دور التصميم الهندسي للمدخنة كعامل حاسم في تحسين أداء المجففات الشمسية حيث أن التحكم في أبعادها يسمح بتحقيق توازن أفضل بين التوزيع الحراري وسرعة تدفق الهواء وبالتالي توفير وسط حراري ملائم لتجفيف المنتجات الزراعية بكفاءة أكبر.

وفي ضوء ما سبق يُقترح في الأعمال المستقبلية ما يلي:

- إدماج نماذج انتقال الرطوبة داخل المادة الغذائية لتقدير فعالية التجفيف بدقة أكبر.
- دراسة تأثير مواد البناء وزاوية ميل المدخنة على الأداء الحراري والهوائي للمجفف.
- إجراء تحليل اقتصادي لمقارنة جدوى التصميمات المختلفة من حيث التكلفة والكفاءة.

وبذلك خلصت الدراسة إلى أن تحسين تصميم المدخنة خصوصًا من حيث الأبعاد الهندسية لمختلف مكونات المجفف يشكل خطوة فعالة نحو تطوير مجففات شمسية أكثر كفاءة وملاءمة للظروف المناخية المحلية، مما يساهم في دعم استراتيجيات الطاقات المتجددة وحفظ المنتجات الزراعية بطرق طبيعية واقتصادية.

قائمة المراجع

- [1] تكنولوجيا حفظ الأغذية، حسين عبد القادر، جامعة عين شمس.
- [2] كتاب : تكنولوجيا تجفيف الفواكه و الخُضَر و الأزهار، تأليف غالب نصّار الشهري. 2024
- [3] Boussalia Amar, Contribution à L'étude de séchage solaire de produits agricoles locaux, diplôme de magister. Université mentouri – Constantine. Alegrie. 2010
- [4] مختار العاتي، المساهمة في تحسين مجفف شمسي للمحاصيل الزراعية ، رسالة ماجستير ، جامعة قاصدي مرباح ورقلة ، الجزائر ، 2011 م .
- [5] أ.د نصر أبو فول ، التجميد والتجفيف ، مركز العمل التنموي/ معا ، الطبعة الأولى ، غزة- 2009 م.
- [6] محمد سليم أشنبه، رنا ماجد جاموس، التجفيف الشمسي للفواكه والخضروات، مركز ابحاث التنزع الحيوي والبيئة، نابلس فلسطين (2016).
- [7]Rechia Messaoudi .Hayat Bcadi, "étude théorique du séchage solaire directe. Université Ahmed draia –Adrar. Mémoire de master, 2021
- [8] Cheradide, Y., Chouicha, S., & Boubekri, A. (2015, 22–24 nov.). *Étude théorique du séchage solaire direct*. 5^e Séminaire Maghrébin sur les Sciences et les Technologies du Séchage (SMSTS'2015), Faculté des Sciences Appliquées, Université Kasdi Merbah — Ouargla, Algérie
- [9]Ahmed BAHADJ,"Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre», Mémoire de Master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla ,Algerie ,2014.
- [10] كتيب فني : المجففات الشمسية ، اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا (الإسكوا) (E/ESCWA/CL1.CCS/2021/BOOKLET.6).بيروت، لبنان: الإسكوا.2021
- [11] قادري شهرة، دراسة مقارنة تجريبية وعددية لانتقال الحرارة في المجفف الشمسي، مذكرة تخرج ماستر أكاديمي علوم المادة، جامعة الشهيد حمة لخضر ،2019.
- [12] محمود عبد الرحمن ياسين، تطوير وفحص أداء مجفف شمسي هجين لتجفيف المحاصيل الزراعية في العراق، وزارة التعليم العالي والبحث العلمي جامعة تكريت كلية الهندسة، 2020.
- [13] كاخيا، طارق إسماعيل. (بدون تاريخ) *الكيمياء الصناعية — الجزء الأول: تكنولوجيا الصناعات الكيميائية اللاعضوية* (سلسلة: علم الكيمياء، الكتاب السادس). ص. 22..
- [14] أ.د نصر أبو فول ، التجميد والتجفيف ، مركز العمل التنموي/ معا ، الطبعة الأولى ، غزة- 2009 م.

