



الجمهورية الديمقراطية الشعبية الجزائرية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي

كلية التكنولوجيا

قسم الهندسة الميكانيكية

مذكرة تخرج لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

ميدان: العلوم والتكنولوجيا

شعبة: الهندسة الميكانيكية

تخصص: طاقات متجددة في الميكانيك

من اعداد الطلبة:

علاء الدين شويه

مقرود عيسى

خميدة البشير

بوبكر دبيلي

الموضوع:

**التحليل التجريبي للسلوك الحراري لمجفف شمسي
غير المباشر ذو لاقط مسطح مزود
بنظام لتخزين الحرارة**

نوقشت في: 2024/06/05

أمام لجنة المناقشة:

جامعة الوادي

رئيسا

د. زين علي

جامعة الوادي

مناقشا

د. منصور خالد

جامعة الوادي

مشرفا

د. منصر نورالدين

جامعة الوادي

مساعد مشرف

أ. عون ياسين

السنة الدراسية: 2024/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

والصلاة والسلام على رسوله الأمين

إهداء

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات.

الحمد لله الذي هدانا إلى طريق العلم والمعرفة.

الحمد لله الذي وفقنا لإنجاز هذه المذكرة وإتمام هذا العمل
التجريبي، والذي نهديه إلى:

عائلاتنا الأعزاء الذين أحاطونا بالسكينة.

أقاربنا وإخواننا.

الأصحاب والأصدقاء والزملاء.

أطال الله في عمركم وأذهب أجزانكم ومدَّ فرحتكم وألَّف بين
قلوبكم وأصلح ذات بينكم وهداكم سبل السلام.

اللَّهُمَّ ارحم ميتهم واعف عنه وعافه وارزقه الفردوس
الأعلى.

اللَّهُمَّ احفظ منهم من كان حيا، وأثر دربه واهد قلبه، أحيه
على الإسلام والسنة وأمته على الإسلام والسنة.

إنك ولي ذلك والقادر عليه.

وصلِّ اللَّهُمَّ وسلِّم وبارك على عبدك ونبيك مُحَمَّدٍ صلوات
ربي وسلامه عليه.



التشكرات

نتقدم بجزيل الشكر لكل أساتذة ماستر طاقات متجددة في
الميكانيك ولأستاذ المؤطر.

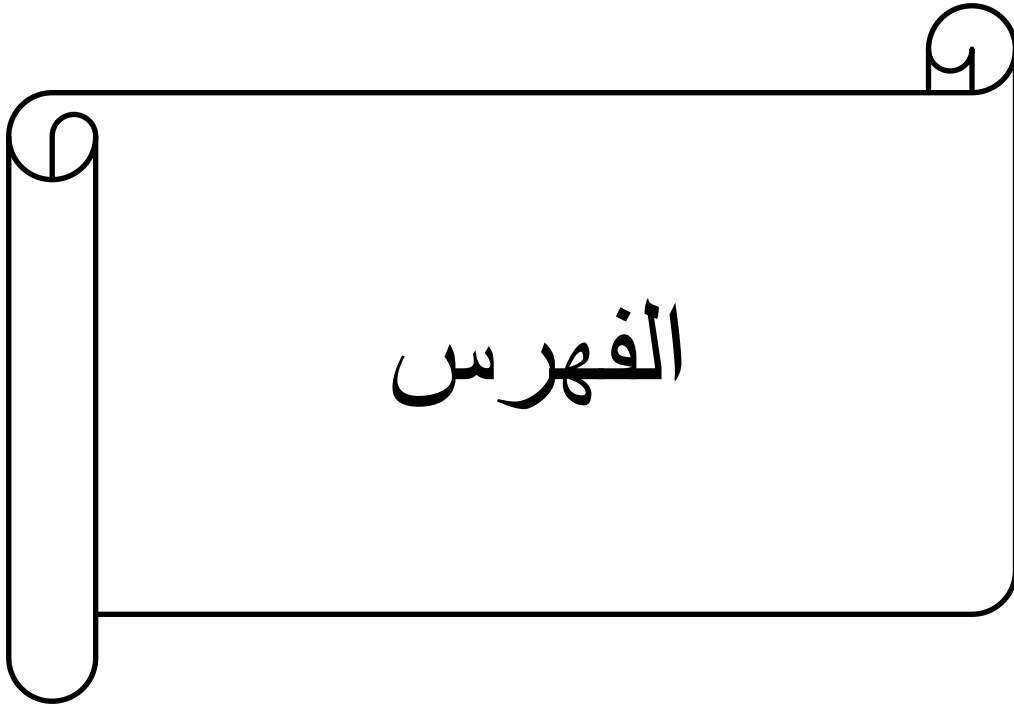
نتقدم بجزيل الشكر إلى كل الأساتذة والزملاء الذين التقينا
بهم من بداية مشوارنا الجامعي إلى نهايته هذا العام
.2024/2023

وإلى كل من ساهم من قريب أو من بعيد بإنجاز هذا العمل
بالجهد والمال شكرا لكم وبارك الله فيكم وبكم ولكم.

علاء الدين شويه، عيسى مقروود، خميده البشير

وبوبكر دبيلي





الفهرس:

5	الفهرس:
7	قائمة الأشكال:
8	قائمة الجداول:
10	المقدمة:
11	الفصل الأول:
11	دراسة بيبلوغرافية حول الأعمال المنجزة سابقا
12	1.1. المقدمة
12	2.1. نبذة تاريخية عن الاعمال المنجزة في مجال التجفيف الشمسي:
41	3.1. الخاتمة
42	الفصل الثاني:
42	عموميات حول المجففات الشمسية
43	1.2. المقدمة
43	2.2. مختلف أنواع المجففات الشمسية
43	1.2.2. تصنيف المجففات الشمسية حسب أسلوب تسخين الهواء
45	2.2.2. تصنيف المجففات الشمسية حسب كيفية الإستفادة من حرارة الشمس ...
49	3.2. مبدأ عمل المجفف الشمسي غير المباشر ذو الألواح المسطحة
50	4.2. تقييم الأداء الحراري للمجفف الشمسي غير المباشر ذو الألواح المسطحة ...
52	5.2. التخزين الحراري في المجففات الشمسية غير المباشرة
53	1.5.2. أنواع التخزين الحراري
54	2.5.2. دمج التخزين الحراري في المجففات الشمسية غير المباشرة
54	3.5.2. فوائد التخزين الحراري
54	4.5.2. دراسة حالة وتطبيقات
54	5.5.2. الخلاصة
54	6.2. الخاتمة

55	الفصل الثالث:
55	الدراسة التجريبية
56	1.3. المقدمة
56	2.3. عرض المجفف الشمسي
58	3.3. تصميم وتنفيذ المجفف الشمسي
60	4.3. كيف يعمل المجفف الشمسي الخاص بنا كنظام تجفيف
60	1.4.3. تجهيز الممتص الخاص بكل مجمع شمسي
64	2.4.3. تجهيز العينة المراد تجفيفها
65	5.3. أجهزة القياس
65	1.5.3. قياس درجة الحرارة
66	2.5.3. قياس سرعة الهواء
67	3.5.3. قياس الإشعاع الشمسي:
68	6.3. النتائج والتفسيرات
69	7.3. الخاتمة
71	الخاتمة:
73	قائمة المراجع
77	الملخص:

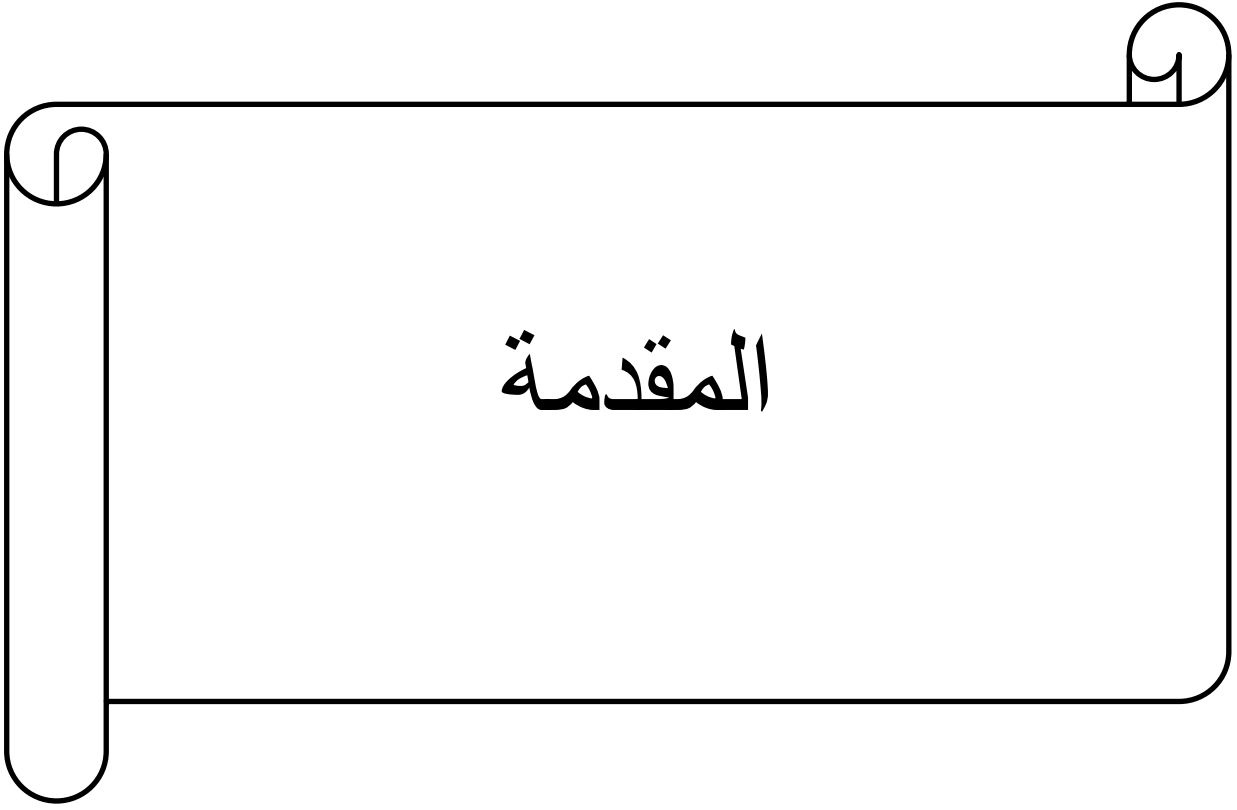
قائمة الأشكال:

- الشكل 1: الشكل النهائي للمجفف بحجرة واحدة فقط ومسار الأشعة الشمسية..... 13
- الشكل 2: صورة مجسدة للمجفف الشمسي للأغذية..... 13
- الشكل 3: رسم تخطيطي للمجفف الشمسي بالحمل الحراري القسري في الوضع المختلط..... 14
- الشكل 4: مخطط تخطيطي يوضح المجفف مع نظام توزيع الهواء..... 15
- الشكل 5: رسم تخطيطي للمجفف الشمسي الهجين الدفيء القائم على ETSC..... 16
- الشكل 6: التركيب التجريبي لـ MISD مع وحدة التخزين الحراري والتجفيف..... 17
- الشكل 7: التركيب التجريبي لـ MISD مع وحدة التخزين الحراري والتجفيف..... 18
- الشكل 8: المجفف الشمسي الغازي الهجين..... 19
- الشكل 9: وصف نظام التحقق من صحة البيانات..... 21
- الشكل 10: تصنيف مواد تخزين الطاقة الطبيعية..... 23
- الشكل 11: صور فوتوغرافية لـ (أ) المجفف الشمسي النشط من النوع غير المباشر..... 25
- الشكل 12: صور فوتوغرافية لـ (أ) طازج غير مقطع (ب) مقطع وموضوع على صواني.. 25
- الشكل 13: تمثيل تخطيطي لـ ISD مع الأدوات..... 27
- الشكل 14: (أ) رسم تخطيطي لمجفف شمسي من النوع المستحث dx..... 28
- الشكل 15: (أ) مقارنة تجفيف الثوم بالمجفف شمسي المفتوح وبالمجفف الشمسي..... 29
- الشكل 16: مجفف الهواء الشمسي بالحمل الحراري القسري غير المباشر..... 30
- الشكل 17: تطور درجة حرارة المنتج مع وقت التجفيف: (◇) التجفيف الشمسي..... 31
- الشكل 18: عرض تخطيطي لجهاز امتصاص الألواح المسطحة مع مجفف المحاصيل..... 34
- الشكل 19: رسم تخطيطي وصورة لمجفف شمسي غير مباشر يعمل بالطاقة الشمسية..... 35
- الشكل 20: رسم تخطيطي لتركيب التجربة ونظام التتبع الشمسي..... 37
- الشكل 21: مجفف هجين يعمل بالطاقة الشمسية والكتلة الحيوية لتجفيف صفائح المطاط..... 39
- الشكل 22: (أ) رسم تخطيطي للإعداد التجريبي. (ب): الإعداد التجريبي..... 41
- الشكل 23: رسم تخطيطي للمجفف شمسي المباشر مع الحمل الطبيعي..... 44
- الشكل 24: رسم تخطيطي للمجفف الشمسي المباشر مع الحمل القسري..... 45
- الشكل 25: (أ)-المجفف الشمس الصندوق، (ب)-المجفف الشمس بالدفيئة..... 46
- الشكل 26: أشكال المجفف الشمسي غير المباشر..... 47
- الشكل 27: أشكال المجفف الشمسي المختلط..... 48
- الشكل 28: المجفف الغاز- الشمسي الهجين..... 49
- الشكل 29: مبدأ عمل المجفف الشمسي غير المباشر ذو الألواح المسطحة..... 50
- الشكل 30: تمثيل الأنواع الثلاثة لمجمعات الهواء..... 51
- الشكل 31: الترتيبات المختلفة للخشونة الأسطوانية..... 52
- الشكل 32: رسم تخطيطي لمجمع الهواء المسطح ذو الحواف الخشنة..... 52
- الشكل 33: المجفف الشمسي المستعمل..... 57

- الشكل 34: رسم تخطيطي يوضح أبعاد كلاً من غرفة التجفيف وطول المجمع الشمسي. 58
- الشكل 35: رسم تخطيطي يوضح أبعاد المجمع الشمسي. 59
- الشكل 36: المجفف الشمسي المستعمل في ورشة النجارة مباشرة بعد الإنجاز. 59
- الشكل 37: وزن صفيحة مملوءة ببرادة الألمنيوم. 60
- الشكل 38: وزن صفيحة مملوءة بالإسمنت. 61
- الشكل 39: صفيحة مملوءة بخليط الإسمنت وبرادة الألمنيوم. 61
- الشكل 40: طلاء الصفائح بالطلاء الأسود غير اللامع. 62
- الشكل 41: صفيحة مملوءة ببرادة الألمنيوم. 62
- الشكل 42: وزن صفيحة مملوءة بالملح. 63
- الشكل 43: خليط الملح مع برادة الألمنيوم. 63
- الشكل 44: طلاء الخليط بالأسود غير اللامع. 64
- الشكل 45: وضع كل خليط في المجمع الخاص به. 64
- الشكل 46: وزن عينة من القرع الأخضر. 64
- الشكل 47: وضع عينة من القرع الأخضر في غرف التجفيف. 65
- الشكل 48: الجهاز الحراري Thermocouple. 65
- الشكل 49: جهاز Arduino. 66
- الشكل 50: تسجيل بيانات درجات الحرارة آلياً في الحاسوب كل عشر ثوانٍ. 66
- الشكل 51: جهاز Anemometer. 67
- الشكل 52: جهاز Pyranometer. 67
- الشكل 53: رسم بياني يوضح تطورات درجة الحرارة في الممتصين بدلالة الزمن. 68
- الشكل 54: رسم بياني يوضح ضياع كتلة القرع الأخضر بدلالة الزمن للممتصين. 69

قائمة الجداول:

- جدول 1: مميزات وعيوب أنواع المجففات الشمسية. 32
- جدول 2: تغيرات المحتوى المائي أثناء ظروف التشغيل المختلفة. 33
- جدول 3: اقتصاديات المجفف الشمسي - الوفر السنوي،. 38
- جدول 4: ايجابيات وسلبيات المجفف الشمسي المباشر. 46
- جدول 5: ايجابيات وسلبيات المجفف الشمسي غير المباشر. 47
- جدول 6: ايجابيات وسلبيات المجفف الشمسي الهجين. 49



المقدمة:

تعد الطاقة الشمسية أحد أهم المصادر البديلة والمتجددة للطاقة في العالم، حيث تتميز بكونها نظيفة ومتاحة بكميات كبيرة في العديد من المناطق. ومع تزايد الاهتمام بالحفاظ على البيئة وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، أصبح تطوير تقنيات الاستفادة من الطاقة الشمسية أمرًا بالغ الأهمية. من بين هذه التقنيات، يبرز استخدام المجففات الشمسية كحل فعال ومستدام لتجفيف المنتجات الزراعية والصناعية.

تتمثل فكرة المجفف الشمسي غير المباشر في استخدام طاقة الشمس لتسخين الهواء، والذي يتم توجيهه بعد ذلك إلى غرفة التجفيف عبر نظام لتبادل الحرارة، مما يساعد على تجفيف المنتجات بفعالية عالية ودون تعريضها مباشرة لأشعة الشمس. يتيح هذا النوع من المجففات تحسين جودة المنتجات المجففة، وتجنب التأثيرات السلبية لأشعة الشمس المباشرة.

تتناول هذه المذكرة التحليل التجريبي للسلوك الحراري لمجفف شمسي غير المباشر مزود بلاقط مسطح ونظام لتخزين الحرارة. وقد تم تقسيم المذكرة إلى ثلاثة فصول رئيسية:

الفصل الأول: دراسة بيئيوجرافية حول الأعمال المنجزة سابقًا

في هذا الفصل، سنستعرض الأدبيات العلمية والأبحاث السابقة التي تناولت المجففات الشمسية بشكل عام والمجففات الشمسية غير المباشرة بشكل خاص. سيتم تحليل مختلف التصميمات والتقنيات المستخدمة، بالإضافة إلى تقييم أداء هذه المجففات ومدى فعاليتها في تجفيف المنتجات المختلفة.

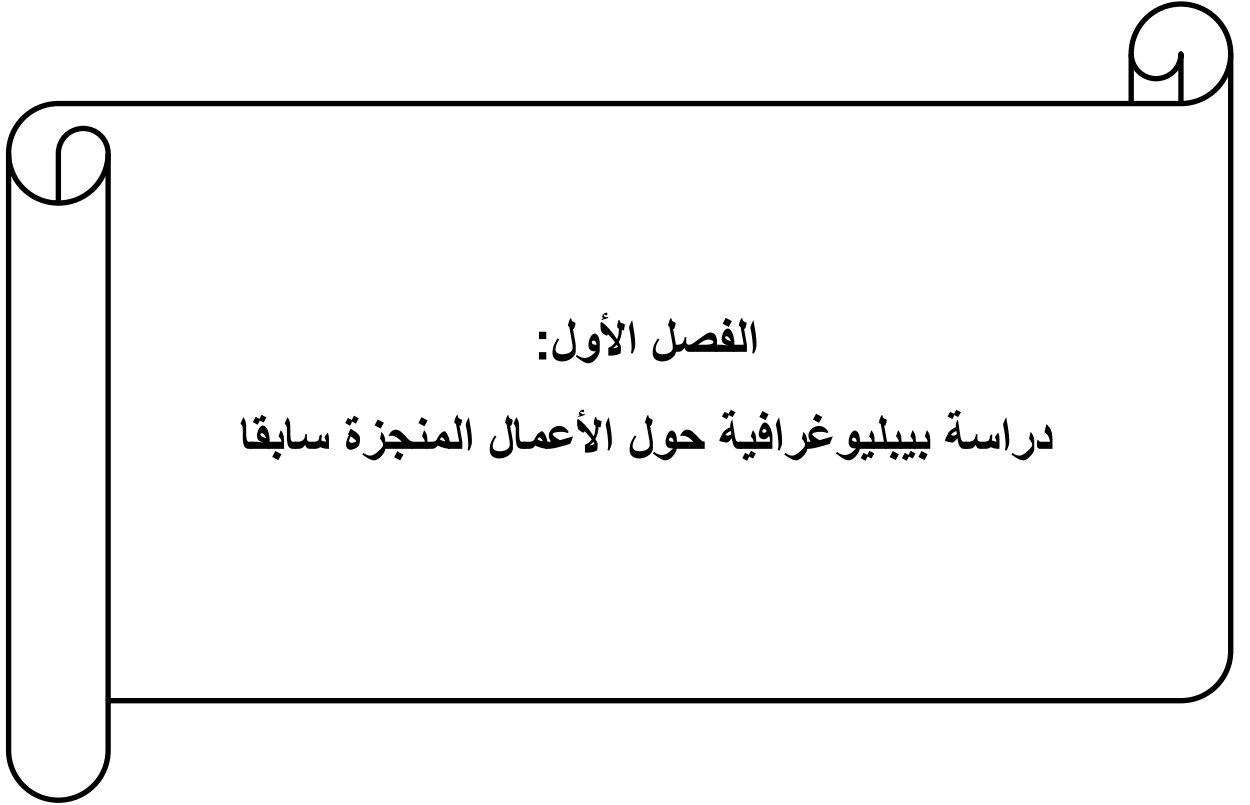
الفصل الثاني: عموميات حول المجففات الشمسية

يركز هذا الفصل على تقديم نظرة شاملة حول المجففات الشمسية، بما في ذلك الأنواع المختلفة للمجففات، مكوناتها الأساسية، ومبدأ عملها. سنقوم أيضًا بمناقشة الفوائد البيئية والاقتصادية لاستخدام المجففات الشمسية مقارنة بالطرق التقليدية للتجفيف.

الفصل الثالث: دراسة تجريبية

يتم في هذا الفصل عرض الدراسة التجريبية التي تم إجراؤها لتحليل السلوك الحراري لمجفف شمسي غير المباشر ذو لاقط مسطح مزود بنظام لتخزين الحرارة. تشمل الدراسة تصميم وبناء المجفف، أدوات القياس المستخدمة، والإجراءات التجريبية. سيتم تقديم النتائج ومناقشتها بالتفصيل، مع التركيز على فعالية نظام تخزين الحرارة في تحسين أداء المجفف.

تهدف هذه المذكرة إلى تقديم فهم معمق حول كيفية تحسين أداء المجففات الشمسية غير المباشرة من خلال استخدام أنظمة مبتكرة لتخزين الحرارة، مما يساهم في تعزيز استخدام الطاقة الشمسية كحل مستدام في عمليات التجفيف.



