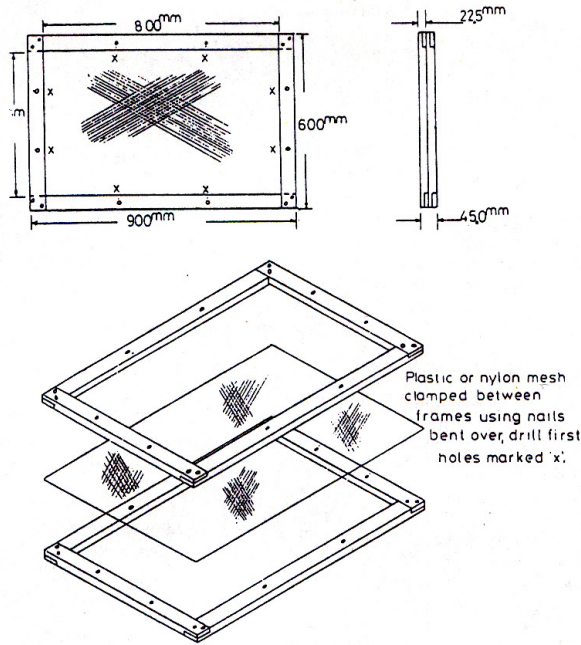


الفصل الثالث

التجفيف بالطاقة الشمسية Solar Drying

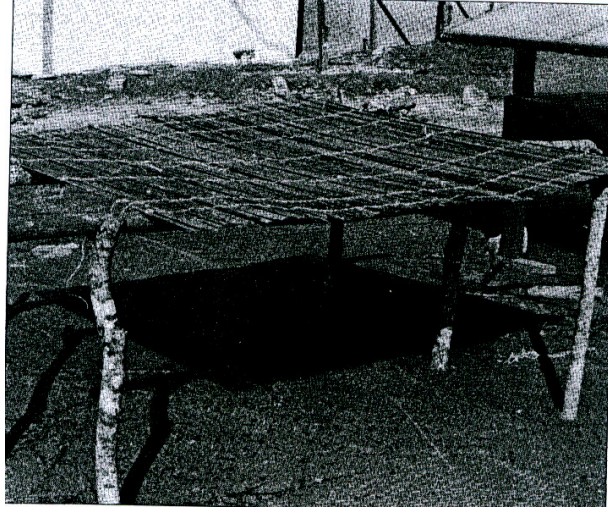
التجفيف الشمسي الطبيعي Natural Sun Drying

تعد عملية التجفيف الشمسي الطبيعي من اقدم طرائق الحفظ التي عرفها الإنسان واستعملها سكان البلاد العربية لتجفيف الفواكه ويحتاج التجفيف الشمسي الطبيعي الى مناطق تتوفر فيها درجات الحرارة العالية والرطوبة الواطئة وخالية من الامطار خلال مدة التجفيف، وأحد البلدان المعروفة في هذا الميدان هو العراق حيث تجفف بهذه الطريقة انواع مختلفة من الفواكه والخضر . تتم هذه الطريقة بفرش الغذاء على صواني او قماش او على سطوح شكل (1-3) وتبقى معرضة للشمس مع التقلبات لحين الجفاف . او قد تعرض للشمس لمدة يوم او يومين ثم توضع على شكل اكداش في الظل لتجف .عندما يتم التجفيف في الظل فان الاغذية يتحسن لونها ويكون زاهي مقارنة مع التجفيف تحت اشعة الشمس المباشرة.



شكل (1-3): سطوح التجفيف.

