

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

رقم الترتيب:

رقم التسلسل:



جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي
كلية العلوم الدقيقة
قسم: الفيزياء
مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة



ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة
تخصص: فيزياء تطبيقية إشعاعات وطاقة
من إعداد:

يمبعي قمره - خيارى إكرام

الموضوع

تأثير مواد التخزين الحراري على أداء المجفف الشمسي غير المباشر
دراسة تطبيقية على الفلفل الحار

نوقشت يوم: 2025/05/29

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

رئيساً	جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي	أستاذ محاضر - أ -	- عسكري سهيلة
مناقشاً	جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي	أستاذ محاضر - ب -	- خلفاوي فضيلة
مؤطراً	جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي	أستاذ محاضر - أ -	- تيوه بلخير

الموسم الجامعي 2025/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الأمم

❀ **إهداء من نبض القلب...** ❀

إلى من كانت حكمته نبراس طريقي، وكلماته زادي في لحظات التردد...

إلى والدي العزيز، شكرًا لك على النصائح التي حفرت في قلبي أثرًا، وعلى دعمك الثابت الذي كان عونًا لا يُقدَّر بثمن.

(محمد الحافظ)

إلى نبع الحنان، ودفء الروح، وسكينة الأيام...

إلى والدتي الغالية، دمت لي دعاءً لا ينقطع، ورضًا لا يزول.

(خديجة تجاني)

إلى أخواتي (حميدة، أسماء، وفاء، سهام، هالة) وابنائهم وازواجهم وإلى أخي وزوجته (زهير، أمينة تجاني) وابنائهم شركاء البهجة والدعم الدائم...

لكم في قلبي محبة لا توصف، وامتنان لا ينتهي.

وإلى صديقتي الوفية، مرآة روحي ورفيقة دربي... **

أنتِ الأخت التي لم تلدها أمي، وواحة الصدق في عالم مزدحم.

شكرًا لأنك كنتِ دائمًا هناك، قلبًا محبًا، ويدًا حانية.

(إكرام خيار)

قمره يمبي



الإهداء

❀ **إهداء من نبض القلب...** ❀

إلى والدي الغالي، نبض الحكمة وسند الحياة...

كل كلمة نطقت بها كانت نورًا يرشدني، وكل نصيحة منك كانت طوق نجاة.
شكرًا لأنك كنت دائمًا صوت العقل، ورفيق الدعاء. دمت لي عزًا وفخرًا، ورفعك الله في الدنيا والآخرة
مقامًا.

(عبد الفتاح خيارى)

إلى والدي الحبيبة، جنة أيامي ومصدر سعادتي...

في حنانك وجدت الراحة، وفي دعائك وجدت البركة.
أنت الدعاء المستجاب، والنعمة التي لا تُقدَّر بثمن... حفظك الله لي، وأدامك نورًا لا يخبو.

إلى زوجي العزيز، سكني وطمأنيني...

أنت اليقين بعد القلق، والفرح بعد التعب.
بك يهدأ قلبي، ومعك يحلو الطريق... رزقني الله بك نعمة لا أحصي شكرها.

(عبد الكريم صحراوي)

إلى إخوتي وأخواتي، نبضي الثاني ورفقة روعي...

أنتم أجمل الأقدار، وضحكتكم بلسم لأيامي.
فيكم السند الحقيقي، وفي وجودكم أمان لا يُشبهه شيء... دمتم لي دائمًا.

وإلى صديقتي الوفية، مرآة روعي ورفيقة دربي...

أنت الأخت التي لم تلدها أمي، وواحة الصدق في عالم مزدحم.
شكرًا لأنك كنت دائمًا هناك، قلبًا محبًا، ويدًا حانية.

(قمره يمبجي)

(إكرام خيارى)



شكر وإقصاد

"ومن لم يشكر الناس لم يشكر الله"

الحمد لله رب العالمين الذي أنار دربنا ووفقنا لإتمام هذا العمل، والصلاة والسلام على خير البشر سيدنا محمد وعلى آله وصحبه الكرام.

في هذه اللحظة المميزة، نقف بين يدي الله **شاكرتين معترفتين** بفضلته وكرمه، فهو الذي يسر لنا السبيل ومنحنا القوة والإصرار لنصل إلى هذه المحطة المهمة في مسيرتنا العلمية.

نتوجه بأسمى آيات الشكر والعرفان إلى الأستاذ الدكتور "تيوه بلخير" الذي كان نبراساً ينيّر طريقنا، وصبر على توجيهنا وإرشادنا بكل حب وتفان. كانت ملاحظاته القيمة ونصائحه الثمينة بمثابة الدليل الذي أوصلنا إلى بر الأمان.

كما نودوا ان نشكر " محمد الصالح موساوي " على تعاونه معنا طيلة العمل ولم يبخل علينا بوقته وجهده

كما نتقدم بجزيل الشكر لأعضاء **لجنة المناقشة الموقرة** : * [عسكري سهيلة وخلفاوي فضيلة] * الذين تفضلوا بتخصيص وقتهم الثمين لمراجعة عملي وإثرائه بملاحظاتهم البناءة وتوجيهاتهم السديدة.

كما نتوجه بالشكر الجزيل إلى ** مركز وحدة البحث وتطوير الطاقات المتجددة في المناطق القاحلة الكائنة** الذي فتح لنا أبوابه ووفر لنا البيئة المثالية للبحث والدراسة، ونشكر جميع العاملين فيه على تعاونهم المثمر

* اختتاماً**، ندعو الله العلي القدير أن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم، وأن ينفع به طلاب العلم والباحثين، وأن يكون إضافة حقيقية للمكتبة العربية والإسلامية.

< * "وما توفيقي إلا بالله عليه توكلت وإليه أنيب" *

* مع خالص الشكر والتقدير *

"اكرام خيارى ،قمره يمبى"



فهرس المحتويات

I.....	الإهداء.....
II.....	شكر وتقدير.....
IV.....	فهرس المحتويات.....
VIII.....	فهرس الأشكال.....
X.....	فهرس الجداول.....
XI.....	فهرس الرموز.....
1.....	المقدمة العامة.....
3.....	قائمة مراجع المقدمة العامة.....

الفصل الأول: مفاهيم عامة حول التجفيف الشمسي

4.....	1.I. مقدمة.....
4.....	2.I. تعريف التجفيف.....
4.....	3.I. تصنيف المجففات الشمسية.....
5.....	1.3.I. المجففات الشمسية المباشرة.....
5.....	1.1.3.I. مزايا المجففات المباشرة.....
6.....	2.1.3.I. عيوب المجففات الشمسية المباشرة.....
6.....	2.3.I. المجففات الشمسية غير المباشرة.....
7.....	1.2.3.I. مزايا المجففات الشمسية غير المباشرة.....
7.....	2.2.3.I. عيوب المجففات الشمسية غير المباشرة.....
8.....	3.3.I. المجففات الشمسية الهجينة.....
8.....	1.3.3.I. مزايا المجففات الشمسية الهجينة.....
9.....	2.3.3.I. سلبيات المجففات الشمسية الهجينة.....
9.....	4.3.I. المجففات الشمسية المختلطة.....
10.....	4.I. أكثر الطرق تجفيف شيوعا.....

10	1.4.I. المجففات الشمسية الطبيعية (مجففات الهواء الطلق)
10	1.1.4.I. مزايا التجفيف الشمسي الطبيعي
11	2.1.4.I. عيوب المجففات الشمسية الطبيعية
11	2.4.I. المجففات الصناعية
12	1.2.4.I. مزايا المجففات الصناعية
12	2.2.4.I. عيوب المجففات الصناعية
12	3.4.I. أنواع المجففات الصناعية
12	1.3.4.I. مجففات الانفاق
13	2.3.4.I. مجففات الرذاذ
14	3.3.4.I. المجففات الأسطوانية
14	4.3.4.I. مجففات الضغط المنخفض
15	5.3.4.I. مجففات تعتمد على الطاقة الناتجة عن الموجات القصيرة
15	5.I. أنظمة تدفق الهواء في المجففات الشمسية
15	1.5.I. مجففات الحمل الطبيعية
16	2.5.I. مجففات الحمل القسري
17	6.I. طرق حفظ الأغذية المجففة
18	7.I. الشروط اللازمة للحصول على أعلى قيمة غذائية للمنتج المجفف
18	8.I. تخزين الأطعمة المجففة
19	9.I. الخاتمة
20	قائمة مراجع الفصل الأول
الفصل الثاني: الدراسة التجريبية	
22	1.II. مقدمة
22	2.II. المجفف الشمسي غير المباشر المستخدم في الدراسة

22	3.II مكونات المجفف الشمسي وتصميمه
23	1.3.II الهيكل الداعم (Support Structure)
23	2.3.II غرفة التجفيف (Drying Chamber)
24	3.3.II وحدة المجمع الشمسي (Solar Collector Unit)
26	4.II أجهزة القياس المستخدمة
27	5.II التجربة
27	1.5.II تركيب المجفف الشمسي
28	2.5.II تحضير المستقبل (المجمع) الشمسي
29	3.5.II اعداد صفيحة المستقبل (خليط الحصى وبرادة الألمنيوم)
31	4.5.II تركيب المستشعرات الحرارية
31	1.4.5.II تثبيت المستشعرات الحرارية وتوزيعها
32	5.5.II تحضير العينات
32	1.5.5.II مراحل تحضير العينات
32	1.1.5.5.II الوزن المستهدف أثناء التجفيف الشمسي غير المباشر
33	2.1.5.5.II قياس المعلمات الأولية لتجفيف
33	1.2.1.5.5.II وزن المنتج الطازج ($W_{initial}$)
34	2.2.1.5.5.II تحديد محتوى الرطوبة الأولي ($MC_{initial}$)
35	3.2.1.5.5.II تحديد الوزن النهائي المجفف W_{final}
35	6.5.II تنفيذ التجربة ومراقبة بارامترات التجفيف
36	6.II الخاتمة
37	قائمة مراجع الفصل الثاني

الفصل الثالث: دراسة النتائج التجريبية ومناقشتها

39	1.III. مقدمة
39	2.III. النتائج التجريبية ومناقشتها
39	1.2.III. شدة الإشعاع الشمسي بدلالة الزمن
40	2.2.III. تغير درجات الحرارة بدلالة الزمن
41	3.2.III. تحليل يربط بين شدة الإشعاع والاستجابة الحرارية للمجمعين
42	4.2.III. تحليل الفرق الحراري بين مدخل المجفف ومدخل غرفة التجفيف
43	5.2.III. الرطوبة وتغير الكتلة بدلالة الزمن
45	6.2.III. تحليل أداء المجففين غير المباشرين باستخدام معدل التجفيف (Drying Rate)
46	3.III. الخاتمة
50	خاتمة عامة

فهرس الأشكال

الصفحة	عنوان الشكل	ترتيب الشكل
الفصل الأول		
5	صورة مجفف شمسي مباشر	(1-I)
7	صورة فوتوغرافية ورسم تخطيطي لمجفف شمسي غير مباشر	(2-I)
8	صورة فوتوغرافية ورسم تخطيطي لمجفف شمسي هجين	(3-I)
9	رسم تخطيطي لمجفف شمسي مختلط	(4-I)
10	تجفيف شمسي طبيعي للمحاصيل الزراعية	(5-I)
11	صورة المجفف الشمسي	(6-I)
13	رسم تخطيطي لمجفف صناعي (مجفف النفق)	(7-I)
14	رسم تخطيطي لمجفف صناعي (مجفف الرذاذ)	(8-I)
16	رسم تخطيطي مع مجفف شمسي مباشر مع الحمل الطبيعي	(9-I)
16	رسم تخطيطي لمجفف مباشر مع الحمل القسري	(10-I)
17	يلخص الفرق بين المجففات الشمسية المباشرة وغير المباشرة والمجففات الشمسية المختلطة حسب طبيعة حركة الهواء في كل نوع	(11-I)
الفصل الثاني		
22	المخطط الهندسي للمجفف	(1-II)
23	تركيب الهيكل الداعم	(2-II)
23	تركيب غرفة التجفيف	(3-II)
24	وحدة المجمع الشمسي	(4-II)
24	غطاء زجاجي شفاف	(5-II)
25	مكونات خليط الاستقبال الشمسي (برادة ألومنيوم، ملح خشن، حصى (7/3).	(6-II)
25	مجفف شمسي غير مباشر	(7-II)

27	المجفف الشمسي المستعمل	(8-II)
30	صفحة المستقبل مملوؤة ببرادة الالمنيوم	(9-II)
30	صفحة المستقبل مملوؤة بالحصى	(10-II)
31	يوضح هذا التوزيع بشكل مفصل	(11-II)
32	مواضع تركيب المستشعرات الحرارية	(12-II)
33	صورة فلفل حار مقسم الي نصفين	(13-II)
34	فرن التجفيف المخبري	(14-II)
34	صورة عينة الفلفل بعد التجفيف	(15-II)
36	قياسات درجات الحرارة	(16-II)
الفصل الثالث		
39	شدة الاشعاع الشمسي مقابل الزمن	(1-III)
40	تغيرات درجة الحرارة الزمنية للمجفف (1)	(2-III)
41	تغيرات درجة الحرارة الزمنية للمجفف (2)	(3-III)
43	منحنى الفرق الحراري للمجففين	(4-III)
44	منحنيات تغير كتلة الفلفل - اليوم الأول	(5-III)
44	منحنيات تغير كتلة الفلفل - اليوم الثاني	(6-III)
45	معدل التجفيف	(7-III)

فهرس الجداول

الصفحة	عنوان الجدول	ترتيب الجدول
	الفصل الثاني	
26	أجهزة القياس المستخدمة	(1-II)
29	الخصائص الفيزيائية للحصى، ملح خشن، وبرادة الالمنيوم	(2-II)

فهرس الرموز

- **W1**: كتلة الحصى kg .
- **W2**: كتلة برادة الالمنيوم kg .
- **Y**: وزن برادة الالمنيوم في كل الصفيحة kg .
- **X**: وزن الحصى ذو مقياس 7/3 في كل الصفيحة kg .
- **W_{initial}**: الوزن الاولي للمنتج قبل التجفيف.
- **WC_{initial}**: محتوى الرطوبة الاولي.
- **WC_{final}**: محتوى الرطوبة المستهدف.
- **W_{dry}**: وزن المنتج بعد التجفيف.
- **D1**: المجفف الأول.
- **D2**: المجفف الثاني.
- **DT**: الفارق الحراري.
- **T_{dryer_in}**: درجة الحرارة الهواء عند مدخل حجرة التجفيف C .
- **T_{outside}**: درجة الحرارة الهواء المحيطة خارج منظومة التجفيف C .



المقدمة

العامّة

مقدمة عامة

يُعدّ التجفيف من أقدم وسائل حفظ الغذاء التي استخدمها الإنسان منذ فجر التاريخ، إذ لجأت المجتمعات القديمة، مثل المصريين القدماء والبابليين، إلى استخدام أشعة الشمس لتجفيف الفواكه، اللحوم، والأسماك بهدف إطالة مدة صلاحيتها وتسهيل تخزينها ونقلها [1]. ويُعتبر التجفيف الشمسي (Solar Drying) أحد أقدم أشكال هذه التقنية، حيث استغل الإنسان الطاقة الشمسية كمصدر طبيعي ومنتجد للحرارة لإزالة الرطوبة من المنتجات الزراعية والغذائية، وذلك منذ حوالي 3000 سنة قبل الميلاد [2].

مع مرور الوقت، شهدت تقنيات التجفيف الشمسي تطورًا كبيرًا نتيجة للتقدم في مجالات الهندسة الزراعية والطاقة المتجددة. فبينما كان التجفيف التقليدي يعتمد على تعريض المحاصيل مباشرة لأشعة الشمس في الهواء الطلق، وهو ما كان يُعرضها للتلوث وفقدان العناصر الغذائية، تطورت أساليب حديثة تعتمد على تصميمات هندسية دقيقة تهدف إلى تحسين كفاءة التجفيف وتقليل فقد الجودة. ومن أبرز هذه التطويرات ظهور المجففات الشمسية المغلقة (Indirect Solar Dryers) والمجففات ذات النظام الهجين (Hybrid Solar Dryers) التي تدمج بين الطاقة الشمسية ومصادر طاقة إضافية، مثل الكهرباء أو الغاز، لضمان استمرار العملية حتى في غياب الشمس [3][4].

تستخدم تقنيات التجفيف الشمسي الحديثة مبادئ فيزيائية مدروسة تعتمد على قوانين انتقال الحرارة والكتلة. من بين أبرز التقنيات المستخدمة حاليًا: مجففات الطاقة الشمسية المباشرة، المجففات غير المباشرة، المجففات المزودة بأنظمة تهوية قسرية والمجففات الهجينة، كما تم دمج أنظمة التحكم الذكية وتحليل البيانات لتحسين جودة وكفاءة العملية [4]. وتُعد هذه التقنيات مثالية في الدول النامية والمناطق الريفية، نظرًا لانخفاض تكلفتها واعتمادها على مصدر طاقة متاح مجانًا [5].

تزايد الاهتمام العالمي بالتجفيف الشمسي في العقود الأخيرة نتيجة التوجه نحو الاقتصاد الأخضر وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري. وتُشير العديد من الدراسات إلى أن استخدام المجففات الشمسية الحديثة يُسهم في تقليل الفاقد الغذائي، تقليل الانبعاثات الكربونية، وتعزيز استدامة النظم الغذائية، خاصة في ظل التحديات البيئية والاقتصادية المتزايدة [3][6]. ويدعم هذا الاهتمام المؤسسات الأكاديمية والبحثية والمنظمات الدولية التي تعمل على تحسين كفاءة هذا النوع من التجفيف ونشره على نطاق أوسع.

رغم المزايا البيئية والاقتصادية لأنظمة التجفيف الشمسي، إلا أن تطبيقاتها الفعلية ما تزال محدودة، خاصة في الدول النامية، بسبب بعض التحديات المتعلقة بعدم تجانس درجات الحرارة، وعدم استقرار ظروف التجفيف، وضعف الأداء الحراري في بعض التصاميم التقليدية. كما أن فعالية المواد المستخدمة في تحسين امتصاص وتخزين الحرارة لم تُستغل بالشكل الأمثل، مما يقلل من مردودية العملية.

في هذا السياق، تتمحور إشكالية هذا البحث حول كيفية تحسين الأداء الحراري لمجفف شمسي غير مباشر، من خلال دمج مواد ذات خصائص حرارية مختلفة (مثل الحصى، برادة الألمنيوم، الملح الخشن) في خليط الاستقبال الشمسي. ويهدف هذا العمل إلى دراسة تأثير نوعية هذه المواد على كفاءة التجفيف، وجودة المنتج النهائي، ومردودية النظام الطاقوية.