الفصل الأول:

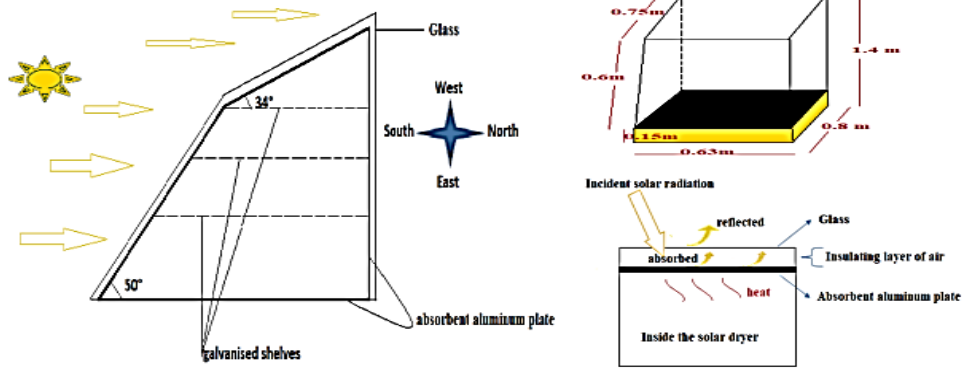
دراسة بيئية جغرافية حول الأعمال المنجزة سابقا

1.1. المقدمة

إحدى استخدامات الطاقة الشمسية هو استغلالها في عملية التجفيف، وهذه واحدة من الطرق المستخدمة لحفظ المحاصيل الزراعية. على الرغم من وجود طرق أخرى للحفظ مثل التبريد والمعالجة الوراثية، إلا أن تقنية التجفيف الشمسي تظل الأقل تكلفة. يُعتبر التجفيف الشمسي من بين أكثر أنواع التجفيف شيوعاً عبر العالم. ويُعتبر التجفيف الشمسي التقليدي من أسهل الطرق في تجفيف المنتجات الزراعية، حيث يتم وضع المنتج على الأرض وتقليبه على فترات زمنية حتى يجف. إلا أن لهذه العملية عدداً من السلبيات، منها تعرض المنتج للحشرات وتقلبات الجو. لهذا السبب تم اختراع مجففات صناعية تعمل على حفظ الغذاء وتجفيفه بطريقة نظيفة وآمنة. وهذا ما دفع العلماء إلى إجراء العديد من الأبحاث التي تسمح بمقارنة النتائج النظرية والتجريبية.

2.1. نبذة تاريخية عن الاعمال المنجزة في مجال التجفيف الشمسي:

من بين الأعمال التي قُدمت في مجال تجفيف المنتجات الزراعية في مجفف شمسي غير مباشر بغرفة واحدة، من إنجاز (Krabch et al) [1]. تتألف هذه الغرفة المنجزة من أربع واجهات، حيث تتضمن غطاء زجاجي في الأعلى وجدراناً من الألمنيوم في الأسفل، مع وجود طبقة هوائية محصورة بينهما. تحت الجدران المعرضة لتدفق الطاقة الشمسية كمتصلة، مساعدة في نقل المكونة من الزجاج والهواء والجدران المعرضة لتدفق الطاقة الشمسية كمتصلة، مساعدة في نقل الحرارة داخل مساحة التجفيف. يتميز المجفف بوجود غرفة واحدة ذات سقف موجه نحو الجنوب، حيث يحتوي هذا السقف على سطح مائل بزواوية مثالية تتراوح بين 35 و 43 درجة من سطح الأفق، مما يضمن استيعاب أقصى إشعاع شمسي خلال العام. تم تصنيع هذا المجفف في مختبر الطاقة الشمسية والبيئة بكلية العلوم في مدينة الرباط. بعد ذلك، قدمت الدراسة الأداء الحراري والاقتصادي للمجفف المصنوع هذا. أولاً، بالنسبة للأداء الحراري، أظهرت التجارب التجريبية أن الرطوبة النسبية داخل المجفف يمكن أن تنخفض بنسبة تصل إلى 5% مقارنة بالرطوبة النسبية الخارجية التي تتراوح بين 45 و 55%، وكانت درجة الحرارة المتوسطة داخل المجفف تبلغ 25 درجة مئوية مقارنة بدرجة الحرارة الجوية المتوسطة التي تبلغ 20 درجة مئوية. هذا الأداء الحراري سمح بتجفيف الكمثرى بعد 23 ساعة فقط. ثانياً، من حيث التكلفة الاقتصادية، يُعتبر تصميم المجفف الشمسي الجديد هذا أقل تكلفة من مجففات الطاقة الشمسية ذات الغرفتين التقليدية، مما يشجع على استخدامه من قبل المنتج المحلي.



الشكل 1: الشكل النهائي للمجفف بحجرة واحدة فقط ومسار الأشعة الشمسية داخل المجفف الشمسي (Krabch et al) [1].



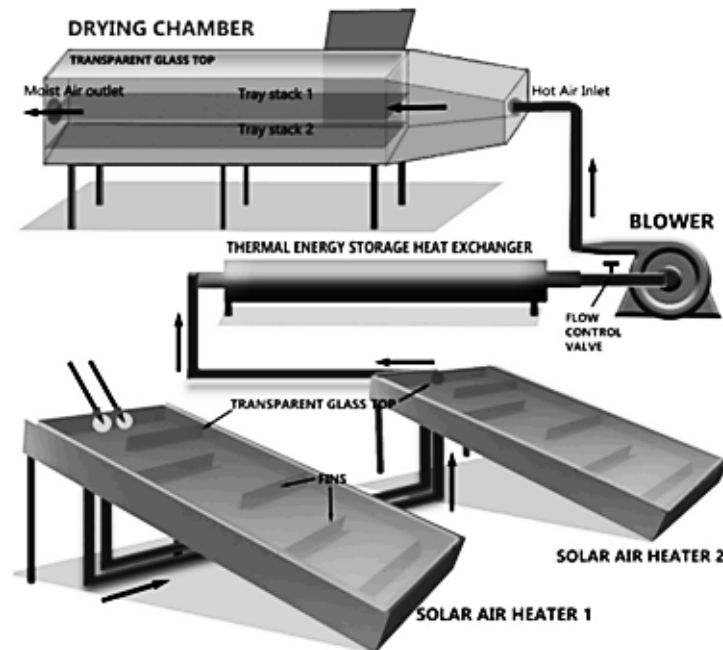
الشكل 2: صورة مجسدة للمجفف الشمسي للأغذية (Krabch et al) [1].

وفي الختام، وفقاً للدراسة التجريبية التي أجراها هؤلاء الباحثون، فإن النتائج التي تم الحصول عليها مشجعة وتظهر أنه من الممكن الوصول إلى درجة حرارة عالية داخل المجفف تصل إلى 60 درجة مئوية ورطوبة منخفضة جداً تبلغ حوالي 10%. هذه الظروف المناخية التي تم تحقيقها داخل المجفف بفضل تصميمه الجديد، سمحت لنا بتجفيف 0.908 كجم من الكمثرى في وقت قصير. في الواقع، بعد 24 ساعة فقط، انخفضت كتلة الكمثرى إلى 0.248 كجم، مما أفقد الطعام حوالي 73% من كتلته بسبب تبخر الماء الذي يحتوي عليه. هذا الأداء الذي حققه المجفف أثناء النهار يمكن الحفاظ عليه من خلال الجمع بين المجفف ونظام التخزين لتجنب التأثيرات العكسية للمتغيرات المناخية أثناء الليل.

هدفت دراسة الباحثين **Nukulwar & Tungikar** [2] إلى تقديم فكرة عامة عن التطور الأخير في المجففات الشمسية المدمجة مع وحدات تخزين الطاقة الحرارية والوحدات المساعدة. وقد وصل المجفف الشمسي إلى مستوى ملحوظ نظراً لمساهمته الهائلة في الحفاظ على المواد الغذائية والخضروات والتوابل والمكونات والمنتجات البحرية والمنتجات الصناعية من التلف. ويتجلى ذلك في أن المجفف الشمسي المدمج مع تخزين الطاقة الحرارية والوحدات المساعدة قلل من وقت التجفيف الكلي واستخدم الطاقة الحرارية بكفاءة. كما أظهرت المراجعات أن درجة الحرارة داخل المجفف تم الحفاظ عليها أعلى من درجة حرارة الغلاف الجوي لمدة

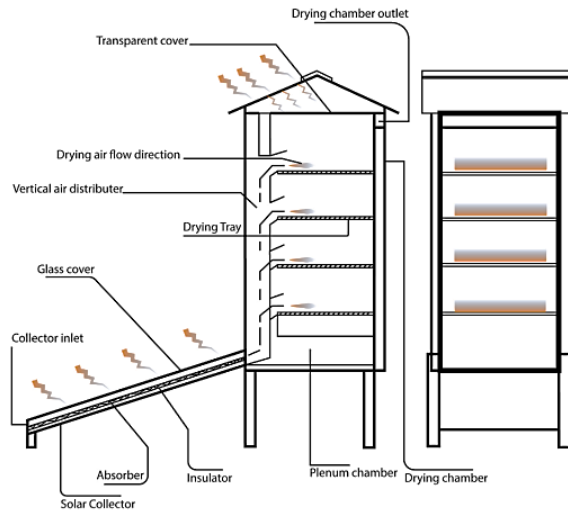
تتراوح بين ساعتين إلى 6 ساعات في حالة مادة تخزين الحرارة الحسية وساعة ونصف إلى 10 ساعات في حالة مادة تخزين الحرارة الكامنة. متوسط درجة الحرارة داخل المجفف الشمسي مع تخزين الحرارة الحسية والكامنة يتراوح بين 6° درجة مئوية إلى 10° درجة مئوية و8° درجة مئوية إلى 20° درجة مئوية، وهي أعلى مقارنة بدرجة حرارة الغلاف الجوي. الوحدات المساعدة مفيدة أو داعمة لقدرة التجفيف الكبيرة للمجفف.

كانت فترات الاسترداد للمجفف المزود بالتخزين الحراري أقل من المجفف المدمج مع الوحدات المساعدة. لتحسين أداء المجفف الشمسي المدمج مع الطاقة الحرارية الشمسية والوحدات المساعدة، كان على الباحثين تنظيم تدفق الهواء لتحسين أداء المجفف الشمسي. تم وضع جهاز خارجي قبل سخان الهواء لإزالة رطوبة الهواء، بحيث يحمل الهواء المزيد من الرطوبة من المنتج. يُعتبر المجفف المزود بتخزين الطاقة الحرارية في مرحلة مبكرة من التطوير (أنظر الشكل رقم 03).



الشكل 3: رسم تخطيطي للمجفف الشمسي بالحمل الحراري القسري في الوضع المختلط مع نظام تخزين الطاقة الحرارية (Nukulwar & Tungikar) [2].

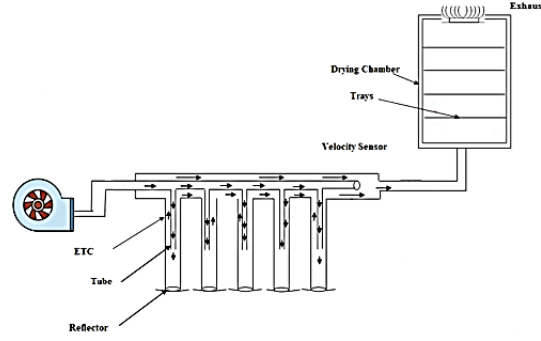
إعتمد **Sileshi et al [3]** في دراسته على تحليل سلوك تدفق هواء التجفيف داخل غرفة التجفيف في المجففات الشمسية التقليدية، باستخدام طريقة ديناميكيات الموائع الحسابية (CFD). واستُخدمت نماذج الإشعاع (Do)، ونقل الأنواع، ونماذج (k-omega SST). كشفت مقارنة النتائج العددية لتوزيع درجة الحرارة مع التجربة عن اتفاق معقول. بين الصواني العلوية والسفلية، لوحظت سرعة 0.015 م/ثانية وتغيرات في الرطوبة النسبية بنسبة 2%. كما يوفر المجفف الهواء المطلوب للتجفيف الشمسي. كشفت النتائج أنّ استخدام قناة توزيع الهواء العمودية المدمجة في المجفف الشمسي من النوع المختلط يمكن أن يُحسّن من عملية التجفيف عن طريق زيادة تجانس توزيع هواء التجفيف وتحسين أداء وجودة المنتجات المجففة في المجففات الشمسية. من الممكن تعديل المجفف من النوع المختلط الطبيعي من خلال الجمع بين نتائج ديناميكيات الموائع الحسابية والبحث التجريبي.



الشكل 4: مخطط تخطيطي يوضح المجفف مع نظام توزيع الهواء (Sileshi et al) [3].

هدفت دراسة **Karthikeyan et al [4]** إلى تجفيف قرع اللبلاب باستخدام المجفف الشمسي الدفيء مع الأنابيب المفرغة. حيث تم تصنيع المجفف الشمسي الهجين الدفيء القائم على ETSC (أنظر الشكل 05). واختير قرع اللبلاب كمادة للتجفيف. تم إجراء دراسة أداء المجفف الشمسي في كل من الوضعين النشط والسلبي. وتم تحديد النتائج التالية:

- كانت درجة حرارة حجرة التجفيف خلال ساعات الذروة أعلى من درجة حرارة الغلاف الجوي ووجد أنها 75 درجة مئوية.
- تم تقليل محتوى الرطوبة في قرع اللبلاب من 80% إلى 12% و 9% في الوضعين السلبي والنشط.
- تبين أن متوسط كفاءة التجفيف في التجفيف الشمسي المفتوح والوضع السلبي والوضع النشط تكون 23% و 34% و 37% على التوالي.
- متوسط كفاءة المجمع في الوضع السلبي تكون 22%، وفي الوضع النشط 26%.
- قدر وقت التجفيف لهذا المجفف لتجفيف قرع اللبلاب بـ 7 ساعات.



الشكل 5: رسم تخطيطي للمجفف الشمسي الهجين الدفيء

القائم على ETSC (Karthikeyan et al) [4].

الباحثون

قام

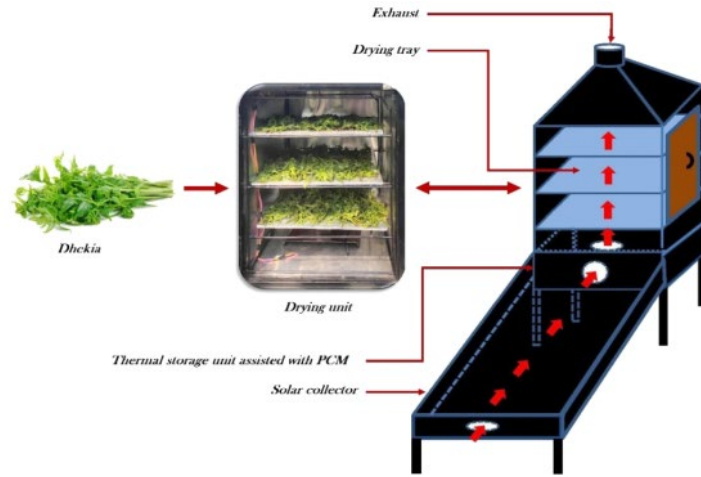
في دراستهم بتصميم مجفف شمسي غير مباشر معدل (MISD) مدمج مع وحدة تخزين الطاقة الحرارية بهدف تجفيف نبات الديكيا (*Diplazium esculentum*). يتكون المجفف الشمسي من مجمع شمسي، ونظام تخزين الطاقة الحرارية، وغرفة تجفيف. أجريت التجارب في ثلاث حالات مختلفة: التجفيف الشمسي المفتوح (الحالة 1)، والمجفف بالصينية (الحالة 2)، والمجفف الشمسي المعدل غير المباشر مع نظام التخزين الحراري (TES) (الحالة 3). تم ملاحظة انخفاض محتوى الرطوبة في الديكيا من 83.1% إلى 3.46% في المجفف الشمسي خلال 270 دقيقة، بينما استغرق 420 دقيقة في التجفيف الشمسي المفتوح.

أجري تحليل جودة للعينة الطازجة والعينة المجففة بالطاقة الشمسية، والمجففة بالشمس المفتوحة، والعينات المجففة في صينية. ووجد أن مستويات مضادات الأكسدة في العينة المجففة بالطاقة الشمسية هي 21 ميكرومول من (TE) لكل جرام من العينة، بينما في العينة المجففة بالشمس المفتوحة كانت 11 ميكرومول من (TE) لكل جرام من العينة. ومن خلال التحليلات الحرارية وتحليلات الجودة، لوحظ أن المجفف الشمسي المطور مع (TES) يقلل من وقت التجفيف ويعزز سمات الجودة مقارنة بالحالتين الأخرين.

وفيما يخص أداء المجفف الشمسي غير المباشر المعدل مع (TES) لتجفيف الديكيا، تم التوصل إلى الاستنتاجات التالية:

- تبلغ الكفاءة الحرارية للمجمع في المجفف الشمسي غير المباشر المعدل 12% عند الحد الأقصى للإشعاع الشمسي.
- ينخفض محتوى الرطوبة في السرخس (على أساس رطب) من 82% إلى 3.4% عند الدقيقة 270 في الحالة الثالثة، والدقيقة 420 في الحالة الأولى.
- يوفر المجفف الشمسي المطور وقت التجفيف بنسبة 35%.
- من التحليل الحركي للتجفيف، لوحظ أن النموذج الآسي ثنائي المدى يناسب بشكل أفضل جميع الحالات الثلاث.

- أظهرت تحليلات الجودة للمنتجات الطازجة والمجففة في جميع الحالات أن قيم TPC و TFC وقيم مضادات الأكسدة للمنتجات المجففة في المجفف الشمسي مع (TES) أظهرت نتائج أفضل من الحالتين الأخرين.

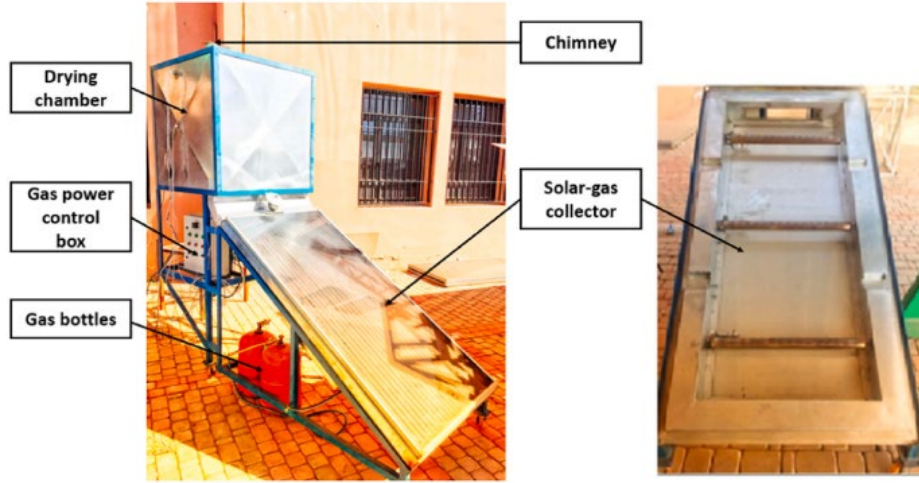


الشكل 6: التركيب التجريبي لـ MISD مع وحدة التخزين الحراري والتجفيف. [Saikia et al] [5].

طبقاً لدراسة [Zoukit et al 6]، تم تطبيق استراتيجية التحكم التعاقبي للتحكم في درجة الحرارة داخل مجفف هجين يعمل بالطاقة الشمسية والغاز (انظر الشكل رقم 07). وذلك لاستخدام المجفف حتى في الليل وفي الظروف الجوية غير المواتية. تتكون حجرة التجفيف من نظامين فرعيين يُسمى (S1) و (S2). النظام الفرعي (S1) يمثل مشغل الغاز، بينما يمثل النظام الفرعي (S2) غرفة التجفيف جنباً إلى جنب مع الجامع. وقد تم التحقيق في سلوك كل نظام فرعي وتبين أن سلوك كلا النظامين الفرعيين هو عتبة غير خطية من النوع والتشبع.

بالنظر إلى هيكلية المجفف المقترحة، تم اعتماد نهج للتحكم في السلاسل التعاقبية لأغراض التحكم في درجة الحرارة. تتكون الحلقة الداخلية لاستراتيجية السلسلة التعاقبية من التحكم في تدفق الغاز، بينما تم تصميم الحلقة الخارجية لتحديث مرجع تدفق الغاز ليتم تتبعه بواسطة الحلقة الداخلية لدرجة حرارة غرفة مرجعية معينة.

تم تصميم اثنين من وحدات التحكم PI غير الخطية لكلتا الحلقتين. وقد تم إنشاء دراسات محاكاة متبوعة بالتحقق التجريبي لاختبار موثوقية النهج المقترح. أظهرت استراتيجية السلسلة التعاقبية المقترحة قدرة جيدة على تلبية الأداء المطلوب لنظام المجفف من حيث الدقة (خطأ الحالة الثابتة في 0.5%، 0.28%، 1.12%) والسرعة (مع وقت الاستقرار من 20 دقيقة، 18 دقيقة، 30 دقيقة) لضبط درجة الحرارة عند القيمة المطلوبة (60 درجة مئوية، 70 درجة مئوية، و80 درجة مئوية)، على الرغم من عدم خطية النظام المدروس. وبالتالي، فإن استراتيجية التحكم التعاقبي مناسبة للمجففات الشمسية.



الشكل 7: التركيب التجريبي لـ MISD مع وحدة التخزين الحراري والتجفيف
[6] (Zoukit et al)

أجرى **Mohammad hossein et al** [7] دراسة عدة تجارب لتجفيف المنتجات الزراعية في محافظة أرسنجان، فارس، إيران، بهدف تأخير التلف والحفاظ على الجودة وتسهيل تخزينها لفترات طويلة وفقاً للظروف المناخية والجغرافية. وقد استخدمت المعدن بكرة ماكينة الخياطة والأنابيب التي تحتوي على PCM (مادة تغير الطور) كحاجز على لوحة الامتصاص لأول مرة في هذه الدراسة.

أظهرت النتائج أن استخدام صفيحة امتصاص المكوك و PCM في المجفف يحسن من متوسط كفاءة المجمع ومتوسط كفاءة المجفف بنسبة 28.5% و 52.1% على التوالي مقارنةً بلوحة الامتصاص المسطحة بدون PCM، و 26.4% و 36.3% مقارنةً بلوحة الامتصاص البكر بدون PCM، و 12.2% و 12.9% مقارنةً بلوح الامتصاص المسطح مع PCM.

