كُتيِّب فني
المجففات الشمسية

الأمم المتحدة
الاسكوا
ESCWA

ازدهارُ البلدان كرامةُ الإنسان

الأمم المتحدة
الاسكوا
ESCWA

ازدهارُ البلدان **كرامةُ الإنسان**

رؤيتنا

طاقاتٌ وابتكار، ومنطقتُنا استقرارٌ وعدلٌ وازدهار

رسالتنا

بشغَف وعزْم وعَمَل: نبتكِر، ننتج المعرفة، نقدِّمُ المشورة،
نبني التوافق، نواكب المنطقة العربية على مسار خطة عام 2030.
يداً بيد، نبني غداً مشرقاً لكلِّ إنسان.

E/ESCWA/CL1.CCS/2021/BOOKLET.6

اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا

كُتيِّب فني
المجففات الشمسية

الأمم المتحدة
بيروت

©2021 الأمم المتحدة
حقوق الطبع محفوظة

تقتضي إعادة طبع أو تصوير مقتطفات من هذه المطبوعة الإشارة الكاملة إلى المصدر.

توجّه جميع الطلبات المتعلقة بالحقوق والأذون إلى اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا (الإسكوا)، البريد الإلكتروني: publications-escwa@un.org.

النتائج والتفسيرات والاستنتاجات الواردة في هذه المطبوعة هي للمؤلفين، ولا تمثل بالضرورة الأمم المتحدة أو موظفيها أو الدول الأعضاء فيها، ولا ترتب أي مسؤولية عليها.

ليس في التسميات المستخدمة في هذه المطبوعة، ولا في طريقة عرض مادتها، ما يتضمن التعبير عن أي رأي كان من جانب الأمم المتحدة بشأن المركز القانوني لأي بلد أو إقليم أو مدينة أو منطقة أو لسلطات أي منها، أو بشأن تعيين حدودها أو تخومها.

الهدف من الروابط الإلكترونية الواردة في هذه المطبوعة تسهيل وصول القارئ إلى المعلومات وهي صحيحة في وقت استخدامها. ولا تتحمل الأمم المتحدة أي مسؤولية عن دقة هذه المعلومات مع مرور الوقت أو عن مضمون أي من المواقع الإلكترونية الخارجية المشار إليها.

جرى تدقيق المراجع حيثما أمكن.

لا يعني ذكر أسماء شركات أو منتجات تجارية أن الأمم المتحدة تدعمها.

المقصود بالدولار دولار الولايات المتحدة الأمريكية ما لم يُذكر غير ذلك.

تتألف رموز وثائق الأمم المتحدة من حروف وأرقام باللغة الإنكليزية، والمقصود بذكر أي من هذه الرموز الإشارة إلى وثيقة من وثائق الأمم المتحدة.

مطبوعات للأمم المتحدة تصدر عن الإسكوا، بيت الأمم المتحدة، ساحة رياض الصلح،

صندوق بريد: 8575-11، بيروت، لبنان.

الموقع الإلكتروني: www.unescwa.org.

فريق الإعداد

الفريق الذي أعدّ الكتيب الفني مؤلف من:

ريم النجداوي

لارا جدع

ساره دانيال

الفريق الذي قام بتنقيح الكتيب وقدم مساهمات أخرى:

فريق الإسكوا: كريم حسن وجيل أمين وزهر بو غانم

فريق تصميم الأشكال: سما عبد الشاكور وفاطمة عبد العزيز

الترجمة والتصميم العام: فريق من قسم إدارة المؤتمرات في الإسكوا

مقدمة

يواجه قطاع الزراعة والأغذية في المنطقة العربية تحديات بارزة تتعلق بندرة الموارد الطبيعية، والوصول إلى المدخلات الزراعية، والوصول إلى الأسواق، والتغيرات المناخية المتزايدة. وتعتبر التكنولوجيات الزراعية الخضراء من الحلول التي تساهم في التخفيف من هذه التحديات وتعزيز قدرات المزارعين على الصمود ولكن لا يزال اعتماد التكنولوجيات الخضراء غير منتشر على صعيد المنطقة العربية بسبب محدودية المعلومات والوصول إلى آليات التمويل الملائمة.

لهذا الغرض، طوّرت الإسكوا الكتيب الفني هذا حول المجففات الشمسية، باعتبارها تقنية تعتمد على الطاقة المتجددة ثبُتت فعاليتها في إنتاج منتجات مجففة ذات جودة عالية كما أنّها تساهم في تخفيض تكلفة الطاقة على مستخدمها وتقليل انبعاثات غازات الدفيئة والمساهمة في الحد من فقد وهدر الطعام.

يندرج إصدار هذا الكتيب تحت إطار مشروع حساب التنمية التابع للإسكوا بعنوان "تعزيز مرونة واستدامة القطاع الزراعي في المنطقة العربية" والذي يهدف إلى تعزيز القدرات الوطنية على معالجة مرونة القطاع الزراعي واستدامته في المنطقة مع استهداف ثلاثة بلدان عربية وهي الأردن ولبنان وفلسطين.

وبالإضافة إلى الكتيب الفني هذا، أعدت الإسكوا مواد تدريبية حول موضوع المجففات الشمسية، تم تقديمها خلال ورش عمل تدريبية وطنية نفّذت في البلدان الثلاثة المستهدفة. كما طورت الإسكوا دليلاً تدريبياً حول استخدام المجففات الشمسية للمنتجات الزراعية يمكن استخدامه في الإرشاد الزراعي أو في حلقات تدريبية أخرى حول هذه التكنولوجيا.