يهدف هذا المشروع التجريبي إلى تصميم وبناء مجفف شمسي غير مباشر ملائم للبيئة المناخية المحلية، وتجريبه عمليًا على منتج زراعي ذي حساسية عالية للرطوبة (الفلفل الحار). ومن خلال التحليل الحراري والمقارنة بين نماذج مختلفة من المواد الماصة، نسعى إلى تحديد التركيبة المثلى التي تحقق أداءً طاقيًا عاليًا واستقرارًا في درجات الحرارة.

تتوزع هذه المذكرة على ثلاثة فصول رئيسية، يغطي كل فصل جانبًا من جوانب الدراسة النظرية والتطبيقية:

❖ **الفصل الأول:** يعرض الإطار النظري للعمل، حيث يُستعرض تاريخ وتقنيات التجفيف الشمسي، وتصنيفات المجففات الشمسية المختلفة (المباشرة، غير المباشرة، الهجينة، المختلطة)، مع تحليل مفصل لمزايا وعيوب كل نوع، بالإضافة إلى استعراض للأنظمة الحرارية، وآليات انتقال الحرارة، والشروط المثلى للحصول على منتج مجفف ذو جودة عالية.

❖ **الفصل الثاني:** يتناول الجانب التطبيقي من الدراسة، حيث يتم وصف تصميم وبناء المجفف الشمسي غير المباشر بالتفصيل، مع عرض لمكوناته، وآلية التشغيل، والمواد المستخدمة في خليط الاستقبال الشمسي. كما يشمل هذا الفصل منهجية التجربة، إعداد العينة، تركيب أجهزة القياس، وبروتوكول جمع البيانات.

❖ **الفصل الثالث:** يُخصص لتحليل النتائج ومناقشتها، حيث يتم تقييم الأداء الحراري للنظام باستخدام المؤشرات الحرارية المسجلة، مقارنة بين الخلطات المختلفة من المواد المستخدمة، وقياس تطور المحتوى الرطوبي للمنتج خلال فترات التجفيف. كما يتضمن الفصل استنتاجات عامة وتوصيات مستقبلية لتحسين أداء المجففات الشمسية في السياقات الميدانية.

❖ **الخاتمة العامة:** تُختتم المذكرة بعرض مركز لأهم الاستنتاجات المستخلصة من الدراسة، مع تقييم شامل لمدى تحقق أهداف البحث. كما يتم تقديم مجموعة من التوصيات التقنية والعلمية التي يمكن أن تسهم في تطوير المجففات الشمسية غير المباشرة، وجعلها أكثر كفاءة وملاءمة للاستخدام في المناطق ذات الإشعاع الشمسي المرتفع، خاصة في البيئات الزراعية المحلية. وتُطرح في النهاية آفاق بحثية مستقبلية يمكن استكشافها، مثل استخدام مواد تغيير الطور أو أنظمة هجينة أكثر تعقيدًا.

قائمة مراجع المقدمة العامة

- [1] Mujumdar, A. S. *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press, 2014.
- [2] Ekechukwu, O. V., & Norton, B. Review of solar-energy drying systems II: An overview of solar drying technology. *Energy Conversion and Management*, 1999;40(6):615–655.
- [3] Fudholi, A., Sopian, K., Othman, M. Y., Ruslan, M. H. Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014;14(1):1-30.
- [4] Janjai, S. A review of solar drying technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012;16(1):3371–3386.
- [5] Esper, A., & Mühlbauer, W. Solar drying — An effective means of food preservation. *Renewable Energy*, 1998;15(1-4):95-100.
- [6] Bala, B. K. *Drying and Storage of Cereal Grains*. Science Publishers, 1997.

الفصل الأول

مفاهيم عامة حول
التجفيف الشمسي

1.I. مقدمة:

يُعدّ التجفيف باستخدام الطاقة الشمسية أحد أقدم التقنيات التي اعتمدها الإنسان، حيث استند إلى التفاعل الطبيعي بين الهواء والحرارة وأشعة الشمس كوسيلة أساسية للحفاظ على المنتجات الزراعية المختلفة، بما في ذلك الحبوب، الفواكه، وغيرها من المحاصيل. وعلى مر العصور، استُخدمت طرق التجفيف التقليدية كجزء من الممارسات التراثية، خاصة في المجتمعات الريفية التي تعتمد على حلول طبيعية لحفظ الأغذية.

ومع التقدم الصناعي، برزت المجففات الصناعية كبديل للتجفيف الطبيعي، إلا أن استخدامها يظل محدودًا نظرًا لتكاليفها المرتفعة واعتمادها على مصادر الطاقة غير المتجددة مثل الكهرباء والوقود الأحفوري، مما يساهم في التلوث البيئي. في المقابل توفر تقنيات التجفيف الشمسي التقليدية حلاً مستدامًا، ولكنها غالبًا ما تؤدي إلى إنتاج غير متجانس بجودة منخفضة. لذا كان من الضروري تطوير أنظمة تجفيف شمسية محسّنة تجمع بين كفاءة المجففات الصناعية واستدامة الطاقة الشمسية، مما أدى إلى ظهور مفهوم "التجفيف الشمسي"، والذي يُعتمد عليه في تجفيف المنتجات الغذائية بطريقة أكثر كفاءة واستدامة.

يهدف هذا الفصل إلى تقديم المفاهيم الأساسية حول تقنيات التجفيف، مع تسليط الضوء على أنواع المجففات المختلفة، إلى جانب استعراض مزايا وعيوب كل منها [1].

2.I. تعريف التجفيف:

هو عملية فيزيائية داخلية تهدف إلى تقليل المحتوى الرطوبي للمادة من خلال تبخر الماء الموجود في الجسم الرطب. تتم هذه العملية عبر آليتين رئيسيتين: الانتقال الكتلي، حيث يتحول الماء من الحالة السائلة إلى البخار، والانتقال الحراري، حيث تتيح كمية الحرارة الكافية تحول السائل إلى غاز لتعزيز تركيز المواد الصلبة ضمن المادة المجففة.

يلعب التجفيف دورًا أساسيًا في تقليل النشاط الميكروبي والإنزيمي والتفاعلات الكيميائية، مما يساهم في الحفاظ على المادة وتقليل احتمالية الفساد. يتم تحقيق ذلك من خلال خفض نسبة الرطوبة إلى مستوى لا يسمح باستمرار النشاط الأحيائي الذي قد يؤدي إلى تلف المادة. يمكن تنفيذ التجفيف بوسائل طبيعية مثل التعرض لأشعة الشمس، أو صناعية باستخدام مصادر حرارية محددة، مع مراعاة ضبط درجة الحرارة والرطوبة بما يحقق التجفيف الفعّال دون الإضرار بالخواص الفيزيائية والكيميائية للمنتج، يختلف الحد الأمثل للرطوبة المتبقية ووفقًا لنوع المادة ومتطلبات الاستخدام النهائي [2].

3.I. تصنيف المجففات الشمسية:

تُصنّف المجففات الشمسية بناءً على آلية تسخين الهواء وطريقة الاستفادة من الإشعاع الشمسي في عملية التجفيف. ويمكن تقسيمها إلى الفئات التالية [3]:

➤ المجففات الشمسية المباشرة.

➤ المجففات الشمسية غير المباشرة.

➤ المجففات الشمسية الهجينة.

➤ المجففات الشمسية المختلطة.

1.3.I. المجففات الشمسية المباشرة:

يُعدّ المجفف الشمسي المباشر نظامًا بسيطًا وسهل التجهيز، حيث يتكوّن من جزء واحد يؤدي وظيفتين أساسيتين: تجميع الأشعة الشمسية وتجفيف المواد في آنٍ واحد. يُغطّي الجزء العلوي للمجفف بطبقة شفافة من الزجاج، مما يسمح بمرور الأشعة الشمسية إلى الداخل، حيث يتم امتصاصها وتحويلها إلى طاقة حرارية.

يتكون الجزء السفلي من المجفف من صفيحة معدنية، غالبًا من الألمنيوم، مطلية باللون الأسود لتعزيز امتصاص الحرارة. تُنقل هذه الحرارة إلى أسطح المواد الموضوعة للتجفيف، ثم إلى الهواء المحيط داخل المجفف، مما يؤدي إلى تسخينه. نتيجةً لذلك، ينشأ تيار حراري طبيعي يُحفّز حركة الهواء، حيث يرتفع الهواء الساخن المحمّل ببخار الماء إلى الأعلى بفعل ظاهرة الحمل الحراري، بينما يدخل الهواء البارد من الفتحات السفلية لتعويض الفاقد، مما يعزز استمرارية العملية.

تساعد الفتحات العلوية في تصريف الهواء الرطب، حيث يزداد معدل حركة الهواء كلما زادت الفروق في الكثافة ودرجات الحرارة بين الهواء الساخن داخل المجفف والهواء البارد خارجه. هذا التدفق المستمر للهواء الدافئ يسرّع من عملية التجفيف ويحسن كفاءة إزالة الرطوبة من المواد المجففة، مما يجعله نظامًا فعالًا ومستدامًا للطاقة [3].



الشكل(1-I): صورة مجفف شمسي مباشر [4].

1.1.3.I. مزايا المجففات المباشرة:

تتميز المجففات الشمسية المباشرة بعدة خصائص تجعلها خيارًا فعالًا في عمليات التجفيف، ومن أبرز مزاياها [5]:

- ✓ تقليل زمن التجفيف مقارنةً بأساليب التجفيف التقليدية، مما يساهم في تحسين كفاءة العملية.
- ✓ حماية المنتج بشكل فعال من العوامل البيئية الضارة، مثل الغبار، الحشرات، الحيوانات والأمطار، مما يضمن جودة أعلى.

- ✓ سهولة التركيب والتشغيل، حيث إنها تتطلب تكاليف تركيب منخفضة نسبياً مقارنة بالأنظمة الأكثر تعقيداً.
- ✓ عدم الحاجة إلى تقنيات تشغيل متقدمة أو كوادر بشرية مؤهلة بدرجة عالية، مما يجعل استخدامها أكثر سهولة.
- ✓ اعتمادها على الطاقة الشمسية المجانية، مما يساهم في تقليل التكاليف التشغيلية مقارنة بالمجففات الصناعية التي تعتمد على مصادر طاقة مكلف.

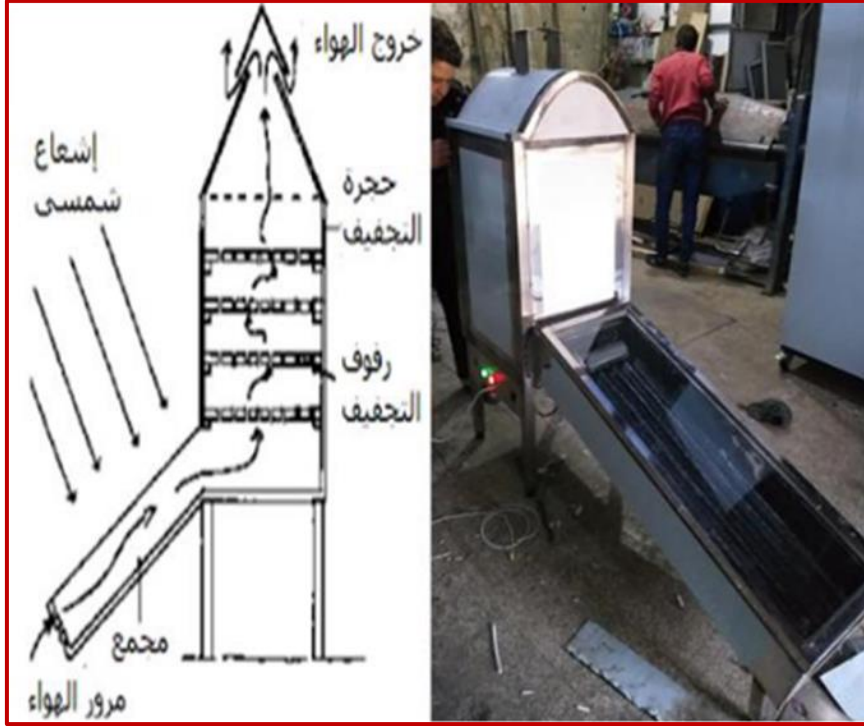
2.1.3.I. عيوب المجففات الشمسية المباشرة:

- على الرغم من المزايا العديدة للتجفيف الشمسي المباشر، إلا أنه ينطوي على بعض العيوب، منها [1]:
- ✗ تعرض المنتج المباشر لأشعة الشمس قد يؤدي إلى تدهور بعض الفيتامينات، خاصةً A و C، بسبب تأثير الأشعة فوق البنفسجية.
- ✗ انخفاض القيمة الغذائية وتغير اللون، حيث يمكن أن يتغير لون بعض المنتجات، مثل الخضار، من الأخضر إلى الأصفر نتيجة التعرض المطول لأشعة الشمس.
- ✗ قابلية كسر الزجاج المستخدم في المجففات الشمسية، مما يستدعي استبداله عند تعرضه للضرر، وهو ما قد يشكل تكلفة إضافية عند الاستخدام طويل الأمد.

2.3.I. المجففات الشمسية غير المباشرة:

في هذه الطريقة لا تتعرض المنتجات المجففة لأشعة الشمس المباشر، مما يساعد في الحفاظ على جودته وقيمتها الغذائية. ويشترك هذا النوع من المجففات مع المجففات الشمسية المباشرة في آلية العمل، إلا أنه يتميز بكفاءة أعلى. ومع ذلك تبقى عملية التجفيف في هذا المجفف معتمد على الظروف الجوية، مما قد يآثر على سرعة وكفاءة التجفيف حيث تتكون المجففات الشمسية غير المباشرة عادةً من جزأين رئيسيين [1]:

- ❖ **مجمع الطاقة الشمسية:** يكون مغطى من الأعلى بغطاء مصنوع من الزجاج أو البلاستيك، ومن الجزء السفلي عادةً من صفائح معدنية، غالباً من الألمنيوم المطلي باللون الأسود، وذلك لامتصاص أشعة الشمس وتحويلها إلى طاقة حرارية بكفاءة عالية.
- ❖ **غرفة التجفيف:** يتم نقل الهواء الساخن الناتج عن المجمع عبر أنابيب إلى هذه الغرفة، والتي تتيح تدوير الهواء الساخن بشكل متوازن حول المنتجات الرطبة، مما يسرّع من عملية التجفيف دون التأثير المباشر لأشعة الشمس.



الشكل (I-2): صورة فوتوغرافية ورسم تخطيطي لمجفف شمسي غير مباشر [2].

1.2.3.I. مزايا المجففات الشمسية غير المباشرة:

تتميز المجففات الشمسية غير المباشرة بعدة خصائص تجعلها خيارًا فعالًا في عمليات التجفيف، ومن أبرز مزاياها [6]:

- ✓ يحافظ المنتج على جودته من خلال تجنب التعرض المباشر لأشعة الشمس، مما يساعد في الاحتفاظ بلونه الطبيعي وقيمته الغذائية، لا سيما فيما يتعلق بالفيتامينات مثل A و C.
- ✓ يتميز هذا النوع من المجففات بكفاءة عالية مقارنة بالأنظمة التقليدية، إلى جانب تكلفته المنخفضة.
- ✓ لا يتطلب تشغيله أي مصدر طاقة كهربائية أو أحفورية، مما يجعله خيارًا مستدامًا وصديقًا للبيئة.
- ✓ يقلل من فرص تكوين المركبات الضارة الناتجة عن تحلل المكونات الغذائية، بفضل قصر مدة التجفيف مقارنة بالطرق الأخرى.

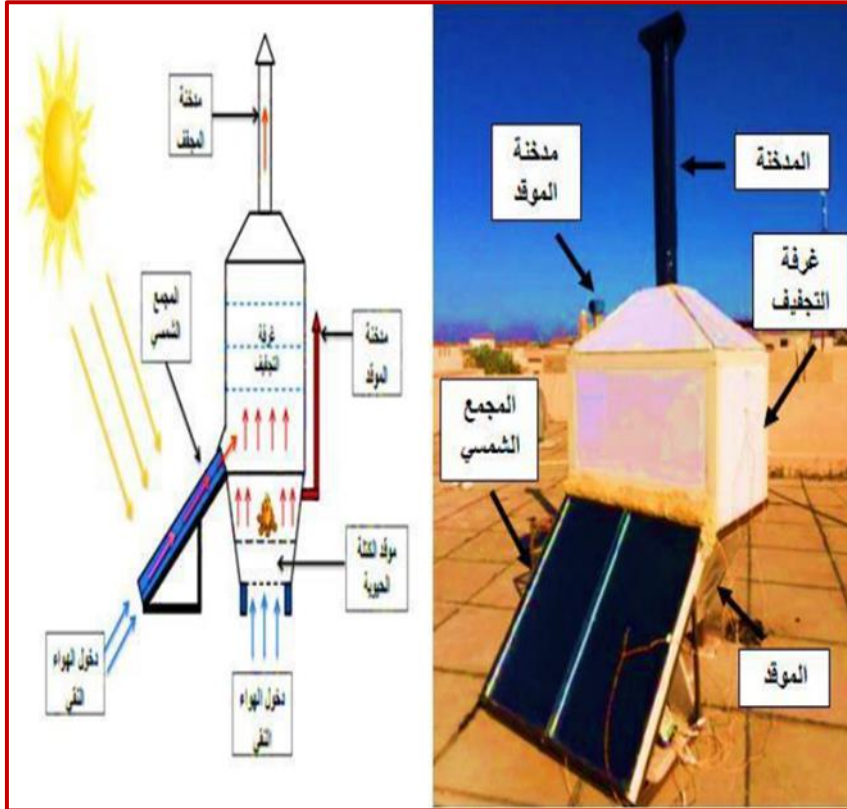
2.2.3.I. عيوب المجففات الشمسية غير المباشرة:

على الرغم من المزايا العديدة التي توفرها المجففات الشمسية غير المباشرة، إلا أنها تعاني من بعض العيوب، ومنها [3]:

- ❌ ارتفاع التكلفة الأولية مقارنة بالمجففات الشمسية المباشرة.
- ❌ تباين سرعة عملية التجفيف بشكل كبير، حيث تتأثر بعوامل الطقس وتصميم المجفف.
- ❌ ضعف متانة المجففات المصنوعة من الزجاج، مما يستلزم استبدالها بشكل دوري للحفاظ على كفاءتها.