على الرغم من أن الأمر استغرق حوالي 4.5 ساعة في المتوسط للوصول إلى محتوى الرطوبة المستهدف باستخدام المجفف، إلا أنه استغرق حوالي 3 أيام للوصول إلى نفس محتوى الرطوبة عند تجفيف البقدونس في الظل.

بعد تركيب البيانات التجريبية مع تسعة نماذج لحركية التجفيف ومقارنة النتائج من حيث RMSE و R2، تبين أن نموذج ميديلي يمكن أن يوفر تقديرات معقولة ودقيقة إلى حد معقول لمنحنى التجفيف لتجفيف البقدونس في المجفف الشمسي المصنّع.



الشكل 8: المجفف الشمسي الغازي الهجين
[7]. (Mohammad hossein et al)

تم تجفيف 1 كجم من البقدونس الطازج إلى مستوى الرطوبة المستهدف في مجفف شمسي بأربع طرق تجفيف مختلفة وكذلك في الظل. وقد تم تصميم وبناء مجفف شمسي من نوع الحمل الحراري القسري غير المباشر بمجمع جديد مع لوحة امتصاص أنبوبي، ونظام تخزين الطاقة الحرارية تحتوي على مادة تغيير الطور، كما تم صنع شمع البارافين لتجفيف الخضراوات الورقية في يوم صيفي بهدف زيادة الكفاءة الحرارية للنظام.

تلخصت النتائج الرئيسية لهذه الدراسة كما يلي:

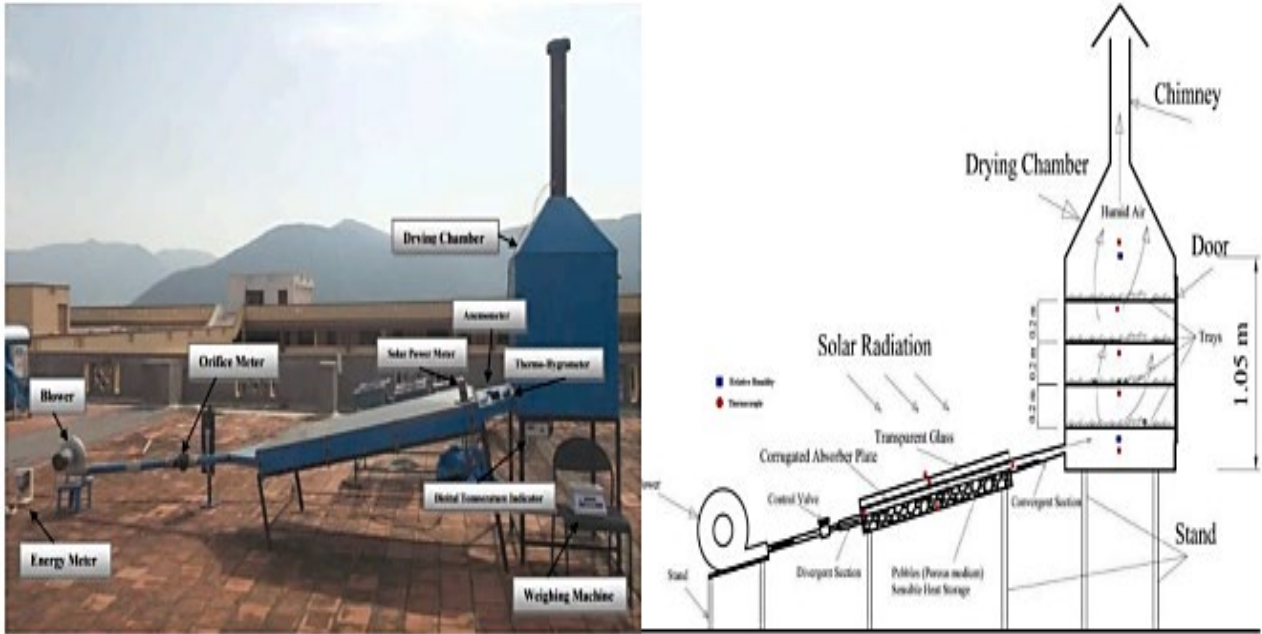
- استغرق الأمر من 3.5 إلى 6 ساعات لتجفيف 1 كجم من البقدونس في المجفف الشمسي المصنّع اعتماداً على الظروف، ولكن استغرقت الخضراوات حوالي 3 أيام للوصول إلى نفس مستوى محتوى الرطوبة عند تجفيفها في الظل.
- استخدام لوحة امتصاص البكرة مع PCM في المجفف أظهر أعلى كفاءة مجمّع (78.9%) وأعلى كفاءة مجفف (18.4%) وأسرع انخفاض في محتوى الرطوبة إلى المستوى المستهدف (210 دقيقة).
- استخدام لوحة امتصاص البكرة أيضاً أدى إلى أعلى درجة حرارة قصوى لمخرج المجمع، والتي كانت 56.8 درجة مئوية.
- متوسط درجة حرارة مخرج مجمّع البكرة مع نظام التخزين كان أعلى بمقدار 4.7 درجة مئوية من دون نظام التخزين، وكان متوسط درجة حرارة مخرج مجمّع الألواح المسطحة مع نظام التخزين كان 2.9 درجة مئوية أعلى من درجة حرارة مخرج مجمّع الألواح المسطحة بدون نظام التخزين.

- نموذج ميدللي كان قادرًا على تقديم تنبؤات دقيقة بشكل معقول عن منحني تجفيف البقدونس لجميع أنماط التجفيف الشمسي التي تم اختبارها في هذه الدراسة.

من خلال دراسة [8] **Dounia Chaatouf et al** تم دمج مجفف شمسي غير مباشر يعمل بالطاقة الشمسية مع نظام تخزين حراري محسوس، وتم فحص نظام التخزين الحراري الحسي على شكل سرير معبأ في ظل الظروف الجوية لمدينة وجدة في شرق المغرب. تم اختيار هذا الموقع لضمان انتظام أفضل للهواء في الغرفة، خاصةً على طول الصواني، وتمديد وقت المعالجة إلى ساعات غير مشمسة.

تركزت الدراسات على أفضل المواد، والمسامية، والسمك الأمثل للسرير المعبأ، وكانت النتائج على النحو التالي:

- إضافة وحدة التخزين لم تكن مفيدة فقط من حيث درجة الحرارة فحسب، بل ساعدت أيضًا في التخلص من دوامة الهواء وجعل الهواء أكثر اتساقًا في الحجرة.
- استمر تأثير التخزين لمدة تقريبًا ثماني ساعات بعد غروب الشمس، حتى وصل الفرق في درجة الحرارة بين الحالتين مع التخزين وبدون تخزين إلى ما يقرب من خمس درجات في الليل.
- متوسط درجة الحرارة بين النهار والليل في غرفة التجفيف كانت أعلى بالنسبة للجرائيت مقارنةً بالحصى، وأقل بالنسبة للحجر الرملي.
- أظهرت دراسة المسامية أن المادة التي تحتوي على 10% من المسامية تخزن وتطلق المزيد من الطاقة، تليها نسبة 40% و 70%. ومع ذلك، من حيث سرعة الهواء، فإن العكس هو الصحيح، حيث أن 10% مسامية تحجب الكثير من الهواء.
- زاد نظام التخزين الحراري المحسوس من كفاءة المجفف الشمسي بحوالي 2.47% ليلاً مقارنةً بالحالة بدون تخزين.
- انخفض متوسط كفاءة المجفف الشمسي في الليل بنسبة 7.11% و 1.61% على التوالي في الحالتين مع وبدون نظام تخزين، مما يعني أن السرير المعبأ يساعد في جعل عملية التجفيف أكثر اتساقًا على مدار اليوم.



الشكل 9: وصف نظام التحقق من صحة البيانات (Dounia Chaatouf et al.) [8].

وبالإضافة إلى ذلك، يُعتبر من الصعب للغاية جعل عملية التجفيف مستمرة تمامًا. وبالتالي، تم تطبيق وحدة تخزين السرير الثابت في المجفف الشمسي غير المباشر لتحسين الكفاءة بشكل أكبر. أُجريت الدراسة باستناد إلى الخصائص والمعلومات الخاصة بالسرير الثابت، وأظهرت النتائج إشارات واعدة. ومع ذلك، يحتاج هذا الجانب إلى المزيد من التقييم، خاصة فيما يتعلق بوقت التجفيف وتقلبات درجة الحرارة على مدار اليوم.

قام الباحثون **Vishnuvardhan et al** [9] في دراستهم بإجراء مراجعة حديثة على المجففات الشمسية التي تعمل بالطاقة الشمسية باستخدام مواد تخزين الطاقة الطبيعية. وتضمنت المراجعة شاملة لمختلف مواد تخزين الطاقة الطبيعية المختلفة، والخصائص الفيزيائية الحرارية والفيزيائية والتقدم المحرز في تطبيقات التجفيف الشمسي المختلفة. علاوة على ذلك، تم إجراء تقييمات لأنواع مختلفة من المجففات الشمسية (الوضع المباشر وغير المباشر والمختلط والمجففات الهجينة) المدمجة مع مواد تخزين الطاقة الطبيعية (انظر الشكل رقم 10). وتم التوصل إلى الاستنتاجات المهمة التالية من هذه المراجعة:

- استخدمت غالبية الدراسات الرمال والصخور والمياه كمواد تخزين ومواد لتطبيقات التجفيف حيث يمكنها تخزين الطاقة الحرارية ما يصل إلى 108 ميغا جول لكل متر مكعب حجم لتطبيقات التدفئة والتبريد، كما أظهرت استقرارًا حراريًا ممتازًا في تطبيقات درجات الحرارة العالية. مواد تخزين الطاقة الطبيعية المقترحة التي يمكن استخدامها في المجففات الشمسية (بالترتيب التنازلي) هي الكوارتز والرمل والحصى والتربة المعدنية والحجر الرملي والصخور والحجر الجيري وحجر الجرانيت والتربة والطين والنفائات والخرسانة وطوب النار والماء.

- تم دمج نظام تخزين الطاقة الحرارية (TES) الذي يحمل الطاقة الطبيعية، كما تم دمج مواد التخزين في المجففات الشمسية إما تحت صفيحة الامتصاص (النوع 1) أو مع مبادل حراري بين SAC وغرفة التجفيف (النوع 2) أو داخل غرفة التجفيف (النوع 3). في معظم الدراسات، تم استخدام إعدادات النوع 1 والنوع 2.

- تحسنت حركية التجفيف وتم توفير وقت التجفيف بشكل كبير مع استخدام مواد تخزين الطاقة الطبيعية في المجففات الشمسية المباشرة (DSD). تم توفير وقت التجفيف بنسبة 55.2 - 69.5% لجوز الهند و51.7% للعنب، و47% للقرع المر في المجففات الشمسية المباشرة المدمجة مع تخزين الطاقة الطبيعية مقارنة بالتجفيف الشمسي المكشوف (OSD). ومع ذلك، تم توفير 47.2% و24.3% من وقت التجفيف في عملية تجفيف العنب والقرع المر، على التوالي، مع استخدام مواد تخزين الطاقة الطبيعية مقارنة بدون نظام تخزين.

- وبالمثل، في المجفف الشمسي غير المباشر (ISD)، تم توفير وقت التجفيف بنسبة 60% بالنسبة للروزيلا، و51.2% لب جوز الهند، و40.3% للعنب، و30% للقرع المر و10% بالنسبة للبطاطس عندما تم دمج المجفف الشمسي غير المباشر مع تخزين الطاقة الطبيعية مقارنةً بالتجفيف بالتجزئة. أيضاً، تم توفير 9.52% من وقت تجفيف البازلاء الخضراء في المجفف المدمج مع تخزين الطاقة الطبيعية مقارنةً بدون تخزين.

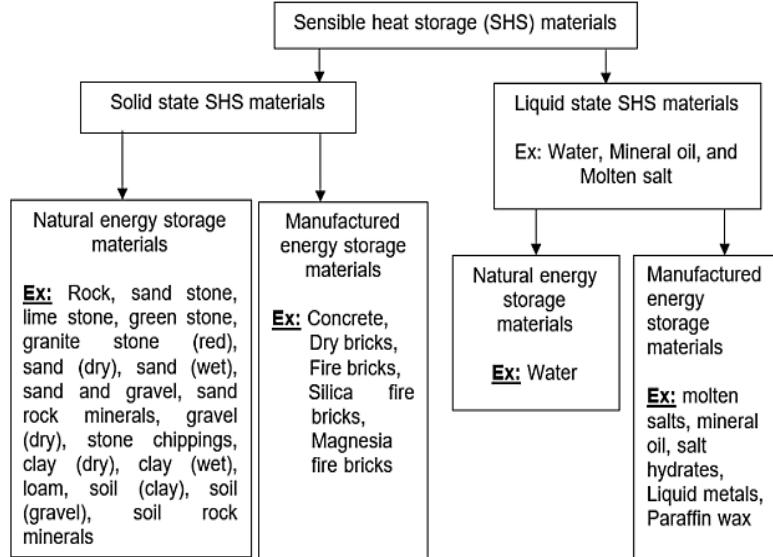
- كانت كفاءة التجفيف (η_d) والكفاءة الحرارية (η_{th}) لنظام التجفيف المدمج مع تخزين الطاقة الطبيعية كانت في حدود 2.85-42% و9.9-58.2% على التوالي لمختلف المواد الغذائية. وبالمثل بالنسبة لنظام ISD مع تخزين الطاقة الطبيعية، كان نفس الشيء في نطاق 1.6-53% و12-78.02% على التوالي.

- تم تحقيق معدل تجفيف أعلى ووقت تجفيف أقل في المجفف الشمسي المختلط في المجفف الشمسي المختلط (MSD) مقارنةً بنظام التجفيف الشمسي المختلط. في معظم أنظمة MSD، تم استخدام إعداد من النوع 1 حيث كانت درجة الحرارة أعلى من المواقع الأخرى. خلال الظروف الجوية غير المواتية، لعب استخدام المجفف الشمسي الهجين (HSD) دوراً مهماً. HSD المدمج مع المصادر المساعدة (مثل الكتلة الحيوية والسخان الكهربائي، والألواح الكهروضوئية، وأسطوانات غاز البترول المسال، وما إلى ذلك) الحفاظ على درجة حرارة ثابتة للتجفيف داخل المجفف.

- كان الماء هو المادة الأكثر استخداماً لتخزين الطاقة الطبيعية في HSD. تم الحصول على درجات حرارة أعلى باستخدام مصادر مساعدة ومجففات مبادل حراري مدمجة لنقل الحرارة من الماء إلى هواء التجفيف. تم توفير ما يقرب من 50 إلى 70% من وقت التجفيف في مجفف HSD لتجفيف المنتجات الغذائية مقارنةً بالتجفيف بالتفريغ الحراري المدمج.

وبشكل عام، يمكن استنتاج أن مواد تخزين الطاقة الطبيعية لها مزايا واعدة لأنماط مختلفة من تطبيقات التجفيف بالطاقة الشمسية. فبدلاً من استخدام مواد التخزين باهظة الثمن والمواد

الكيميائية PCM، يمكن استخدام هذه المواد المتاحة مجاناً كمواد لتخزين الطاقة في المجففات الشمسية. ومع ذلك، يلزم إجراء المزيد من الدراسات لاستكشاف مواد التخزين المناسبة. كما يلزم إجراء المزيد من الدراسات لتقدير الأمتل لطبقة التخزين لتجنب الاستخدام المفرط لمواد التخزين وتقليل حجم الإعداد.



الشكل 10: تصنيف مواد تخزين الطاقة الطبيعية (Vishnuvardhan et al.) [9].

تناولت دراسة [10] Mulatu C et al إجراء فحوصات تجريبية عن طريق تجفيف شرائح القرع اللبلاّب بهدف تقييم أداء المجففات الشمسية من النوعين السلبي والنشط غير المباشر (AITSD و PITSD) المدعومة بوحدة تخزين الطاقة الحرارية (TESS). بالنسبة لـ AITSD، فقد تم هيكلته انطلاقاً من المجفف الشمسي غير المباشر PITSD مع إضافة قناة شبه منحرفة تحمل مراوح وحدة المعالجة المركزية (CPU) مدفوعة بالألواح الشمسية الكهروضوئية للمساعدة في تدفق الهواء. بناءً على نتائج التحليل، تم استخلاص الاستنتاجات الأساسية التالية:

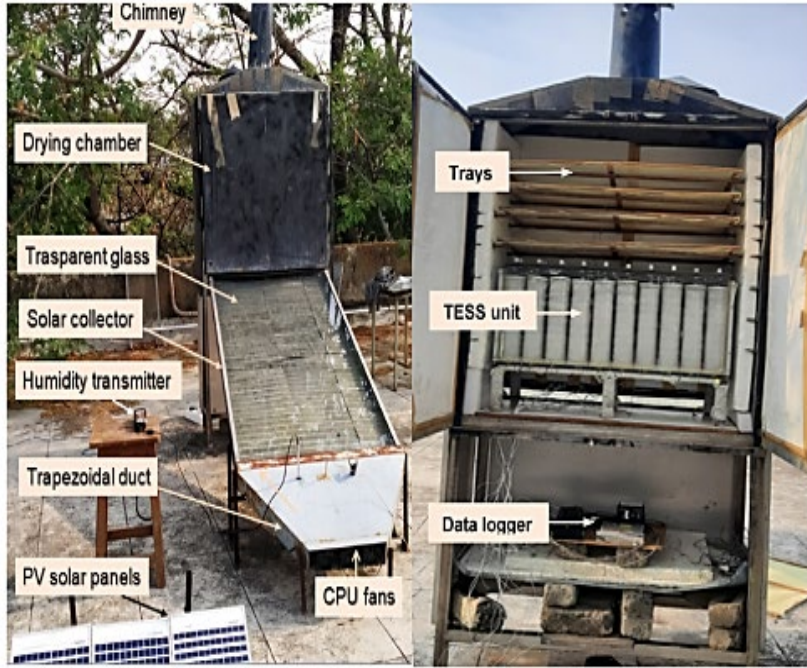
- خلال الاختبار، كانت درجات الحرارة القصوى المحققة داخل قسم التجفيف في PITSD و AITSD هي 64.5 و 61.54 درجة مئوية، على التوالي.
- بعد غروب الشمس، كانت درجة الحرارة القصوى المسجلة داخل قسم التجفيف 40° لكلا النظامين. يمكن لكلا النظامين التشغيل حتى منتصف الليل (الساعة 12) وحتى بعد غروب الشمس بسبب وحدة TESS.
- كانت القيمة المتوسطة المقدرّة لـ PITSD و AITSD، هي 0.7359 Qa كيلو وات و 0.7612 كيلو وات على التوالي.
- كانت القيم المتوسطة لكفاءة المجمع 66.7% لـ PITSD و 69.87% لـ AITSD.

- أظهر جهاز AITSD تحسناً بنسبة 12.59% في كفاءة التجفيف (hd) مقارنةً بجهاز PITSD. كانت القيم المقدرة 13.15 و 15.2% لكل من AITSD و PITSD، على التوالي.
- كانت القيم المتوسطة لانتشار الرطوبة (D_e) لكل من AITSD و PITSD كانت 8.06 و 10.00 م²/ثانية على التوالي بنسبة 24.07% في AITSD بالمقارنة مع PITSD.
- متوسط القيم المقدرة لمعامل نقل الكتلة (h_m) ل AITSD و PITSD كانت 0.0041 و 0.0055 م/ث مع تحسن بنسبة 34.14% لمعامل النقل الحراري AITSD. وبالمثل، كانت معاملات انتقال الحرارة (4.7 h) و 6.28 واط/م² كلفن على التوالي. ولوحظ تحسن بنسبة 33.62% في AITSD.
- تم حساب متوسط قيم طاقة التنشيط (E_a) في AITSD و PITSD تم حسابها لتكون 38.95 و 36.35 كيلوجول/مول، ونفس الشيء بالنسبة لاستهلاك الطاقة النوعية (SEC) كان 0.228 و 0.265 كيلو واط ساعة/كجم، على التوالي.
- كانت القيم المتوسطة لمعدل استخلاص الرطوبة النوعي (SM) تم حسابها لتكون 3.78 و 4.38 كجم/كيلووات ساعة لكل من AITSD و PITSD، على التوالي.
- بلغ الحد الأقصى لمعدل التجفيف الملاحظ في قسم التجفيف في AITSD و PITSD 2.28 و 3.35 كجم/ساعة على التوالي.
- لوحظت الارتباطات اللوغاريتمية لكل من D_e و h و h_m مع المحتوى الرطوبي (Mc). جميع المتغيرات الثلاثة (D_e ، h ، و h_m). اتجهت إلى الزيادة عندما انخفضت نسبة الرطوبة (Mc).
- انخفضت نسبة Mc في شريحة العينة من 15.56 (ديسيل) إلى 0.184 (ديسيل) في 16 ساعة في PITSD، وفي 14 ساعة في AITSD، وبالتالي فإن وقت التجفيف كان 2 ساعة في AITSD.

من النتائج، يبدو أن AITSD المدعوم ب TESS يفوق PITSD المدعوم ب TESS في جميع المعايير التي تم تقييمها أثناء التجربة (انظر الشكل رقم 12). يُوصى بإجراء تحليل اقتصادي لهذا العمل لتسهيل المزيد من التطبيقات واسعة النطاق.

(أ)

(ب)

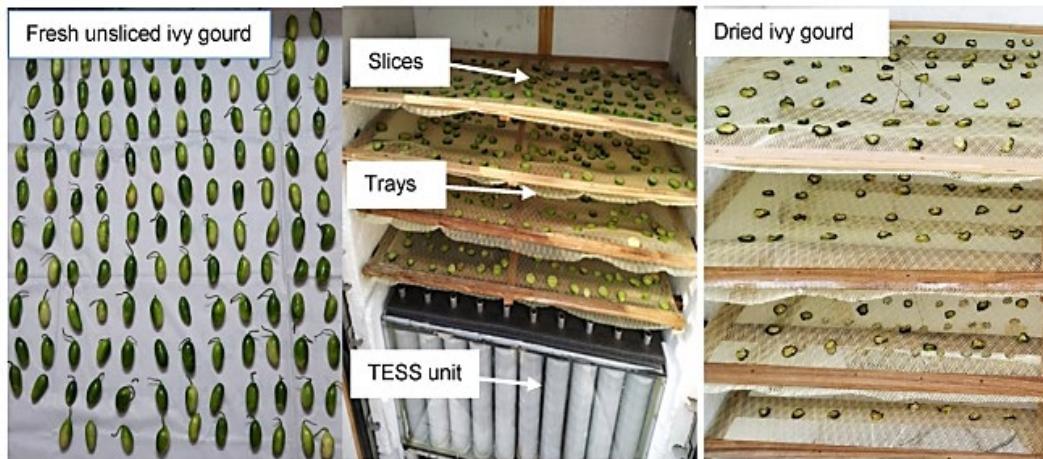


الشكل 11: صور فوتوغرافية لـ (أ) المجفف الشمسي النشط من النوع غير المباشر و(ب) وحدة TESS [10] Mulatu C et al.