المحتويات

ص. 3 فريق الإعداد

ص. 4 مقدمة

ص. 5 ملخص تنفيذي

ص. 7 وصف التكنولوجيا

ص. 7 المجففات الشمسية المباشرة

ص. 11 المجففات الشمسية غير المباشرة

ص. 11 المجففات الشمسية الهجينة

ص. 17 اعتبارات التصميم

ص. 18 مزايا التكنولوجيا وتحديات تطبيقها

ص. 18 المزايا

ص. 18 تحديات التطبيق

ص. 19 المراجع

ملخص تنفيذي

يعتبر تجفيف المحاصيل أحد الحلول الفعالة للحد من فقد وهدر الأغذية. وبالمقارنة مع التجفيف تحت أشعة الشمس في الهواء الطلق، المعتمد على نطاق واسع في المناطق الريفية وخاصةً في البلدان النامية، تعتبر المجففات الشمسية أكثر صحية وكفاءة، كما يمكن استخدامها لمجموعة متنوعة من المحاصيل. إنها تكنولوجيا خضراء تعتمد على الطاقة المتجددة وبالتالي تخفّض فاتورة الطاقة على المُزارِع وتساهم في الحد من انبعاثات غازات الدفيئة. تقدّم المجففات الشمسية تصاميم مختلفة يمكن تكييفها مع مختلف الظروف المناخية وخصائص المنتجات. كما أنها مناسبة جداً للمنطقة العربية التي تنعم بأشعة الشمس لساعات طويلة ويمكن تنفيذها وتشغيلها بسهولة من قِبل المجتمعات الريفية شرط تقديم الإرشاد المناسب. وعلى الرغم من أن التكلفة الأولية لتركيب المجفف الشمسي قد تكون أعلى من اعتماد التجفيف تحت أشعة الشمس في الهواء الطلق، إلا أنّ المنتج النهائي باستخدام المجففات الشمسية يكون أكثر أماناً، وذا جودة أعلى، ويتم تسويقه بشكل أفضل، مما يسمح باسترداد تكلفة المجفف بسرعة.

وصف التكنولوجيا

إن تقنيات تجفيف الأغذية هي من بين أقدم الطرق المستخدمة لحفظ المنتجات الغذائية والزراعية بما في ذلك الحبوب والفواكه والخضار والأعشاب والأسماك ومنتجات الألبان وغيرها. ويهدف 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 بانحلال المنتج وتعفّنه. وإن الطريقة التقليدية الأكثر استخداماً لتجفيف الأغذية، وخاصة في البلدان النامية، هي طريقة التجفيف تحت أشعة الشمس في الهواء الطلق حيث يوضع الغذاء تحت أشعة الشمس المباشرة على أرض/سطح من الخرسانة، أو أية مساحة مسطّحة ملائمة أخرى ويُترك لعدة أيام حتى يجف. ويعتبر التجفيف بأشعة الشمس في الهواء الطلق أرخص طريقة للتجفيف حيث لا حاجة لمعدات أو أي مصدر إضافي للطاقة غير الشمس. بيد أن هذه الطريقة لها مساوئ عدة؛ على سبيل المثال لا الحصر: الاعتماد الكلي على توافر أشعة الشمس وعدم القدرة على توقّع جودة المنتج المجفف النهائي الذي قد يواجه العديد من العناصر الخارجية التي تعرّضه للخطر (مثل الغبار وتلوث الهواء والحشرات والقوارض). وبذلك، توفر المجففات الشمسية بديلاً مناسباً للتجفيف الشمسي في الهواء الطلق للتغلب على التحديات السابق ذكرها.

يمكن تصنيف المجففات الشمسية تبعاً لمبدأ عملها، وتحديداً كيفية تجميعها للطاقة الشمسية وتحويلها إلى طاقة حرارية للتجفيف. وفي هذا السياق، يمكن أن تكون المجففات الشمسية إما من النوع المباشر، أو النوع غير المباشر، أو الهجين. يقدم القسم التالي وصفاً لكل نوع مع إعطاء أمثلة على التصاميم التي تم تطويرها واستخدامها.

تجدر الإشارة أيضاً إلى أنه في إطار كل نوع، يمكن اعتماد وضعين تشغيليين: الوضع السلبي (Passive) الذي يعتمد على الدوران الطبيعي لتدفق الهواء (مجففات الحمل الحراري الطبيعي)، والوضع النشط (Active) الذي يتضمن الدوران القسري لهواء التجفيف الساخن من خلال نظام التهوية (مجففات الحمل الحراري القسري).

ألف. المجففات الشمسية المباشرة

يتكون هذا النوع من المجففات من خزانة مغلقة مغطاة بأغطية شفافة تسمح للإشعاع الشمسي بتسخين المنتج المخزَّن في الداخل مباشرة. وهو نظام بسيط ورخيص يحمي المنتجات المجففة من الملوثات الموجودة في تقنية التجفيف تحت أشعة الشمس في الهواء الطلق. ومع ذلك، ينبغي للمزارع أيضاً أن ينظر في المساوئ المرتبطة بهذا النوع من المجففات الشمسية إذ إنّ التعرض المباشر للإشعاع الشمسي قد يتسبب بتغيُّر لون المنتج مما يقلل من جودته. إلى جانب ذلك، لا تتم إزالة بخار الماء المتكون داخل الخزانة بشكل سليم مما يبطئ معدل التجفيف ويحد من ناقلية الغطاء الشفاف. وترد في الإطار 1 المجففات الشمسية المباشرة السلبية والنشطة:

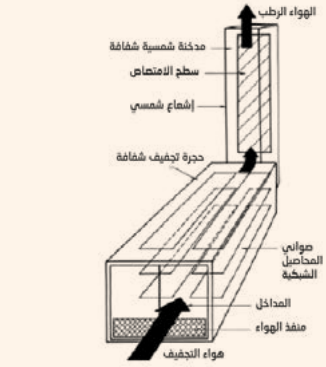
الإطار 1. تصاميم المجففات الشمسية المباشرة: نماذج عن الوضعين التشغيليين السلبي والنشط

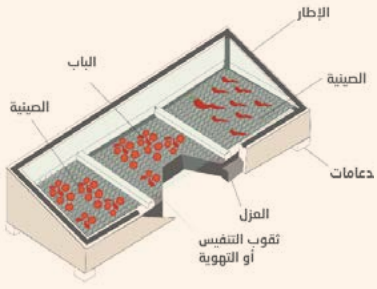
المجفف الشمسي المباشر السلبي

- يتميّز بتصميم بسيط وغير مكلف.
- يتكون المجفف من حجرة تجفيف، وهي عبارة عن علبة معزولة مع مدخل ومنفذ لضمان دوران الهواء، وصفيحة شفافة يمكن أن تكون من الزجاج أو البولي إيثيلين أو البولي كربونات.
- تسمح الصفيحة الشفافة بنقل الإشعاع الشمسي إلى المنتج الموضوع في حجرة التجفيف، في حين يدور الهواء الساخن في المجفف بسبب الفرق في الكثافة.
- يجب إضافة مدخنة أو تنفيسة للسماح بخروج الهواء الرطب.
- مناسب لتجفيف الفواكه والخضار والأعشاب والتوابل والمكسرات.
- تبعاً لنوع المنتج الذي سيتم تجفيفه (محتوى الرطوبة الأولي) والموقع (الموقع الجغرافي والطقس) ومعدل تدفق الهواء (اعتماداً على درجات الحرارة في الهواء الطلق)، تختلف كفاءة تجفيف المجفف المباشر السلبي من 20 إلى 40 في المائة.
- تحمي المجففات المباشرة السلبية المنتج من المطر والتلوث. ولكن، في حالات قليلة، قد تتسبب بارتفاع درجة حرارة المنتج مما قد يؤدي إلى انخفاض جودته (على سبيل المثال، تغير اللون في المشمش كما ذكر Udomkun and others, 2020).
- استناداً إلى حجم عملية التجفيف، توجد عدة تصاميم بما في ذلك المجفف الشمسي الصندوقي ومجففات الدفيئة.