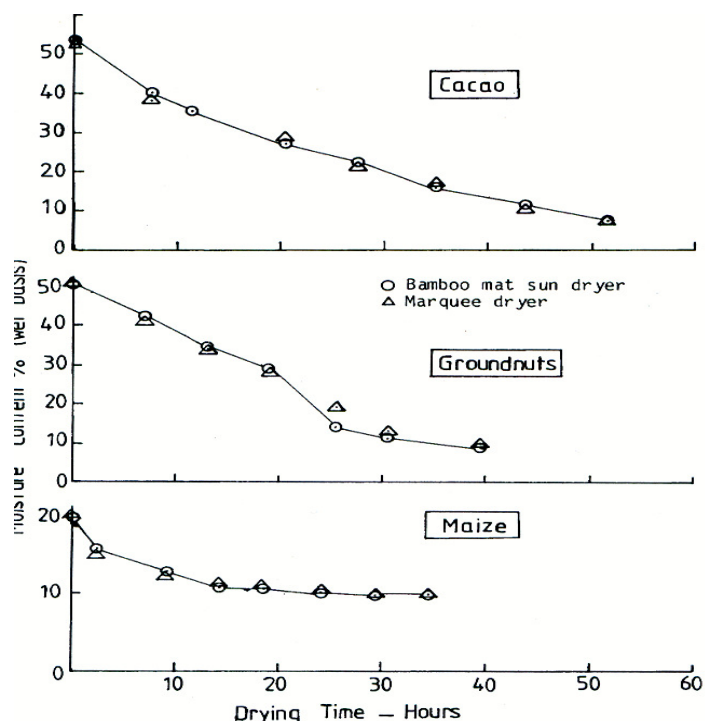
وهناك انواع اخرى من سطوح التجفيف مثل تلك المصنوعة من الخيزران شكل (2-3) او من السمنت او من صفيحة مضلعة من الالمنيوم وتكون مرتفعة عن الارض ويسمى ايضا بالمجفف الشمسي التقليدي *Traditional Sun Drying* وفيه يتعرض الغذاء الى الاشعاع الشمسي المباشر كما ان الظروف البيئية تتحكم بعملية التجفيف، ويوضح جدول (1-3) كفاءة المجففات الشمسية التقليدية المختلفة عند درجات حرارة تتراوح بين 23 - 35 °م ورطوبة نسبية من 50 - 100% ومعدل طاقة اشعاع شمسي من 3.5 - 4.1 كيلو واط/م² يوم وعدد ساعات الشروق للشمس 3 - 6 ساعة/يوم ان طرائق التجفيف لها نفس الكفاءة تقريبا . لاتعد الكفاءة كعامل محدد لاختيار نوع سطح التجفيف وانما من خلاله يمكن معرفة البديل اعتمادا على التكاليف ومدى توفر المواد في الاسواق . وحتى لو ان سطوح التجفيف غطيت بغطاء بلاستيكي فانها سوف لاتؤدي الى زيادة معدلات التجفيف بالرغم من ان درجات الحرارة فيها اعلى من درجات الحرارة في الجو ، الا ان الرطوبة النسبية تكون فيها عالية وخصوصا في المراحل المبكرة من التجفيف. كما يوضح شكل (3-3) انخفاض الرطوبة مع الزمن عند استخدام التجفيف الطبيعي.



شكل (2-3): سطح التجفيف المصنوع من الخيزران. Minka, 2000.

جدول (3-1): الكفاءة لأنواع مختلفة من اسطح التجفيف.

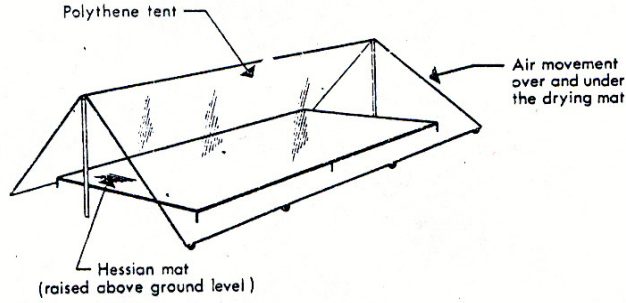
الكفاءة %		انواع اسطح التجفيف
باستعمال رفوف	بدون رفوف	
14.50	15.00	الخيزران
15.00	14.00	السمنت
14.00	13.50	صفيحة المنيومية مضلعة



شكل (3-3): تغير الرطوبة مع الزمن لأغذية مختلفة.