3.3.I. المجففات الشمسية الهجينة:

تعتمد المجففات الشمسية الهجينة على مصدر طاقة ثانوي (إضافي)، مثل الكهرباء أو احتراق الفحم أو الغاز أو الكتلة الحيوية، لتعزيز كفاءة التجفيف. كما يتم استخدام مراوح لتحريك الهواء داخل مجففات الحمل القسري، مما يسرّع عملية التجفيف. تساهم هذه الطاقة الإضافية في الحفاظ على درجة حرارة ثابتة داخل المجفف، بغض النظر عن الظروف الجوية، مما يساعد في تحقيق درجة التجفيف المثلى بفعالية وكفاءة عالية [2].



الشكل (3-I): صورة فوتوغرافية ورسم تخطيطي لمجفف شمسي هجين [2].

1.3.3.I. مزايا المجففات الشمسية الهجينة:

تتميز المجففات الشمسية الهجينة بعدة مزايا مقارنة بالمجففات الشمسية التقليدية والمجففات الصناعية، ومن أبرزها [4]:

- ✓ تحكم فعال في درجة الحرارة وسرعة عملية التجفيف، مما يساهم في تحسين جودة المنتج المجفف.
- ✓ زيادة الإنتاجية مقارنة بالمجففات الشمسية التقليدية، حيث يمكن تشغيل المعدات ليلاً أو خلال فترات هطول الأمطار عند الحاجة.
- ✓ الاستقلالية عن الظروف المناخية المتغيرة، مما يجعلها أكثر موثوقية في مختلف البيئات.
- ✓ كفاءة الطاقة العالية، حيث تستهلك طاقة أقل مقارنة بالمجففات الصناعية، مما يقلل من التكاليف التشغيلية.

2.3.3.I. سلبيات المجففات الشمسية الهجينة:

على الرغم من المزايا العديدة التي توفرها المجففات الشمسية الهجينة، إلا أنها تواجه بعض التحديات، ومن أبرزها [4]:

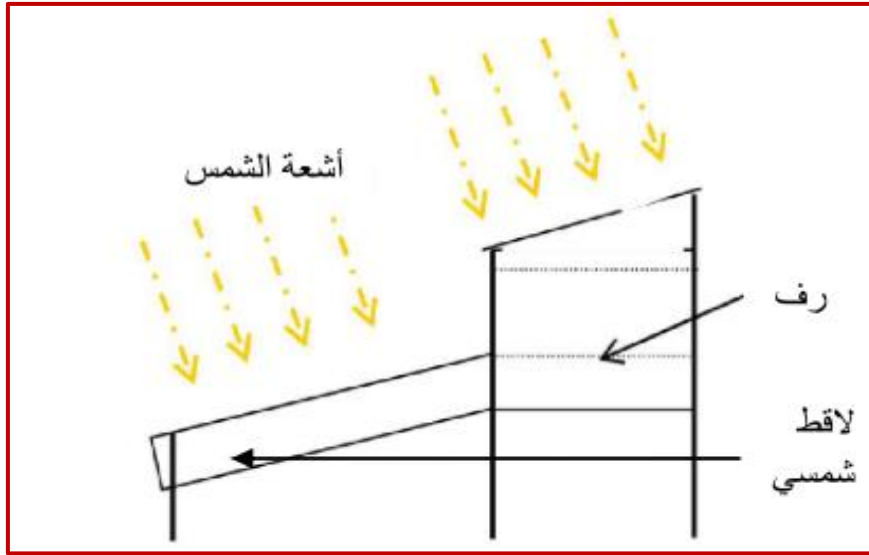
✘ التكلفة الأولية المرتفعة مقارنة بالمجففات الشمسية التقليدية، مما قد يؤثر على جدواها الاقتصادية في بعض الحالات.

✘ ضرورة التوفر على مصادر طاقة إضافية مثل الكهرباء أو الوقود، مما يستلزم قربها من شبكات الطاقة لضمان تشغيلها بكفاءة.

✘ الحاجة إلى مشغلين مؤهلين لإدارتها وصيانتها، نظرًا لتعقيد نظام التشغيل مقارنة بالمجففات الأخرى.

4.3.I. المجففات الشمسية المختلطة:

تعتمد المجففات الشمسية المختلطة على دمج آليات التجفيف المباشر وغير المباشر لتحقيق كفاءة أعلى في العملية. حيث له نفس تركيبة المجفف الشمسي غير المباشر [2]، يتم تسخين الهواء عبر مجمع شمسي، ثم يُوجّه الهواء الساخن إلى غرفة التجفيف. تُغطّى هذه الغرفة بصفائح زجاجية شفافة، مماثلة لما هو مستخدم في المجففات الشمسية المباشرة، مما يسمح بامتصاص إضافي لأشعة الشمس. ونتيجة لهذا التصميم، فإن المجفف الشمسي المختلط يجمع بين مزايا وعيوب كل من المجففات الشمسية المباشرة وغير المباشرة [5].



الشكل (4-I): رسم تخطيطي لمجفف شمسي مختلط [1].

4.I. أكثر الطرق التجفيف شيوعاً:**1.4.I. المجففات الشمسية الطبيعية (مجففات الهواء الطلق):**

تعتمد هذه الطريقة على تعريض المحصول للهواء وأشعة الشمس الطبيعية، حيث يتم تجفيف المنتجات الزراعية عبر الامتصاص المباشر لأشعة الشمس على مدار فترة زمنية طويلة. يُعتبر هذا الأسلوب من أبسط طرق التجفيف الشمسي، إذ تُوزَّع الأغذية على رفوف أو حصائر أو أسرّة مخصصة، وقد تُترك مباشرة على الأرض في بعض الحالات. تضمن هذه الطريقة تعرض المنتجات لأشعة الشمس والرياح، مع ضرورة تقليبيها بانتظام لضمان تجفيف متساوٍ وفعال [1].



الشكل (I-5): تجفيف شمسي طبيعي للمحاصيل الزراعية [2].

1.1.4.I. مزايا التجفيف الشمسي الطبيعي:

تتمتع المجففات الشمسية الطبيعية، بعدة مزايا تجعلها خياراً فعالاً ومستداماً لعملية التجفيف، ومن أبرزها العملية [3]:

- ✓ عدم الحاجة إلى معدات متخصصة أو عمالة ماهرة، مما يجعلها وسيلة منخفضة التكلفة وسهلة الاستخدام.
- ✓ استخدام مصدر طاقة مجاني وصديق للبيئة، حيث تعتمد على أشعة الشمس دون أي انبعاثات ملوثة.
- ✓ عدم وجود استهلاك إضافي للطاقة، مما يقلل من التكاليف التشغيلية.
- ✓ عملية تجفيف متدرجة ولطيفة، بفضل التغيرات الطبيعية بين درجات الحرارة النهارية والليل.
- ✓ الحفاظ على اللون الطبيعي للمحاصيل مع تغير طفيف في مظهرها.
- ✓ سهولة التنفيذ والتطبيق، نظراً لبساطة العملية وعدم الحاجة إلى استثمارات كبيرة.

2.1.4.I. عيوب المجففات الشمسية الطبيعية:

رغم بساطة وسهولة التجفيف الشمسي التقليدي، إلا أنه ينطوي على عدد من العيوب والتحديات التي تحد من كفاءته وفعاليتها، ومن أبرز هذه العيوب [1]:

- ✘ بطء العملية وعدم انتظامها، مما قد يؤدي إلى تفاوت في جودة التجفيف.
- ✘ الحاجة إلى تدخل بشري مستمر، سواء في متابعة التجفيف أو حماية الأغذية من العوامل البيئية، خاصة أثناء هطول الأمطار.
- ✘ استهلاك وقت طويل ومساحة كبيرة، ما يجعله غير عملي في بعض الحالات.
- ✘ تعرض المنتجات لعوامل التلوث مثل الغبار، الحشرات، الحيوانات، والطيور، مما قد يؤدي إلى فقدان قيمتها الغذائية أو تلفها بالكامل.
- ✘ احتمال حدوث تغيرات في الخصائص البيولوجية والكيميائية للمنتج، بما في ذلك اللون، الطعم، والقوام نتيجة التعرض المباشر لأشعة الشمس، مما قد يؤثر على جودته بشكل سلبي.

2.4.I. المجففات الصناعية:

هو إحدى التقنيات الحديثة المستخدمة في حفظ الأغذية، حيث يعتمد على تسخين المواد الغذائية مسبقاً باستخدام مصادر طاقة مختلفة، مثل الوقود الأحفوري أو الكهرباء، بهدف تقليل محتواها المائي وتعزيز استقرارها التخزيني. تتميز هذه العملية بإمكانية معالجة مجموعة واسعة من المنتجات الغذائية بمختلف أشكالها وألوانها، مع الحفاظ على أكبر قدر ممكن من قيمتها الغذائية [5].

يمتاز التجفيف الصناعي بكفاءته العالية في إنتاج مواد غذائية مجففة ذات جودة مرتفعة وقيمة غذائية محسنة خلال فترة زمنية قصيرة، مع تقليل الحاجة إلى مساحات تشغيلية كبيرة. ويهدف هذا الأسلوب إلى تحقيق منتج نهائي يتمتع بمظهر جذاب ونكهة متميزة، مع ضبط درجات الحرارة ضمن نطاق يتراوح بين 50 و80 درجة مئوية، مما يضمن تجفيفاً فعالاً مع الحد الأدنى من الفقد في الفيتامينات والعناصر الغذائية الأساسية [5].



الشكل (I-6): صورة المجفف الشمسي [4].

1.2.4.I. مزايا المجففات الصناعية:

تتمتع المجففات الشمسية الصناعية بعدة مزايا، من أبرزها [4]:

- ✓ **استمرارية عملية التجفيف:** تعمل المجففات الصناعية على مدار اليوم دون تأثر بالتغيرات الجوية، مما يضمن استقرار العملية وكفاءتها.
- ✓ **حماية المنتج:** تساهم هذه المجففات في حماية المنتجات الغذائية من الملوثات البيئية والتقلبات المناخية، مما يعزز جودتها وسلامتها.
- ✓ **التحكم الدقيق:** توفر المجففات الصناعية القدرة على ضبط ومعايرة ظروف التجفيف وفقاً لنوع المنتج، مما يضمن تحقيق النتائج المطلوبة.

2.2.4.I. عيوب المجففات الصناعية:

على الرغم من المزايا العديدة التي توفرها المجففات الشمسية غير المباشرة، إلا أنها تعاني من بعض العيوب، ومنها [4]:

- ✗ **التكلفة التشغيلية المرتفعة:** تعتمد المجففات الصناعية بشكل أساسي على الطاقة الكهربائية لتسخين الهواء، مما يؤدي إلى زيادة استهلاك الطاقة وارتفاع تكاليف التشغيل.
- ✗ **محدودية التوافر الكهربائي:** قد تعاني بعض المناطق الريفية والنائية من ضعف البنية التحتية الكهربائية، مما يعيق الاعتماد على هذه التقنية في عمليات التجفيف.
- ✗ **التأثير على جودة المنتج:** قد تتسبب عملية التجفيف في تكوين طبقة صلبة على السطح الخارجي لبعض المنتجات، مما يؤثر على ملمسها النهائي، ويقلل من قدرتها على الاحتفاظ بجودتها أثناء التخزين.

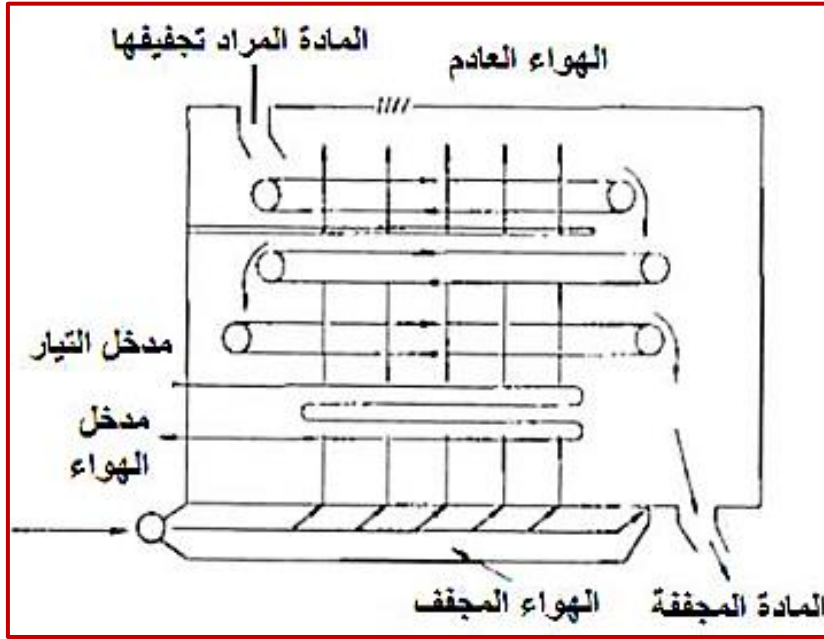
3.4.I. أنواع المجففات الصناعية:**1.3.4.I. مجففات الانفاق:**

تم تطوير تقنية مجففات الأنفاق لمعالجة العيوب المرتبطة بالتجفيف الشمسي، حيث تعتمد على استخدام الهواء الساخن الجاف المتدفق بسرعة كبيرة في اتجاهات متعددة حول الغذاء المحمّل على أرفف، صوانٍ، أو سيور متحركة داخل النفق. تساهم هذه التقنية في تقليل الفقد الناتج عن التعرض للعوامل البيئية مثل الطيور، الحشرات، القوارض أو الأمطار، مما يضمن الحفاظ على جودة المنتج.

تتميز هذه المجففات بنظام تشغيل مستمر يتيح التحكم الدقيق في العوامل التشغيلية المختلفة، مما يضمن توفير ظروف هوائية مستقرة لعملية التجفيف. ولتحقيق استمرارية العمل دون انقطاع، فهي مزودة بألية بديلة تحافظ على استقرار التشغيل. تتراوح مدة التجفيف عادةً بين 6 إلى 24 ساعة، وتستخدم هذه المجففات على نطاق واسع في تجفيف الخضروات، الفواكه، وأحياناً اللحوم والأسماك.

تتكون هذه المجففات من حجرات طويلة معزولة مطوية بمواد خاصة، حيث يتراوح ارتفاعها بين 1.5 إلى 3 أمتار، وعرضها بين 10 إلى 12 مترًا مع إمكانية امتدادها حتى 30 مترًا يتم ترتيب المواد الغذائية

المراد تجفيفها على صوانٍ موضوعة فوق عربات متحركة داخل النفق، حيث يمكن أن يصل عدد الصواني إلى 20 - 30 صينية لكل عربة، مما يضمن توزيعًا متجانسًا للحرارة وكفاءة عالية في عملية التجفيف [6].

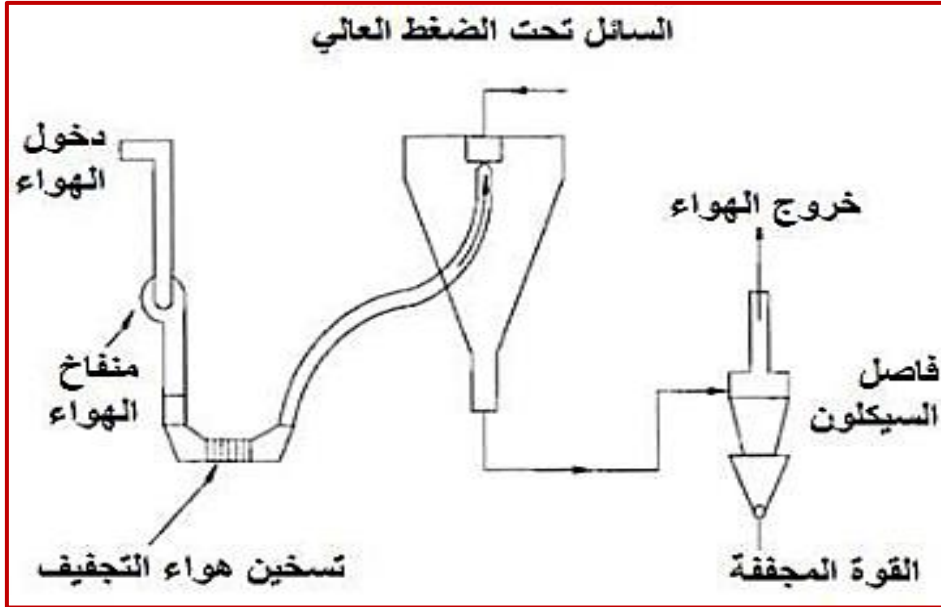


الشكل (I-7): رسم تخطيطي لمجفف صناعي (مجفف النفق) [6].

2.3.4.I مجففات الرذاذ:

تُعد مجففات الرذاذ من التقنيات المستخدمة في تجفيف المواد الغذائية السائلة، مثل البيض والحليب ومستحضرات القهوة سريعة الذوبان وعصائر الفواكه والخضروات، بهدف تحويلها إلى مسحوق. تتم عملية التجفيف داخل غرف واسعة، يتراوح طولها بين 60 و100 متر، بينما يصل قطرها إلى 20 متر. وتعتمد هذه العملية على تدرية السائل إلى جزيئات دقيقة على شكل ضباب معلق في تيار من الهواء الساخن، مما يسرع من تبخير الرطوبة خلال ثوانٍ معدودة [6].

يُساهم هذا الأسلوب في الحدّ من فقدان العناصر الغذائية، إذ لا تتجاوز نسبة الفقد في فيتامين ج 5%. في نهاية العملية، تترسب المادة الجافة في قاع المجفف على هيئة مسحوق، حيث يتم جمعها بواسطة مراوح خاصة ونقلها إلى وحدات الترسيب لفصلها بكفاءة [6].



الشكل (8-I): رسم تخطيطي لمجفف صناعي (مجفف الرذاذ) [6].

3.3.4.I المجففات الأسطوانية:

تستخدم المجففات الأسطوانية لتجفيف المواد التي يصعب دفعها بالرذاذ، مثل البطاطس المهروسة وغيرها. تتم عملية التجفيف من خلال طلاء الغذاء على السطح الخارجي للأسطوانة الدوّارة المسخنة، حيث تفقد الطبقة الغذائية رطوبتها خلال دورة واحدة فقط، ليتم بعد ذلك كشطها باستخدام شفرة متخصصة تُعرف باسم Blade Doctr.

تتميز الأسطوانة بقدرتها العالية على الاحتفاظ بالحرارة ونقلها بسرعة إلى المادة الغذائية عبر التوصيل الحراري، مما يتيح تحقيق التجفيف خلال فترة قصيرة تتراوح بين 2-3 دقائق ومن أهم مزايا هذه المجففات انخفاض تكاليفها مقارنة بالمجففات الرذاذية، مع تقليل فقدان العناصر الغذائية. ومع ذلك، فإنها قد تؤدي إلى فقدان أقل للرطوبة مقارنة بالتجفيف الشمسي أو التجفيف بالهواء الساخن [3].