المجفف الشمسي الصندوقي

- جيد للاستخدام المنزلي وتجفيف الفواكه والخضار والتوابل والأعشاب على نطاق صغير.
- عادة ما يتم طلي الجزء الداخلي من حجرة التجفيف باللون الأسود أو استخدام مواد سوداء في تصميمها لتعزيز امتصاص الإشعاع الشمسي.
- يمكن إضافة تعديلات إلى التصميم لتعزيز دوران الهواء وزيادة معدل التجفيف عن طريق إضافة مساحة خشبية على سبيل المثال لتوجيه مدخل الهواء أومدخنة طويلة لتسهيل خروج الهواء الرطب.

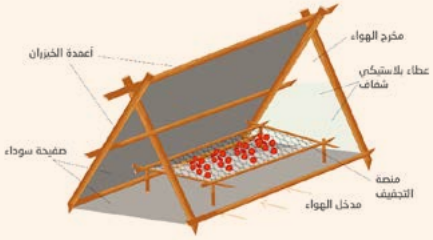




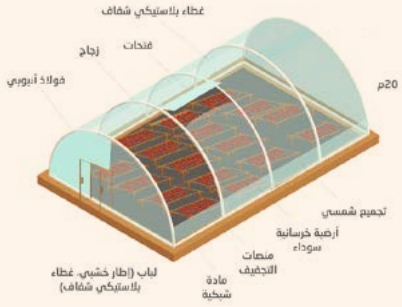
المصدر: Visavale, 2012.

مجففات الدفيئة

- المعروفة أيضاً باسم مجففات الخيمة، وهي دفيئات معدلة.
- جيدة لتجفيف منتجات زراعية متعددة على نطاق واسع.
- يمكن تزويدها بمدخنة للدوران الطبيعي للهواء الساخن.
- يمكن عادة استخدام الصفائح البلاستيكية أو المعدنية الداكنة لتغطية أرضية الخيمة لزيادة امتصاص الإشعاع الشمسي. يمكن أن تكون المواد المستخدمة لإطار الخيمة معدنية أو خشبية أو من الخيزران اعتماداً على النموذج المعتمد:
- مجفف خيمة من البولي إيثيلين ذو الدوران الطبيعي (أ): يكون إطار الخيمة مصنوعاً عادة من الخيزران المغطى بصفيحة/غشاء من البولي إيثيلين الشفاف. ويُسمح للهواء بالدخول من القاعدة السفلى للخيمة عن طريق لف الغطاء وفكه ويخرج من الخيمة من خلال فتحات التهوية في الجزء العلوي.
- مجفف شمسي على شكل قبة أو نفق ذو الدوران الطبيعي (ب): هذا النموذج له شكل شبه أسطواني ويتكون من إطار معدني مغطى بغشاء من البولي إيثيلين الشفاف. ويدخل الهواء الخيمة من خلال فتحات دخول موجودة في قاعدة كلا الجانبين على طول الخيمة بأكملها ويخرج من فتحات التهوية الموجودة في الجزء العلوي. وتتم إضافة مادة شبكية إلى فتحات التهوية لمنع الحشرات والآفات من الدخول وتقليل التلوث الخارجي. ويمكن إضافة مدخنة لهذا النوع من المجففات.



(أ)



(ب)

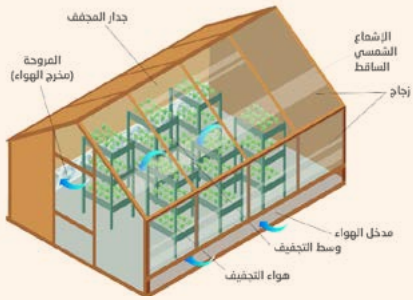
المصدر: Visavale, 2012.

المجفف الشمسي المباشر الناشط

- كما هو الحال في المجففات المباشرة السلبية، تمتص المحاصيل الإشعاع الشمسي المباشر من خلال الأغطية الشفافة. ولكن، في النوع النشط، يتم تعزيز دوران الهواء بواسطة مروحة العادم التي يمكن تشغيلها على الطاقة الشمسية (الشبكة الكهروضوئية) أو الكهرباء.
- إن المجففات النشطة هي أكثر تكلفة من النوع السلبي وتتطلب مهارات في مجال التشغيل والصيانة.
- إن المجففات المباشرة النشطة هي أكثر ملاءمة من المجففات السلبية للمحاصيل ذات محتوى الرطوبة العالي (مثلاً الكيوي والملفوف والقرنبيط والبابايا والطماطم والمانجو).
- يجب التحكم في درجات الحرارة المثلى ومعدلات تدفق كتلة الهواء لتحقيق كفاءة عالية في التجفيف ومنتج بجودة عالية.

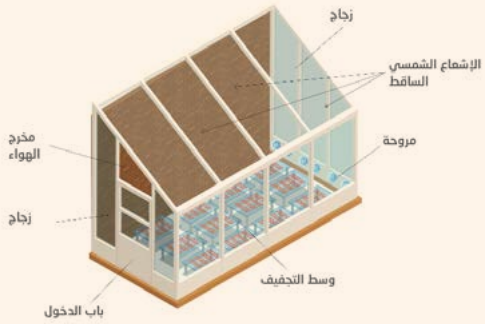
التصاميم النموذجية

- مجفف الدفيئة الحراري القسري (أ)



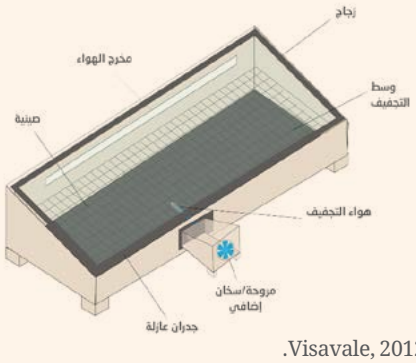
المصدر: Visavale, 2012.