نظرا لتعرض المواد المجففة بالشمس الى التغيرات والظروف الجوية المختلفة والتلوث بالأحياء المجهرية و الغبار والحشرات مما يؤدي الى خفض قيمتها الغذائية وتحتاج هذه العملية الى مساحة كبيرة وزمن طويل نسبيا للتجفيف ، هذا الامر ادى الى عدم استغلالها اقتصاديا وعلى نطاق واسع. بالاضافة الى ذلك فان الامطار ممكن ان تفشل عملية التجفيف بالكامل وتتعدم السيطرة عليها.

هنالك طريقة اخرى للتجفيف الشمسي الطبيعي وهي استخدام هيكل يشبه الخيمة ومغطى بالبولي اثيلين الشفاف من الاعلى ومفتوح من الاسفل والجانبين الاخرين. كما في شكل (3-4).



شكل (3-4): مجفف طبيعي ذو هيكل يشبه الخيمة مفتوح من الجوانب.

المجففات الشمسية Solar Dryers

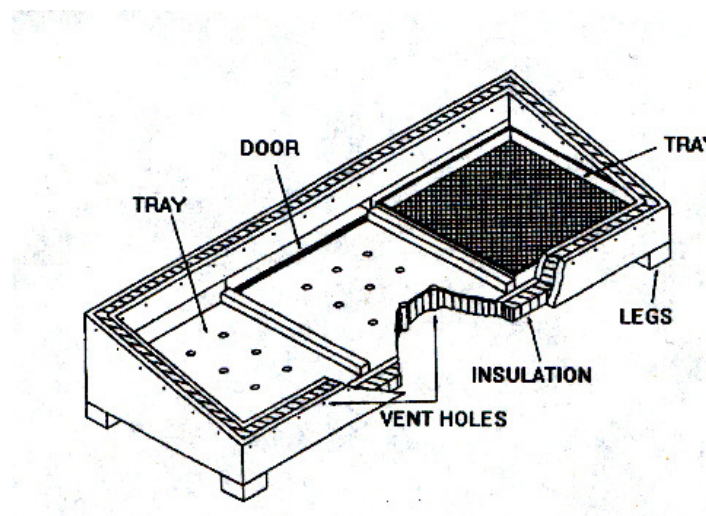
إن التجفيف بالطاقة الشمسية هو عبارة عن تقنية الاستفادة من طاقة الاشعاع الشمسي وذلك بتحويلها الى طاقة حرارية باستخدام مجمع شمسي *Solar Collector* وتكون المجففات الشمسية على نوعين هما :

1- مجففات شمسية ذات حمل طبيعي *Natural convection solar dryers*

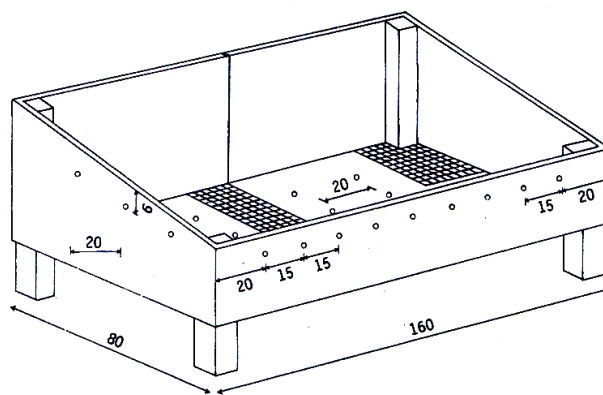
وهذه المجففات تكون على نوعين هما :