تنقسم المجففات الأسطوانية إلى نوعين رئيسيين [3]:

❖ المجففات الأسطوانية المفردة.

❖ المجففات الأسطوانية المزدوجة.

4.3.4.I مجففات الضغط المنخفض:

تتميز مجففات الضغط المنخفض بقدرتها على إنتاج منتجات غذائية مجففة ذات جودة عالية، حيث تساهم في الحفاظ على القيمة الغذائية والخصائص الحسية للمواد المجففة. ونظرًا لتكاليفها التشغيلية المرتفعة، تُستخدم هذه المجففات عادةً لتجفيف الأغذية ذات القيمة الاقتصادية العالية.

يعتمد أداء التجفيف على عدة عوامل، منها معدل التفريغ داخل المجفف ودرجة الحرارة المستخدمة، حيث يتم التحكم بهما وفقاً لسرعة ورطوبة المادة المراد تجفيفها، وتصنّف مجففات الضغط المنخفض إلى ثلاثة أنواع رئيسية [3]:

- مجففات الرفوف المفرغة.
- مجففات الحزام المستمر المفرغة.
- مجففات التبخر المفرغة.

I.5.3.4. مجففات تعتمد على الطاقة الناتجة عن الموجات القصيرة:

يعتمد تشغيل هذا النوع من المجففات على تفاعل الموجات القصيرة مع جزيئات الماء داخل المادة الغذائية، نظراً للشحنة الكهربائية التي تحملها هذه الجزيئات. يمكن تشبيه هذه العملية بسلوك المغناطيس عند تفاعله مع قطبين متعاكسين، حيث تنتشر الموجات داخل المادة الغذائية، سواء كانت في حالة جافة أو رطبة.

عند امتصاص المادة الغذائية لهذه الطاقة، يتولد مجال كهربائي ديناميكي يؤدي إلى تحريك جزيئات الماء بسرعة في اتجاه متعاكس مع تغيرات المجال الكهربائي المتولد. وكلما زادت سرعة حركة الجزيئات، ارتفعت طاقتها الداخلية، مما يؤدي إلى زيادة درجة حرارة الغذاء وتسريع عملية التجفيف.

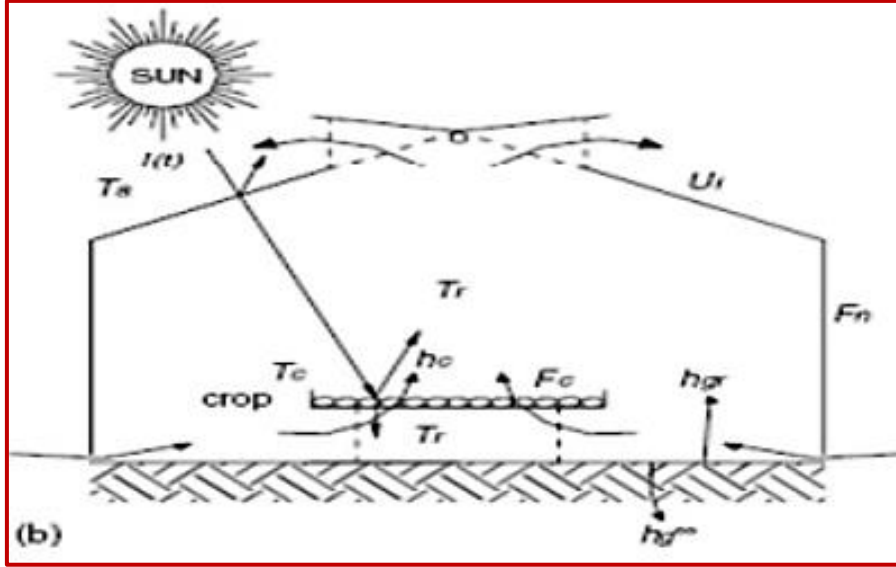
يُعزز وجود تيار من الهواء تدفق جزيئات الماء المتبخرة، مما يُسهم في تقليل محتوى الرطوبة في الغذاء بكفاءة، حيث تتراوح درجة حرارة التجفيف بين $18-22^{\circ}\text{C}$ [3].

I.5. أنظمة تدفق الهواء في المجففات الشمسية:

تصنّف المجففات الشمسية وفقاً لآلية تدوير الهواء المستخدمة فيها، حيث تنقسم إلى نوعين رئيسيين: الأول يعتمد على الحمل الطبيعي في تدوير الهواء، بينما يعتمد النوع الثاني على الحمل القسري، الذي يُستخدم فيه وسائل ميكانيكية لتعزيز تدفق الهواء داخل المجفف، مما يساهم في تحسين كفاءة التجفيف وتسريع العملية [7].

I.1.5. مجففات الحمل الطبيعية:

تعتمد مجففات الحمل الطبيعي على حركة الهواء الساخن داخل غرفة التجفيف، حيث يؤدي تسخين الهواء إلى انخفاض كثافته، مما يجعله يرتفع إلى الأعلى ليقوم بتجفيف المنتجات المستهدفة. ومع امتصاصه للرطوبة، يبرد تدريجياً ليتم طرده خارج الغرفة عبر فتحات خاصة، مما يضمن استمرارية عملية التجفيف بكفاءة [7].

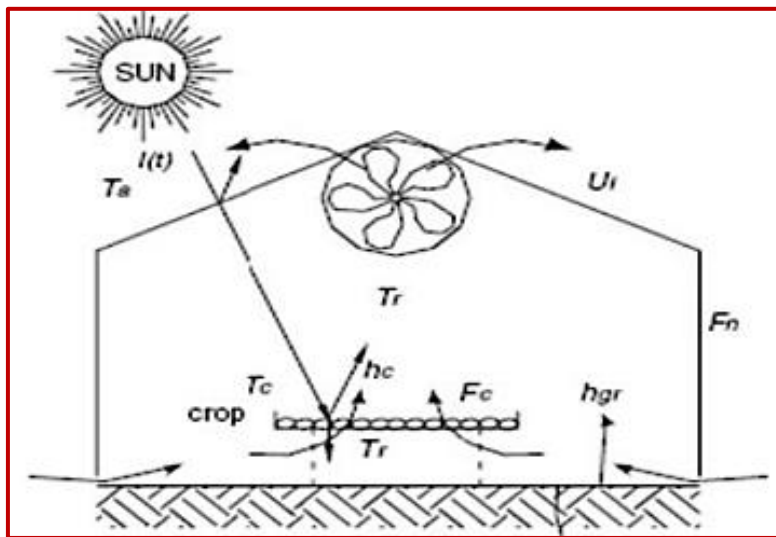


الشكل (I-9): رسم تخطيطي مع لمجفف شمسي مباشر مع الحمل الطبيعي [8].

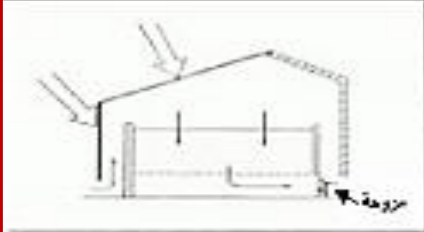
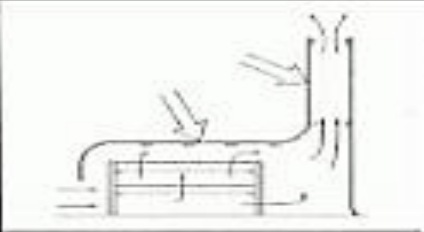
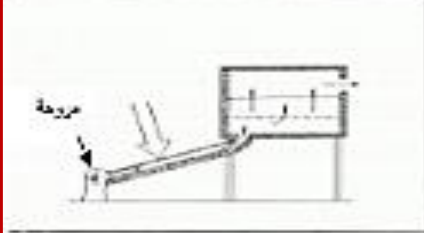

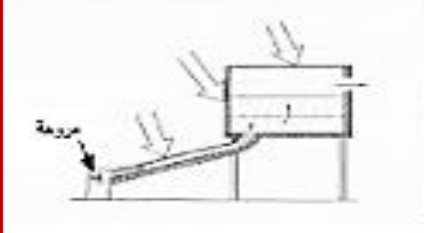
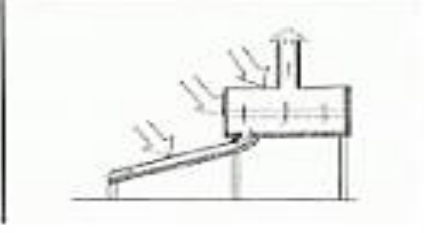

2.5.I. مجففات الحمل القسري:

تعتمد مجففات الحمل القسري على استخدام المراوح لتدوير الهواء الساخن داخل المجفف، مما يتيح توزيع الحرارة بشكل أكثر كفاءة وتسريع عملية التجفيف. يتم اختيار نوع المروحة بناءً على معدل تدفق الهواء المطلوب لضمان تحقيق التجفيف بالسرعة والكفاءة المرجوة. وتتميز هذه المجففات بقدرتها على توفير تحكم دقيق في ظروف التجفيف من خلال ضبط سرعة تدفق الهواء الساخن [7].

ومع ذلك، تعاني مجففات الحمل القسري من بعض العيوب، أبرزها ارتفاع تكاليف التصنيع والتشغيل مقارنةً بالمجففات التي تعتمد على الحمل الطبيعي. كما أنها تتطلب مصدر طاقة كهربائياً، سواء من الشبكة التقليدية أو من أنظمة الطاقة الشمسية، لتشغيل المراوح. ونظراً لاعتمادها على مصدر طاقة إضافي بجانب الطاقة الشمسية، يمكن تصنيفها ضمن المجففات الهجينة [7].



الشكل (I-10): رسم تخطيطي لمجفف مباشر مع الحمل القسري [8].

مجففات الحمل القسري (مجففات شمسية هجينة)	مجففات الحمل الطبيعي	
		مجففات شمسية مباشرة
		مجففات شمسية غير مباشرة
		مجففات شمسية مختلطة
		

الشكل (I-11): يلخص الفرق بين المجففات الشمسية المباشرة وغير المباشرة والمجففات الشمسية المختلطة حسب طبيعة حركة الهواء في كل نوع [8].

6.I. طرق حفظ الأغذية المجففة:

يمكن تخزين الأغذية المجففة في موقع التجفيف حتى يتم طلبها للتصنيع، وخلال هذه الفترة، يجب اتباع إجراءات صارمة للحفاظ على جودتها وفقاً للخطوات التالية [4]:

❖ **التبخير:** خلال فترة التخزين، تخضع الأغذية المجففة لعمليات تبخير دورية للقضاء على الإصابات الحشرية، حيث يُستخدم بروميد الميثيل (CH_3Br) في صناعة الفواكه المجففة، إلى جانب مواد أخرى لأغراض مماثلة. تُنفَّذ عملية التبخير شهرياً أو أكثر، وذلك حسب درجة حرارة التخزين لضمان الفعالية المثلى.

❖ **الاستلام والمعاينة:** عند نقل المنتجات المجففة إلى مرحلة التصنيع، يتم فحصها بدقة لتقييم جودتها وتحديد نسبة الرطوبة المتبقية فيها، مما يضمن توافرها مع معايير التصنيع المطلوبة.

❖ **التخزين بعد التصنيع:** لحفظ المنتجات المجففة لفترات طويلة والحد من مخاطر التلف والتعفن، يتم تخزينها في بيئات ذات درجات حرارة منخفضة، مما يسهم في إطالة عمرها الافتراضي والحفاظ على جودتها الغذائية.

7.I. الشروط اللازمة للحصول على أعلى قيمة غذائية للمنتج المجفف:

لضمان الحصول على منتج مجفف ذو قيمة غذائية عالية، يجب مراعاة مجموعة من الشروط، منها [2]:

- تجنب التبييض المفرط.
- إجراء عملية التجفيف خلال أقصر مدة زمنية ممكنة، مع تجنب رفع درجة الحرارة بشكل مفرط.
- عدم تحميل المجفف بكميات كبيرة من المادة المراد تجفيفها.
- ترتيب قطع الغذاء على صواني التجفيف مع ترك مسافات كافية بينها لضمان توزيع الهواء بشكل متساوٍ.
- الحفاظ على تدفق جيد للهواء داخل المجفف.
- تنفيذ عملية التجفيف عندما تكون نسبة الرطوبة في الهواء منخفضة.
- فحص الغذاء بشكل دوري للتأكد من وصوله إلى درجة التجفيف المناسبة.
- تخزين المنتجات المجففة في عبوات محكمة الإغلاق تمنع دخول الرطوبة أو الأكسجين.
- حفظ الغذاء المجفف في مكان بارد، جاف، ومظلل لضمان جودته على المدى الطويل.

8.I. تخزين الأطعمة المجففة:

تعتمد فترة التخزين بعد اكتمال عملية التجفيف على عدة عوامل رئيسية، وهي [3]:

- 1- طبيعة المنتج الغذائي.
- 2- العوامل المرتبطة بعملية التجفيف ذاتها.
- 3- الطريقة المستخدمة في تجفيف المادة الغذائية.
- 4- ظروف ومكان التخزين.

هذه العوامل مجتمعة تؤثر بشكل مباشر على جودة المنتج المجفف وفترة صلاحيته التخزينية. يعتبر التحكم في هذه العوامل أساسياً لضمان الحفاظ على خصائص المنتج الغذائي المجفف لأطول فترة ممكنة مع الحفاظ على سلامته وجودته.

9.I. الخاتمة:

في هذا الفصل، تم استعراض المفاهيم الأساسية المتعلقة بعملية التجفيف وأهميتها في حفظ المنتجات الغذائية، مع تسليط الضوء بشكل خاص على تقنيات التجفيف الشمسي التي تُعد بديلاً مستداماً وفعالاً. تم تصنيف المجففات الشمسية إلى أنواع رئيسية (مباشرة، غير مباشرة، هجينة ومختلطة)، مع تفصيل خصائص كل نوع، مزاياه وعيوبه، بالإضافة إلى مقارنتها بأساليب التجفيف الأخرى التقليدية والصناعية، والتعرض لجوانب مهمة تتعلق بالحفاظ على جودة المنتج المجفف وشروط تخزينه. بناءً على هذه المعرفة النظرية الشاملة، سينتقل العمل في الفصل التالي إلى الجانب التطبيقي، حيث سيتم تفصيل عملية تصميم وإنجاز مجفف شمسي من النوع غير المباشر، وتوضيح المواد والأدوات المستخدمة، ووصف العينة المختارة للتجفيف (الفلل الحار) وخصائصها، والأجهزة المستخدمة للقياس، ومن ثم شرح خطوات التجربة العملية لتقييم أداء المجفف المنجز.

قائمة مراجع الفصل الأول

- [1] ل. منصر، س. العبيد، "توزيع درجة الحرارة في المجفف الشمسي"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2018).
- [2] س. بوحنية، ه. يمبعي، "دراسة تجريبية لكفاءة المجفف الشمسي ذو الماص المقلوب تحت شروط طقس مدينة الوادي"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2022).
- [3] ش. قادري، "دراسة مقارنة تجريبية وعددية لانتقال الحرارة في المجفف الشمسي"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2019).
- [4] ع. ا. داودي، ع. شوشاني محمد "دراسة تحسين أداء المجفف الشمسي بمساعدة مواد تخزين الطاقة تحت شروط طقس مدينة الوادي- الجزائر"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2023).
- [5] م. ا. خزانة، أ. هرشة، ع. ا. فرج "دراسة أداء مجفف شمسي هجين في منطقة الوادي"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2024).
- [6] ر. التلي، س. ا. بوغرامة، "التجفيف الشمسي لثوم"، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، الجزائر (2015).
- [7] ب. بكوش، م. كشيدة، ع. ا. نصري، "إنجاز مجفف من اجل تحسين جودة المحاصيل الزراعية"، مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2023).
- [8] خ. زعبي، ع. حوامد، إ. هرمس، "دراسة كفاءة مجفف شمسي في منطقة الجنوب الشرقي بالجزائر- الوادي" مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي، الجزائر (2021).

الفصل الثاني

المجففات الشمسية

وطرق تجفيفها

1.II. مقدمة:

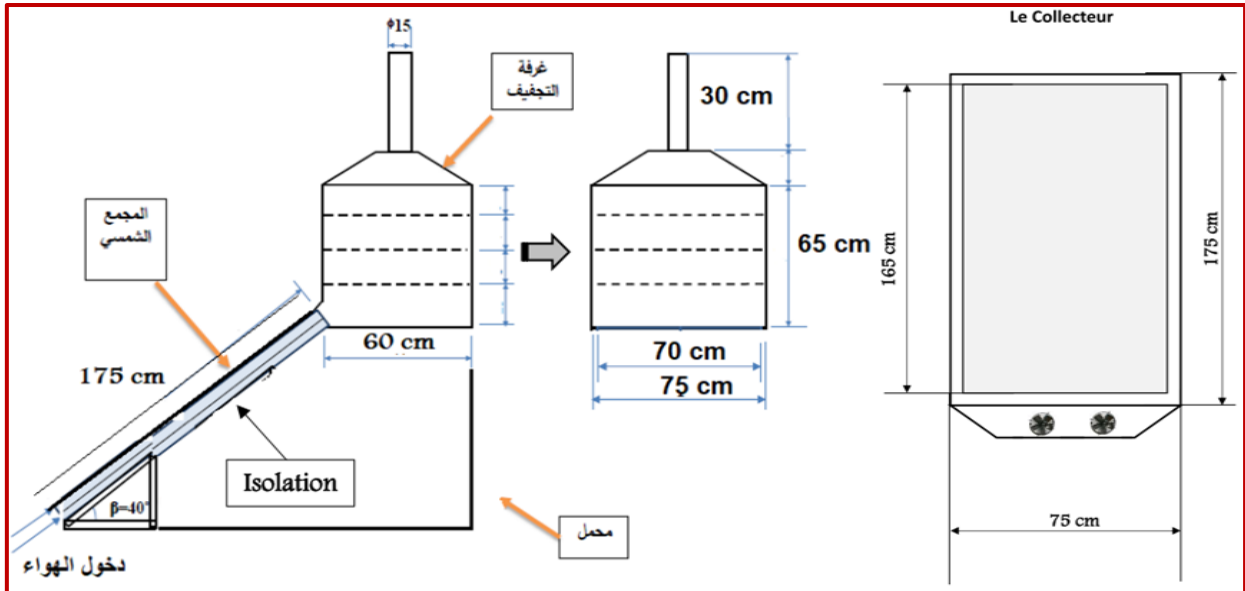
يُقدم هذا الفصل عرضًا تفصيليًا للمنهجية التجريبية المتبعة لتقييم أداء مجفف شمسي غير مباشر، مُصمم لتجفيف المنتجات الزراعية. يتضمن ذلك وصفًا دقيقًا لتصميم المجفف ومكوناته الرئيسية (الهيكل الداعم، حجرة التجفيف، وحدة المجمع الشمسي)، مع التركيز على المواد المستخدمة والأسس التصميمية لخليط الاستقبال الشمسي.