- مجفف حراري قسري على شكل حظيرة وذو سطح شفاف (ب)



المصدر: Visavale, 2012.

- مجففات الحمل القسري على نطاق صغير المجهزة بمصدر حرارة إضافي (ج)

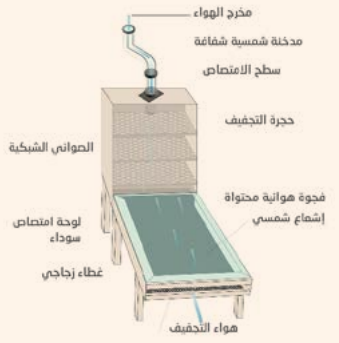


المصدر: Visavale, 2012.

الإطار 2. تصاميم المجففات الشمسية غير المباشرة: نماذج عن الوضعين التشغيليين السلبي والنشط

المجفف الشمسي غير المباشر السلبي

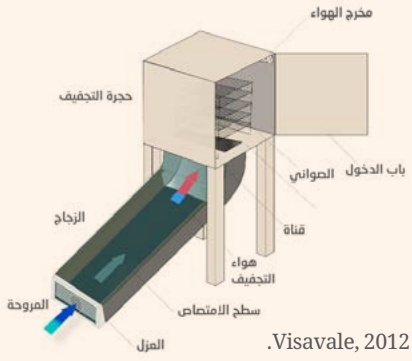
- يتدفق الهواء في هذا المجفف عن طريق الدوران/ الحمل الحراري الطبيعي ويتم تفريغه من خلال فتحات التهوية أو المدخنة لتسهيل الحركة الرأسية للهواء.
- لزيادة سعة هذه المجففات، توضع الرفوف أو الصواني بطريقة عمودية وبشكل متباعد للسماح بالتدفق السليم للهواء الساخن بينها.



المصدر: Visavale, 2012.

المجفف الشمسي غير المباشر الناشط

- بالإضافة إلى مجمع الطاقة الشمسية، تتضمن هذه المجففات مروحة العادم للحفاظ على معدل تدفق كاف في حجرة التجفيف مما يسمح بالتبخر/ التجفيف الموحد.



المصدر: Visavale, 2012.

باء. المجففات الشمسية غير المباشرة

في المجففات الشمسية غير المباشرة، لا يتعرض المنتج لأشعة الشمس المباشرة. ويتكون المجفف من وحدتين رئيسيتين هما: (1) مجمع الطاقة الشمسية الذي يجمع الإشعاع الشمسي من خلال أغطية شفافة و(2) خزانة التجفيف، وهي مقصورة غير شفافة، حيث يتم وضع المنتج الذي سيتم تجفيفه. ويمكن أن يكون مجمع الطاقة الشمسية مصنوعاً إما من المعدن أو الخشب المغلف بشكل مناسب أو البولي ايثيلين الأسود، وهو الحل الأرخص. ويسمح مجمع الطاقة بتسخين الهواء المحيط الذي يتدفق من خلال قنوات الهواء إلى خزانة التجفيف حيث يتم تخزين المنتج على الصواني الشبكية أو الرفوف.

بالمقارنة مع المجففات الشمسية المباشرة، تتطلب المجففات غير المباشرة وقتاً أقل للتجفيف وتحافظ بشكل أفضل على جودة المنتجات المجففة (تكسير أقل للمنتجات والحفاظ بشكل أفضل على ألوانها ومحتواها من الفيتامينات) عن طريق تجنب تعرضها المباشر للإشعاع الشمسي. غير أن هذه المجففات أكثر تعقيداً من المجففات المباشرة وتتطلب المزيد من الصيانة والاستثمار الأولي. وترد في الإطار 2 تصاميم للمجففات الشمسية غير المباشرة السلبية والنشطة.

جيم. المجففات الشمسية الهجينة

تجمع المجففات الشمسية الهجينة بين خصائص كل من المجففات الشمسية المباشرة وغير المباشرة حيث يتم تجفيف المنتج من خلال الجمع بين الإشعاع الشمسي المباشر وتدفق الهواء المسخَّن مسبقاً في مجمع الطاقة

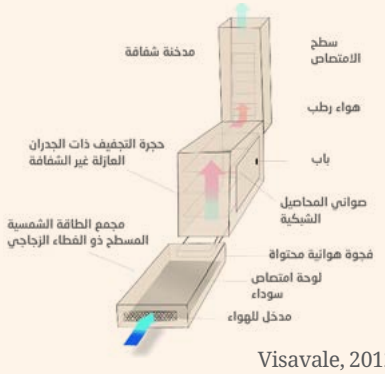
الشمسية. بالمقارنة مع المجففات الأخرى، يتطلب المجفف الهجين وقتاً أقل للتجفيف، لكنه أكثر تكلفة ويتطلب المزيد من الصيانة. ولوحظ أن المجففات الشمسية الهجينة تحافظ بشكل أفضل على جودة المنتج مقارنة بالتجفيف في الهواء الطلق.

وتستخدم عادة للمنتجات التي تتطلب تجفيف سريع مع الحفاظ على الجودة مثل الأعشاب والكاجو والفطر والأناناس وغيرها (Udomkun and others, 2020). وترد في الإطار 3 تصاميم المجففات الشمسية الهجينة السلبية والنشطة:

الإطار 3. تصاميم المجففات الشمسية الهجينة: نماذج عن الوضعين التشغيليين السلبي والنشط

النوع الهجين السلبي

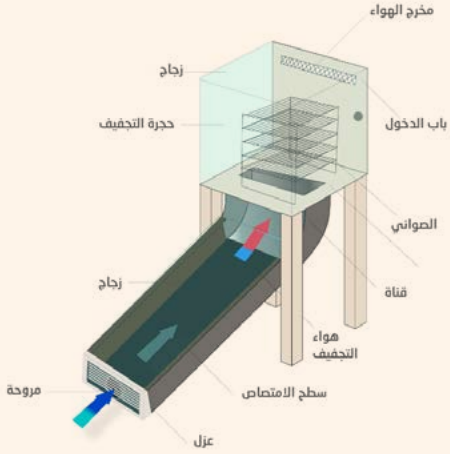
- في المجففات الشمسية الهجينة السلبية، يتم تجفيف المنتج من خلال الهواء الساخن الذي يتم تسخينه في المجمع ومن خلال الإشعاع الشمسي المباشر في حجرة التجفيف. يمكن استخدام الخشب أو المعدن المغلف بشكل صحيح لبناء مثل هذه المجففات بالإضافة إلى خيارات أخرى أكثر اقتصاداً مثل أغشية/صفائح البولي ايثيلين.