(أ)

(ب)

(ج)

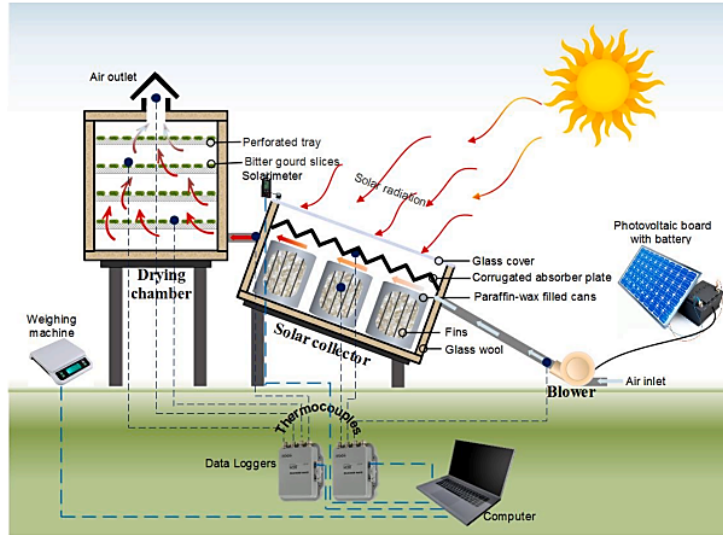


الشكل 12: صور فوتوغرافية لـ (أ) طازج غير مقطع (ب) مقطع وموضوع على صواني و(ج) المنتج النهائي المجفف (Mulatu C et al) [10].

في هذه الدراسة قام الباحث **S. Madhankumar** [11] بتحليل الطاقة والجدوى الاقتصادية للمجفف الشمسي غير المباشر (ISD)، والذي يشتمل على منفاخ، وثلاثة إعدادات مختلفة لمجمع الطاقة الشمسية ذات الألواح المموجة (بدون تخزين طاقة المواد المتغيرة الطور (PCMES)، مع PCMES، ومع زعانف مُدخلة PCMES) كما هو موضح في الشكل رقم 13. تم تطوير هذه الإعدادات واختبارها لتجفيف شرائح القرع المر في ظل ثلاثة سيناريوهات بيئية، وتم تنفيذ التجفيف في وحدة التجفيف الحراري القسري في وقت واحد. تم استخلاص الاستنتاجات التالية:

- استمرت عملية التجفيف حتى وصل محتوى الرطوبة على أساس رطب إلى 12% من 92% للحفاظ. وكانت فترات التجفيف الملحوظة في ISD خلال السيناريو البيئي 2 للإعدادات 1، 2، و 3، وفي 15 OSD ساعة، و 11 ساعة، و 11 ساعة، و 18 ساعة على التوالي. ومن الملاحظ أن ISD ينتج منتجًا بجودة أفضل من OSD.
- تم تحديد أفضل نموذج رياضي لسلوك التجفيف بناءً على المتغيرات الإحصائية باستخدام نتائج السيناريو البيئي 1. وأظهر نموذج Weibull لجميع إعدادات ISD ونموذج ثنائي المدى الخاص ب OSD قيمة R2 أكبر وقيم χ^2 و RMSE أقل.
- خلال تجربة السيناريو البيئي 1، أظهر متوسط الطاقة الحرارية المشحونة والمفرغة في وحدة PCMES قيمًا تبلغ 16.88 كيلوجول و 16.12 كيلوجول في الإعداد 2، و 17.78 كيلوجول و 17.35 كيلوجول في الإعداد 3 خلال فترة التجفيف. بلغ متوسط كفاءة 17.3% ISD للإعداد 1، و 18.9% للإعداد 2، و 19.6% للإعداد 3. وكان متوسط كفاءة تجفيف ISD في الإعداد 1، والإعداد 2، والإعداد 3 هو 14.16 كيلو وات/كجم، و 12.60 كيلو وات/كجم، و 12.07 كيلو واط ساعة/كجم، على التوالي. ومن خلال تحليل الطاقة، أظهر الإعداد 3 أفضل نتيجة من الإعدادين الآخرين بسبب دمج زعانف الألمنيوم عالية التوصيل الحراري في وحدة PCMES، وهذا كان مناسبًا لجميع السيناريوهات البيئية الأخرى أيضًا.

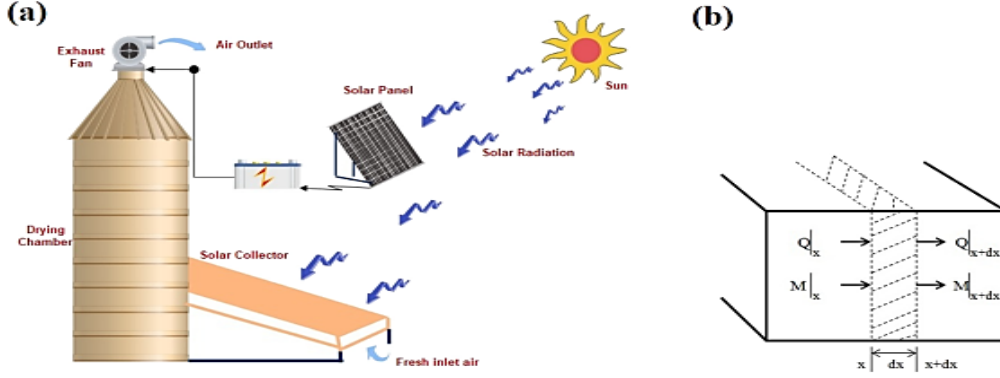
أبلغ تحليل الطاقة في ISD عن الكفاءة الحرارية واستهلاك الطاقة ومعدل استخلاص الرطوبة. وقد أظهر أداء ISD المزود بزعانف مُدخلة في PCMES أداءً متفوقًا على الإعدادين الآخرين في مجال الطاقة. وعلى الرغم من ذلك، يترتب على استخدام الزعانف تكلفة رأسمالية أعلى بنسبة قليلة (3.1%) مقارنة بالإعداد بدون زعانف. تم اختيار ISD مع إدراج الزعانف PCMES كأفضل إعداد بناءً على معايير الطاقة والمعايير الاقتصادية من تقنيات اتخاذ القرارات متعددة المعايير. ونتيجة لذلك، ينتج الإعداد المختار منتجًا قويًا وعالي الجودة؛ وبالتالي، يُوصى به لتجفيف المنتجات الزراعية في صناعات تجفيف الأغذية.



الشكل 13: تمثيل تخطيطي لـ ISD مع الأدوات.
[11] (S. Madhankumar).

في هذه الدراسة قام الباحثون Mukul Sengar Et al [12] بإجراء تحقيق في أداء المجفف الشمسي من النوع المستحث من خلال النظر في حركية التجفيف والتحليل الحراري. كما تمت دراسة نموذج رياضي وتعديله من أجل التحقق من صحة النتائج التجريبية. تم تصنيع إعداد مجفف شمسي من النوع المستحث وأجريت التجارب على البطاطس كعينات غذائية (أنظر الشكل رقم 14). وأظهرت التجربة النتائج التالية:

- تم العثور على أن البطاطس مناسبة كمادة غذائية للتجربة بسبب كونها مصدرًا غنيًا بالنشا. وأظهرت العينة ذات الشكل الكروي أدنى معدل لفقدان الحرارة والرطوبة، وحققت أقصى درجة للحرارة والرطوبة مقارنة بالأشكال الأخرى.
- يمكن للمجفف الشمسي تحقيق درجة حرارة كافية حتى في حالة انخفاض الإشعاع الشمسي.
- يتقارب النموذج الرياضي مع البيانات التجريبية.
- يتمتع هذا المجفف الشمسي المستحث بتكلفة تشغيل منخفضة وفترة استرداد تبلغ 1.5 سنة، وتم العثور على أنه اقتصادي مقارنة بالمجففات الشمسية الأخرى المتاحة. يمكن لهذه التقنية أن تلعب دورًا مهمًا في توفير الطاقة والحد من التلوث البيئي.



الشكل 14: (أ) رسم تخطيطي لمجفف شمسي من النوع المستحث (ب) عنصر حجم تحكم من مادة غذائية بسماكة dx (Mukul Sengar Et al) [12].

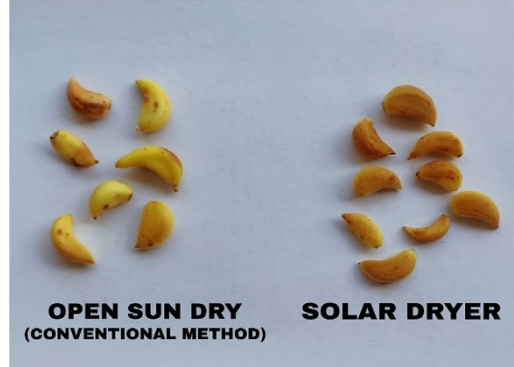
قام **Yogesh D et al** [13] في هذه الورقة البحثية، تم تحليل أداء المجفف الشمسي بناءً على درجة الحرارة ومحتوى الرطوبة (%) والرطوبة النسبية. تم إجراء التجارب باستخدام مجفف شمسي غير مباشر لتجفيف وتنشيف منتجات غذائية مثل البصل والثوم. تمت مقارنة النتائج مع طريقة التجفيف الشمسي المفتوح التقليدي (OSD). في المجفف الشمسي، بلغت درجة الحرارة القصوى المسجلة 47.6 درجة مئوية. استغرق التجفيف الكامل ل 1 كجم من البصل حوالي 36 ساعة، بينما استغرق التجفيف الكامل ل 300 جرام من الثوم في المجفف الشمسي الغير مباشر 188 ساعة. في طريقة التجفيف الشمسي المفتوح (OSD)، تعرض البصل والثوم لضوء الشمس المباشر الذي قلل من الخصائص الحسية مثل الرائحة واللون والطعم والعناصر الغذائية.

أما في حالة المجفف الشمسي الغير مباشر، فلم تتعرض المنتجات لأشعة الشمس المباشرة، مما حافظ على الخصائص الحسية. أظهرت النتائج أن نسبة الرطوبة انخفضت إلى 25% و 60% للبصل والثوم على التوالي خلال فترة 24 ساعة في المجفف الشمسي الغير مباشر، بينما تم تسجيل 67% و 63% على التوالي في حالة المجفف الشمسي المفتوح (OSD). يشير الاستنتاج إلى أن المجفف الشمسي أكثر كفاءة من طريقة التجفيف بالتحميم الموضعي التقليدي، حيث يزيد من معدل إزالة الرطوبة ويحافظ على المعايير الحيوية مثل الطعم والرائحة واللون والعناصر الغذائية. ويبدو أن المجفف الشمسي يولد حرارة أكثر من المجفف الشمسي الغير مباشر، مما يزيد من درجة حرارة الخزانة القريبة ويجعل عملية التجفيف أكثر كفاءة مقارنة بالتحميم الموضعي.

(ب)



(أ)



الشكل 15: (أ) مقارنة تجفيف الثوم بالمجفف شمسي المفتوح وبالمجفف الشمسي غير المباشر (ب) مقارنة تجفيف البصل بالمجفف شمسي المفتوح وبالمجفف الشمسي غير المباشر (Yogesh D et al) [13].

إستعرض **Sunil et al** [14] في هذه الورقة استراتيجيات متاحة لتعزيز أداء الوضع غير المباشر لأنظمة التجفيف بالطاقة الشمسية. وأشارت إلى أهمية كل من نظام تخزين الطاقة الحرارية والحمل الحراري القسري في تنفيذ تجفيف الأغذية الزراعية أو المنتجات الطبية خلال الليل، بالإضافة إلى ضمان الموثوقية والتحكم. حيث تعمل الألواح الكهروضوئية كمصدر للطاقة الكهربائية وتوفر هذه الطاقة لمكونات مثل المنفاخ أو المضخة الحرارية.

تعتمد كفاءة المجفف الشمسي على عدد من المتغيرات مثل تشميس الطاقة الشمسية، ودرجة الحرارة المحيطة، وسرعة الهواء المحيط، وسرعة الهواء داخل المجفف، ورطوبة الهواء، ونوع المنتج، والرطوبة الأولية الموجودة في المنتج، ووزن المنتج المراد تجفيفه، وما إلى ذلك. يُوصى بإجراء المزيد من الأبحاث للتحقق من سرعة التحكم المستمر ودرجة حرارة الهواء داخل غرفة التجفيف. ويؤدي توفير الألواح الكهروضوئية مع مجمعات الطاقة الشمسية أيضًا إلى تحسين كفاءة تجفيف المجفف الشمسي من النوع غير المباشر. (أنظر الشكل رقم 16).



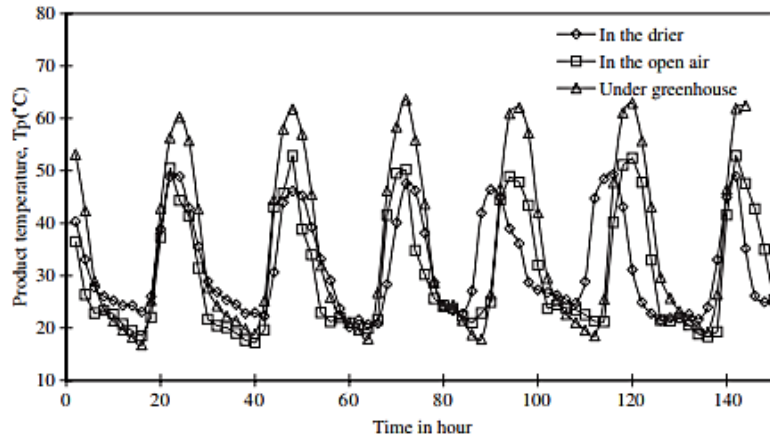
1. Flat plate collector
2. Absorber plate of collector
3. Air blower
4. Inlet air to collector
5. Outlet air from collector
6. Dryer chamber
7. Thermocouples location

الشكل 16: مجفف الهواء الشمسي بالحمل الحراري القسري غير المباشر
[14] (Sunil et al).

هدف **Madhankumar et al** [15] في هذه المراجعة إلى دراسة ميزات وفوائد المجفف الشمسي غير المباشر (ISD) مع وحدات تخزين الطاقة الحرارية المزودة بزعانف لإزالة الرطوبة من المنتجات الغذائية وتجفيفها، وذلك من خلال عرض ومقارنة مختلف وحدات المواد ذات التغير الطوري (PCM) المتاحة، وموقع وحدة PCM المدمجة في ISD، والزعانف المدمجة مع نظام تخزين الطاقة الحرارية (TES) في ISD، وطرق الديناميكا الحرارية الحاسوبية (CFD) لتجفيف المنتجات الغذائية. وقد أدى استخدام أجهزة TES و مواد تخزين الحرارة الكامنة إلى تحسين الاستخدام المستدام لمجففات الحرارة الكامنة وزيادة تشغيلها حتى بعد توقف أشعة الشمس. وقد مكن استخدام TES من تقليل عدد الساعات اللازمة لإزالة المحتوى المائي. إن استخدام PCM ذات الحرارة الكامنة العالية ومساحة السطح الكبيرة للتبادل الحراري ضروري لتحقيق كفاءة حرارية جيدة لمثبت الحرارة الكامنة. بالإضافة إلى ذلك، تبين أن صفيحة الامتصاص المموجة أكثر كفاءة مقارنةً بالصفائح المسطحة، حيث إنها توفر مساحة امتصاص أعلى. وقد وجدت الدراسة أن فترات الاسترداد أقل مقارنةً بالعمر الافتراضي للأجهزة. ولذلك، يوصى باستخدام هذا النوع من أجهزة ISD للمنتجات الغذائية والصناعات التحويلية والمزارعين. كانت التقنيات العديدة مفيدة جدًا في تطوير نظام مجفف شمسي مبتكر لتجفيف المنتجات الغذائية.

هدفت المراجعة التي أجراها **A. Fadhel et al** [16] وزملاؤه إلى دراسة العمليات الثلاث لتجفيف العنب بالطاقة الشمسية (التجفيف الشمسي المكشوف، التجفيف الشمسي بالحمل الحراري الطبيعي، والتجفيف الشمسي في النفق الشمسي في الدفيئة). تختلف ممارسات تجفيف العنب بالطاقة الشمسية والتقليدية بشكل كبير. في الطريقة التقليدية (التجفيف الشمسي المكشوف)، يتم نشر عناقيد العنب إما على الأرض أو على منصة في طبقة رقيقة معرضة مباشرة للشمس. هذه الطريقة هي الأرخص وتستخدم بنجاح في البلدان المنتجة للعنب، حيث لا تتطلب أي نفقات رأسمالية. كما تم استكشاف طريقة تجفيف محسنة أخرى في تونس حديثًا، وهي التجفيف بالدفيئة

الشمسية النفقية، التي تعتمد على نشر عناقيد العنب على صواني مرتبة على مستويين أو أكثر. في هذه الحالة، يكون العنب محميًا بغطاء شفاف يقلل من مخاطر الطقس. هذه الطريقة رخيصة أيضًا لأن الصوبات الزراعية غير مستغلة خلال موسم الحر، كما أن جودة الزبيب تكون أفضل مقارنةً بجودة الزبيب عند تجفيفه بالطريقة الشمسية المكشوفة (أنظر الشكل رقم 17). وقد أظهرت التجربة أن التجفيف في الدفيئة النفقية بالطاقة الشمسية كان مرضيًا ومنافسًا لعملية التجفيف الشمسي، حيث قدرت مدة تجفيف العنب في الدفيئة الزراعية والمجفف الشمسي بالحمل الحراري الطبيعي بحوالي خمسة أيام وأربعة أيام على التوالي، وأن التجفيف في الدفيئة الشمسية يقدم قدرة تجفيف كبيرة ولا يتطلب استثمارًا أوليًا كبيرًا أو تكلفة تشغيل إضافية.



الشكل 17 تطور درجة حرارة المنتج مع وقت التجفيف: (◇) التجفيف الشمسي في النفق الشمسي في الدفيئة (□) التجفيف الشمسي المفتوح و(Δ) المجفف الشمسي بالحمل الحراري الطبيعي (A. Fadhel et al) [16].

استعرض A. Fudholi et al [17] في هذه الورقة أنواع المجففات الشمسية، والتي تشمل:

1. المجففات الشمسية المباشرة.
2. المجففات الشمسية غير المباشرة.
3. المجففات ذات الوضع المختلط.
4. المجففات الشمسية الهجينة.

تم التركيز على المنتج الذي يتم تجفيفه، بالإضافة إلى الجوانب التقنية والاقتصادية لهذه المجففات (أنظر الجدول رقم 01).

وفي الختام، تشير الاتجاهات التقنية في تطوير أنظمة التجفيف بمساعدة الطاقة الشمسية للمحاصيل الزراعية إلى أهمية تصميم المجمعات المدمجة، وتحقيق الكفاءة العالية، والتخزين المتكامل، والعمر الطويل لنظام التجفيف. تجدر الإشارة إلى أن مجمعات الطاقة الشمسية القائمة على الهواء ليست الأنظمة الوحيدة المتاحة؛ بل يمكن أيضاً استخدام المجمعات المعتمدة على الماء، حيث يمكن استخدام مبادل حراري مائي-هوائي. يمكن أن يُجبر تدفق الهواء الساخن في

مبادل حراري من الماء لتجفيف المحاصيل الزراعية، حيث يعمل خزان الماء الساخن كمخزن للحرارة في نظام التجفيف الشمسي.

Classification	Advantages	Disadvantages
Passive dryers	+ Simplest + Low capital and running costs	Low capacity
Active dryers	+ Independent of the ambient climatic conditions + Short drying periods than passive dryers	More complex and expensive than passive dryers
Hybrid solar dryers	+ Allow better control of drying + Ability to operate without sun reduce of product loss + May be faster than passive and active dryers	Expensive, and may cause fuel/gas dependence

جدول 1: مميزات وعيوب أنواع المجففات الشمسية. (A. Fudholi et al) [17].

يهدف العمل المقدم في هذه الورقة البحثية من طرف Samira Chouicha et al [18] إلى دراسة مجفف شمسي غير مباشر، تم تصميمه وتصنيعه محليًا بالضبط في مدينة ورقلة في جنوب الصحراء الجزائرية، من أجل ضبط الظروف المناسبة للتخزين الآمن لشرائح البطاطس المقطعة. من خلال هذه الدراسة، تم استخدام مقاومة كهربائية مزودة بعدد متغير من الألواح الكهروضوئية لتعزيز الكفاءة الحرارية. من ناحية أخرى، تم متابعة تأثير عوامل التحكم المختلفة للتجفيف الشمسي الهجين على جودة شرائح البطاطس المجففة. وأظهرت النتائج الرئيسية ما يلي (أنظر الجدول رقم 02):

- عند استخدام لوحة شمسية واحدة للوصول إلى المحتوى المائي النهائي للبطاطس ($X_f = 0.13$ كجم ث / كجم د م)، كان زمن التجفيف المطلوب 3 ساعات. وفي حالة استخدام لوحين، كان هذا الزمن ساعتين و45 دقيقة.
- أفضل ظروف التشغيل لضمان أعلى كفاءة وأقل مدة زمنية وأفضل جودة للمنتج تم اختيارها على النحو التالي:
 - ❖ التجفيف الهجين (الطاقة الشمسية) مع تحسين توصيل الألواح الشمسية ووقت التجفيف وجودة المنتج. كانت ظروف التشغيل هي: سرعة تدفق الهواء 0.51 م/ث لمدة ساعتين و45 دقيقة خلال الفترة بين 06 مايو 2012 و28 مايو 2012.
 - ❖ التجفيف الهجين (طاقة كهربائية تقليدية) باستخدام سرعة قصوى، حيث تم إجراؤه عند: 0.5 متر/ثانية لمدة ساعة و15 دقيقة خلال الفترة من 13 مايو 2012 إلى 18 مايو 2012.