كما يستعرض الفصل شبكة أجهزة القياس المستخدمة ومواصفاتها، واستراتيجية توزيع المستشعرات الحرارية لضمان رصد دقيق للتدرجات الحرارية. بالإضافة إلى ذلك، يتم تفصيل إجراءات تحضير العينات التجريبية (الفلل الحار) وتحديد خصائصها الأولية والنهائية.

أخيرًا، يوضح الفصل بروتوكول تنفيذ التجارب التجفيفية، وظروف التشغيل، وآلية جمع البيانات، بهدف ضمان شفافية الإجراءات وموثوقية النتائج التي سيتم تحليلها لاحقًا.

2.II. المجفف الشمسي غير المباشر المستخدم في الدراسة:

تتناول هذه الدراسة تصميم وتطوير مجفف شمسي غير مباشر للخضروات، والذي تم بناؤه وتجميعه بمنهجية احترافية من قبل فريق بحثي في مختبر الهندسة الميكانيكية بجامعة الوادي [1]. استند تطوير هذا المجفف إلى نتائج دراسات وتحليلات سابقة بهدف تحقيق الكفاءة التشغيلية المثلى. يوضح الشكل (1-II) المخطط الهندسي للمجفف، مبيّنًا الأبعاد الأساسية لمكوناته الرئيسية.



الشكل (1-II): المخطط الهندسي للمجفف [1].

3.II. مكونات المجفف الشمسي وتصميمه:

يتألف المجفف الشمسي بشكل أساسي من ثلاثة مكونات رئيسية [1]: الهيكل الداعم، غرفة التجفيف، ووحدة المجمع الشمسي.

1.3.II. الهيكل الداعم (Support Structure):

تم تصنيع الهيكل الداعم، كما هو موضح في الشكل (II-2): تركيب الهيكل الداعم، من مقاطع فولاذية لضمان المتانة والقوة. تبلغ أبعاده التقريبية 2.00 متر طولاً، و 1.20 متر عرضاً، و 0.50 متر ارتفاعاً. تم ضبط زاوية ميلان الهيكل عند 33 درجة ($\beta=33^\circ$) في الشكل (II-1) وذلك لتحقيق الاستقبال الأمثل للإشعاع الشمسي المباشر [1].



الشكل (II-2): تركيب الهيكل الداعم [1].

2.3.II. غرفة التجفيف (Drying Chamber):

شيدت غرفة التجفيف، الموضحة في الشكل (II-3): تركيب غرفة التجفيف، من مادة الخشب. ولتحسين الأداء الحراري، تم دمج مواد عازلة حراريًا، وتحديدًا البوليسترين بسماكة 4 سم، على الأسطح الخارجية للمجمع الشمسي (كما هو مفصل في الوثيقة الأصلية) ويفترض أن يشمل ذلك جوانب وقاعدة غرفة التجفيف لتقليل الفواقد الحرارية [1].



الشكل (II-3): تركيب غرفة التجفيف [1].

3.3.II. وحدة المجمع الشمسي (Solar Collector Unit) :

تُعد وحدة المجمع الشمسي، المشار إليها في الشكل (II-4)، العنصر المحوري في تصميم المجفف. يتألف نظام التجميع الشمسي من لوحين، حيث يتميز كل لوح بالخصائص التالية:

❖ **الغطاء الزجاجي:** غطاء زجاجي شفاف بأبعاد 1.65 متر × 0.65 متر لكل لوح (كما هو مبين تفصيليًا في الشكل (II-5)). [2].



الشكل (II-4): وحدة المجمع الشمسي [2].



الشكل (II-5): غطاء زجاجي شفاف [2].

❖ **خليط الاستقبال الشمسي:** يتكون خليط مواد الاستقبال الشمسي، كما هو موضح في الشكل (II-6): مكونات خليط الاستقبال الشمسي (برادة ألومنيوم، ملح خشن، حصى 7/3)، من برادة الألومنيوم، والملح الخشن، والحصى (بنسبة أو تصنيف 7/3). يهدف هذا الخليط إلى زيادة السعة الحرارية وتحسين امتصاص الإشعاع الشمسي.



الشكل (II-6): مكونات خليط الاستقبال الشمسي (برادة ألمنيوم، ملح خشن، حصى 7/3).

يقدم الشكل (II-7) عرضًا شاملاً للوحدة المجهزة للمجفف الشمسي غير المباشر.



الشكل (II-7): مجفف شمسي غير مباشر.

4.II. أجهزة القياس المستخدمة:

خلال هذه التجربة، تم الاستعانة بالأجهزة المبينة في الجدول أدناه:

الجدول(1-II): أجهزة القياس المستخدمة [2].

اسم الجهاز	صورته
ميزان	
جهاز قياس سرعة الرياح	
حساسات حرارية	
فرن تجفيف مخبري او حاضنة مخبرية	



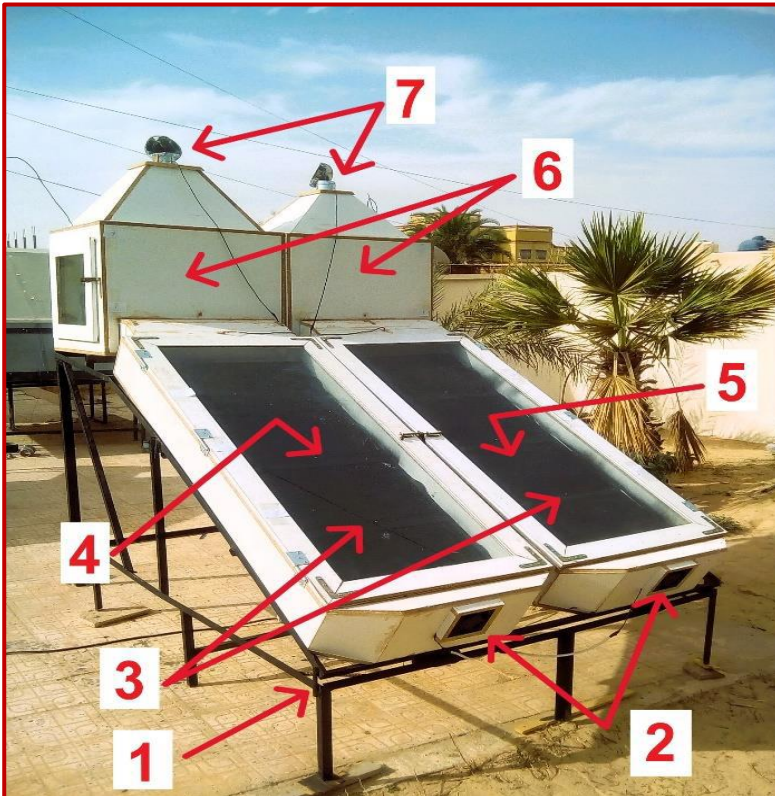
مقياس الاشعاع الشمسي



ميزان مخبري

5.II. التجربة:

1.5.II. تركيب المجفف الشمسي:



1. حامل.
2. مراوح كهربائية لدخول الهواء.
3. الغطاء الزجاجي.
4. صفائح خليط الملح وبرادة الألمنيوم مرتبة فوق بعضها البعض.
5. صفائح خليط الحصى وبرادة الألمنيوم مرتبة فوق بعضها البعض.
6. غرف التجفيف.
7. فتحات خروج الهواء.

الشكل(II-8): المجفف الشمسي المستعمل [1].

❖ آلية التشغيل:

يعمل المجفف بنظام التجفيف الشمسي غير المباشر. يتم تسخين الهواء المحيطي أثناء مروره عبر المجمعات الشمسية. بعد ذلك، يُوجَّه الهواء الساخن إلى غرفة التجفيف بواسطة آلية الحمل الحراري القسري، والتي يتم تحقيقها من خلال مروحتين للتهوية (بأبعاد 0.12 م × 0.12 م لكل منهما). يتم تصريف الهواء الرطب المحمل ببخار الماء من غرفة التجفيف عبر فتحات تهوية مخصصة (بأبعاد 0.1 م × 0.08 م).

II.2.5. تحضير المستقبل (المجمع) الشمسي:

في سياق تصميم مجمع الطاقة الشمسية (وحدة الامتصاص/التخزين الحراري) للمجفف الشمسي غير المباشر، يتطلب اختيار المواد المستخدمة موازنة دقيقة بين خصائص حرارية ووظيفية متعددة. بناءً على عدة أبحاث سابقة في مجال التجفيف [2]، تم اختيار مزيج من الحصى أو ملح الخشن مع الألمنيوم، كمواد أساسية لهذا الجزء، وذلك بهدف تحقيق توازن مثالي بين القدرة على التخزين الحراري والاستجابة السريعة لتغيرات درجة الحرارة.

فالحصى مثلاً، رغم موصليته الحرارية الأقل، يتمتع بقدرة نوعية على تخزين الحرارة أكبر مقارنة ببرادة الألمنيوم (حوالي 0.9 J/g°C للألمنيوم مقابل 0.8 J/g°C للحصى - مع ملاحظة اختلاف الكثافة)، مما يجعله المكون الأساسي للتخزين طويل الأمد. في المقابل، تتميز برادة الألمنيوم بموصلية حرارية عالية جداً (حوالي 237 W/m·K مقابل 7-1 W/m·K للحصى)، وهذا يمنحها القدرة على امتصاص ونقل الحرارة بسرعة فائقة، مما يساهم في تسريع عملية تسخين المجمع والاستجابة للتغيرات الشمسية.

ولتحقيق التآزر بين هاتين الخاصيتين، تم تحديد نسبة 70% حصى إلى 30% برادة ألمنيوم بالوزن كنسبة مثالية. هذه النسبة مُبررة بناءً على عدة اعتبارات منها: أولاً، توفر التوازن المطلوب بين كفاءة الامتصاص والتخزين وتكلفة المواد. ثانياً، تُعد هذه النسبة حاسمة لضمان السلامة والكثافة؛ حيث أن تجاوز 30% من برادة الألمنيوم قد يؤدي إلى زيادة كبيرة في وزن الخليط وتكلفته، فضلاً عن احتمالية حدوث ارتفاع سريع ومفرط في الحرارة داخل المجمع، مما قد يضر بالمواد أو الهيكل. ثالثاً، تضمن هذه النسبة توزيعاً متجانساً لبرادة الألمنيوم بين حبيبات الحصى، مما يمنع ترسبها في القاع أو إغلاق مسارات تدفق الهواء الساخن الضرورية لكفاءة المجمع. وبذلك، يمثل هذا المزيج ونسبته المحددة قراراً تصميمياً مدروساً يهدف إلى تحسين أداء وسلامة وحدة الامتصاص والتخزين الحراري. يوضح الجدول التالي أهم الخصائص الحرارية للحصى، الملح و برادة الألمنيوم .

الجدول (2-II): الخصائص الفيزيائية للحصى، ملح خشن، وبرادة الألمنيوم.

الخاصية	الحصى	برادة الألمنيوم	الملح الخشن (NaCl)
السعة الحرارية النوعية	°C 1000_800 J/k	900 ~ J/kg.°C	850 ~ J/kg.°C
الكثافة الفعلية	1600–2000 kg/m ³	500–700 kg/m ³ (لأنها برادة)	~2160 kg/m ³
الموصلية الحرارية	(ضعيفة 1–7) W/m.K	عالية (~237 W/m.K)	(متوسطة ~6.5) W/m.K
القدرة الفعلية على التخزين (لكل لتر)	□ جيدة جداً	□ ضعيفة نسبياً	□ جيدة
ملاحظات إضافية	متوفر ورخيص	خفيف، يسخن بسرعة	يمتص الرطوبة ويتكثف

3.5.II. اعداد صفيحة المستقبل (خليط الحصى وبرادة الألمنيوم):

لتحديد الكتل المطلوبة لكل مادة مكونة للخليط النهائي (الحصى وبرادة الألمنيوم) والمخصص لملء صفيحة الاستقبال، يتم أولاً حساب الكتلة الإجمالية للخليط (W). تمثل هذه الكتلة (W) المقدار الكلي اللازم لشغل حجم الصفيحة بالكامل بالمزيج المطلوب.

بافتراض أن x هي كتلة الحصى اللازمة لملء الصفيحة بالكامل عند استخدام الحصى فقط، وأن y هي كتلة برادة الألمنيوم اللازمة لملء الصفيحة بالكامل عند استخدام برادة الألمنيوم فقط. فيكون اذا عبارة كتلة الخليط النهائي في الصفيحة حسب العلاقة التالية :

$$W = \frac{1}{\frac{0.7}{x} + \frac{0.3}{y}} \quad (1-II)$$

بناءً على ذلك، فإن الكتلة النهائية للحصى (W₁) والكتلة النهائية لبرادة الألمنيوم (W₂) ضمن الخليط، تُحسبان وفقاً للنسب المحددة مسبقاً والكتلة الإجمالية للخليط (W). تتم الحسابات على النحو التالي:

- كتلة الحصى (W₁): W₁ = 0.7 g
- كتلة برادة الألمنيوم (W₂): W₂ = 0.3 g

الخطوات العملية تمت كما يلي :

بعد وضع كل صفيحة على الميزان ومعايرته إلى الصفر، تمت تعبئتها ببرادة الألمنيوم حتى الامتلاء الكامل (الشكل (9-II)). وقد بلغ وزن برادة الألمنيوم في كل صفيحة 1.7 كغ، أي y = 1.7 kg



الشكل (9-II): صفيحة المستقبل مملوئة ببرادة الألمنيوم.

تم ملء صفيحة المستقبل بمادة الحصى ذو مقاس 7/3 ملم كما هو موضح في الصورة (10-II)، ثم وُضعت على الميزان لقياس الكتلة. وقد تم تسجيل كتلة الحصى داخل الصفيحة بقيمة $x = 8.2$ كغ.



الشكل (10-II): صفيحة المستقبل مملوئة بالحصى.

باستخدام العلاقة رقم (1) لحساب الكتلة الإجمالية للخليط داخل الصفيحة، تم الحصول على الكتلة التالية: $W = 3.819 \text{ kg}$

وبناءً على ذلك، يمكن استنتاج الكتل النهائية المكونة للخليط في صفيحة المستقبل، حيث تم تحديد:

- كتلة الحصى: $W_1 = 2.67 \text{ kg}$.
- كتلة برادة الألمنيوم: $W_2 = 1.145 \text{ kg}$.

II.4.5. تركيب المستشعرات الحرارية:

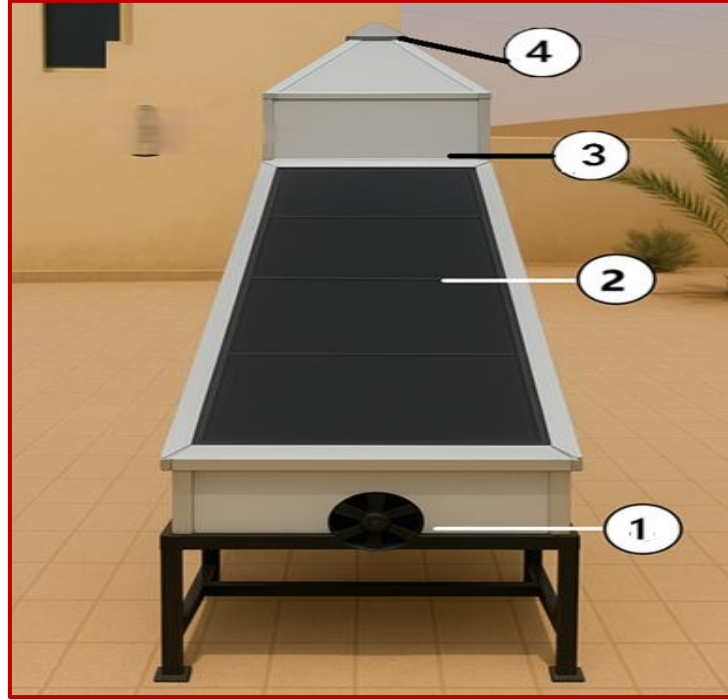
II.4.5.1. تثبيت المستشعرات الحرارية وتوزيعها:

لغرض رصد الأداء الحراري للمجفف الشمسي غير المباشر، تم تثبيت مجموعة من المستشعرات الحرارية (الموضحة في الصورة (II-11)) في مواقع استراتيجية ضمن مكونات النظام. استهدف هذا الإجراء قياس درجات الحرارة بدقة عند نقاط متعددة، مما يسمح بفهم معمق لآلية انتقال الحرارة وتوزيعها. وقد تم توزيع هذه المستشعرات وفقاً لمنهجية مدروسة تهدف إلى توفير تمثيل شامل ودقيق للتدرجات الحرارية ضمن نظام التجفيف [3]. يوضح الشكل (II-12) تفاصيل هذا التوزيع، حيث وُضعت المستشعرات على النحو التالي:

- ❖ **المستشعر الأول (T_outside):** وُضع خارج منظومة التجفيف لقياس درجة حرارة الهواء المحيط (الظروف الخارجية).
- ❖ **المستشعر الثاني (T_collector):** وُضع داخل المجمع الشمسي لتقييم كفاءة امتصاص الطاقة الشمسية ودرجة حرارة الهواء المُسخَّن.
- ❖ **المستشعر الثالث (T_dryer_in):** وُضع عند مدخل حجرة التجفيف لقياس درجة حرارة الهواء الداخل إلى الحجرة.
- ❖ **المستشعر الرابع (T_dryer_out):** وُضع عند مخرج حجرة التجفيف لقياس درجة حرارة الهواء الخارج بعد مروره على المادة المجففة.



الشكل (II-11): يوضح هذا التوزيع بشكل مفصل [1].



الشكل (II-12): مواضع تركيب المستشعرات الحرارية.

5.5.II. تحضير العينات:

1.5.5.II. مراحل تحضير العينات:

1.1.5.5.II. الوزن المستهدف أثناء التجفيف الشمسي غير المباشر:

لتحديد الوزن المستهدف أثناء التجفيف الشمسي غير المباشر عندما يكون محتوى الرطوبة النهائي المطلوب معروفاً، اتبع هذا الإطار الديناميكي الحراري والرياضي المستمد من دراسات التجفيف الزراعي:

الصيغة الرئيسية للوزن المستهدف

يمكن حساب الوزن النهائي المطلوب (W_{final}) باستخدام:

$$W_{final} = W_{initial} \times [(1 - MC_{initial}) / (1 - MC_{final})] \quad (2-II)$$

حيث: $W_{initial}$ = الوزن الأولي للمنتج قبل التجفيف.