أ- المجففات الشمسية المباشرة: *Direct Solar Dryers*

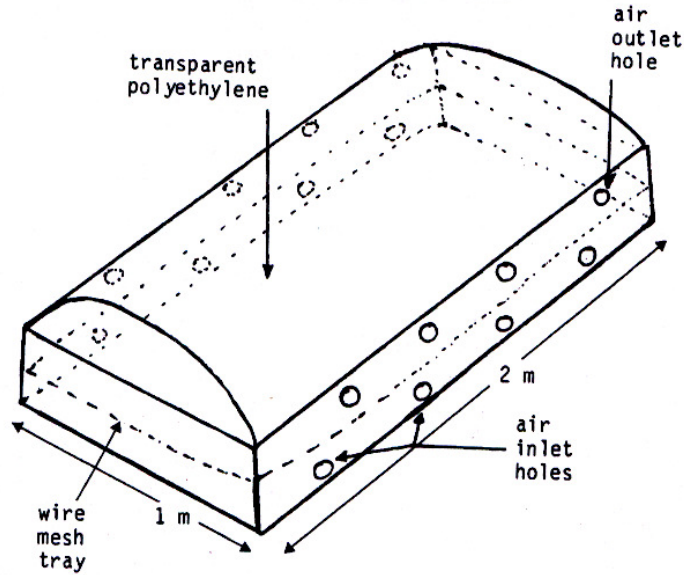
فيها يكون المجمع الشمسي وغرفة التجفيف وحدة واحدة وتتعرض المواد الغذائية الى الاشعاع الشمسي مباشرة وهذا النوع من المجففات هو عبارة عن صندوق خشبي معزول من القاعدة والجوانب ومغلق من الاعلى بلوح زجاجي يميل بزاوية معينة بحسب الموقع الجغرافي للمنطقة ، يتم عمل فتحات في القاعدة لتسمح للهواء البارد بالدخول الى المجفف وكذلك فتحات تحت اللوح الزجاجي لخروج بخار الماء. كما هو موضح في الأشكال (3-5) و (3-6) و (3-7).



شكل (3-5): مكونات المجفف الشمسي المباشر.

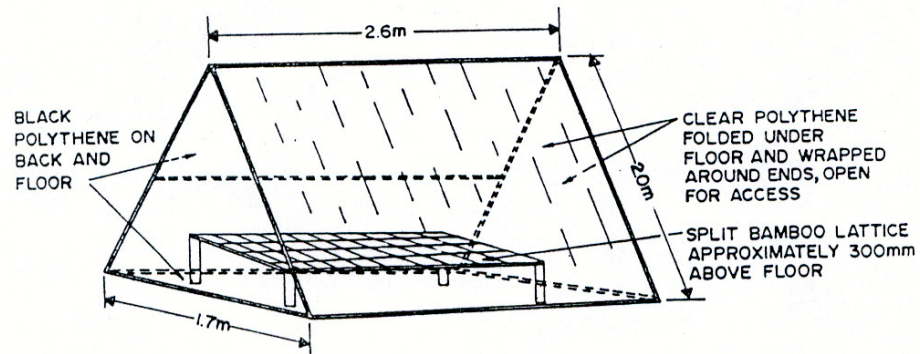


شكل (3-6): أبعاد المجفف الشمسي المباشر.



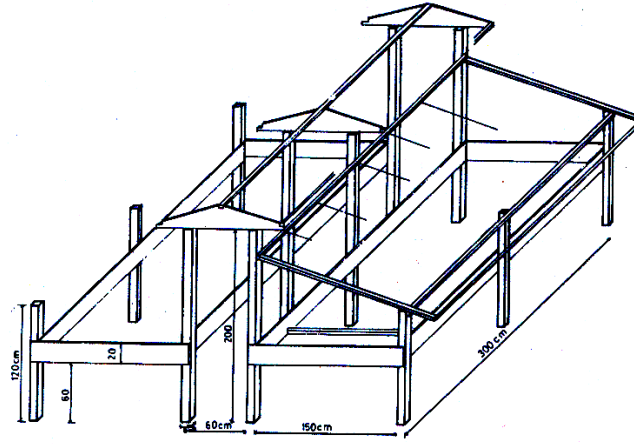
شكل (3-7): مجفف شمسي مباشر ذو غطاء شفاف مقوس.

هنالك نوع آخر من المجففات الشمسية هو مجفف الخيمة الشمسية *Solar Tent Dryer* يتكون من هيكل خشبي يشبه الخيمة مغطى بالبولي اثيلين الشفاف ويحتوي بداخله على مصطبة توضع عليها الاغذية المراد تجفيفها وفيها يتعرض الغذاء إلى أشعة الشمس المباشرة كما في شكل (3-8).