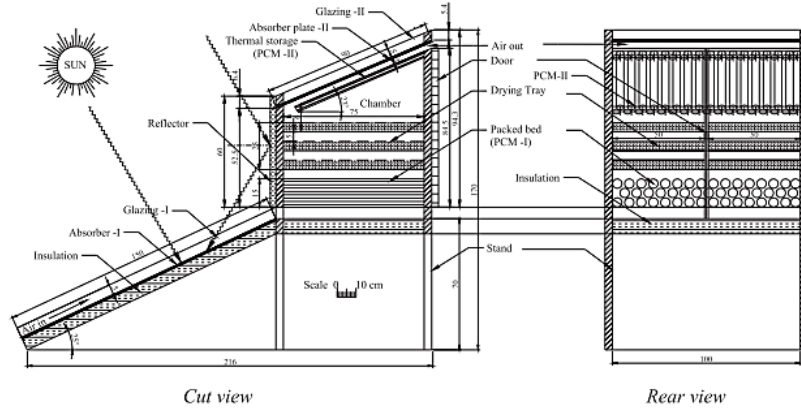
	1 panel	2 panels
X_1 (kg w / kg d.m)	5.22	5.25
X_2 (kg w / kg d.m)	0.13	0.13
timing of drying (H)	3H	2H45min

جدول 2: تغيرات المحتوى المائي أثناء ظروف التشغيل المختلفة.
[18] (Samira Chouicha et al)

إستعرض **Dilip Jain et al** [19] في هذه الورقة تطوير مجفف حديث للمحاصيل بالطاقة الشمسية مزود بمخزن للطاقة الحرارية للحفاظ على استمرارية تجفيف الأعشاب دون فقدان لونها ونكهتها. يتكون المجفف من مجمع شمسي مسطح، وسرير معبأ لتخزين الطاقة المتغيرة الطور، وقاعدة تجفيف مع صواني للمحاصيل ونظام تهوية طبيعي. تم تصميم المجفف بمساحة تجميع قصوى تبلغ 1.5 متر مربع، وستة صواني للمحاصيل بمساحة فعالة تبلغ 0.50 × 0.75 متر مربع، ويمكنه استيعاب 12 كجم من الأعشاب الورقية الطازجة. المجفف مرفق بسرير حراري معبأ لتخزين الطاقة بسعة 50 كجم من مادة تغيير الطور (PCM).

يعمل نظام التجفيف بحيث تخزن المواد المتغيرة الطور الطاقة الحرارية خلال ساعات سطوع الشمس وتطلق الحرارة الكامنة والحسية بعد غروب الشمس، مما يتيح للمجفف العمل بفعالية لمدة 5 إلى 6 ساعات. في غرفة التجفيف، لوحظ أن درجة الحرارة أعلى بمقدار 6 درجات مئوية من درجة الحرارة المحيطة بعد ساعات سطوع الشمس حتى منتصف الليل خلال شهر يونيو في جودبور. تم تحليل الأداء الاقتصادي للمجفف من خلال العائد على رأس المال وفترة الاسترداد البسيطة، حيث كانت 0.65 و 1.57 سنة على التوالي على أساس التكلفة المثلى للمواد الخام وسعر بيع المنتج (أنظر الشكل رقم 18).

يعتبر مجفف المحاصيل الشمسي المطور بديلاً للتغلب على عيوب التجفيف الشمسي المكشوف التقليدي والاستفادة القصوى من الإشعاعات الشمسية المتاحة. المجفف المزود بسرير معبأ بمادة تغيير الطور قادر على تخزين الطاقة الحرارية في شكل حرارة كامنة وحسية أثناء النهار وإطلاق الحرارة نفسها بعد ساعات سطوع الشمس. ساعدت هذه الطاقة المخزنة في الحفاظ على درجة حرارة التجفيف، التي تراوحت بين 40 و 45 درجة مئوية، مما أدى إلى تمديد فترة التجفيف. أكدت التجارب الليلية الأداء الجيد للنظام والكفاءة الحرارية للمجفف، حيث بلغت الكفاءة 28.2%. بالنظر إلى التكلفة المعقولة للمواد الخام (20 روبية/كجم) وسعر المنتج (400 روبية/كجم)، كان المجفف الشمسي قابلاً للتطبيق من الناحية المالية مع فترة استرداد تبلغ 1.5 سنة.

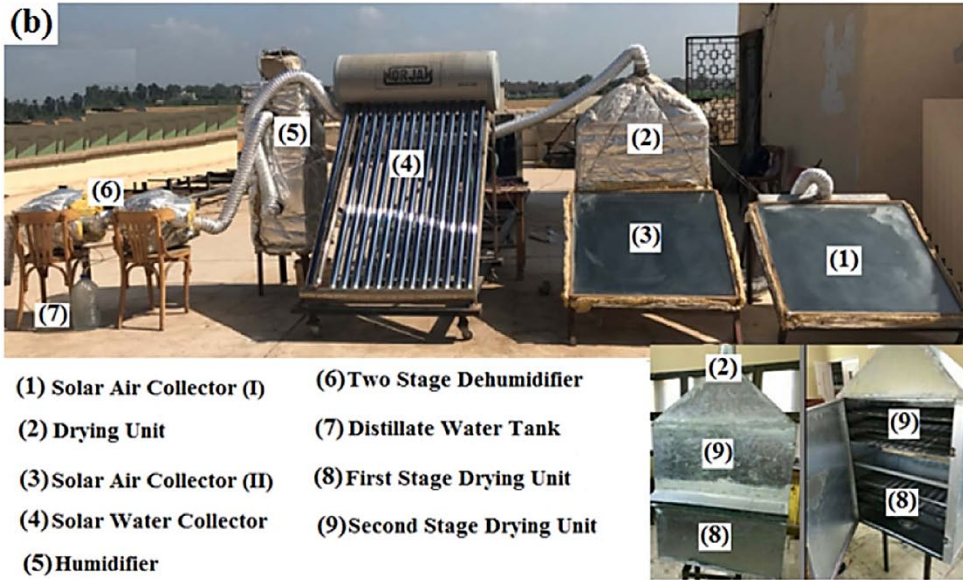
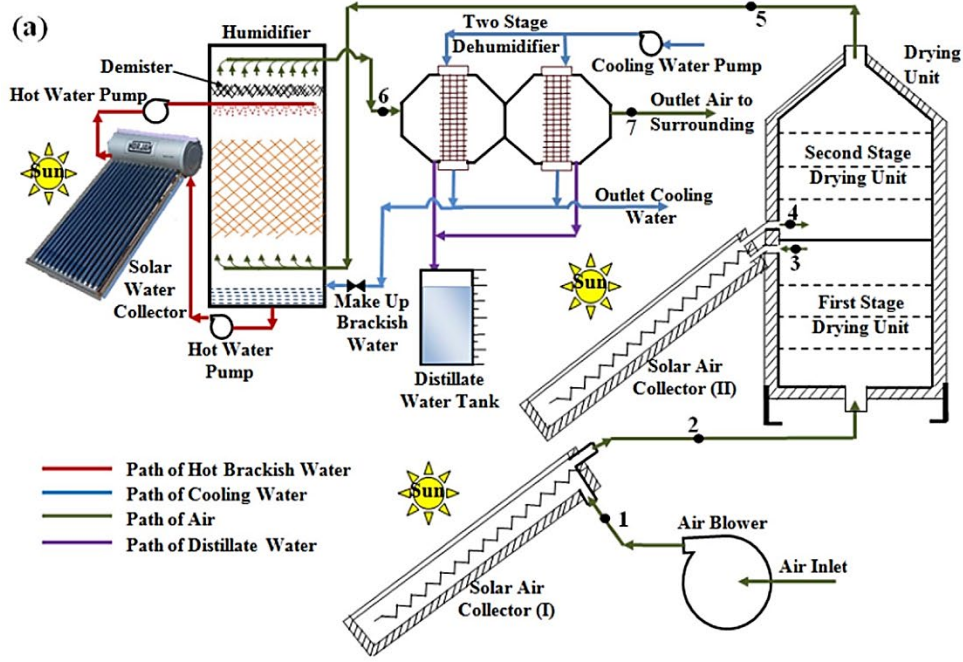


الشكل 18: عرض تخطيطي لجهاز امتصاص الألواح المسطحة مع مجفف المحاصيل الشمسي الحراري الطبيعي بالحمل الحراري. [19] (Dilip Jain et al).

إستعرض **A.E. Kabeel et al [20]** في هذه الدراسة إجراء تقييمات أداء مجفف شمسي غير مباشر يعمل بالطاقة الشمسية على مرحلتين مع إعادة التسخين المقترن بالترطيب- التجفيف (HDH) بهدف إنتاج المياه المقطرة وتجفيف المنتجات وتوفير الطاقة. تم تصميم وبناء أنظمة تحلية المياه في مدينة طنطا، مصر. يتكون النظام المقترح من نظامين فرعيين:

1. المجفف الشمسي غير المباشر على مرحلتين مع إعادة التسخين، والذي يمكن استخدامه لإزالة محتويات الرطوبة من النباتات.
2. نظام تحلية المياه بالتسخين الشمسي غير المباشر، والذي يمكن استخدامه لإنتاج مياه التقطير.

أظهرت النتائج التجريبية أنه مع زيادة تدفق الهواء من 50 إلى 75 م³/ساعة، تزداد إنتاجية ماء التقطير من 29.55 إلى 42.3 لتر/اليوم، وتزداد إزالة الرطوبة من المنتج من 8.33 إلى 12.37 كجم/اليوم خلال الفترة من 8:00 صباحًا إلى 7:00 مساءً. أدى استخدام المجفف على مرحلتين مع إعادة التسخين إلى تحسين إزالة الرطوبة من المنتج بنسبة 71.78% في المتوسط مقارنة بالمرحلة الأولى فقط من وحدة التجفيف. كما أن نسبة ناتج الكسب تتفاوت على نطاقات 1.24-1.79 و 0.97-1.38 للنظام المقترح ونظام تحلية المياه عالي الكثافة فقط، عندما يزيد معدل تدفق الهواء من 50 إلى 75 م³/ساعة. تحسنت نسبة ناتج الكسب للنظام المقترح بنسبة 29% في المتوسط مقارنة مع نظام تحلية المياه عالي الكثافة فقط (أنظر الشكل رقم 19).



الشكل 19: رسم تخطيطي وصورة لمجفف شمسي غير مباشر يعمل بالطاقة الشمسية على مرحلتين مع إعادة تسخين مقترنة بأنظمة تحلية الترطيب والتجفيف. (A.E. Kabeel et al) [20].

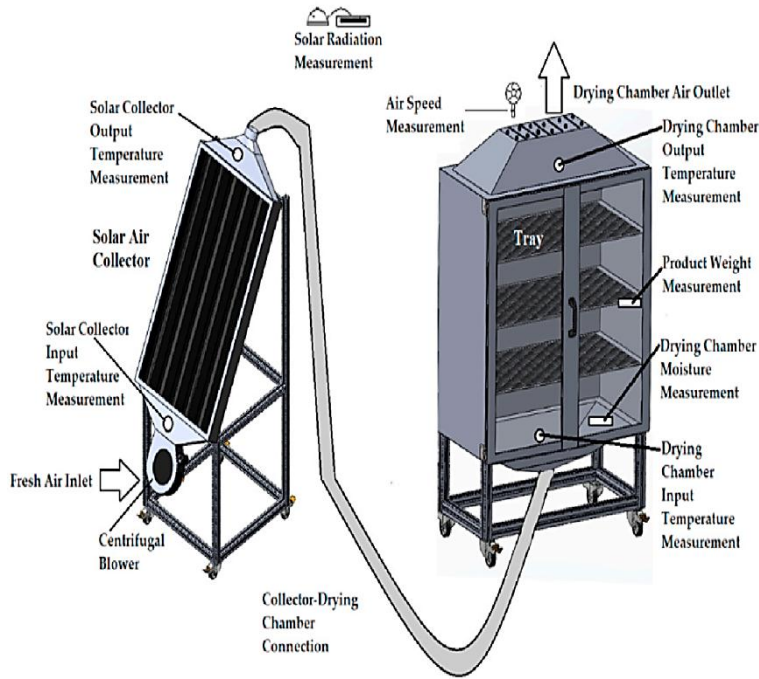
في هذه الدراسة التجريبية التي أجراها Mehmet Das et al [21]، تم فحص الأداء الحراري لمجفف الهواء الشمسي مع نظام التتبع الشمسي. تم تزويد مجمع الهواء الشمسي (SAC) بميزة التتبع الشمسي باستخدام نظام تحكم منطقي قابل للبرمجة (PLC) لم يتم استخدامه من قبل. تم تجهيز SAC بخاصية التتبع الشمسي ثنائي الاتجاه باستخدام هذا النظام. تم دمج SAC المتحرك المصمم مع خزانة تجفيف للحصول على مجفف مجمع الهواء الشمسي

(SACD). كما تم تصميم جهاز SACD ثابت، بنفس الأبعاد مثل المجفف المتحرك، لمقارنة أداء المجفف المتحرك SACD.

من أجل مقارنة الكفاءة الحرارية وكفاءة التجفيف لكلا النظامين، تم تجفيف شرائح التفاح بسمك 14 مم في وقت واحد. تم فحص مجمع الهواء الشمسي وحركية تجفيف شرائح التفاح. في نظام التجفيف SAC المتحرك والثابت، تم تحديد قيم D_{eff} التي تراوحت ما بين 0.062×10^{-7} إلى 0.084×10^{-7} م²/ثانية، و $33.2-40.01$ كيلوجول/مول، و 0.031×10^{-6} إلى 0.049×10^{-6} م²/ثانية، و $16.4-22.9$ كيلوجول/مول في درجة حرارة 62 درجة مئوية و45 درجة مئوية، على التوالي.

تفاوتت قيم E_a للتفاح لتصل إلى $33.2-40.01$ كيلوجول/مول في نظام التجفيف SAC المتحرك، و 16.4 إلى 22.9 كيلوجول/مول في نظام التجفيف الثابت SAC. وأظهر h_c لشرائح التفاح تغيرات تتراوح بين $17.475-21.818$ واط/م² كلفن في نظام التجفيف المتحرك SAC، و $13.215-20.846$ واط/م² كلفن في نظام التجفيف الثابت SAC. وازدادت قيم D_{eff} و E_a و h_c مع زيادة سرعة المروحة. في نظام التجفيف المتحرك ونظام التجفيف الثابت SAC، تم حساب قيم η لثلاث سرعات مختلفة للمروحة بنسبة 75.7% و 51.7% في المتوسط، على التوالي. تم الحصول على أقصى η في كلا نظامي التجفيف عند سرعة مروحة تبلغ 1690 دورة في الدقيقة.

جهاز SAC المتحرك، المزود بخاصية التتبع الشمسي مع PLC، حقق متوسط كفاءة أعلى بنسبة 24% من SAC الثابت. وفقاً للمعايير الإحصائية مع $R=0.96289$, $X^2 = 0.008004125$, و $RMSE = 0.070025781$ ، وجد أن نموذج Midilli وآخرون هو أفضل نموذج لوصف سلوك تجفيف شرائح التفاح (أنظر الشكل رقم 20).



الشكل 20: رسم تخطيطي لتكوين التجربة ونظام التتبع الشمسي -1 (PLC المعالج، 2- المقاومة الهيدروليكية للمحرك، 3- المبادل الحراري للمحرك، 4- صمام. Ldr (Mehmet Das et al) [21].

قام **A. Sreekumar et al** [22] في هذه الورقة البحثية، تم تطوير واختبار نوع جديد من المجففات الشمسية الفعالة التي تعمل بالطاقة الشمسية والمخصصة بشكل خاص لتجفيف الخضروات والفاكهة. يحتوي المجفف على حجرتين: إحداهما لتجميع الإشعاع الشمسي وإنتاج الطاقة الحرارية والأخرى لنشر المنتج المراد تجفيفه. تم تصميم هذا الترتيب لامتصاص أقصى قدر من الإشعاع الشمسي بواسطة لوحة الامتصاص. في هذا المجفف، تم تحميل المنتج تحت اللوحة الماصة، مما منع مشكلة تغير اللون بسبب التشعيع بأشعة الشمس المباشرة. يحتوي المجفف على ستة صواني مثقبة لتحميل المواد.

وصل جهاز الامتصاص للمجفف درجة حرارة 97.2 درجة مئوية عند دراسته في ظل ظروف عدم التحميل. كانت أقصى درجة حرارة للهواء في المجفف، في ظل هذه الحالة كانت 78.1 درجة مئوية. تم تحميل المجفف ب 4 كجم من القرع المر بمحتوى رطوبة أولي 95%، وتم تحقيق محتوى الرطوبة النهائي المطلوب بنسبة 5% في غضون 6 ساعات دون فقدان لون المنتج، في حين استغرق التجفيف تحت أشعة الشمس المفتوحة 11 ساعة.

كان زجاج المجمع مائلاً بزاوية معينة، مناسبة للموقع، لامتصاص أقصى قدر من الإشعاع الشمسي. تم إجراء تحليل مفصل للأداء بثلاث طرق، وهي "طريقة التكلفة السنوية" و"القيمة الحالية للموفورات السنوية" و"القيمة الحالية للموفورات التراكمية". تم حساب تكلفة التجفيف لـ 1 كجم من القرع المر على أنها 17.52 روبية، و41.35 روبية في حالة المجفف

الكهربائي. افترض أن العمر الافتراضي للمجفف الشمسي هو 20 عامًا. تم حساب القيمة الحالية التراكمية للمدخرات السنوية على مدى عمر المجفف الشمسي، واتضح أنها تبلغ 31659.26 روبية، وهي أعلى بكثير من التكلفة الرأسمالية للمجفف (6500 روبية). وحُسبت فترة الاسترداد على أنها 3.26 سنة، وهي أيضًا صغيرة جدًا بالنظر إلى عمر النظام (20 سنة) لأنه لا يحتوي على مواد قابلة للتآكل.

لذا، فإن المجفف سوف يجفف المنتجات بدون تكلفة خلال فترة عمره الافتراضي بالكامل تقريبًا. كانت جودة المنتج الذي تم تجفيفه في المجفف الشمسي تنافسية مع المنتجات ذات العلامات التجارية المتوفرة في السوق، ويمكن استخدام المجفف المطور بشكل جيد في القطاع المنزلي، كما يمكن لصغار المزارعين والمزارعين الهامشيين الاستفادة منه.

Year	Annualized cost of dryer (Rs.)	Annual savings (Rs.)	Present worth of annual saving (Rs.)	Present worth of cumulative saving (Rs.)
1	920.11	2205	2041.66	2041.66
2	920.11	2315.25	1984.95	4026.61
3	920.11	2431.01	1929.81	5956.42
4	920.11	2552.56	1876.20	7832.62
5	920.11	2680.19	1824.09	9656.71
6	920.11	2814.20	1773.42	11430.13
7	920.11	2954.91	1724.16	13154.29
8	920.11	3102.65	1676.26	14830.55
9	920.11	3257.78	1629.70	16460.25
10	920.11	3420.67	1584.43	18044.68
11	920.11	3591.71	1540.42	19585.10
12	920.11	3771.29	1497.63	21082.73
13	920.11	3959.86	1456.03	22538.76
14	920.11	4157.85	1415.58	23954.34
15	920.11	4365.74	1376.26	25330.60
16	920.11	4584.03	1338.03	26668.63
17	920.11	4813.23	1300.86	27969.49
18	920.11	5053.90	1264.73	29234.22
19	920.11	5306.59	1229.60	30463.82
20	920.11	5571.92	1195.44	31659.26

جدول 3: اقتصاديات المجفف الشمسي - الوفرة السنوي، والقيمة الحالية للوفرة السنوي والقيمة الحالية للوفرة السنوي التراكمي لكل سنة خلال العمر الافتراضي للمجفف الشمسي لتجفيف القرع المر لمدة 250 يومًا من استخدام المجفف الشمسي.
[22] (A. Sreekumar et al)

إستعرضت دراسة **Sonthawi Sonthikun et al** [23] تصميم مجفف هجين يعمل بالطاقة الشمسية والكتلة الحيوية وتصنيعه لتجفيف ألواح المطاط الطبيعي. يتكون المجفف من غرفة تجفيف مجمّع شمسي ومبادل حراري وفرن الكتلة الحيوية. تم إجراء محاكاة CFD لتوزيع تدفق الهواء داخل المجفف الهجين للكتلة الحيوية الشمسية لضمان فائدة مراوح تدوير الهواء.

تم اختبار المجفف الهجين الذي يعمل بالطاقة الشمسية والكتلة الحيوية لتجفيف 100 عدد من صفائح المطاط الطبيعي. تم تقليل محتوى الرطوبة في صفائح المطاط من 34.26% إلى 3% (ديسيل) في 36 ساعة وأصبح راکدًا عند 0.34% (ديسيل) بعد 48 ساعة فقط، وهو ما يمثل انخفاضًا ملحوظًا في وقت التجفيف وكذلك استهلاك الكتلة الحيوية. وقد لوحظ أن لون وملس صفيحة المطاط الطبيعي أفضل من التجفيف التقليدي لتجفيف المطاط الدخاني.

إن تصميم المجفف الهجين للطاقة الشمسية والكتلة الحيوية هو بديل اقتصادي ويمكن التوصية به لصغار المزارعين.