$MC_{initial}$ = محتوى الرطوبة الأولي (بالصيغة العشرية، على سبيل المثال $78.58\% = 0.7858$)

MC_{final} = محتوى الرطوبة المستهدف (بالصيغة العشرية).

II.2.1.5.5. قياس المعلمات الأولية للتجفيف:**II.2.1.5.5.1. وزن المنتج الطازج ($W_{initial}$):**

للبدء في العمل التجريبي وتحديد الوزن الأولي للمنتج الطازج ($W_{initial}$)، تم اتباع الخطوات التالية لتحضير عينة الفلفل الحار:

- ❖ **جمع المنتج (القطف):** تم جمع حبات الفلفل الحار الطازجة مباشرة من مصدرها (المزرعة أو الحقل). جرى الحرص على اختيار ثمار صحية وخالية من التلف الظاهر لضمان تمثيلية العينة.
- ❖ **التنقية والتحضير:**
 - نُقلت العينة المجمعة إلى المختبر لإجراء عمليات التنقية الأولية.
 - شملت التنقية فحص كل حبة فلفل لإزالة أي شوائب خارجية مثل الأتربة أو الأوراق الزائدة أو الأجزاء التالفة.
 - تم غسل حبات الفلفل بلطف بالماء الجاري لإزالة أي بقايا سطحية.
 - بعد الغسيل، نضع أنصاف على مناديل ورقية جافة لامتصاص قطرات الماء الزائدة. كذلك نتركها لبضع دقائق حتى نتأكد من ثبات الوزن (حالة الرطوبة السطحية ثابتة).
 - كجزء من التحضير النهائي قبل الوزن وتسهيل العمليات اللاحقة (مثل التجفيف أو الاستخلاص)، تم تقطيع حبات الفلفل المحضرة بعناية إلى نصفين باستخدام أداة حادة ونظيفة. كذلك تمت إزالة البذور كما هو موضح في الشكل (II-13).



الشكل (II-13): صورة فلفل حار مقسم الي نصفين.

- ❖ **قياس الوزن الأولي ($W_{initial}$):** تم قياس وزن العينة المحضرة والمقطعة في حالتها الرطبة.

لضمان الدقة المطلوبة في العمل المخبري، تم استخدام ميزان إلكتروني حساس لقياس الوزن.

سُجل وزن العينة الطازجة بدقة عالية، حيث بلغ 113.5153 غرام. يمثل هذا القيمة وزن المنتج الطازج الأولي ($W_{initial}$) المستخدم في التجربة.

II.2.2.1.5.5. تحديد محتوى الرطوبة الأولي ($MC_{initial}$):

بعد التحديد الدقيق للوزن الأولي ($W_{initial}$) لعينة الفلفل الحار، كانت الخطوة الحاسمة في التحضير لدراسة التجفيف غير المباشر هي التحديد الدقيق لمحتوى الرطوبة الأولي ($MC_{initial}$). هذا المعامل أساسي لأنه يمثل الحمل المائي الأولي في العينة ويعمل كخط أساس ضروري لتقييم حركات التجفيف، الكفاءة وحسابات توازن الكتلة اللاحقة. لتحديد $MC_{initial}$ ، تم استخدام طريقة التجفيف بالفرن وفقاً للإجراءات المخبرية القياسية. تم وضع جزء ممثل من العينة في فرن مُتحكم بدرجة الحرارة (كما هو موضح في الشكل (II-14)) وتم تجفيفه عند درجة حرارة ثابتة قدرها 65 درجة مئوية لمدة 24 ساعة، أو حتى استقر وزن العينة، مما يشير إلى أن جميع الرطوبة الحرة قد تمت إزالتها. وبشكل محدد، وصلت العينة إلى وزن جاف مستقر (W_{dry}) قدره 12.6117 جرام (انظر الشكل (II-15))، والذي يعمل كأساس لحساب محتوى الرطوبة الأولي. على الرغم من وجود طرق أخرى مثل أجهزة قياس الرطوبة للتقييم السريع، إلا أن التجفيف بالفرن حتى الوزن الثابت يُفضل غالباً لدقته في إعدادات البحث. يُعد $MC_{initial}$ المحسوب باستخدام هذا الوزن الجاف المحدد ضرورياً لتحليل أداء عملية التجفيف غير المباشر المطبقة على الفلفل الحار:



الشكل (II-14): فرن التجفيف المخبري [2].



الشكل (II-15): صورة عينة الفلفل بعد التجفيف.

نسبة الرطوبة العينة على أساس الوزن الرطب يكون حسب العلاقة التالية:

$$MC_{initial}\% = \frac{W_{initial} - W_{dry}}{W_{initial}} \times 100 \quad (3-II)$$

وبما انه لدينا في هذه الحالة ($W_{initial} = 113.5153 \text{ g}$) و ($W_{dry} = 12.6117 \text{ g}$) نجد

$$MC_{initial}\% = \frac{113.5153 - 12.6117}{113.5153} \times 100 = \frac{100.9036}{113.5153} \times 100 \approx 88.89\% \quad (4-II)$$

3.2.1.5.5.II. تحديد الوزن النهائي المجفف W_{final} :

يستند تحديد محتوى الرطوبة النهائي المستهدف (MC_{final}) للمادة المجففة إلى معايير أساسية تتعلق بضمان استقرار المنتج أثناء التخزين أو الامتثال للوائح التنظيمية المعمول بها. تشير المراجع العلمية إلى أن النطاقات الشائعة لمحتوى الرطوبة النهائي تتراوح بين 10-15% للمنتجات الحبوبية [3][4]، وبين 8-10% للفواكه والخضروات لضمان جودتها وحفظها [5][6]. وفي إطار هذه الدراسة، تم اعتماد قيمة محتوى رطوبة نهائي مستهدف (MC_{final}) تساوي 0.1 (بالصيغة العشرية). سيتم استخدام هذه القيمة، بالاقتران مع العلاقة (2-II)، لحساب الوزن النهائي المستهدف للمادة الخاضعة لعملية التجفيف الشمسي غير المباشر يكون كما يلي :

$$W_{initial} = 113.5153 \text{ g} \quad \text{لدينا:}$$

$$MC_{initial} = 0.8889$$

$$MC_{final} = 0.1$$

$$W_{final} = 113.5153 \times \left(\frac{1 - 0.8889}{1 - 0.1} \right)$$

$$W_{final} = 113.5153 \times \left(\frac{0.1111}{0.9} \right)$$

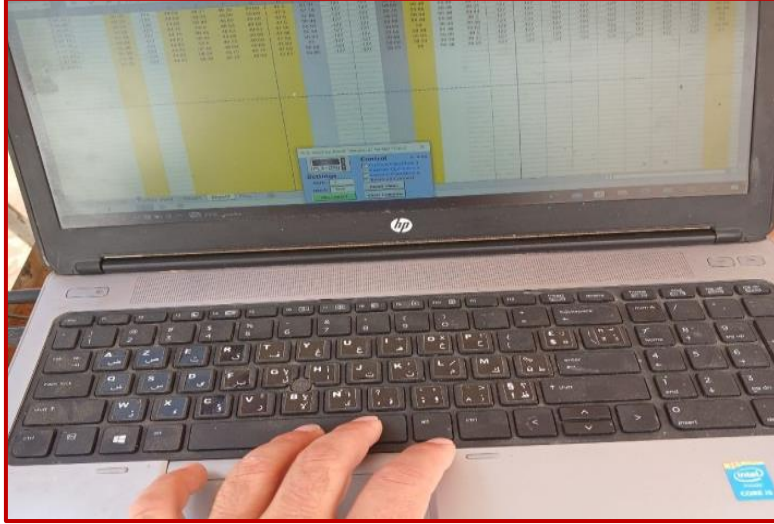
$$W_{final} = 113.5153 \times 0.1234$$

$$\Rightarrow W_{final} \approx 14.008 \text{ g} \quad (5-II)$$

6.5.II. تنفيذ التجربة ومراقبة بارامترات التجفيف:

استُهلَّت إجراءات التجفيف التجريبية بتحميل كل حجرة من حجرتي التجفيف بعينة من الفلفل الحار بكتلة رطبة أولية قدرها 100 جرام. لتقييم الأداء الديناميكي الحراري للمجفف الشمسي، تم إجراء مراقبة دقيقة ومستمرة لدرجات الحرارة عند نقاط محددة مسبقاً داخل النظام. وقد تحقق ذلك باستخدام شبكة من المستشعرات الحرارية المتصلة بنظام حاسوبي لتسجيل البيانات (Data Acquisition System).

بالتوازي مع قياسات درجة الحرارة، تم تسجيل المتغيرات البيئية والتشغيلية الأساسية المؤثرة على عملية التجفيف، والتي شملت: شدة الإشعاع الشمسي (Solar Irradiance)، ومستويات الرطوبة النسبية للهواء (Relative Humidity)، وسرعة تدفق الهواء. تم توثيق جميع هذه القياسات، بما في ذلك درجات الحرارة، على فترات زمنية منتظمة كل 30 دقيقة طوال المدة الكلية للتجربة. (تُظهر الأنماط الحرارية المسجلة في الشكل 45 أمثلة على قياسات درجات الحرارة التي تم جمعها).



الشكل (II-16): قياسات درجات الحرارة [1].

لمتابعة حركية التجفيف (Drying Kinetics) وتقييم معدل فقدان الرطوبة، تم قياس التغير في كتلة عينات الفلفل بشكل دوري. تضمنت بروتوكول القياس تسجيل أوزان العينات كل 30 دقيقة خلال الساعتين الأوليتين من بدء التجربة. بعد ذلك، تم تمديد الفترة الفاصلة بين القياسات إلى ساعة واحدة خلال الساعات الأربع التالية. وأخيراً، خلال اليوم الثاني من التجفيف، تم تسجيل الأوزان كل ساعتين حتى الوصول إلى الوزن المستهدف أو نهاية الفترة التجريبية المحددة.

6.II. الخاتمة:

لقد تم في هذا الفصل إرساء الأساس المنهجي للدراسة التجريبية الحالية، وذلك من خلال تقديم وصف تفصيلي لتصميم المجفف الشمسي غير المباشر ومكوناته، وتحديد مواصفات أجهزة القياس المعتمدة، وشرح بروتوكول تحضير العينات وإجراءات تنفيذ التجارب التجفيفية. إن توثيق هذه الجوانب المنهجية بدقة يضمن الشفافية والقابلية لتكرار التجربة، ويُعد خطوة حاسمة نحو فهم أعمق لأداء النظام.

بناءً على الإجراءات والقياسات الموضحة، تم تجميع مجموعة بيانات شاملة تعكس الظروف التشغيلية والمتغيرات الحرارية الرئيسية خلال عملية التجفيف. الفصل التالي سيخصص لتحليل هذه البيانات ومناقشة النتائج المستخلصة، بهدف تقييم أداء المجفف الشمسي واستخلاص الاستنتاجات العلمية ذات الصلة.

قائمة مراجع الفصل الثاني

- [1] F. Thesis, “Assessment of the Thermal Efficiency of an Indirect Solar Drying System in El Oued state,” 2024.
- [2] F. Des and S. Et, “Master academique,” pp. 1–66, 2013.
- [3] V. S. Vigneswaran et al., “Comparative assessment of indirect cabinet solar dryers in various operating modes versus direct cabinet dryers: A techno-economic analysis,” *Sol. Energy*, vol. 268, p. 112266, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2023.112266>.
- [4] A. Dissa, H. Desmorieux, J. Bathiebo, and J. Koulidiati, “a Comparative Study of Direct and Indirect Solar Drying of Mango,” *Glob. J. Pure Appl. Sci.*, vol. 17, no. 2, pp. 273–294, 2011, [Online]. Available: www.globaljournalseries.com.
- [5] J. Ennissioui and T. El Rhafiki, “Experimental study of a natural convection indirect solar dryer,” *Heliyon*, vol. 9, no. 11, 2023.
- [6] A. Boubeghal and A. Chaker, “Design and experimental studies of an indirect-mode natural convection solar dryer for henna leaves (*Lawsonia inermis*),” *World Rev. Sci. Technol. Sustain. Dev.*, vol. 14, no. 4, pp. 344–358, 2018, doi: [10.1504/WRSTSD.2018.095722](https://doi.org/10.1504/WRSTSD.2018.095722).

الفصل الثالث

دراسة النتائج

التجريبية ومناقشتها

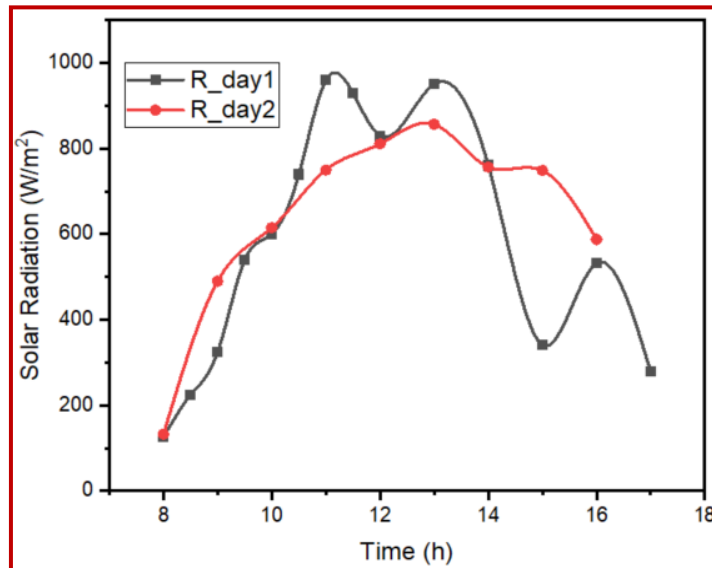
1.III. مقدمة:

يتناول هذا الفصل تقييماً مقارناً لأداء مجففين شمسيين غير مباشرين متطابقين في التصميم، يختلفان فقط في مادة المستقبل الحراري داخل المجمع الشمسي. يعتمد الأول على خليط من الحصى وبردادة الألمنيوم، بينما يستخدم الثاني خليطاً من الملح وبردادة الألمنيوم. يهدف التقييم إلى تحديد أي من الخليطين يحقق كفاءة أفضل في تحويل الطاقة ونقل الحرارة خلال تجفيف الفلفل الحار. تم توثيق الظروف البيئية، وقياس درجات الحرارة في نقاط مختلفة، ومتابعة تغير الكتلة لتحديد معدلات التجفيف. يشمل التحليل مقارنة الأداء الحراري، كفاءة المجمع، والاستجابة الحرارية، وصولاً إلى نتائج تساهم في تحسين تصميم وكفاءة المجففات الشمسية غير المباشرة.

2.III. النتائج ومناقشتها:

1.2.III. شدة الإشعاع الشمسي بدلالة الزمن:

بهدف توثيق الظروف البيئية المؤثرة على عملية التجفيف، تم رصد كثافة الإشعاع الشمسي الكلي (Global Solar Radiation) خلال يومي التجفيف المخصصين لإجراء التجارب. وقد استُخدم لهذا الغرض جهاز قياس الإشعاع الشمسي المحمول (Handheld Pyranometer)، حيث سُجلت القراءات بشكل دوري بفواصل زمني قدره ثلاثون دقيقة (30 min). وقد تم تمثيل البيانات المُجمعة بيانياً، حيث يُظهر الشكل (1-III) التغيرات الزمنية في كثافة الإشعاع الشمسي على مدار فترتي القياس.



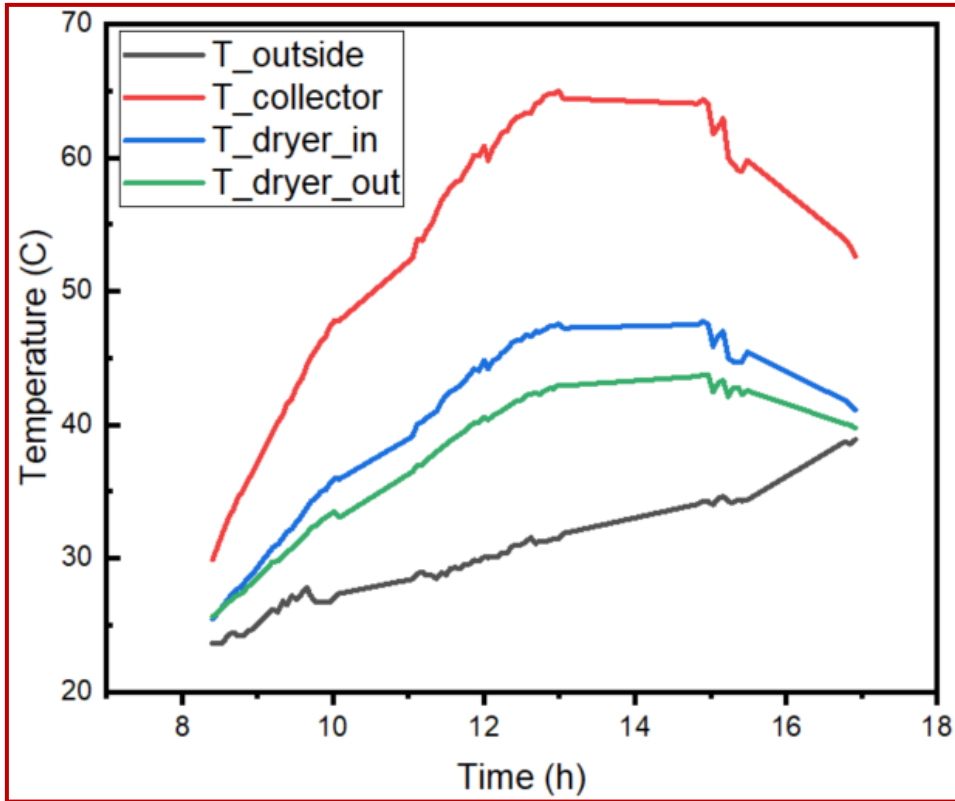
الشكل (1-III): شدة الإشعاع الشمسي مقابل الزمن.