المصدر: Visavale, 2012.

النوع الهجين الناشط

- بالإضافة إلى حجرة التجفيف ومجمع الطاقة الشمسية، يتم تركيب مروحة للتحكم بتدفق الهواء داخل المجفف وتسهيله. في هذه المجففات، يمكن الجمع بين الطاقة الشمسية ومصدر آخر للطاقة (على سبيل المثال: الكهرباء، غاز الاحتراق، الكتلة الحيوية) لأغراض تسخين الهواء.
- أظهر استخدام الألواح الشمسية الكهروضوئية (VP) لتوليد الحرارة في مجفف هجين نتائج جيدة في تجفيف الطماطم. فعند المقارنة مع مجفف هجين بدون مصدر إضافي للتسخين، سمح المجفف الهجين الناشط بارتفاع درجة الحرارة في الخزانة لتصل إلى 62 درجة مئوية مقارنة مع 54 درجة مئوية في مجفف بدون مصدر إضافي للتسخين، وخفَّض وقت التجفيف من 9 ساعات إلى 6 ساعات للوصول إلى نفس محتوى الرطوبة (10 في المائة من أساس رطب بنسبة 94.22 في المائة)، وأعطى معدل تجفيف أعلى وأكثر كفاءة في التجفيف. بالإضافة إلى ذلك، كانت جودة المنتج أعلى أيضاً بالمقارنة مع المنتجات التي تم الحصول عليها عن طريق التجفيف تحت أشعة الشمس في الهواء الطلق (Hussein and others, 2017).



المصدر: Visavale, 2012.

الجدول 1. متطلبات تجفيف بعض المحاصيل

المحصول	محتوى الرطوبة الأولي (في المائة)	محتوى الرطوبة النهائي (في المائة)	الحد الأقصى من الحرارة المسموح بها للتجفيف (درجة مئوية)
الأرز الخام	24-22	11	50
الأرز المسلوق	35-30	13	50
الذرة الصفراء	35	15	60
القمح	20	16	45
الذرة	24	14	50
الأرز	24	11	50
البقول	22-20	10-9	60-40
بذور الزيت	25-20	9-7	60-40
البازلاء	80	5	65
القرنبيط	80	6	65
الجزر	70	5	75
الفاصوليا الخضراء	70	5	75
البصل	80	4	55
الثوم	80	4	55
الملفوف	80	4	55
البطاطا الحلوة	75	7	75
البطاطا	75	7	75
التوابل	80	5	65
المشمش	85	18	65
التفاح	80	24	70
العنب	80	20-15	70
الموز	80	15	70
الجوافة	80	7	65
البامية	80	20	65
الأناناس	80	10	65
الطماطم	96	10	60
الباذنجان	95	6	60

تُستخدم المجففات الشمسية لتجفيف مجموعة متنوعة من المحاصيل والمنتجات كالحبوب والأعشاب والخضار والفواكه ومنتجات الألبان والأسماك. ولكل نوع، يجب تكييف تصميم المجفف الشمسي بحيث تكون درجة الحرارة وتدفق الهواء الأمثل لتحقيق التجفيف السليم مع الحفاظ على منتج ذي نوعية جيدة. وبشكل عام، تستغرق الأغذية الرطبة مثل المانجو والأناناس والطماطم يومين كاملين من

التجفيف الشمسي. في حين يمكن تجفيف الأغذية الأخرى، مثل التفاح وجوز الهند والبطاطا والبصل، في يوم واحد. أما المنتجات الورقية مثل الأعشاب فلا تأخذ سوى جزء من اليوم (Al-Busoul, 2017). ويتضمن الجدول 1 معلومات عن محتوى الرطوبة الأولي والنهائي والحد الأقصى لدرجة الحرارة المسموح بها لتجفيف بعض المحاصيل (Prakash and Kumar, 2013).

من أجل تقديم إرشادات بشأن نطاق تطبيق مختلف أنواع المجففات الشمسية، يلخص الجدول 2 سمات وخصائص كل نوع من أنواع المجففات:

الجدول 2. السمات والخصائص الرئيسية لأنواع مختلفة من المجففات الشمسية

السمة/ الخاصية	النوع المباشر		النوع غير المباشر		النوع الهجين	
	السلبي	الناشط	السلبي	الناشط	السلبي	الناشط
مناسب لتجفيف الفواكه والخضار	نعم[أ]	نعم	نعم	نعم	نعم	نعم (تبين أن الحمل الحراري القسري أكثر ملاءمة لإنتاج الطماطم المجففة ذات القيمة العالية لصغار المنتجين إذ كانت كفاءة المجمع والمجفف أعلى وكان وقت التجفيف أقصر مما كان عليه في وضع الحمل الحراري الطبيعي/السلبي)[ب]
مناسب لتجفيف الأعشاب[ج]	نعم	نعم (تم الحصول على نتائج أفضل للنعناع في الحمل الحراري القسري منه في الحمل الحراري الطبيعي)	نعم	نعم	نعم	نعم
مناسب لتجفيف منتجات الألبان	نعم	نعم	نعم[د،هـ]	نعم (أظهر نموذج رياضي تم تطويره للتجفيف الشمسي لـ"كشك" أنه من الأفضل استخدام درجات حرارة منخفضة مع دفع الهواء قسراً في بداية عملية التجفيف. وفي المراحل التالية، يجب استخدام درجة حرارة عالية بدون دفع الهواء قسراً)[و]	نعم	نعم

يتجنب تغيُّر لون المنتج أو انكساره	كلا	كلا	نعم	نعم	نعم	نعم
تصميم بسيط	نعم	نعم	كلا (مقارنة بالنوع المباشر)		كلا	كلا
يمكن تصنيعه بالمواد المتاحة (صفائح الخشب والخيزران والحديد...)	نعم	نعم	نعم	نعم	نعم	نعم
يتطلب استثمارات أولية كبيرة	كلا	كلا (لكن نظام التهوية يزيد من التكلفة)	نعم (مقارنة بالنوع المباشر)		نعم	نعم
يتطلب مهارات في مجال الصيانة	كلا	نعم (مقارنة بالنوع المباشر السلبي)	نعم (مقارنة بالنوع المباشر)		نعم	نعم
يستخدم على نطاق صغير ومتوسط[أ]	نعم		نعم		نعم	نعم

أ. Eke, 2013.
ب. Patil and Gawande, 2016.
ج. Sallam and others, 2015.
د. Tashtosh and others, 2014.
هـ. Agrawal and others, 2015.
و. Bahnasawy and Shenana, 2004.
ز. Patil and Gawande, 2018.