- [15] منصر لنده، العبيد سندس، توزيع درجة الحرارة في المجفف الشمسي، جامعة شهيد حمة لخضر بالوادي، كلية علوم دقيقة، مذكرة تخرج ماستر أكاديمي، 2018.
- [16] م. حمد الفارس ، الطاقة الشمسية ،مجلة العلوم و التقنية ، الجزء الأول العدد 34 ISSN10173056. ربيع آخر 1416هـ/ سبتمبر 1995م.
- [17] Mounir Boukerche. « Eudes expérimentale da séchage solaire par convection naturelle », Master, Université Mohamed Kheider de Biskra (2019)
- [18] Bouguetit Mohamuned. Bougoffa Sassi, « Etude expérimentale et théorique d'un séchoir solaire convectif direct », mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla (2019)
- [19] Souheyla Yalana Khaldi. « Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un bain thermique pour le stockage d'énergie, Thèse de Doctorat de l'université Bourgogne Franche-Comté, (2018)
- [20] Halassa Daoud « Contribution à l'étude du transfert thermique dans un capteur solaire, application au séchoir solaire pour produits agricoles ». Thèse de Doctorat, université Yahia Farès de Médéa (2020)
- [21] Bessa M. M., Bakheti Djouadi, « Etude d'un séchoir solaire intégré au bâtiment, Mémoire de Master, université Mohamed Boudiaf. M'sila (2023)
- [22] Mecheri Ayoub & Kouici Abdessalam, « Etude d'amélioration de l'homogénéité du champ thermique dans un séchoir solaire en utilisant la méthode des plans d'expériences » (mémoire de Master). Université Kasdi Merbah – Ouargla, Algérie. (2019).
- [23] Lakhdar D., « Conception et étude d'un séchoir solaire », Mémoire de Master, Université Ziane Achour, Djelfa (2022).
- [24] Kancane, B., & Truita, A. Étude et amélioration de l'efficacité énergétique d'un séchoir solaire direct à convection naturelle. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ouargla. (2017).
- [25] Menali Amira, Sifos Amina, « Etude expérimentale d'un séchoir à convection », Mémoire de Master, université Abdelhamid ibn Badis, Mostaganem (2023)
- [26] Geben micheal, Gedion Hahtay. "Performance evaluation of solar chimney applied for drying processes", PhD Thesis, Hungarian university of agriculture and life sciences (2022)
- [27] Ahmed Djebl, « Etude Numérique et Expérimentale d'un Séchoir Solaire Mixte Application au Séchage des Produits Alimentaires », Thèse de Doctorat, université Yahia Fares de Médéa (2019)

[28] Maatallah karim, Terra Rokaya, « Etude et réalisation d'un séchoir solaire destiné pour le séchage des boues des stations d'épurations urbaines », Diplôme d'ingénieur d'état université Kasdi Merbah, Ouargla (2019)

[29] Boubeghal, A, et al., « Etude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection Naturelle » Revue des Energies Renouvelables ICRES-07, Tlemcen (2007), pp.315-320

[30] كثيرة عيد بكوش بشير نصري عبد الحميد النجار مجفف الشمسي من أجل تحسين جودة المحاصيل الزراعية. مذكرة ماستر، جامعة الشهيد منه العصر الولادي (2023)

[31] Mannonche, D, et al « Séchage solaire de la tomate dans un séchoir indirect a convection naturelle », conférence internationale sur le génie des procédés, Bejaia, 2007

[32] Mazzone Ismahan, Taourit Mohammed el Amine, « Modélisation et amélioration des performances d'un séchoir salaire indirect à convection naturelle, Mémoire de Master, université A. Belkaid. Tlemcen 2021

ملخص

يتناول هذا العمل دراسة السلوك الحراري داخل مجفف شمسي يعتمد على الحمل الحراري الطبيعي، حيث تم إنجاز نمذجة رياضية تضمنت معادلة الاستمرارية ومعادلات الحركة والطاقة في الإحداثيات الديكارتية بالاعتماد على تقريب بوسينسك. كما ركزت الدراسة على تأثير فتحة المدخنة في كل من مجال السرعات ومجال درجات الحرارة، إضافة إلى مقارنة سرعة الهواء عند المخرج مع اختلاف أبعاد هذه الفتحة. وقد أُنجزت هذه الدراسة من خلال محاكاة عددية باستخدام برنامج Comsol Multiphysics، وأظهرت النتائج أن كفاءة وأداء المجفف الشمسي يرتبطان بشكل وثيق بسرعة الهواء الخارج عبر المدخنة ودرجة الحرارة المتوسطة داخل المجفف اللذان يتأثران بالخصائص الهندسية للمدخنة.

❏ **كلمات مفتاحية:** المجفف الشمسي، الحمل الحراري الطبيعي، محاكاة عددية.

Abstract

This work studies the thermal behaviour inside a solar dryer operating by natural convection. A mathematical model is developed, including the continuity equation, the equations of motion and the energy equations in Cartesian coordinates, using the Boussinesq approximation. The study also focused on the effect of the chimney opening on the velocity and temperature fields with a comparison of the air velocity at the outlet for different opening dimensions. This study is carried using Comsol Multiphysics software. The results showed that the efficiency and performance of the solar dryer are closely related to the velocity and temperature of the outgoing air, which are directly influenced by the geometric characteristics of the chimney.

Keywords: Solar dryer, natural convection, numerical simulation.

Résumé

Ce travail étudie le comportement thermique à l'intérieur d'un séchoir solaire fonctionnant par convection naturelle. Un modèle mathématique a été réalisé, incluant l'équation de continuité, les équations du mouvement et les équations d'énergie en coordonnées cartésiennes, en utilisant l'approximation de Boussinesq. L'étude s'est également concentrée sur l'effet de l'ouverture de la cheminée sur les champs de vitesses et de températures avec une comparaison de la vitesse de l'air à la sortie pour différentes dimensions d'ouverture. Cette étude a été réalisée par le logiciel Comsol Multiphysics. Les résultats ont montré que l'efficacité et les performances du séchoir solaire sont étroitement liées à la vitesse et la température de l'air sortant qui sont influencées directement par les caractéristiques géométriques de la cheminée.

Mots-clés : séchoir solaire, convection naturelle, simulation numérique.