كما هو موضح في الشكل (1-III)، في اليوم الأول تميز منحنى الإشعاع بقمّتين عند منتصف النهار ($\approx 1000 \text{ W/m}^2$) مع هبوط وصعود مفاجئتين نتيجة مرور سحب ركامية متقطعة وسريعة الحركة، بينما في اليوم الثاني كان المنحنى أكثر سلاسة بقمّة واحدة أقل قيمة ($\approx 860 \text{ W/m}^2$) وهبوط تدريجي يعكس غطاءً

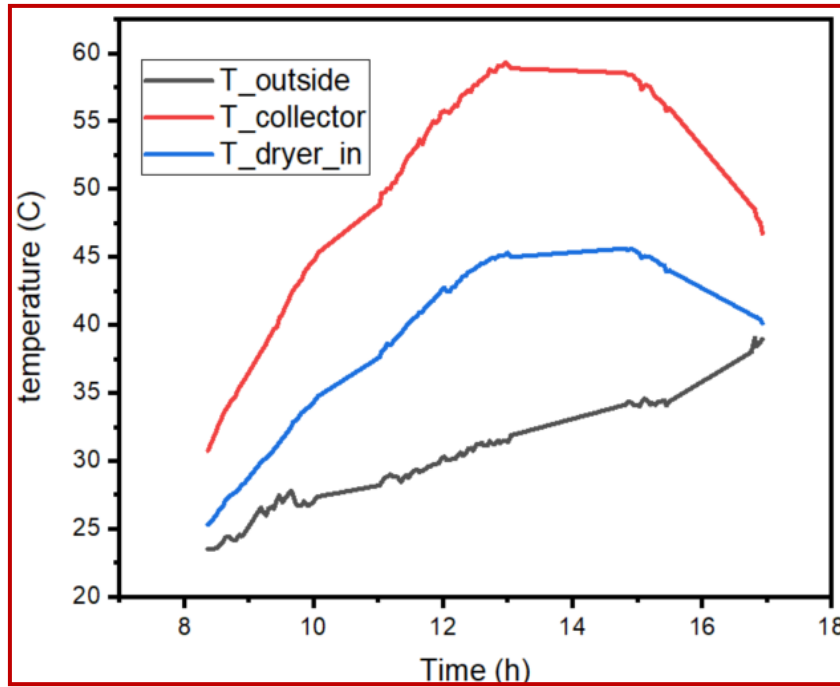
سحابيًا أكثر انتظامًا أو رقيقًا. يوضح هذا أن نوع السحب وكثافتها وسرعة حركتها تتحكم في تقطع الإشعاع وحدته خلال اليوم.

III.2.2. تغير درجات الحرارة بدلالة الزمن:

لتقييم الأداء الحراري للمجففات، تم رصد وتوثيق درجات الحرارة في نقاط استراتيجية متعددة ضمن حيز كل مجفف. وقد استُخدمت لهذا الغرض مستشعرات حرارية (Thermal Sensors)، تم ربطها بوحدة متحكم دقيق من نوع أردوينو (Arduino Microcontroller Board). تولت وحدة الأردوينو جمع قراءات درجات الحرارة بشكل دوري ونقلها إلى جهاز حاسوب متصل، حيث تم عرض القيم رقمياً وتسجيلها. امتدت عملية تسجيل البيانات على مدار فترة التجفيف الكاملة (يومين)، وذلك بمعدل قراءة واحدة كل عشر دقائق. تُظهر الأشكال (III-2) و (III-3) المنحنيات البيانية للتغيرات الزمنية لدرجات الحرارة المسجلة للمجفف الأول والمجفف الثاني، على التوالي.



الشكل (III-2): تغيرات درجة الحرارة الزمنية للمجفف (1).



الشكل (III-3): تغيرات درجة الحرارة الزمنية للمجفف (2).

أظهرت نتائج المقارنة بين المجففين الشمسيين غير المباشرين، اللذين يختلفان فقط في مادة المستقبل الشمسي، أن المجفف الأول (D1)، الذي يستخدم خليطاً من الحصى وبرادة الألمنيوم، قد حقق أداءً حراريًا أعلى من المجفف الثاني (D2) الذي يستخدم خليط الملح وبرادة الألمنيوم. حيث سجل المجفف الأول فرقاً حراريًا أكبر بين درجة حرارة المجمع والهواء المحيط ($T_2 - T_1 \approx 25^\circ\text{C}$) مقارنة بالمجفف الثاني ($\approx 20^\circ\text{C}$)، بالإضافة إلى درجات حرارة أعلى عند مدخل غرفة التجفيف ($T_3 \approx 47^\circ\text{C}$ مقابل 44°C). كما أظهر المجفف الأول انتظامًا جيدًا في نقل الحرارة من المجمع إلى غرفة التجفيف مع فقد حراري معتدل ($T_2 - T_3 \approx 18^\circ\text{C}$) وفارق حراري منخفض داخل غرفة التجفيف ($T_3 - T_4 \approx 3^\circ\text{C}$)، مما يشير إلى كفاءة حرارية جيدة في استغلال الهواء الساخن. في المقابل، ورغم أن المجفف الثاني أظهر استقرارًا حراريًا نسبيًا في درجات الحرارة الداخلية، إلا أن أداءه العام كان أقل. ويُعزى تفوق المجفف الأول إلى الخصائص الفيزيائية الأفضل للحصى، مثل سعة حرارية نوعية أعلى وموصلية حرارية أفضل مقارنة بالملح، ما ساعد على امتصاص وتخزين ونقل الحرارة بكفاءة أكبر. تُبرز هذه النتائج أهمية اختيار مادة المستقبل في تصميم المجمعات الشمسية، حيث يُمكن أن تؤثر بشكل مباشر على كفاءة نظام التجفيف الشمسي.

III.2.3. تحليل يربط بين شدة الإشعاع والاستجابة الحرارية للمجمعين:

بعد الوصول إلى ذروة الإشعاع الشمسي، يكشف السلوك الحراري للمجمّع عن رؤى قيمة حول قدرته على تخزين الحرارة. من خلال مقارنة درجة حرارة المجمع خلال فترات زمنية متماثلة قبل وبعد الظهيرة الشمسية — على سبيل المثال، في الساعة 10:00 صباحاً والساعة 16:00 مساءً — يتضح أن درجة حرارة المجمع تكون عادةً أعلى في فترة ما بعد الظهر مما كانت عليه في الصباح، حتى تحت مستويات إشعاع شمسي متشابهة. يشير هذا التباين إلى وجود القصور الحراري والتخزين الحراري الفعال داخل مواد المجمع.

تقوم المواد الموجودة داخل المجمع (الحصى + الألمنيوم أو الملح + الألمنيوم) بتخزين الحرارة خلال فترة تزايد الإشعاع الشمسي. وبمجرد أن يبدأ المدخل الشمسي في الانخفاض بعد الظهر، تستمر الطاقة الحرارية المخزنة في الانطلاق، مما يحافظ على درجات حرارة أعلى مما يمكن تحقيقه بالاعتماد على المدخل الشمسي وحده. يمكن ملاحظة هذا التأثير في التبريد المتأخر لمنحنى درجة حرارة المجمع بعد بلوغ الإشعاع الشمسي ذروته وبدء انخفاضه.

تعكس بقاء درجة الحرارة مرتفعة في فترة ما بعد الظهر مقارنة بالصباح، رغم مستويات الإشعاع المتشابهة، كفاءة التخزين الحراري لتרכيبة مواد المجمع. المواد ذات السعة الحرارية العالية (مثل الملح أو الحصى) تمتص المزيد من الطاقة أثناء ذروة الإشعاع وتطلقها تدريجياً، مما يؤدي إلى تنعيم تقلبات درجة الحرارة. على النقيض من ذلك، المواد ذات السعة المنخفضة ستؤدي إلى انخفاضات أكثر حدة في درجة الحرارة، مما يشير إلى أداء تخزين ضعيف.

في الختام، يوفر السلوك غير المتماثل لدرجة حرارة المجمع حول الظهيرة الشمسية مؤشراً قوياً على كفاءة التخزين الحراري. تؤكد درجات الحرارة المرتفعة في فترة ما بعد الظهر، مقارنة بنظيراتها في الصباح تحت إشعاع مماثل، أن مواد المجمع تساهم في الحفاظ على الأداء الحراري للنظام بما يتجاوز التوافر الشمسي المباشر — وهي ميزة حاسمة للحفاظ على ظروف التجفيف خلال الساعات المتأخرة أو أثناء الغطاء السحابي المتقطع.

4.2.III. تحليل الفرق الحراري بين مدخل المجفف ومدخل غرفة التجفيف:

بهدف تقييم أداء التحويل الطاقوي لكل مجفف شمسي، تم التركيز على تحديد الفارق الحراري (ΔT) بين درجة حرارة الهواء عند مخرج المجمع الشمسي (والتي تمثل درجة حرارة مدخل غرفة التجفيف، T_{dryer_in}) ودرجة الحرارة المحيطة بالنظام ($T_{outside}$ ، المقاسة عند مدخل المجمع الشمسي). يُعد هذا الفارق مؤشراً مباشراً على كفاءة اكتساب الطاقة الحرارية في المجمع الشمسي، وبالتالي على الأداء الطاقوي للمجفف. ونظراً لثبات معدل تدفق الهواء الكتلي خلال المجمعين، الناتج عن استخدام مروحتين متطابقتين وتمائل أبعاد المجمعين، فإن (ΔT) يوفر أساساً موثوقاً للمقارنة بين أدائهما. بالاستناد إلى البيانات الحرارية المسجلة سابقاً، تم حساب الفارق الحراري باستخدام العلاقة التالية:

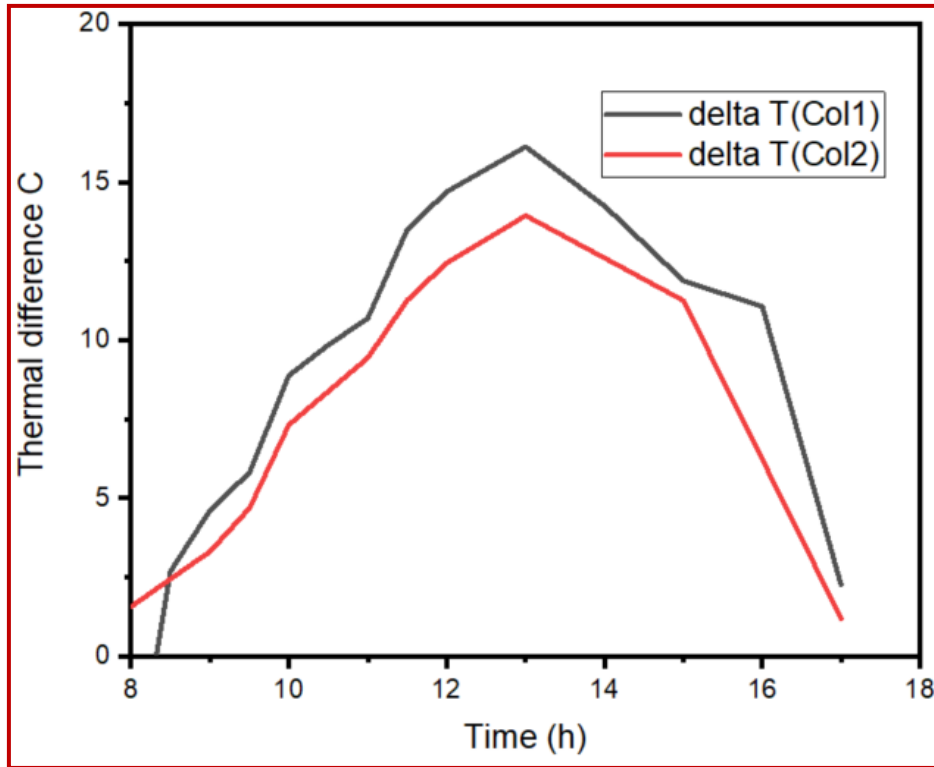
$$\Delta T = T_{dryer_in} - T_{outside} \quad (1-III)$$

حيث:

T_{dryer_in} : درجة حرارة الهواء عند مدخل حجرة التجفيف ($^{\circ}C$).

$T_{outside}$: درجة حرارة الهواء المحيط خارج منظومة التجفيف ($^{\circ}C$).

تم تجميع قيم الفروقات الحرارية (ΔT) المحسوبة وتمثيلها بيانياً كما هو موضح في الشكل (4-III).



الشكل (III-4): منحنى الفرق الحراري للمجففين.

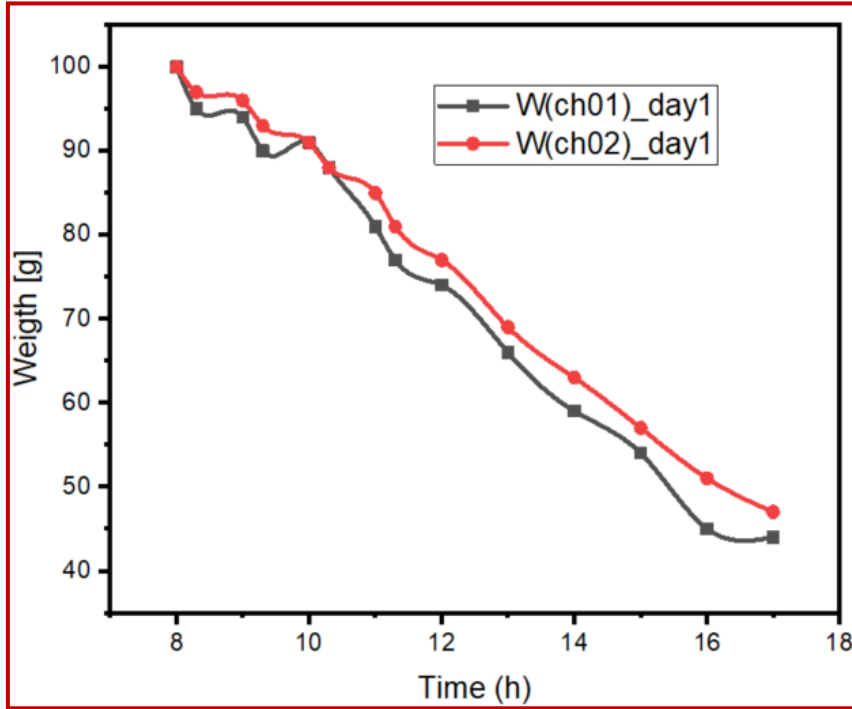
يستعرض الشكل (III-4) المنحنى البياني لأداء مجففين شمسيين (Col1 و Col2) من حيث الفارق الحراري (ΔT) بين هواء مدخل غرفة التجفيف ودرجة حرارة الهواء المحيط خلال ساعات النهار، كمؤشر على كفاءة التسخين الشمسي. أظهر المجفف Col1 الذي يستخدم خليط الحصى وبرادة الألمنيوم، أداءً حراريًا متفوقًا مقارنة بـ Col2 الذي يعتمد على خليط الملح وبرادة الألمنيوم. يتجلى التفوق في قيم ΔT الأعلى خلال معظم اليوم، ومعدل تسخين أسرع، وفارق نزوة بلغ 2.4°C لصالح Col1، مما يدل على كفاءة أعلى في نقل الطاقة الحرارية.

تُعزى هذه الفروقات إلى الخصائص الفيزيائية الحرارية للمواد المستخدمة، حيث يمتلك خليط الحصى امتصاصية أعلى وموصلية حرارية أفضل مقارنة بالملح، بالإضافة إلى استقرار أعلى في الظروف الرطبة. كما يشير التحليل إلى أن تصميم Col1 يحقق تكاملاً حراريًا أفضل (المساحة تحت المنحنى)، مما يعزز فعاليته في التجفيف.

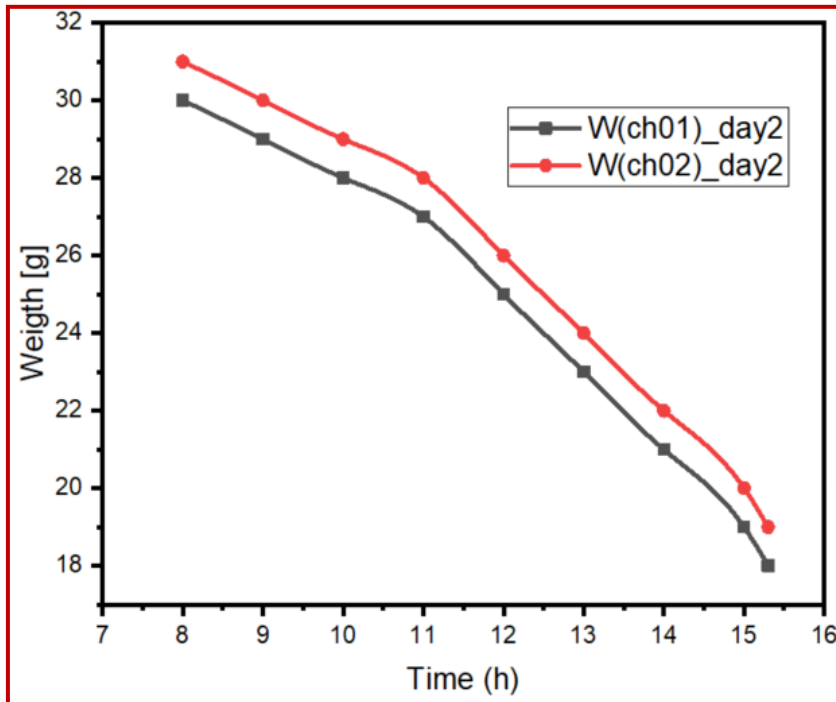
III.5.2. الرطوبة وتغير الكتلة بدلالة الزمن:

بهدف دراسة حركية التجفيف وتقييم معدل فقدان الرطوبة، تم رصد وتوثيق التغير في كتلة عينات الفلفل بشكل دوري على مدار يومي التجفيف. أُجريت قياسات الوزن باستخدام ميزان دقيق بفواصل زمنية قدره ثلاثون دقيقة (30 min) لكل عينة. وقد بلغت الكتلة الابتدائية الرطبة (Initial Wet Mass) لعينات الفلفل 100 جرام لكل غرفة تجفيف. حُددت الكتلة النهائية المستهدفة للفلفل (Target Final Mass)، والتي عندها تُعتبر عملية التجفيف مكتملة، بحوالي 15 جرامًا. وقد تم احتساب هذه القيمة المستهدفة استنادًا إلى العلاقات الرياضية أو النماذج الموصوفة في الفصل السابق من هذه الدراسة.

يوضح الشكل (5-III) المنحنيات البيانية لتطور كتلة عينات الفلفل (المُشار إليها بالرمز W(ch01)_day للغرفة الأولى للمجفف الذي يستخدم خليطاً من الحصى وبرادة الألمنيوم و W(ch02)_day للغرفة الثانية للمجفف الذي يحوي على خليط الملح وبرادة الألمنيوم) خلال اليوم الأول من عملية التجفيف، بينما يعرض الشكل (6-III) البيانات المماثلة لليوم الثاني من التجفيف.



الشكل (5-III): منحنيات تغير كتلة الفلفل - اليوم الأول.