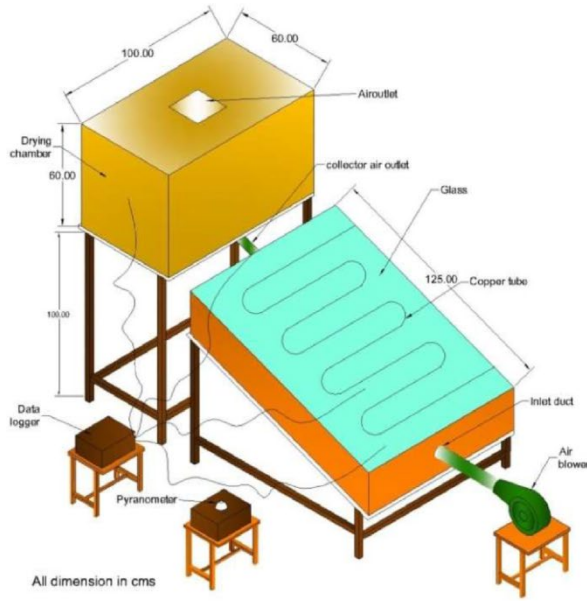
(a) Front view

(b) Side view

الشكل 21: مجفف هجين يعمل بالطاقة الشمسية والكتلة الحيوية لتجفيف صفائح المطاط.
[23] (Sonthawi Sonthikun et al)

إستعرض **A.K. Bhardwaj et al** [24] في هذه الدراسة تحليلاً تجريبياً لمجفف شمسي غير مباشر جديد لتجفيف الفلفل الحار في غرب الهيمالايا الغربية. حيث تم الاحتفاظ بخردة الحديد المتنوعة مع الحصى على لوحة الامتصاص وزيت المحرك المنقول عبر أنبوب نحاسي، وقد تم تطبيقها كوسيط لتخزين الحرارة الحسية (SHS) في مجمع الهواء الشمسي (SAC). كما تم استخدام شمع البارافين كمادة تغيير الطور (PCM) في حجرة التجفيف. ثم تم إجراء تقييم أداء نظام التجفيف على أساس السمات الفيزيائية والحرارية والجودة. وتم تسجيل الملاحظات التالية (انظر الشكل رقم 22):

- تم تجفيف الفلفل الأحمر الطازج باستخدام المجفف الشمسي الذي يشتمل على المجفف الشمسي الحراري (SHS) والمجفف الشمسي الحراري المتعدد الكلور (كلاهما)، في أقصر وقت تجفيف إلى مستوى تشبع بنسبة 4.85% (على أساس رطب) كما هو الحال مقارنةً بالتجفيف الذي تم إجراؤه دون استخدام TES والتجفيف الطبيعي تحت أشعة الشمس.
- وقد تم توثيق أعلى معدل للجفاف عند استخدام كل من SHS واستخدمت كل من مادة PCM كمادة للتجفيف الحراري في حين كان نفس المعدل أقل نسبياً عند التجفيف دون استخدام مادة TES والتجفيف الشمسي الطبيعي.
- وقد تم حساب كفاءة وحدة التجفيف التي تتضمن TES أكثر من ثلاثة أضعاف التجفيف الشمسي الطبيعي.
- تحسنت قدرة الفلفل الحار المجفف على إعادة الترطيب بأكثر من ضعفين مقارنةً بالتجفيف الشمسي التقليدي.
- وباستخدام نظام التجفيف هذا، تحسن اللون والقوام والنفادة (المعايير الحسية)، وتم العثور على معايير أفضل للفلفل الحار المجفف جودة أفضل.
- تتكون القيم الغنية بالمحتويات الأساسية للفلفل الحار المجفف من: فيتامين ج (49.25 مجم)، والكابسيين (0.52%)، والكاروتين (341.5 ميكروجرام)، وتم الحصول على الثيامين (0.912 مجم) بالمقارنة مع أشعة الشمس الطبيعية التي تحتوي على فيتامين ج (32.25 مجم) والكابسيين (0.23%) والكاروتين (217.8 ميكروجرام) والثيامين (0.534 مجم) على التوالي.



(a)




(b)

الشكل 22: (أ) رسم تخطيطي للإعداد التجريبي. (ب): الإعداد التجريبي.
[24] (A.K. Bhardwaj et al)

3.1. الخاتمة

تم التطرق في هذا الفصل إلى أهم الدراسات السابقة الخاصة بالمجففات الشمسية، مع تحديد أهم أنواعها (المجفف المباشر، غير المباشر، المختلط، والمجففات الهجينة)، بالإضافة إلى إيجابيات وسلبيات كل منها، ومبدأ عملها والفروق فيما بينها. كما تصنف هذه الأبحاث بحسب مجال توزيع درجات الحرارة في المجفف الشمسي ونوعية المواد المطلوبة للتجفيف. وتم التطرق إلى طرق حفظ الأغذية والشروط اللازمة للحصول على أعلى قيمة غذائية للمنتج والفائدة من تجفيف الأغذية.



الفصل الثاني:
عموميات حول المجففات الشمسية

1.2. المقدمة

تقنيات تجفيف الأغذية هي من بين أقدم الطرق المستخدمة لحفظ المنتجات الغذائية والزراعية، بما في ذلك الحبوب، والفواكه، والخضار، والأعشاب، والأسماك، ومنتجات الألبان وغيرها. يهدف التجفيف إلى تقليل محتوى الرطوبة، وبالتالي نشاط الماء في المنتجات، لإطالة مدة صلاحيتها عن طريق وقف نمو وتكاثر الكائنات الحية الدقيقة التي تزدهر في بيئة رطبة وتتسبب في انحلال المنتج وتعفنه.

يعتبر التجفيف الشمسي التقليدي من أكثر الطرق استعمالاً في معظم دول العالم، وهي طريقة سهلة وغير مكلفة، حيث يتم نشر المحصول على سطح مستوٍ وتركه يتعرض لأشعة الشمس والرياح مباشرة. ولكن خلال هذه الطريقة يتعرض المحصول للتلوث بالغبار والأتربة والحشرات والقوارض والأمطار. هذه العملية تتطلب الوقت وتحتاج إلى مساحة كبيرة، لذا تم اللجوء إلى طرق أخرى للتجفيف مثل التجفيف الصناعي. وبسبب تكلفته العالية، تم تطوير مجففات تعمل بالطاقة الشمسية. تعتمد هذه المجففات على مبدأ تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية تعمل على تبخير الرطوبة من المنتج المراد تجفيفه. سيتم التطرق في هذا الفصل إلى هذا النوع من المجففات، بالإضافة إلى أنواعه (مباشر، غير مباشر، مختلط، هجين)، وطريقة عملها.

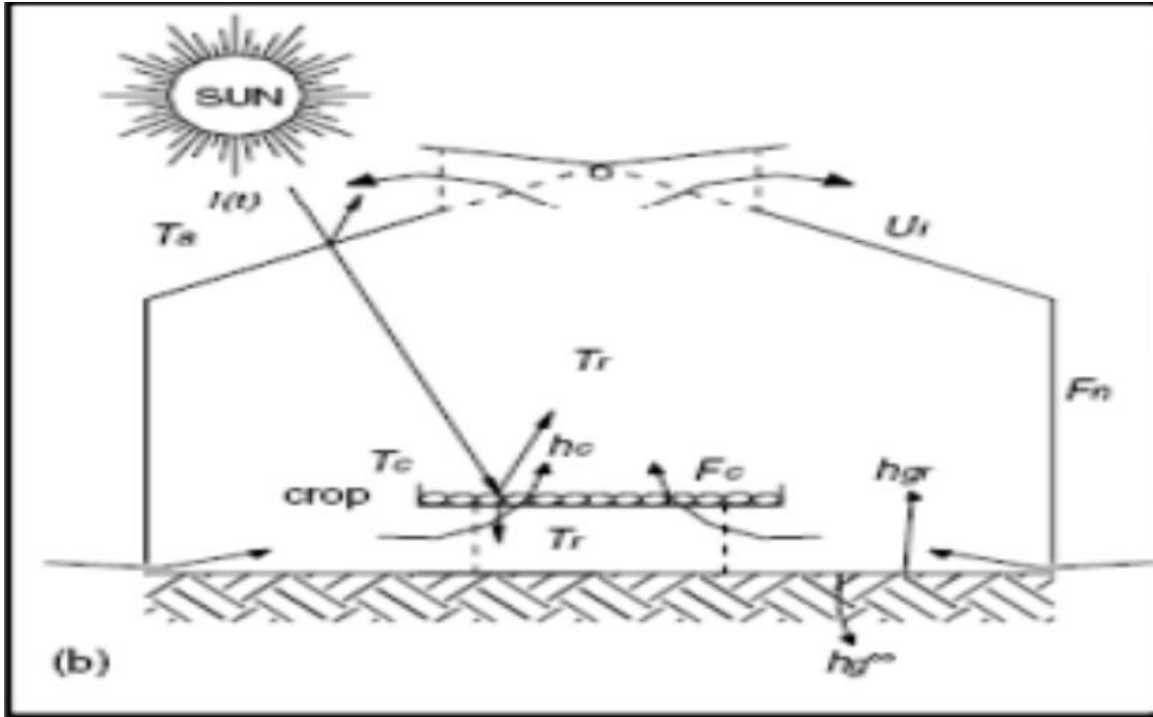
2.2. مختلف أنواع المجففات الشمسية

يوجد العديد من أنواع المجففات الشمسية، وتصنف أنظمة التجفيف الشمسي تبعاً لأسلوب تسخين الهواء وكيفية الاستفادة من حرارة الشمس، ونذكر منها:

1.2.2. تصنيف المجففات الشمسية حسب أسلوب تسخين الهواء

يتم تصنيف المجففات الشمسية حسب طريقة تدوير الهواء المستخدمة فيها. من بين هذه الطرق توجد مجففات تستخدم الحمل الطبيعي لتدوير الهواء، وهناك أيضاً مجففات تستخدم دوران الحمل القسري في تدوير الهواء.

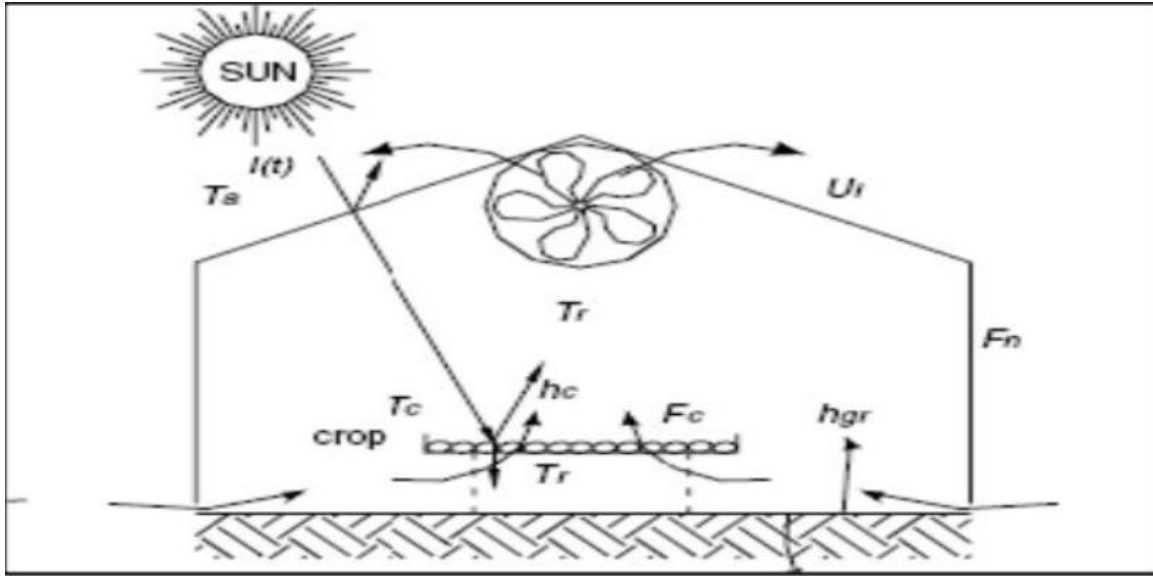
❖ **مجففات الحمل الطبيعي:** يستخدم التجفيف بالحمل الحراري الطبيعي الطاقة الشمسية لتسخين الهواء الناقل للحرارة، مما يمنحه قدرة إضافية على الاحتفاظ ببخار الماء. يرتفع هذا الهواء الساخن الفائق لكثافته إلى الأعلى ليخرج من خلال مدخنة، آخذاً معه الرطوبة المستخرجة من المنتجات المراد تجفيفها. أحد عيوب هذا النوع هو خطر تجاوز درجة الحرارة القصوى المسموح بها للمنتج، وغالباً ما يكون ذلك بسبب ضعف دوران الهواء، وهو أمر شائع في هذه الأنظمة، أنظر الشكل رقم (23) [25].



الشكل 23: رسم تخطيطي للمجفف شمسي المباشر مع الحمل الطبيعي. [25]

❖ **مجففات الحمل القسري:** تعتمد مجففات الهواء القسرية على دوران الهواء الساخن داخل المجفف باستخدام المروحة. يتم اختيار نوعية المروحة بناءً على كمية الهواء المطلوبة لإتمام عملية التجفيف بالسرعة المطلوبة. توفر هذه النوعية من المجففات إمكانية التحكم بشكل أفضل في عملية التجفيف بفضل سرعة الهواء الساخن المستمر مقارنة بالمجففات الشمسية بالحمل الطبيعي.

ومن بين العيوب الخاصة بهذا النوع من المجففات هي التكلفة العالية لإنتاجها وتشغيلها مقارنة بالمجففات ذات الحمل الطبيعي. كما أنها تتطلب الاعتماد على إمدادات كهربائية محلية تقليدية أو نظام طاقة شمسية لتشغيل المروحة. يمكن اعتبار هذا الصنف من المجففات هجيناً لاستعماله مصدرًا آخر للطاقة غير الطاقة الشمسية، أنظر الشكل رقم (24) [26].



الشكل 24: رسم تخطيطي للمجفف الشمسي المباشر مع الحمل القسري. [26]

2.2.2. تصنيف المجففات الشمسية حسب كيفية الاستفادة من حرارة الشمس

تم تطوير عدة أنواع من المجففات الشمسية لتلبية الحاجة المحلية والتوافر في تجفيف المنتجات الغذائية. يمكن تصنيف هذه المجففات وفقاً لطريقة استخدامها للإشعاع الشمسي، وتم تقسيمها إلى:

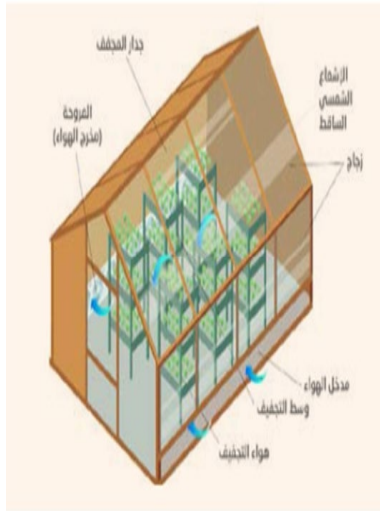
❖ **المجففات الشمسية المباشرة:** المجفف الشمسي المباشر ذو تجهيز بسيط وسهل، يتكون من جزء واحد يلعب دور مجمع الأشعة الشمسية وغرفة تجفيف في نفس الوقت. يُغطى من الأعلى بطبقة من الزجاج تسمح بمرور الأشعة الشمسية، ومن الأسفل بصفيحة معدنية (غالباً ما تكون من الألمنيوم) مطلية بالأسود حيث تمتص الحرارة بواسطة أسطح المنتجات التي يتم تجفيفها ثم عبر الأسطح الداخلية لها. تؤدي الحرارة الممتصة إلى تسخين الهواء الداخل إلى المجفف نتيجة لحركة الهواء البارد، ويدفع الهواء الساخن تحت تأثير فرق الكثافات إلى الأعلى حاملاً معه بخار الماء الناتج عن التجفيف، ثم يخرج من الفتحات العلوية بالغرفة. فكلما كانت فتحات تصريف الهواء مرتفعة، تكون حركة الهواء أكثر فاعلية نتيجة لزيادة قدرة السحب لوجود فرق بين الكتلة وعمود الهواء البارد خارج المجفف والهواء الساخن داخله (أنظر الجدول رقم 4) [27].

إيجابيات المجفف الشمسي المباشر	سلبيات المجفف الشمسي المباشر
<p>- يتعرض المنتج لتدهور في الجودة بسبب التعرض المباشر للشمس، مما يؤدي إلى تدمير فيتامينات A و C والذبول والتغير في اللون.</p> <p>- تكون المواد المصنوعة من البولي إيثيلين هشّة ويجب تغييرها بانتظام.</p> <p>- تصل درجة الحرارة داخل المجفف إلى مستويات مرتفعة نسبياً، مما يساهم مع التعرض للشمس في تدمير العناصر الغذائية.</p>	<p>- يوفر الجفاف باستخدام مجففات الطاقة الشمسية حمايةً أفضل ضد الغبار والحشرات والحيوانات والأمطار.</p> <p>- لا يحتاج إلى عمالة مؤهلة.</p> <p>- يوفر إمكانيات تصميم كبيرة.</p>

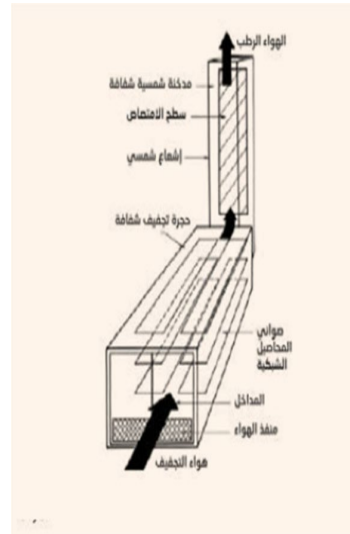
جدول 4: ايجابيات وسلبيات المجفف الشمسي المباشر. [27]

كما يوجد هذا النوع من المجففات على أشكال عديدة من التصميمات (المجفف الشمسي الصندوقي، المجفف الشمسي بالدفينة... الخ) ، كما هو موضح في الشكل (25):

(ب)



(أ)



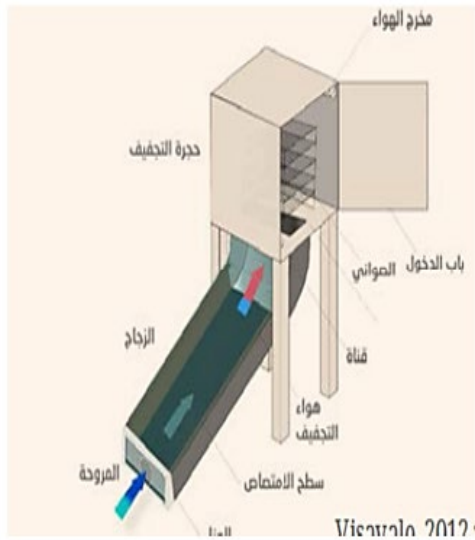
الشكل 25: (أ)-المجفف الشمس الصندوقي، (ب)-المجفف الشمس بالدفينة. [27]

❖ **المجففات الشمسية غير المباشرة:** يتكون هذا النوع من المجففات من جزئين: مجمع الأشعة الشمسية وغرفة التجفيف. يغطي مجمع الأشعة الشمسية من الأعلى بطبقة من الزجاج، ومن الأسفل بصفيحة معدنية مطلية باللون الأسود، مما يسمح بتزويد غرفة التجفيف بالحرارة اللازمة. يسخن الهواء بواسطة المجمع الشمسي، ثم يُدفع إلى غرفة التجفيف حيث يتم تخزين المنتج على صواني شبكية أو رفوف، ويتخلص من جزء من رطوبة المادة عند خروجه إلى الجو. تعد هذه الأنظمة أكثر فعالية من المجففات المباشرة،

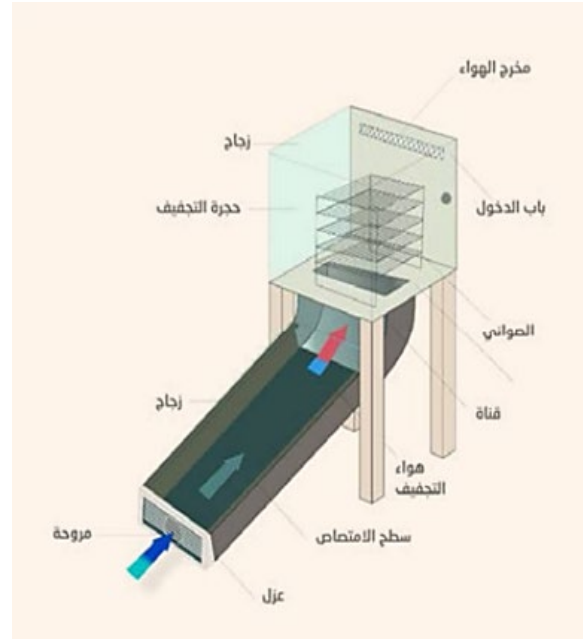
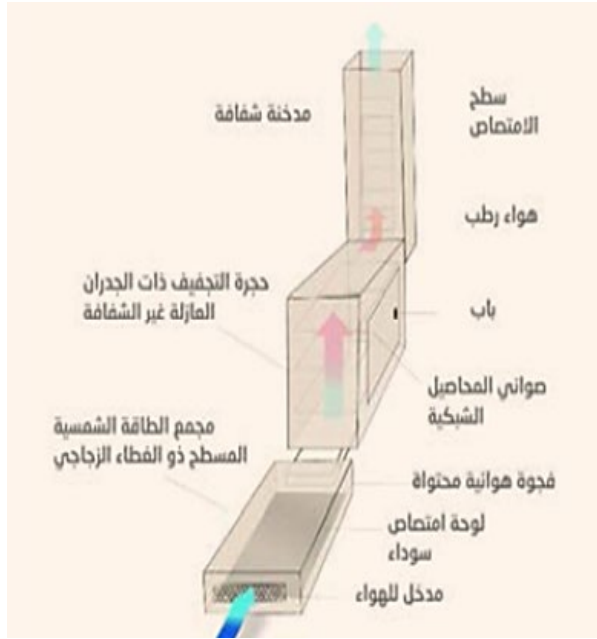
وتوفر ميزة الحفاظ على خصائص الأغذية بشكل أفضل، مثل اللون، والمظهر، والقيمة الغذائية. وبالتالي، فهي مناسبة بشكل خاص لتجفيف الأطعمة، (أنظر الجدول رقم 5) (والشكل رقم 26) [28].

سلبيات المجفف الشمسي غير المباشر	إيجابيات المجفف الشمسي غير المباشر
<ul style="list-style-type: none"> - سرعة التجفيف تختلف بشكل كبير حسب الظروف المناخية وتصميم المجفف. - الحاجة إلى تغيير المواد المصنوعة من البولي إيثيلين بشكل منتظم، حيث أنها هشّة وقابلة للتلف. 	<ul style="list-style-type: none"> - يتم تجفيف المنتج بعيدًا عن أشعة الشمس المباشرة، مما يساعد على الحفاظ على لونه وقيمته الغذائية (وخاصة فيتامينات A و C). - يمكن بناء هذا النوع من المجففات محليًا بتكلفة منخفضة. - لا يتطلب تشغيلها استخدام الطاقة الكهربائية أو الوقود الأحفوري.