ممارسات ما قبل وما بعد التجفيف

تجدر الإشارة أيضاً إلى أنه ينبغي النظر في عدة ممارسات ما قبل وما بعد التجفيف في تحضير منتجات مجففة ذات جودة عالية ونذكر في القسم التالي الممارسات الرئيسية المطبقة على الفواكه والخضار[1] :

1. للخضار

تصل درجة الحرارة المثلى لتجفيف الخضار إلى حوالي 60 درجة مئوية. وإذا تم استخدام درجات حرارة أعلى قد تتصلب الخضار من الخارج في حين تبقى الرطوبة في الداخل، مما يؤدي إلى نمو العفن ومخاطر محتملة على سلامة الأغذية. إلى جانب ذلك، فإن وقت التجفيف الطويل يؤدي إلى فقدان النكهة وجودة المنتج. كما يجب تجفيف الخضار مباشرة بعد الحصاد لتجنب الخسائر فيها.

إن المحاصيل النباتية الأكثر ملاءمة للتجفيف هي الجزر والذرة الحلوة والثوم والفطر والفلفل والبصل والبامية والفاصوليا الخضراء والشمندر والبازلاء الخضراء

1 University of Georgia Cooperative Extension Service, ND.

واليقطين والطماطم وغيرها. وينبغي غسلها، وتشذيبها، وتقشيرها عند الحاجة، وتقطيعها إلى شرائح بشكل موحد، وينبغي إزالة الأجزاء الخشبية والليفية، فضلاً عن الأجزاء المضروبة والمتحللة.

إن مرحلة المعالجة ضرورية قبل عملية التجفيف. وعادة ما يتم ذلك عن طريق السلق (Blanching)، بالماء أو البخار، لوقف العمل الأنزيمي في الخضار الذي يستمر خلال عملية التجفيف والمسؤول عن فقدان اللون والنكهة. كما يعجّل السلق عملية التجفيف عن طريق تليين بنية خلايا الخضار مما يسمح للرطوبة بالخروج. بعد السلق، يجب غمس الخضار في الماء البارد، وتصفيتها، ومن ثم وضعها على صينية التجفيف لتجفيفها. لا يحتاج كل الخضار إلى السلق، على سبيل المثال، يمكن تجفيف البصل والفلفل الأخضر والفطر والطماطم بدون سلقها.

يجب وضع الخضار في المجفف أو على الصينية في طبقة واحدة مع عدم تكديسها. ويجب أن تجفف حتى تصبح صلبة أو بملمس الجلد، اعتماداً على الخضار، حتى يصبح مستوى الرطوبة فيها بنسبة 10 في المائة تقريباً. بالنسبة للحبوب والذرة والبازلاء، يجب أن تكون صلبة وتتحطم عند ضربها بالمطرقة. أمّا الخضار الورقية فيجب أن تكون هشة. ويجب تبريد الخضار المجففة كلياً قبل تعبئتها في مستوعبات نظيفة وجافة ومحكمة الإغلاق. ويجب تخزينها في مكان بارد وجاف ومظلم. وتجدر الإشارة إلى أن الخضار المجففة لديها مدة صلاحية أقصر من الفواكه، ويمكن تخزينها من أربعة إلى 12 شهراً.

2. للفواكه

كما بالنسبة للخضار، يجب تحضير الفواكه جيداً قبل تجفيفها. وينبغي غسلها وتقشيرها وتقطيعها إلى شرائح ذات أحجام موحدة للسماح لها بأن تجف بنفس المعدل. اعتماداً على المحصول، يجب فحص قشر الفواكه أو شقها لتسريع عملية التجفيف. وعموماً، يتم تجفيف الخوخ والعنب والتين والتمر كفواكه كاملة بدون تقطيعها إلى شرائح. وقد تتطلب بعض الفواكه الخضوع لمرحلة قبل المعالجة لتجنب اسودادها (الموز والتفاح)، ويتمّ ذلك من خلال عدة عمليات مثلاً عبر غمسها في عصير الفاكهة، أو في العسل.

من حيث المبدأ، ينبغي أن تجفف معظم الفواكه على حوالي 60 درجة مئوية حتى يصل محتوى الرطوبة فيها إلى حوالي 20 في المائة في نهاية عملية التجفيف. ويجب أن تتّخذ الفواكه المجففة ملمساً جلدياً ولكن ليس صلباً. ولا ينبغي ملاحظة أي آثار للرطوبة عند قطع الفاكهة أو الضغط عليها. من حيث المبدأ، لا ينبغي أن تكون لزجة إلا إذا كانت ثمرة ذات محتوى سكر مرتفع مثل التين والكرز. وبعد عملية التجفيف، يجب تبريد المنتج وتعبئته في حاويات نظيفة محكمة الإغلاق ومقاومة للرطوبة كالجرار الزجاجية والعلب المعدنية والأكياس البلاستيكية (علماً أنّه ليست جميع أنواع الأكياس البلاستيكية مناسبة للمنتجات المجففة؛ على سبيل المثال، البوليستر والنايلون لديها نفاذية غاز منخفضة وهي خيارات أفضل من البولي ايثيلين منخفض الكثافة (LDPE) والبولي ايثيلين مرتفع الكثافة (HDPE)). ويجب تخزينها في مكان بارد وجاف ومظلم. ويمكن تخزين معظم الفواكه المجففة لمدة سنة واحدة عند 16 درجة مئوية أو 6 أشهر عند 27 درجة مئوية.