الشكل (6-III): منحنيات تغير كتلة الفلفل - اليوم الثاني.

منحنى الكتلة بدلالة الزمن أظهر أن المجفف D1 الذي يستخدم خليطاً من الحصى وبرادة الألمنيوم أزال كمية أكبر من الرطوبة، حيث انخفض وزن العينة من ~100 غ إلى ~44 غ، مقارنة بـ ~48 غ في المجفف D2 الذي يحوي على خليط الملح وبرادة الألمنيوم، ما يعكس فرقاً قدره 4 غ تقريباً، أي زيادة نسبية في الكفاءة قدرها حوالي 7.7%. يُعزى هذا الأداء المتفوق إلى الخصائص الفيزيائية الحرارية الأفضل للحصى، مثل الموصلية الحرارية الأعلى والسعة الحرارية النوعية المناسبة، ما سمح بتخزين الحرارة وتحريرها بفعالية خلال فترة التجفيف. بالمقابل، أظهر المجفف الثاني استقراراً حرارياً نسبياً، لكن بأداء أقل. تؤكد هذه النتائج أن اختيار مادة المستقبل الحراري يلعب دوراً محورياً في تحسين كفاءة المجففات الشمسية، ويوصى بتوسيع الدراسة لتشمل أياماً إضافية وتحليل الكفاءة الحرارية الكلية لكل نظام.

6.2.III. تحليل أداء المجففين غير المباشرين باستخدام معدل التجفيف (Drying Rate):

لتحليل كفاءة المجففين الشمسيين غير المباشرين، تم اعتماد صيغة معدل التجفيف، والمعبر عنها بالعلاقة:

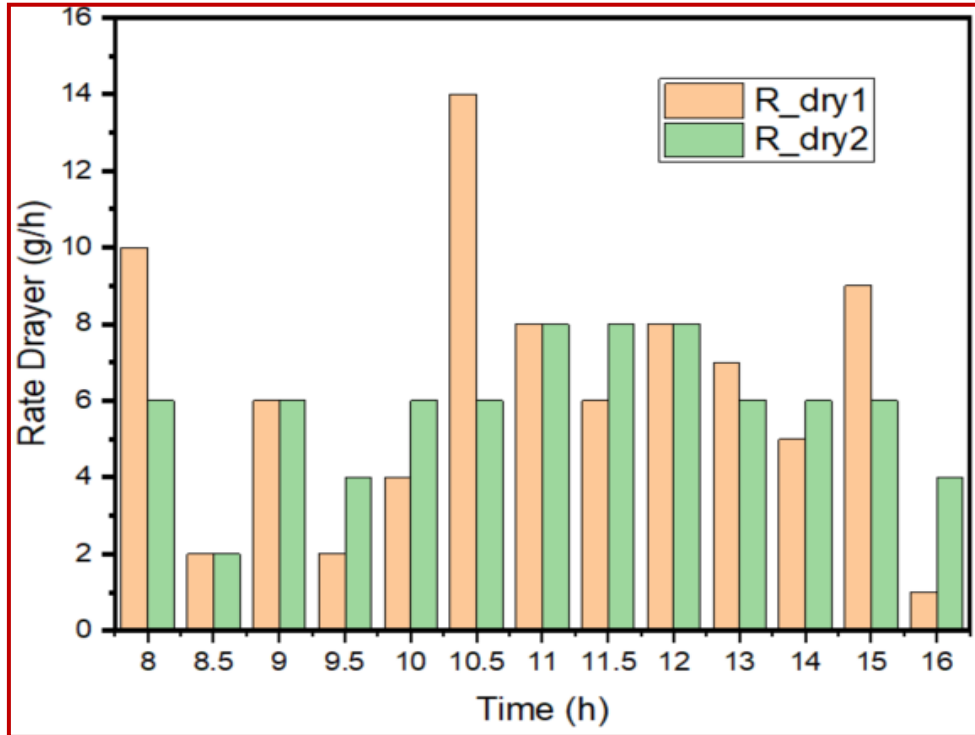
$$DR = \frac{m_1 - m_2}{t_2 - t_1} [g/h] \quad (2-III)$$

وهي علاقة رياضية أساسية في تكنولوجيا التجفيف، تُستخدم لقياس كمية الرطوبة التي تُزال من المادة خلال فترة زمنية محددة.

حيث: DR - معدل التجفيف (بوحدة غ/ساعة).

Δm - التغير في الكتلة (غرام).

Δt - التغير في الزمن (بالساعات).



الشكل (7-III): معدل التجفيف.

يوضح الشكل (III-7) أدناه التغير في معدل التجفيف (g/h) لكلا المجففين غير المباشرين خلال فترة التجربة الممتدة من الساعة 8 صباحاً حتى 4 مساءً. يظهر المجفف الأول (R_dry1) الذي يستخدم خليط الحصى وبرادة الألمنيوم أداءً أكثر تقلباً، مع بلوغه أعلى معدل تجفيف يقارب 14 g/h عند الساعة 10.5، ما يشير إلى استجابة حرارية سريعة وزيادة فعالية امتصاص الطاقة الشمسية خلال فترات الإشعاع القصوى. في المقابل، أظهر المجفف الثاني (R_dry2) الذي يحوي على خليط الملح وبرادة الألمنيوم أداءً أكثر استقراراً، حيث حافظ على معدلات تجفيف تتراوح غالباً بين 5-8 g/h عبر معظم فترة التجفيف.

تشير هذه النتائج إلى أن المجفف الأول يتميز بكفاءة أعلى في المراحل المبكرة والمتوسطة من التجفيف، مما قد يسهم في تقليص زمن العملية الكلي. ومع ذلك، فإن ثبات أداء المجفف الثاني يُعد ميزة في الحفاظ على ظروف تجفيف منتظمة، وهو ما قد يكون مناسباً للمنتجات الحساسة للحرارة.

بناءً على هذه القيم والبيان، يُمكن الاستنتاج أن كفاءة التجفيف تعتمد بشكل كبير على تصميم المجفف، خصوصاً فيما يتعلق بنظام الامتصاص والتهوية، وأن لكل من المجففين خصائص تشغيلية قد تناسب أنواعاً مختلفة من المواد المراد تجفيفها.

3.III. خاتمة:

يستعرض هذا الفصل دراسة تجريبية مقارنة للأداء الحراري وحركية التجفيف لمجففين شمسيين غير مباشرين، تميزا باختلاف مادة المستقبل الحراري المستخدمة: خليط الحصى وبرادة الألمنيوم في المجفف الأول (D1)، وخليط الملح وبرادة الألمنيوم في المجفف الثاني (D2). أظهرت النتائج بوضوح تفوقاً ملحوظاً للمجفف الأول (D1) من حيث قدرته على تحقيق درجات حرارة أعلى عند مدخل غرفة التجفيف، واستجابة حرارية أسرع للإشعاع الشمسي، وقدرة تخزين حراري أكثر فعالية، مما انعكس إيجاباً على معدلات التجفيف وإجمالي كمية الرطوبة المزالة من عينات الفلفل الحار.

يُعزى هذا الأداء المتفوق للمجفف الأول (D1) بشكل أساسي إلى الخصائص الفيزيائية الحرارية الأفضل لخليط الحصى والألمنيوم، لا سيما الامتصاصية الشمسية الأعلى، والموصلية الحرارية المحسنة، والاستقرار الفيزيائي الأفضل مقارنة بخليط الملح والألمنيوم في ظل ظروف التشغيل. دلّ التحليل على أن الاختيار الدقيق لمادة المستقبل الشمسي يمثل عاملاً حاسماً في تحديد الكفاءة الكلية للمجفف الشمسي.

تؤكد هذه الدراسة على أهمية الخصائص الترموفيزيائية لمواد المستقبل في تصميم المجمعات الشمسية، وتشير إلى أن خليط الحصى مع برادة الألمنيوم يمكن أن يكون خياراً فعالاً ومنخفض التكلفة نسبياً لتحسين أداء المجففات الشمسية غير المباشرة. توصي النتائج بمزيد من البحث لاستكشاف نسب دمج مثالية لهذه المواد، ودراسة تأثيرها على المدى الطويل تحت ظروف تشغيل متنوعة، بالإضافة إلى تقييم الجدوى الاقتصادية لتطبيقها على نطاق واسع. في المجمل، تقدم هذه الدراسة مساهمة قيمة في مجال تكنولوجيا التجفيف الشمسي، وتوفر أساساً لتطوير مجففات أكثر كفاءة واستدامة.

توصيات مستقبلية مقترحة:

بناءً على النتائج المستخلصة من هذه الدراسة، يمكن اقتراح التوجهات البحثية والتطويرية التالية لتعزيز كفاءة المجففات الشمسية غير المباشرة:

I. تحسين خصائص مواد المستقبل الشمسي الحالية:

1. تحسين خليط الحصى والألمنيوم:

- دراسة تأثير حجم حبيبات الحصى وشكلها على كفاءة الامتصاص وانتقال الحرارة.
- بحث تأثير نسب الدمج المختلفة بين الحصى وبرادة الألمنيوم للوصول إلى النسبة المثلى.
- طلاء الحصى بمواد ذات امتصاصية عالية (مثل الطلاء الأسود الانتقائي) قبل خلطه مع الألمنيوم لزيادة كفاءة الامتصاص.

2. تحسين خليط الملح والألمنيوم (في حال وجود مبرر لاستخدامه):

- استكشاف طرق لحماية الملح من الرطوبة (مثل التغليف الدقيق) لضمان استقرار أدائه الحراري.
- بحث إمكانية استخدام أملاح ذات نقاط انصهار أعلى أو خصائص حرارية أفضل إذا كانت التكلفة تسمح بذلك.
- تحسين التلامس بين حبيبات الملح وبرادة الألمنيوم لتعزيز الموصلية الحرارية.

3. تجربة مواد مستقبل شمسي بديلة ومبتكرة:

- **مواد طبيعية أخرى منخفضة التكلفة:** استكشاف استخدام مواد محلية أخرى مثل الفحم النباتي المسحوق، نشارة الخشب المعالجة (الكربونية)، أو حتى بعض أنواع التربة الداكنة الممزوجة بمواد موصلة.
- **مواد مُعاد تدويرها:** بحث إمكانية استخدام مخلفات صناعية أو زراعية معالجة (مثل خبث المعادن، أو الرماد المتطاير) كجزء من مادة المستقبل.
- **مواد متغيرة الطور (PCMs - Phase Change Materials):** دمج مواد متغيرة الطور ذات درجة حرارة انتقال مناسبة ضمن مادة المستقبل أو في وحدة تخزين حراري منفصلة لتحسين قدرة التخزين الحراري وتوفير درجات حرارة أكثر استقراراً، خاصة خلال فترات انخفاض الإشعاع الشمسي أو بعد الغروب.
- **المواد النانوية:** استكشاف إضافة كميات صغيرة من المواد النانوية (مثل أنابيب الكربون النانوية أو جسيمات المعادن النانوية) إلى مواد المستقبل التقليدية لتعزيز امتصاصيتها وموصلتها الحرارية بشكل كبير.

II. تحسين تصميم المجمع الشمسي وغرفة التجفيف:

1. تحسين ديناميكا الهواء:

- ❖ تحسين تصميم مسار تدفق الهواء داخل المجمع لضمان توزيع منتظم للحرارة وزيادة معامل انتقال الحرارة بالحمل.
- ❖ استخدام موجهات أو زعانف داخل المجمع لزيادة مساحة التبادل الحراري وزمن مكوث الهواء.

2. تقليل الفقد الحراري:

- تحسين عزل جدران المجمع وغرفة التجفيف لتقليل الفقد الحراري إلى المحيط.
- استخدام زجاج مزدوج أو مواد تغطية ذات نفاذية عالية للإشعاع الشمسي وانبعائية منخفضة للإشعاع الحراري الطويل الموجة (Low-e).
- تحسين نظام التخزين الحراري (إذا كان منفصلاً): تصميم وحدة تخزين حراري أكثر كفاءة باستخدام مواد ذات سعة حرارية عالية وموصلية جيدة.

III. دراسات أداء موسعة وطويلة الأمد:

- إجراء تجارب تجفيف على مدار فصول مختلفة لتقييم أداء المجففات تحت ظروف مناخية متنوعة.
- تقييم تأثير التدهور المحتمل لمواد المستقبل الشمسي على الأداء بمرور الوقت.
- دراسة تأثير تحميل المنتج (كمية الفلفل) على أداء المجفف وكفاءته.

IV. التحليل الاقتصادي والبيئي:

- إجراء تحليل تكلفة- فائدة شامل للمواد والتصاميم المختلفة لتحديد الخيارات الأكثر جدوى اقتصادياً.
- تقييم الأثر البيئي للمواد المستخدمة وعملية التصنيع والتشغيل.

V. تطوير أنظمة تحكم ذكية:

- دمج أنظمة تحكم بسيطة (مثل التحكم في سرعة المروحة بناءً على درجة الحرارة أو الإشعاع الشمسي) لتحسين الأداء وتقليل استهلاك الطاقة إذا كانت المروحة تعمل بالطاقة الكهربائية.

الخاتمة

العامّة

خاتمة عامة

ختاماً، تمثل هذه الدراسة إسهاماً علمياً في مجال تطوير تقنيات التجفيف الشمسي للمنتجات الزراعية، مع التركيز على معالجة إشكالية محددة تتعلق بتحسين الكفاءة الحرارية لأنظمة التجفيف الشمسي غير المباشر في منطقة الوادي الجزائرية.

انطلقت الدراسة من استعراض تاريخي وعلمي شامل لتقنيات التجفيف عبر العصور، مبينة كيف تطورت هذه التقنية القديمة من أسلوب بدائي يعتمد على التعرض المباشر لأشعة الشمس، إلى أنظمة هندسية متقدمة تستند إلى مبادئ فيزيائية دقيقة في انتقال الحرارة والكتلة. وقد استعرض الفصل الأول بشكل تفصيلي أبرز المفاهيم العامة المتعلقة بالتجفيف الشمسي، مع تحليل مقارنة لمزايا وعيوب مختلف الطرق، إضافة إلى الفوائد الصحية والغذائية للأطعمة المجففة وأساليب حفظها، مما أرسى الأساس النظري للدراسة.

في الفصل الثاني، قدمنا وصفاً دقيقاً للمنهجية التجريبية المتبعة، متضمنة تصميم مجفف شمسي مبتكر للمحاصيل الزراعية. وقد تناول بالتفصيل النظام الحراري المتكامل بجميع مكوناته الأساسية، بدءاً من آلية تجميع الطاقة الشمسية وصولاً إلى طرق إعداد العينات وتوزيع الحساسات وضبط شروط التشغيل المثلى. كما عرضت شرحاً وافياً لبروتوكول التجربة وأساليب جمع البيانات وتحليلها لتقييم الأداء الحراري للمجفف، مما يعكس الدقة العلمية والمنهجية في إجراء التجارب.

أما الفصل الثالث، فقد شكل جوهر الإسهام العلمي للدراسة، حيث تم مقارنة تحليلية بين مجففين شمسيين غير مباشرين متماثلين في التصميم، مع اختلاف وحيد يتمثل في مادة المستقبل الحراري. استخدم النظام الأول خليطاً من الحصى وبرادة الألمنيوم، بينما اعتمد الثاني على خليط الملح وبرادة الألمنيوم كوسيط للتخزين الحراري. وقد أجريت التجارب باستخدام الفلفل الحار كمادة تجريبية، مع قياس دقيق للمتغيرات البيئية ودرجات الحرارة والتغيرات في كتلة المنتج أثناء عملية التجفيف.

أظهرت نتائج التحليل الإحصائي للبيانات وجود فروق ذات دلالة إحصائية بين أداء النظامين، حيث تميز النظام المعتمد على خليط الحصى والألمنيوم بقدرة أعلى على تخزين الطاقة الحرارية والاحتفاظ بها لفترات أطول، مما انعكس إيجاباً على معدلات التجفيف وكفاءة النظام وجودة المنتج النهائي. وقد مكنت هذه النتائج من استخلاص توصيات محددة لتحسين فعالية المجففات الشمسية غير المباشرة، مع إمكانية تطبيقها في سياقات مشابهة.

إن هذه الدراسة، بمنهجيتها ونتائجها التطبيقية الملموسة، تفتح آفاقاً واعدة لتطوير تقنيات تجفيف مستدامة وفعالة من حيث التكلفة، تلبي احتياجات المناطق الريفية والنائية، وتسهم في تعزيز الأمن الغذائي وتقليل الفاقد من المحاصيل الزراعية. كما تمهد الطريق لمزيد من البحوث المتقدمة في مجال دمج تقنيات التخزين الحراري مع أنظمة الطاقة المتجددة، سعياً نحو تحقيق التكامل بين الاستدامة البيئية والكفاءة الاقتصادية في سلاسل الإنتاج الغذائي، وهو ما ينسجم مع أهداف التنمية المستدامة وتوجهات الاقتصاد الأخضر العالمية.

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

المخلص

يهدف هذا العمل إلى دراسة تطبيقية لمجفف شمسي غير مباشر مخصص لتجفيف محاصيل زراعية في ولاية الوادي. يركز الهدف الأساسي من الدراسة على مقارنة أداء مجففين شمسيين غير مباشرين متماثلين في التصميم، ويكمن الاختلاف بينهما في مادة المستقبل الحراري؛ حيث تم استخدام مزيج من الحصى والألمنيوم في المجفف الأول، ومزيج من الملح والألمنيوم في المجفف الثاني.

تم اختيار الفلفل الحار كمادة للتجفيف، نظرًا لخصائصه الفيزيائية المميزة وانتشاره الواسع في المنطقة. أظهرت النتائج تفوق المجفف المزود بمزيج الحصى والألمنيوم من حيث كفاءة التجفيف وفقدان الرطوبة مقارنةً بالمجفف الآخر.

الكلمات المفتاحية: التجفيف، الطاقة الشمسية، المجفف الشمسي غير المباشر، الفلفل الحار، درجة الحرارة.

Abstract

This study aims to conduct an applied investigation of an indirect solar dryer designed for drying agricultural crops in the El Oued region. The main objective is to compare the performance of two indirect solar dryers with identical designs, differing only in the thermal storage material: the first dryer uses a mixture of gravel and aluminum, while the second uses a mixture of salt and aluminum.

Chili pepper was selected as the drying material due to its distinctive physical properties and its widespread cultivation in the region. The results demonstrated the superiority of the dryer equipped with the gravel–aluminum mixture, in terms of drying efficiency and moisture loss, compared to the other configuration.

Keywords: Drying, Solar Energy, Indirect Solar Dryer, Chili Pepper, Temperature.