جدول 5: إيجابيات وسلبيات المجفف الشمسي غير المباشر. [28]



الشكل 26: أشكال المجفف الشمسي غير المباشر. [28]



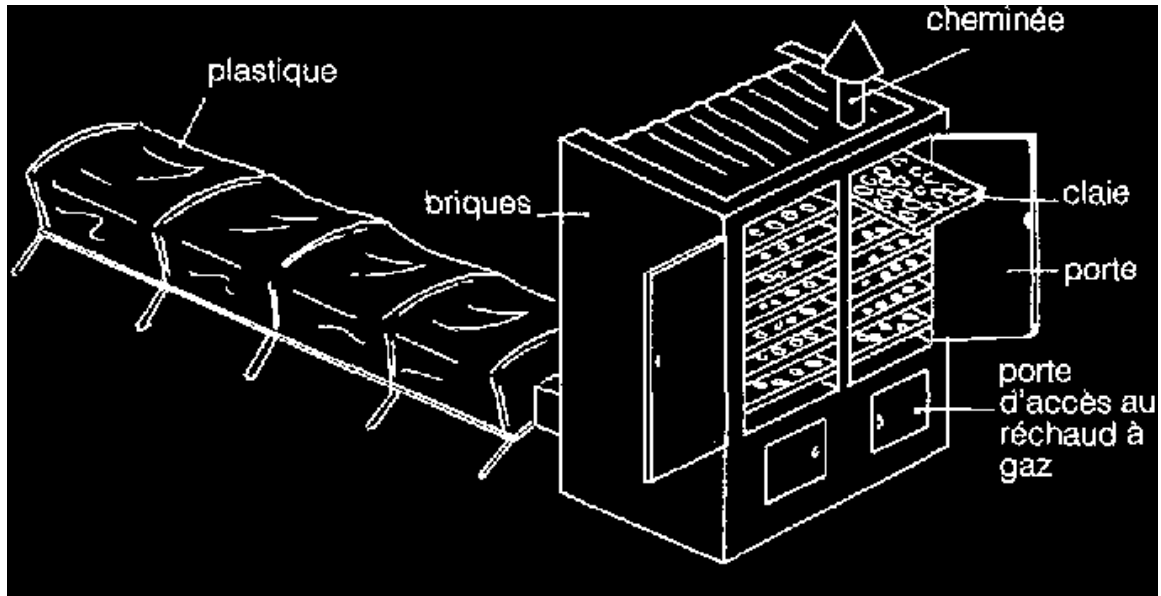
الشكل 27: أشكال المجفف الشمسي المختلط. [29]

❖ **المجففات الشمسية المختلطة:** تجمع هذه المجففات بين خصائص المجففات الشمسية المباشرة وغير المباشرة. حيث يتم تجفيف المنتج من خلال الجمع بين الإشعاع الشمسي المباشر وتدفق الهواء المسخن مسبقاً في مجمع الطاقة الشمسية. يتميز المجفف المختلط ذو الدوران الطبيعي (الشكل رقم 4) بنفس الخصائص الهيكلية للمجفف غير المباشر (المجمع الشمسي وغرفة التجفيف والمدخنة)، لكن جدرانه مزودة بألواح زجاجية بحيث يؤثر الإشعاع الشمسي مباشرة على المنتج مثل المجفف المتكامل. يوجد تصميم آخر (الشكل رقم 27) يتكون من مجمع هواء مغطى بلوح زجاجي. تحتوي حجرة التجفيف على صواني متراكبة، والجدران مصنوعة من الخشب الرقائقي، والسطح العلوي مصنوع من الزجاج. المدخنة الشمسية أسطوانية الشكل، مصنوعة من صفائح مجلفن ومزودة بغطاء معدني لمنع المطر [29].

❖ **المجففات الشمسية الهجينة:** يستخدم هذا النوع من المجففات الهجينة (الشكل 28) أحد مصادر الطاقة المساعدة التالية: الكهرباء، الغاز، زيت الوقود، الخشب، الكتلة الحيوية، وغيرها، للتعويض عن الحالات المناخية الطارئة وضبط درجة حرارة هواء التجفيف إلى درجة حرارة نقطة الضبط الثابتة باستخدام أجهزة التحكم في درجة الحرارة. (انظر الجدول رقم 6 والشكل 28) [30].

سلبيات المجفف الشمسي غير المباشر	ايجابيات المجفف الشمسي غير المباشر
<ul style="list-style-type: none"> - تكلفة الإنتاج والاستثمار مرتفعة جدا. - الحاجة إلى تزويد المحلي بالوقود والكهرباء. - اليد العاملة مؤهلة للصيانة. 	<ul style="list-style-type: none"> - زيادة نسبة إنتاج مقارنة بالمجفف الشمسي. - استهلاك منخفض للطاقة مقارنة بالمجفف الصناعي. - التحكم الجيد في درجة الحرارة وسرعة التجفيف داخل المجفف.

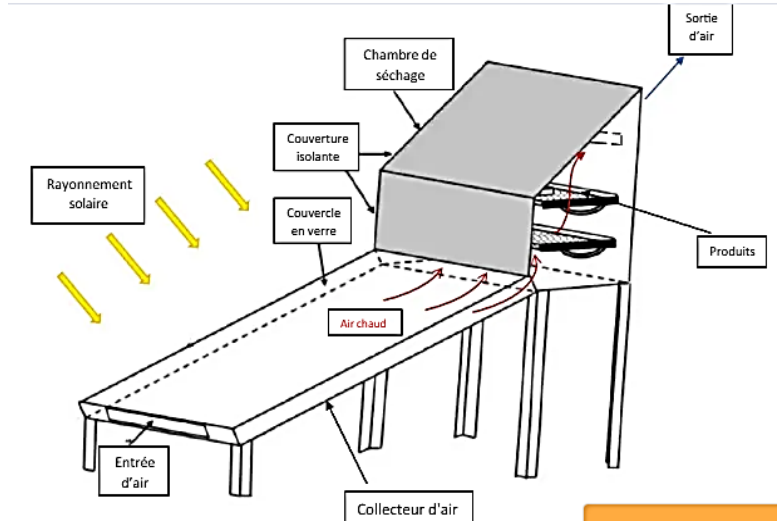
جدول 6: ايجابيات وسلبيات المجفف الشمسي الهجين. [30]



الشكل 28: المجفف الغاز- الشمسي الهجين. [30]

3.2. مبدأ عمل المجفف الشمسي غير المباشر ذو الألواح المسطحة

يتكون المجفف الشمسي غير المباشر من الأجزاء التالية: مجمع يحول الإشعاع الشمسي إلى حرارة، وحجرة تجفيف تحتوي على المنتج، ومدخنة (الشكل رقم 29)؛ يدخل الهواء إلى المجمع، حيث يتم تسخينه وترتفع درجة حرارته، ثم يرتفع الهواء الساخن عن طريق الحمل الحراري الطبيعي إلى غرفة التجفيف، وهذا النظام يعتمد بشكل كبير على الظروف المناخية المحيطة. يختلف وقت التجفيف بشكل كبير حسب الظروف المناخية؛ مما يجعل العملية غير ثابتة وتحتاج إلى مراقبة مستمرة لتحقيق نتائج مرضية [31].



الشكل 29: مبدأ عمل المجفف الشمسي غير المباشر ذو الألواح المسطحة. [31]

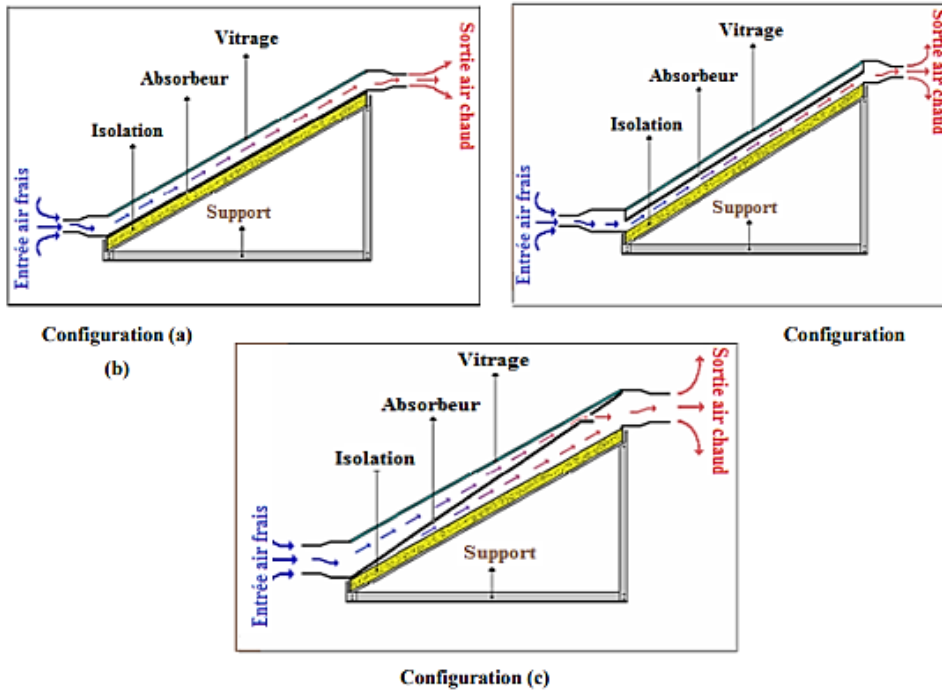
4.2. تقييم الأداء الحراري للمجفف الشمسي غير المباشر ذو الألواح المسطحة

يعد اختبار المجفف ضروريًا لتقييم أدائه الفني، ويوفر أساسًا للمقارنة مع المجففات الأخرى، ويمكن أن يساعد الشركات المصنعة على تحسين تصميماتها، وبالتالي تمكين المستخدمين من اختيار المجفف المناسب.

بشكل عام، عند إجراء تقييم الأداء الحراري للمجفف الشمسي غير المباشر ذو الألواح المسطحة، يجب مراعاة بعض المعايير، ويمكن تلخيصها على النحو التالي:

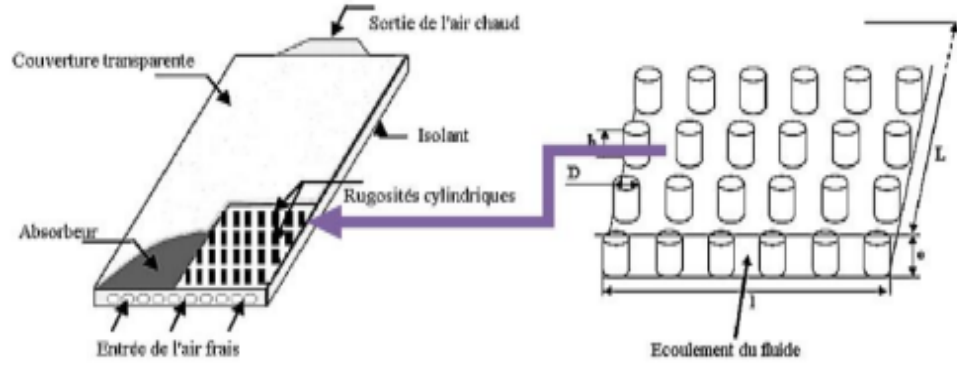
- **وقت التجفيف وسرعته:** ترتبط سرعة ومدة تجفيف المحاصيل الزراعية بعدد كبير من المعايير، أهمها:
 - ✓ طبيعة المنتج ومساميته وشكله ورطوبته.
 - ✓ درجة الحرارة والرطوبة وسرعة الهواء الخاصة بالطقس.
 - ✓ نوع المجفف وشكله وحجمه.
 - ✓ سعة التجفيف/ كثافة الحمولة.
- **درجة حرارة هواء التجفيف والرطوبة:** ترتبط بعدة مقاييس نذكر منها:
 - ✓ درجة حرارة الجو والرطوبة خارج المجفف الشمسي.
 - ✓ مساحة سطح الحامل وعدد الرفوف.
 - ✓ درجة رطوبة المنتج قصد التجفيف.
 - ✓ ضعف مقاومة المواد المصنعة للمجفف مثل الزجاج، يفرض تبديلها باستمرار.
 - ✓ نوع وتكوين جهاز امتصاص أشعة الشمس (الألواح المسطحة) على مستوى المجفف الشمسي، بحيث نميز 3 أنواع للتكوينات:

- ✚ التكوين الأول (أ): هو الأبسط، مع وجود ممر هواء تحت جهاز الامتصاص. جهاز الامتصاص مصنوع من صفائح معدنية مطلية باللون الأسود ($\alpha=0.95$)، والغطاء من الزجاج السميكة (0.03 م).
- ✚ التكوين الثاني (ب): مشابه للأول، لكن لوحة الامتصاص موضوعة على القطر. توضع صفيحة الامتصاص على قطر المجمع بين الغطاء والعازل، ويكون مدخل الهواء فوق جهاز الامتصاص والمخرج أسفل جهاز الامتصاص. يحتوي على فتحة مستطيلة (150 × 600 مم) للسماح بمرور الهواء الساخن.
- ✚ التكوين الثالث (ج): يتكون من نفس عناصر التكوين الأول، ولكن يكون ممر الهواء فقط فوق الصفيحة الماصة (بين الزجاج والصفيحة الماصة). (انظر الشكل رقم 30).

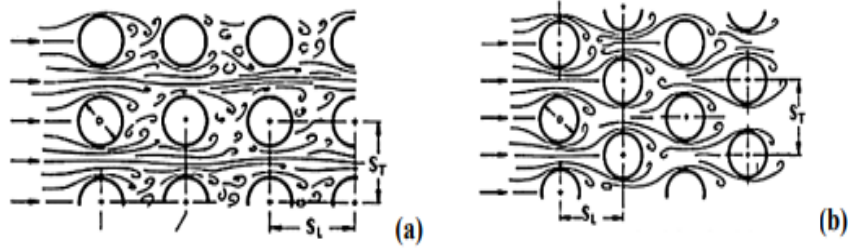


الشكل 30: تمثيل الأنواع الثلاثة لمجمعات الهواء. [32]

- تدفق هواء التجفيف: ويعتمد تدفق هواء التجفيف على:
 - ✓ نوع المجفف الشمسي غير المباشر المستخدم في عملية التجفيف، سواء كان يعمل بأسلوب الحمل الطبيعي أو بأسلوب الحمل القسري (مراوح).
 - ✓ خشونة الصنعية لجهاز الامتصاص، حيث يتميز 3 أنواع من مجمعات الهواء) مجمع الهواء المسطح بدون حواجز، مجمع الهواء المسطح المزود بحواجز أسطوانية مرتبة في صفوف متراصة (a)، مجمع الهواء المسطح مع حواجز أسطوانية مرتبة في صفوف متداخلة (b). كما هو موضح في الشكلين المواليين، الشكل رقم 31 والشكل رقم 32:



الشكل 32: رسم تخطيطي لمجمع الهواء المسطح ذو الحواف الخشنة. [33]



الشكل 31: الترتيبات المختلفة للخشونة الأسطوانية. [33]

- **كفاءة المجفف:** ويمكن التعبير عنها من خلال توفر ميزة الحفاظ على خصائص الأغذية بشكل أفضل، مثل (اللون، النكهة، الطعم، الرائحة، القوام)، والقيمة الغذائية (وخاصة فيتامينات A و C) وكذلك القدرة الفعالة على الترطيب.

5.2. التخزين الحراري في المجففات الشمسية غير المباشرة

يلعب التخزين الحراري دورًا حاسمًا في تحسين أداء وكفاءة المجففات الشمسية غير المباشرة. من خلال تخزين الطاقة الحرارية، يمكن لهذه الأنظمة توفير عملية تجفيف مستمرة ومستقرة، حتى عندما تكون الإشعاع الشمسي متقطعًا أو غير متوفر. هذه القدرة مهمة بشكل خاص في الحفاظ على جودة المنتجات المجففة وضمان معدلات تجفيف ثابتة.

1.5.2. أنواع التخزين الحراري

1.1.5.2. تخزين الحرارة المحسوسة

1. **المواد:** تشمل المواد الشائعة الماء، الصخور، الرمل، والخرسانة. تمتص هذه المواد الحرارة خلال فترات الإشعاع الشمسي العالي وتطلقها خلال فترات الإشعاع المنخفض أو عدم التوفر.
2. **الآلية:** يعتمد تخزين الحرارة المحسوسة على تغيير درجة حرارة وسيط التخزين. على سبيل المثال، يمتلك الماء سعة حرارية نوعية عالية، مما يجعله وسيطاً فعالاً لتخزين كميات كبيرة من الحرارة.
3. **المزايا:** تصميم بسيط، تكلفة منخفضة، وموثوقية.
4. **العيوب:** الحاجة إلى حجم كبير لتخزين كمية كبيرة من الحرارة، إمكانية فقدان الحرارة مع مرور الوقت [34].

2.1.5.2. تخزين الحرارة الكامنة

1. **المواد:** تُستخدم مواد تغيير الطور (PCMs) مثل شمع البرافين، الأملاح، والأحماض الدهنية نظراً لقدرتها على امتصاص وإطلاق كميات كبيرة من الحرارة خلال تحولات الطور (صلب-سائل).
2. **الآلية:** تخزن المواد ذات التغيير الطوري الحرارة عند الذوبان وتطلقها عند التجمد، مما يوفر درجة حرارة ثابتة تقريباً خلال عملية تغيير الطور.
3. **المزايا:** كثافة تخزين طاقة عالية، درجة حرارة خروج مستقرة.
4. **العيوب:** تكلفة أعلى، تعقيد في التصميم والدمج [34].

3.1.5.2. التخزين الحراري الكيميائي:

1. **المواد:** يستخدم التفاعلات الكيميائية القابلة للانعكاس لتخزين وإطلاق الحرارة. تشمل الأمثلة الهيدريدات المعدنية، الكربونات، والهيدروكسيدات.
2. **الآلية:** أثناء التفاعلات الماصة للحرارة، يتم امتصاص الحرارة وتخزينها في الروابط الكيميائية. خلال التفاعلات المطلق للحرارة، يتم إطلاق هذه الحرارة.
3. **المزايا:** سعة تخزين عالية، تخزين طويل الأمد بدون خسائر كبيرة.
4. **العيوب:** تكلفة عالية، تصميم نظام معقد، ومخاوف تتعلق بالسلامة مع بعض المواد الكيميائية [35].

2.5.2. دمج التخزين الحراري في المجففات الشمسية غير المباشرة

- في المجففات الشمسية غير المباشرة، يتم دمج أنظمة التخزين الحراري بعدة طرق:
1. **دمج مباشر:** يتم وضع مادة التخزين مباشرة داخل المجفف، غالبًا أسفل أو حول غرفة التجفيف، لتوفير توزيع حراري منتظم.
 2. **وحدة تخزين حراري منفصلة:** وحدة تخزين مخصصة، غالبًا متصلة عبر مبادلات حرارية، تخزن الطاقة الحرارية وتزودها لغرفة التجفيف حسب الحاجة.
 3. **أنظمة هجينة:** تجمع بين مواد تخزين الحرارة المحسوسة والكامنة لتحسين سعة التخزين والأداء الحراري [36].

3.5.2. فوائد التخزين الحراري

1. **فترات تجفيف ممتدة:** يسمح بالتجفيف المستمر خلال الفترات الغائمة أو الليل، مما يضمن عملية تجفيف مستمرة.
2. **تحسين كفاءة التجفيف:** يثبت درجة حرارة التجفيف، مما يقلل من التقلبات ويعزز جودة المنتج.
3. **توفير الطاقة:** يقلل من الحاجة إلى مصادر تسخين إضافية، مما يؤدي إلى توفير التكاليف وتقليل الأثر البيئي [36].

4.5.2. دراسة حالة وتطبيقات


أظهرت العديد من الدراسات فعالية التخزين الحراري في تحسين أداء المجففات الشمسية غير المباشرة. على سبيل المثال، قام Sharma وآخرون (2009) بتحليل استخدام مواد تغيير الطور في المجففات الشمسية ووجدوا تحسينات كبيرة في توحيد التجفيف وكفاءة الطاقة [34]. وبالمثل، أشار Fudholi وآخرون (2013) إلى فوائد دمج مواد تخزين الحرارة المحسوسة في تمديد فترات التجفيف وتعزيز الأداء العام للنظام [35].

5.5.2. الخلاصة

تُعد أنظمة التخزين الحراري مكونات أساسية في المجففات الشمسية غير المباشرة الفعالة والموثوقة. من خلال دمج مواد وآليات تخزين مختلفة، يمكن لهذه الأنظمة تعزيز عملية التجفيف بشكل كبير، مما يؤدي إلى تحسين جودة المنتج وكفاءة الطاقة. من المتوقع أن تساهم التطورات المستقبلية في المواد وتقنيات الدمج في تحسين أداء واعتماد المجففات الشمسية.

6.2. الخاتمة

تم التطرق في هذا الفصل إلى أهم المفاهيم الخاصة بالمجففات الشمسية، مع تحديد أهم أنواعها بالإضافة إلى إيجابيات وسلبيات كل منها، ومبدأ عملها. كما خصصنا دراستنا حول المجفف الشمسي غير المباشر ذو الألواح السطحية، حيث تم التطرق إلى مبدأ عمله ومعايير تقييم أدائه الحراري.



الفصل الثالث:
الدراسة التجريبية

1.3. المقدمة

في هذا البحث، نقوم بدراسة تجريبية لمجفف شمسي غير مباشر يستخدم خليطاً من برادة الألمنيوم مع الملح، وخليطاً آخر من برادة الألمنيوم مع الأسمنت. يهدف البحث إلى تحسين كفاءة التجفيف باستخدام هذا الخليط الذي قد تعزز من امتصاص وتخزين الحرارة، مما يعزز من أداء المجفف الشمسي في مختلف الظروف البيئية مما يساهم في تطوير تقنيات تجفيف متقدمة ومستدامة.