قد تحتاج الفواكه، على وجه الخصوص، إلى مرحلة تكييف (Conditioning) قبل التعبئة النهائية؛ وذلك لتوزيع محتوى الرطوبة المتبقي في الفواكه بالتساوي والحد من فرص التلف بعد التخزين. يتمّ ذلك عن طريق وضع الفواكه في حاويات لعدة أيام مع هز المحتوى للتحقق مما إذا كان من رطوبة زائدة لا تزال موجودة في المنتج. ويمكن ملاحظة ذلك من تشكيل المياه المكثفة على جدران الحاوية. في هذه الحالة، يجب أن يتم تجفيف المنتج أكثر قبل تعبئته وتخزينه بشكل صحيح.

ملاحظة: يعد الحصول على أجهزة قياس الرطوبة أمراً مهماً للمزارعين الذين يستخدمون المجففات الشمسية لاستخدامها بانتظام في تحديد محتوى الرطوبة الدقيق (FAO, 2020).

اعتبارات التصميم

عند اختيار نوع وتصميم المجفف الشمسي، يجب أخذ العديد من المعايير في الاعتبار. وترد فيما يلي قائمة بالاعتبارات الرئيسية:

- خصائص المجفف:
  - الخصائص الفيزيائية: حجم المجفف وشكله وسعته، وعدد الصواني وحجمها، وسهولة التحميل والتفريغ وتدفق المواد منه وإليه. ويعتمد حجم مشروع التجفيف إلى حد كبير على هذه الخصائص.
  - الأداء الحراري: وقت التجفيف ومعدله ومعدل تدفق الهواء ودرجة حرارة التجفيف.
  - خصائص أخرى: تكلفة التصميم والاستثمار الأولي المتاح.
- خصائص المنتج الذي سيتم تجفيفه: الخصائص الفيزيائية والحموضة وقابلية الاشتعال ووقت التجفيف ودرجة الحرارة المطلوبة ومحتوى الرطوبة الأولي والنهائي والمظهر المطلوب ونكهة المنتج النهائي.
- خصائص الموقع المتاح لتركيب مجفف: المساحة، والطاقة المتاحة، والوقود والكهرباء، ودرجة الحرارة والرطوبة المحيطة، وتلوث الهواء، والقيود المفروضة في الموقع المتعلقة بالضوضاء أو غيرها من مصادر الإزعاج التي يمكن أن تنتج عن عملية التجفيف.
- مدة التعرض للشمس في المكان الذي يتم فيه استخدام المجفف الشمسي.
- متطلبات تشغيل المجفف وصيانته والموارد البشرية الماهرة المتاحة (الفنيين والمشغلين).
- قد تؤثر العمليات اللازمة قبل وبعد عملية التجفيف بما في ذلك الفرز، والنقل، والتعبئة والتغليف أيضاً على اختيار المجفف.

مزايا التكنولوجيا وتحديات تطبيقها

تقدم المجففات الشمسية العديد من المزايا، وخاصة بالمقارنة مع تقنيات التجفيف تحت أشعة الشمس في الهواء الطلق. ويعرض القسم التالي أهم مزايا تكنولوجيا المجففات الشمسية بالإضافة إلى تحديات التطبيق الرئيسية:

ألف. المزايا

- يسمح التجفيف الشمسي للمنتجات الزراعية بالحصاد المبكر وتخزين المنتج على المدى الطويل مع تجنب تدهور جودته؛ كما أنه يخلق سوقاً جديدة للمنتجات الجديدة مستفيداً من ارتفاع الأسعار بعد نهاية الموسم.
- يسمح التجفيف الشمسي بتخفيض حجم ووزن المنتج مما يقلّل متطلبات التعبئة والتغليف والتخزين والنقل (المساحة والتكاليف والشروط). وتعتبر هذه المزايا هامة جداً بالنسبة للبلدان النامية.
- تقدم المجففات الشمسية مجموعة متنوعة من التصاميم القابلة للتكيُّف مع نوع المنتج الذي سيتم تجفيفه وكميته وخصائصه.
- بالمقارنة مع نظام التجفيف تحت أشعة الشمس في الهواء الطلق، إن المجفف الشمسي النموذجي أسرع وأكثر كفاءة، بحيث يجفّف الغذاء في وقت أقصر ويعطي منتجاً ذا جودة أعلى. بالإضافة، يوفّر المجفف الشمسي تجفيفاً أكثر نظافة لأنه يتم في بيئة مغلقة، وأكثر سلامة لأن المنتج يحتفظ بمعظم مغذياته إذا تم تجفيفه بشكل صحيح على درجات الحرارة المثلى.
- يمكن تصنيع المجفف الشمسي محلياً من المواد المتاحة.
- تعتبر فترة استرداد تكلفة الاستثمار الأولي للمجفف الشمسي قصيرة جداً مقارنة بعمره.
- تمثل المجففات الشمسية فرصة عملية للمشاريع الصغيرة الناشئة، ولا سيما في المناطق الريفية.

باء. تحديات التطبيق

- يعتمد المجفف الشمسي مباشرة على توافر الشمس والطاقة الشمسية وبالتالي لا يمكن استخدامه سوى خلال النهار. وفي حال كان المنتج الذي سيتم تجفيفه يتطلب تجفيفاً مستمراً، يلزم وجود مصدر طاقة وتسخين احتياطي أو مساعد مثل الكهرباء أو الغاز المسال أو الديزل أو الكتلة الحيوية. ولكن الأنظمة التي تستخدم الطاقة غير المتجددة تكون أكثر كلفة ماديّاً وبيئياً.
- يمكن أن تعطي المجففات الشمسية المباشرة منتجات ذات جودة رديئة لأن المحصول يخضع للإشعاع الشمسي المباشر مما يسبب تغيُّر لونه، وكرملة الفواكه ذات محتوى السكر المرتفع، وظهور نكهة سيئة فيها بسبب الأكسدة، أو فقدان بعض من قيمتها الغذائية (خاصّةً الفيتامينات الحساسة للضوء).
- ما لم تكن منطقة مجمّع الحرارة كبيرة ويتم تعزيز دوران الهواء عن طريق التهوية/المروحة، فإن عملية التجفيف تميل إلى أن تكون بطيئة.
- قد يتطلب تشغيل بعض التصاميم وصيانتها موظفين مهرة. حتى بالنسبة للنُظُم البسيطة، ينبغي شرح التكنولوجيا بعناية للمستخدم

بحيث يتم إنشاء النظام بشكل صحيح لضمان تشغيله بكفاءة.

- قد تحتاج بعض المجففات الممكننة إلى أن يتمّ استيرادها.