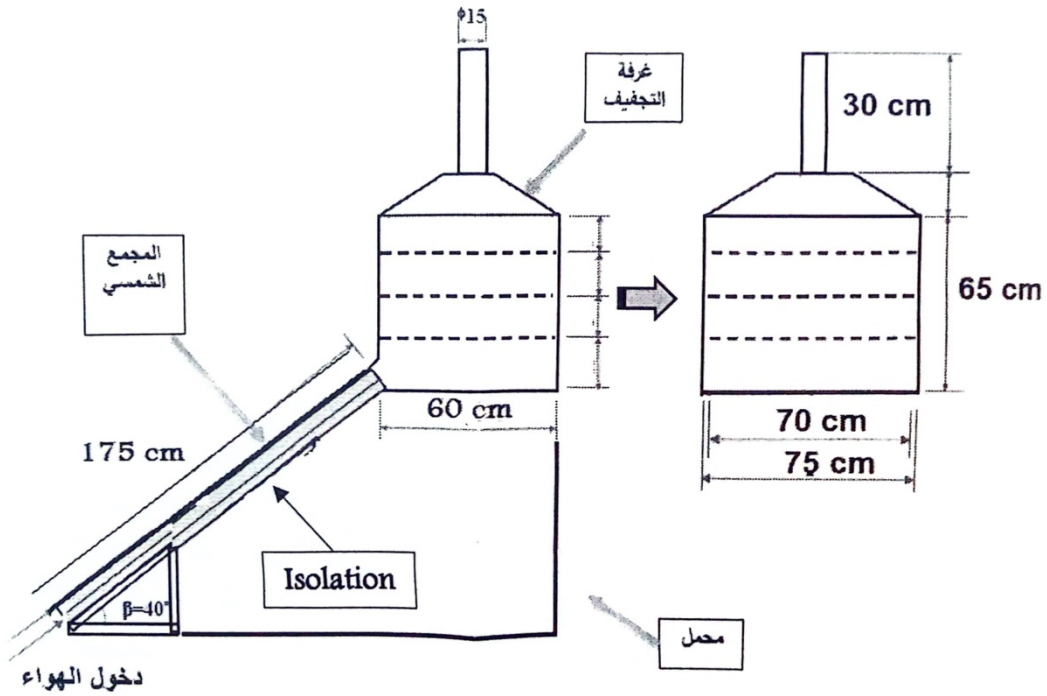
2.3. عرض المجفف الشمسي

الجهاز هو عبارة عن مجفف شمسي يتكون من مجمع مسطح مغطى بغطاء زجاجي بسبك (0.005 متراً). أبعاد المجمع (1.75 متر × 0.75 متراً) حيث يقوم بتحويل الإشعاعات الشمسية إلى طاقة حرارية. يتكون كل مجمع من الممتص المصنوع من إحدى نوعي الخليط المراد استعماله، وذلك بسبك (0.025 متراً) وطول وعرض يساويان (1.65 متر × 0.65 متراً)، وقد تم طلاءه باللون الأسود غير اللامع. الجوانب والجزء السفلي للمجمع معزولان حرارياً وذلك باستخدام مادة الفلين الأبيض. يتم إمالة المجمع بزاوية 33° (مطابقة لخط عرض مدينة الوادي) بالنسبة للمستوى الأفقي وموجه نحو الجنوب. غرفة التجفيف بمساحة (0.273 متر مكعب)، يتم ضخ الهواء الذي يتم تسخينه بواسطة الممتص إلى غرفة التجفيف بواسطة مراوح كهربائية موضوعة في الجانب السفلي للمجمع.

في هذه الدراسة نقدم سلسلة من الاختبارات التجريبية التي أجريت على نموذجين للمجمع الشمسي المسطح للهواء، والذي تم تصميمه وتجربته في منطقة الوادي. تشمل التجهيزات التجريبية قياس الإشعاع الشمسي الكلي، سرعة الرياح، ودرجات الحرارة: المحيطة، ودرجة حرارة الهواء عند الدخول والخروج، ودرجة حرارة الممتص. بهدف تحسين الأداء الحراري باستخدام خليط الملح وبرادة الألمنيوم وخليط الإسمنت وبرادة الألمنيوم في كل من هذه المجففات. يتم تمثيل ذلك بشكل أساسي كما هو موضح في الشكل رقم (33).

3.3. تصميم وتنفيذ المجفف الشمسي

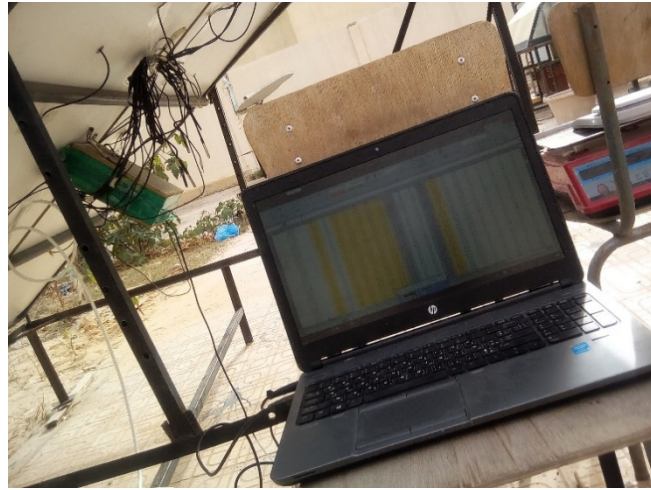
تم بناء المجفف الشمسي المستعمل في هذه التجربة وفقاً للمخطط الآتي: أنظر الشكل رقم (34) (35):



الشكل 34: رسم تخطيطي يوضح أبعاد كلاً من غرفة التجفيف وطول المجمع الشمسي وزاوية الميل.



الشكل 49: جهاز Arduino.



الشكل 50: تسجيل بيانات درجات الحرارة آليا في الحاسوب كل عشر ثوانٍ.

2.5.3. قياس سرعة الهواء

تم قياس سرعة الهواء عند مدخل الهواء في المجمع الشمسي ومخرج الهواء الساخن في الفتحات عند مخرج غرفة التجفيف باستعمال جهاز (Anémomètre) (أنظر الشكل رقم 51):



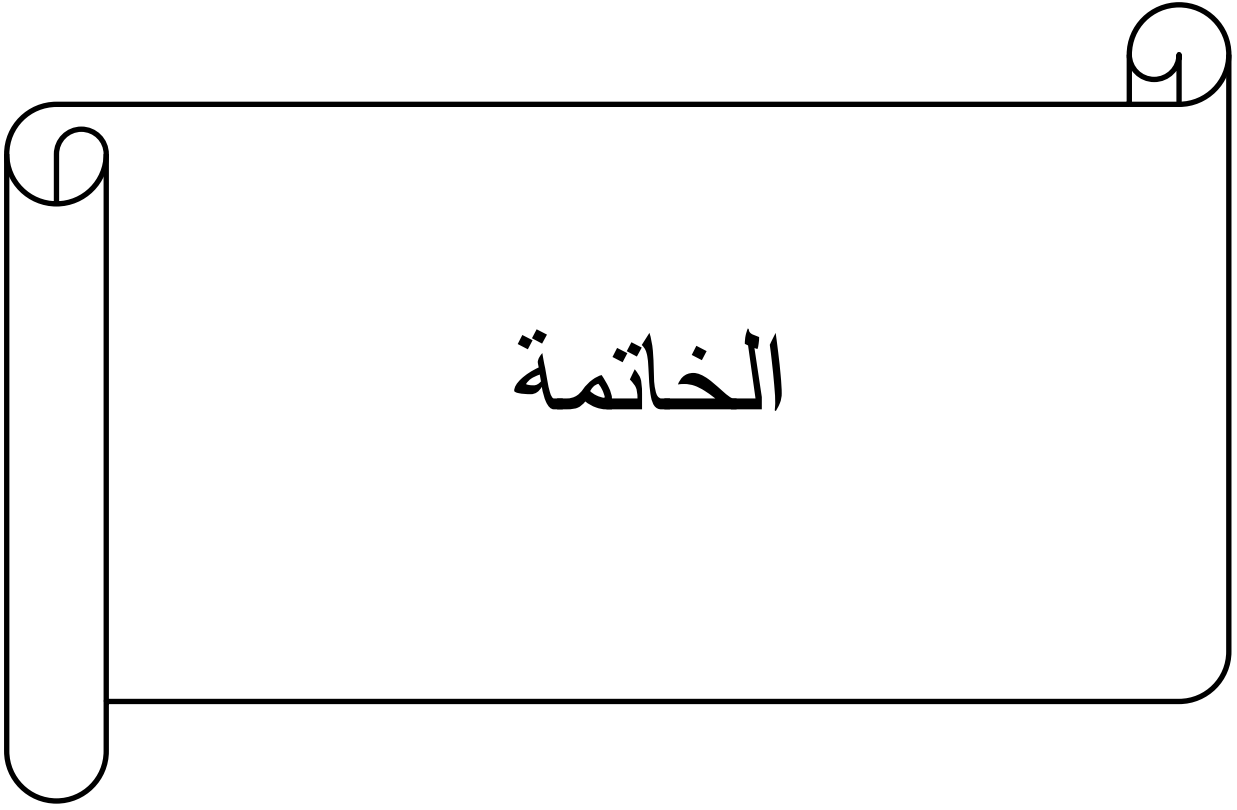
الشكل 51: جهاز Anemometer.

3.5.3. قياس الإشعاع الشمسي:

تم قياس مقدار الإشعاع الشمسي باستعمال جهاز (Pyranometer) (أنظر الشكل رقم 52):



الشكل 52: جهاز Pyranometer.



الخاتمة:

ختامًا، فإن هذه المذكرة تسلط الضوء على التحليل التجريبي للسلوك الحراري لمجفف شمسي غير المباشر ذو لاقط مسطح مزود بنظام لتخزين الحرارة، من خلال ثلاثة فصول رئيسية. في الفصل الأول، تم استعراض الدراسات البيولوجرافية التي تعالج الأعمال السابقة في هذا المجال، حيث تم التركيز على تحليل النتائج المختلفة والأساليب المتبعة في تجفيف المنتجات الزراعية باستخدام الطاقة الشمسية. أما في الفصل الثاني، فقد تم تقديم نظرة شاملة حول أنواع المجففات الشمسية وتفاصيل تصميمها وآلية عملها، مع تسليط الضوء على أهمية استخدام الطاقة الشمسية كمصدر بديل ومستدام للطاقة في عمليات التجفيف. وفي الفصل الثالث، تمت دراسة تجريبية للمجفف الشمسي، حيث تم تحليل الأداء الحراري للجهاز واختبار فعاليته في ظروف تشغيل مختلفة.

من خلال هذه المراحل، تم التوصل إلى فهم أعمق للتحديات والتقنيات المرتبطة بتطوير وتحسين المجففات الشمسية. النتائج التي توصلنا إليها تظهر أن استخدام المجففات الشمسية غير المباشرة المزودة بأنظمة لتخزين الحرارة يمكن أن يعزز من كفاءة عملية التجفيف ويزيد من استدامتها البيئية والاقتصادية. بناءً على هذه النتائج، يمكن أن توجه الأبحاث المستقبلية نحو تحسين تصميمات المجففات وتطوير مواد جديدة لتخزين الحرارة، مما يسهم في تحقيق استفادة أكبر من الطاقة الشمسية في عمليات التجفيف الزراعي والصناعي.

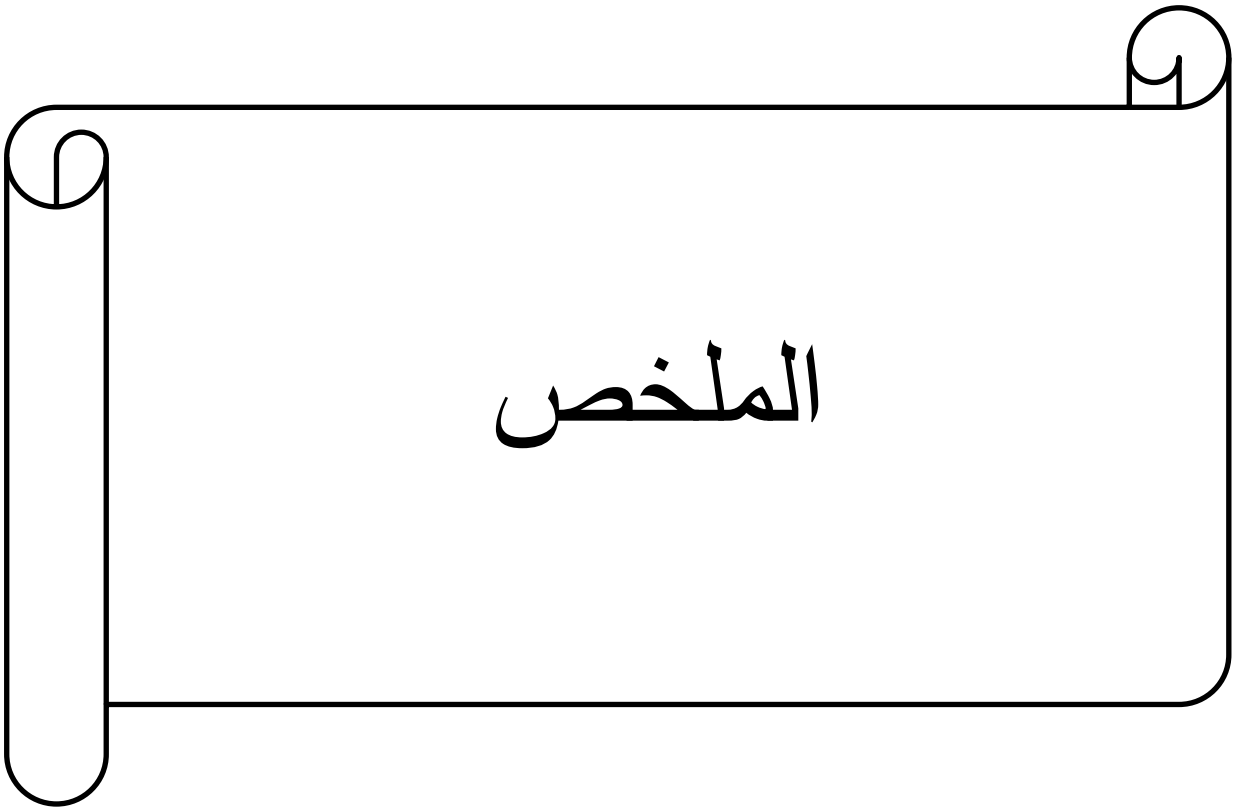
المراجع

قائمة المراجع

- [01] Chaatouf, D., Salhi, M., Raillani, B., Amraoui, S., Mezrhab, A., & Naji, H. (2022). Parametric analysis of a sensible heat storage unit in an indirect solar dryer using computational fluid dynamics. *Journal of Energy Storage*, 49, 104075. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104075>
- [02] Gilago, M. C., & V.P., C. (2022). Performance parameters evaluation and comparison of passive and active indirect type solar dryers supported by phase change material during drying ivy gourd. *Energy*, 252, 123998. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123998>
- [03] Karthikeyan, R., Thangavel, P., Raghunath, R. T., Muthu Priyan, K. A., & Praveen Balaji, M. (2022). Performance analysis of greenhouse solar dryer using evacuated tubes. *Materials Today: Proceedings*, 66, 1509–1513. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.447>
- [04] Krabch, H., Tadili, R., Idrissi, A., & Bargach, M. (2022). Indirect solar dryer with a single compartment for food drying. Application to the drying of the pear. *Solar Energy*, 240, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.05.025>
- [05] Mugi, V. R., Das, P., Balijepalli, R., & Vp, C. (2022). A review of natural energy storage materials used in solar dryers for food drying applications. *Journal of Energy Storage*, 49, 104198. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104198>
- [06] Nukulwar, M. R., & Tungikar, V. B. (2022). Recent development of the solar dryer integrated with thermal energy storage and auxiliary units. *Thermal Science and Engineering Progress*, 29, 101192. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2021.101192>
- [07] Rezaei, M., Sefid, M., Almutairi, K., Mostafaeipour, A., Ao, H. X., Hosseini Dehshiri, S. J., Hosseini Dehshiri, S. S., Chowdhury, S., & Techato, K. (2022). Investigating performance of a new design of forced convection solar dryer. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 50, 101863. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101863>
- [08] Saikia, D., Kumar Nayak, P., Radha Krishnan, K., Kondareddy, R., & Lakshmi, D. V. N. (2022). Development of indirect type solar dryer and experiments for estimation of drying parameters of dheckia (*Diplazium esculentum*). *Materials Today: Proceedings*, 56, 774–780. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.255>
- [09] Sileshi, S. T., Hassen, A. A., & Adem, K. D. (2022). Simulation of mixed-mode solar dryer with vertical air distribution channel. *Heliyon*, 8(11), e11898. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11898>
- [10] Zoukit, A., Doubabi, H., Salhi, I., & Abdenouri, N. (2022). Advanced cascade control strategy applied to an indirect hybrid solar-gas dryer: Numerical and experimental investigations. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102380. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102380>

- [11] Kale, S. G., & Havaladar, S. N. (2023). Performance enhancement techniques for indirect mode solar dryer: A review. *Materials Today: Proceedings*, 72, 1117–1124. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.177>
- [12] Kokate, Y. D., Baviskar, P. R., Baviskar, K. P., Deshmukh, P. S., Chaudhari, Y. R., & Amrutkar, K. P. (2023). Design, fabrication and performance analysis of indirect solar dryer. *Materials Today: Proceedings*, 77, 748–753. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.439>
- [13] Madhankumar, S., Viswanathan, K., Taipabu, M. I., & Wu, W. (2023). A review on the latest developments in solar dryer technologies for food drying process. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 58, 103298. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2023.103298>
- [14] Madhankumar, S., Viswanathan, K., Wu, W., & Ikhsan Taipabu, M. (2023). Analysis of indirect solar dryer with PCM energy storage material: Energy, economic, drying and optimization. *Solar Energy*, 249, 667–683. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.12.009>
- [15] Sengar, M., Singhania, R. R., Singh, D., Mishra, P. K., Singh, D., Kumar, M., & Giri, B. S. (2023). Drying kinetics, thermal and morphological analysis of starchy food material: Experimental investigation through an induced type solar dryer. *Environmental Technology & Innovation*, 31, 103221. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103221>
- [16] Fadhel, A., Kooli, S., Farhat, A., & Bellghith, A. (2005). Study of the solar drying of grapes by three different processes. *Desalination*, 185(1–3), 535–541. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2005.05.012>
- [17] Fudholi, A., Sopian, K., Ruslan, M. H., Alghoul, M. A., & Sulaiman, M. Y. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.032>
- [18] Chouicha, S., Boubekri, A., Mennouche, D., & Berrbeuh, M. H. (2013). Solar Drying of Sliced Potatoes. An Experimental Investigation. *Energy Procedia*, 36, 1276–1285. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.144>
- [19] Jain, D., & Tewari, P. (2015). Performance of indirect through pass natural convective solar crop dryer with phase change thermal energy storage. *Renewable Energy*, 80, 244–250. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.02.012>
- [20] Kabeel, A. E., & Abdelgaied, M. (2018). Experimental evaluation of a two-stage indirect solar dryer with reheating coupled with HDH desalination system for remote areas. *Desalination*, 425, 22–29. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.016>
- [21] Das, M., & Akpınar, E. K. (2020). Determination of thermal and drying performances of the solar air dryer with solar tracking system: Apple drying test. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100731. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100731>
- [22] Sreekumar, A., Manikantan, P. E., & Vijayakumar, K. P. (2008). Performance of indirect solar cabinet dryer. *Energy Conversion and Management*.

- [23] Sonthawi Sonthikun, & Kitti,Fardsin (2016). Determination of thermal and drying performances of the solar air dryer with solar tracking system: Apple drying test. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21, 100731. <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214157X20304731>
- [24] Bhardwaj, A. K., Kumar, R., Chauhan, R., & Kumar, S. (2020). Experimental investigation and performance evaluation of a novel solar dryer integrated with a combination of SHS and PCM for drying chilli in the Himalayan region. *Thermal Science and Engineering Progress*, 20, 100713. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100713>.
- [25] Slimane Boughali, Etude et optimisation du séchage solaire des produits agroalimentaires dans les zones arides et désertiques, diplôme de Doctorat, Hadj Lakhdar Batna, 2010, p 44 46.
- [26] Muhammad Salim Ashnaba, Rana Majid Jamous, solar drying of fruits and vegetables, research center Biodiversity and Environment, Nablus, Palestine (2016).
- [27] Ati Mokhtar, Contribution to Improving the Solar Dryer for Agricultural Crops, Master's Thesis, University of Kasdi Merbah Ouargla, 2011, pp. 45-39.
- [28] J.A,Duffie and W.A.Beckman“Soler engineering of thermal,Vol.3, Wiley. New York 1980.
- [29] A. Ayensu, "Dehydration of food crops using a solar drying with convective heat flow" *Solar Energy* Vol. 59, Nos. 4-6, pp. 121-126, Ghana, 1997.
- [30] O. V. Ekechukwu, B. Norton, Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology, *Energy Conversion, Management*. 40, 1999, 615-655.
- [31] P. Dudez, Le séchage solaire à petite échelle des fruits et légumes: expériences et procédés, Edition du Greth, France (1999).
- [32] F.Mokhtari et D. Semmar« L’Influence de la Configuration de l’Absorbeur sur les Performances Thermiques d’un Capteur Solaire à Air » *Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique* (2001) 159-162.
- [33] K, Aoues; N, Moumami; A, Moumami; M, Zellouf; A, Labed; E, Echouri. Etude de l’influence des rugosités artificielles sur les performances thermiques des capteurs solaires plans à air, *Revue des Energies Renouvelables*, Vol 11, N°2, (2008). p219-227
- [34] Atul Sharma, V.V. Tyagi, C.R. Chen, D. Buddhi. (2009). Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and Sustainable energy reviews*, 13(2), 318–345. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
- [35] A. Fudholi, K. Sopian, M.H. Ruslan, M.A. Alghoul, M.Y. Sulaiman. (2010). Review of solar dryers for agricultural and marine products. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(1), 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.032>
- [36] Atul Sharma, C.R. Chen, Nguyen Vu Lan. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(6-7), 1185–1210. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.015>



الملخص:

تعد الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقة المتجددة التي يمكن استغلالها في مختلف المجالات، ومن بين هذه التطبيقات نجد المجففات الشمسية التي تعتبر بديلاً اقتصادياً وبيئياً عن المجففات التقليدية. تهدف هذه المذكرة إلى تحليل السلوك الحراري لمجفف شمسي غير مباشر ذو لاقط مسطح مزود بنظام لتخزين الحرارة. يتكون هذا العمل من ثلاثة فصول رئيسية:

- الفصل الأول: دراسة ببليوغرافية حول الأعمال المنجزة سابقاً.
- الفصل الثاني: عموميات حول المجففات الشمسية.
- الفصل الثالث: دراسة تجريبية.

من خلال هذا العمل، نسعى إلى تقديم مساهمة قيمة في مجال تطوير المجففات الشمسية وتعزيز استخدام الطاقة المتجددة في عمليات التجفيف. نتطلع إلى أن تكون النتائج المستخلصة من هذه الدراسة مرجعاً مفيداً للباحثين والمهندسين في تصميم وتحسين المجففات الشمسية المستقبلية.

Abstract:

Solar energy is one of the most important renewable energy sources that can be utilized in various fields. Among these applications, solar dryers are considered an economical and environmentally friendly alternative to traditional dryers. This thesis aims to analyze the thermal behavior of an indirect solar dryer with a flat plate collector equipped with a heat storage system.

This work is composed of three main chapters:

- **Chapter One: Bibliographic Study of Previous Works**
- **Chapter Two: Generalities about Solar Dryers**
- **Chapter Three: Experimental Study**

Through this work, we aim to provide a valuable contribution to the development of solar dryers and to promote the use of renewable energy in drying processes. We hope that the results derived from this study will serve as a useful reference for researchers and engineers in designing and improving future solar dryers.