ملاحظة: لكي تكون التجربة ناجحة اقتصادياً عند استخدام مجفف شمسي، يجب تطوير قنوات السوق للمنتجات المجففة، وينبغي التحكم بالجودة وتقديم المساعدة التقنية خاصة في حالة المجتمعات الريفية (FAO, 2018).

المراجع

Agrawal, A.K., Sandey, K.K., Geetesh Sinha (2015). Drying of Chhana using Solar Energy: Physical and Thermal Properties of Dried Chhana (Chhana Drying by Solar Energy). International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), vol. 3, No. 20, pp. 1-3. Available from: https://www.ijert.org/research/drying-of-chhana-using-solar-energy-physical-and-thermal-properties-of-dried-chhana-IJERTCONV3IS20007.pdf.

Al-Busoul, Mamdoh (2017). Design of Fruits Solar Energy Dryer under Climatic Condition in Jordan. Journal of Power and Energy Engineering, vol. 5, No. 2 (February), pp. 123-137. Available from: https://www.researchgate.net/publication/314118166_Design_of_Fruits_Solar_Energy_Dryer_under_Climatic_Condition_in_Jordan.

Bahnasawy, A.H. and Shenana, M.E. (2004) A mathematical model of direct sun and solar drying of some fermented dairy products (Kishk). Journal of Food Engineering, vol. 61 (2004), pp. 309-319. Available from: https://www.academia.edu/8271400/A_mathematical_model_of_direct_sun_and_solar_drying_of_some_fermented_dairy_products_Kishk_.

Eke, Ben Akachukwu (2013). Development of Small Scale Direct Mode Natural Convection Solar Dryer for Tomato, Okra, and Carrot. International Journal of Engineering and Technology, vol. 3, No. 2 (February), pp. 199-204. Available from: http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.670.2699&rep=rep1&type=pdf.

Food and Agriculture Organization (FAO) (2018) Technologies and Practices for Small Agricultural Producers: Producing solar dried fruit and vegetables for micro- and small-scale rural enterprise development: processing aspects. Available from: https://teca.apps.fao.org/teca/en/technologies/4503.

Food and Agriculture Organization (FAO) (2020) Technologies and Practices for Small Agricultural Producers: Labour saving technologies and practices: solar drying equipment, Available from: http://www.fao.org/teca/en/technologies/7319.

Hussein, J.B., Hassan, M.A., Kareem, S.A. and Filli, K.B (2017). Design, Construction and Testing of a Hybrid Photovoltaic (PV) Solar Dryer. International Journal of Engineering Research & Science (IJOER), vol.3, No.5 (May), pp. 1-14. Available from: https://www.researchgate.net/publication/317266725_Design_Construction_and_Testing_of_a_Hybrid_Photovoltaic_PV_Solar_Dryer.

Patil, Rajendra, and Gawande, Rupesh (2016). Comparative Analysis of Cabinet Solar Dryer in Natural and Forced Convection Mode for Tomatoes. International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI), vol. 3, No. 7 (July), pp. 49-52. Available from: https://www.researchgate.net/publication/319464503_Comparative_Analysis_of_Cabinet_Solar_Dryer_in_Natural_and_Forced_Convection_mode_for_tomatoes.

Patil, Rajendra, and Gawande, Rupesh (2018). Energetic Analysis of Solar Tunnel Greenhouse Drying for Tomato. International Journal for Research in Engineering Application & Management (IJREAM), special Issue: 6th International Conference on Recent Trends in Engineering & Technology (ICRTET - 2018), pp. 609-613. Maharashtra, India. Available from: https://www.researchgate.net/publication/338357416_Energetic_Analysis_of_Solar_Tunnel_Greenhouse_Drying_For_Tomato.

Prakash, Om, and Kumar, Anil. (2013) Historical Review and Recent Trends in Solar Drying Systems, International Journal of Green Energy, vol. 10, No.7, pp. 690-738, Available from https://www.researchgate.net/publication/262864695_Historical_Review_and_Recent_Trends_in_Solar_Drying_Systems.

Sallam, Y.I., Aly, M.H., Nassar, A.F., Mohamed, E.A. (2015). Solar drying of whole mint plant under natural and forced convection. Journal of Advanced Research, vol. 6, No.2, pp. 171–178. Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2090123213001458#!.

Sontakke M., and Salve S. (2015) Solar Drying Technologies: A review. International Refereed Journal of Engineering and Science (IRJES), vol. 4, No. 4 (April), pp.29-35. Available from: http://www.irjes.com/Papers/vol4-issue4/E442935.pdf.

Tashtosh, Ghassan M., Jaradat, Mohammad, Zuraiakt, Shadi, Aljarah, Mohamad (2014). A Mathematical Model of Indirect Solar Drying of Dairy Products (Jameed). Energy and Environmental Engineering, vol. 2, No. 1, pp. 1-13. Available from: http://www.hrpub.org/download/20131215/EEE1-14500557.pdf.

Tiwari, Anupam (2016) A Review on Solar Drying of Agricultural Produce. Journal of Food Processing & Technology, vol. 7, No. 9. Available from: https://www.longdom.org/open-access/a-review-on-solar-drying-of-agricultural-produce-2157-7110-1000623.pdf.

Udomkun, Patchimaporn; Romuli, Sebastian; Schock, Steffen; Busarakorn, Mahayothee; Sartas, Murat; Wossen, Tesfamicheal; Njukwe, Emmanuel; Vanlauwe Bernard; Müller, Joachim (2020). Review of solar dryers for agricultural products in Asia and Africa: An innovation landscape approach, Journal of Environmental Management, vol. 268 (August). Available from: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479720306629?via%3Dihub.

University of Georgia Cooperative Extension Service (ND). Preserving food: Drying Fruits and Vegetables. Harrison, Judy A. and Andress, Elizabeth L., eds. Available from: https://nchfp.uga.edu/publications/uga/uga_dry_fruit.pdf.

Visavale, Ganesh., (2012). Principles, Classification, and Selection of Solar Dryers. In Solar drying: Fundamentals, Applications and Innovations, Ching Lik Hii, Sachin Vinayak Jangam, Sze Pheng Ong and Arun Sadashiv Mujumdar, eds., Singapore, pp. 1-50 Available from https://www.researchgate.net/publication/264510127_Principles_Classification_and_Selection_of_Solar_Dryers.

21-00579