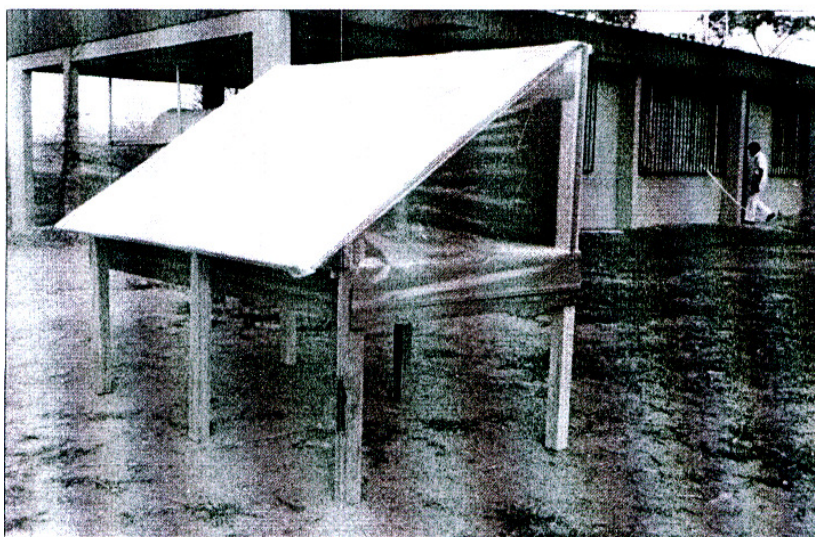
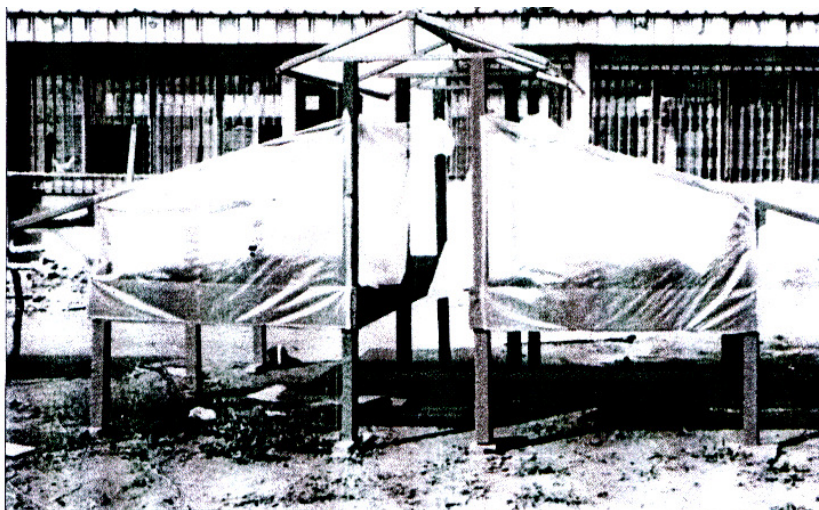
شكل (3-8): مجفف الخيمة المباشر.

هنالك نوع آخر من مجففات الخيمة *marquee Dryers* يتكون من هيكل مغطى بغطاء شفاف بحيث ان الاشعاع الشمسي يصل الى الغذاء وبنفس الوقت يحمي الغذاء من الامطار والغبار شكل (3-9) و (3-10) هذا الهيكل مجزأ إلى جزئين وكل واحد منهما تتم فيه عملية تجفيف الاغذية وهما متوازيان ومرتفعان عن الأرض ويغطيها من المركز غطاء شفاف اخر ومرتفع عنهما ، سطوح التجفيف مصنوعة من أسلاك منسوجة مع بعضها تشبه المنخل أو من الخيزران أو صفيحة من الألمنيوم المضلع ، ويمر الهواء أسفل وأعلى الرفوف.

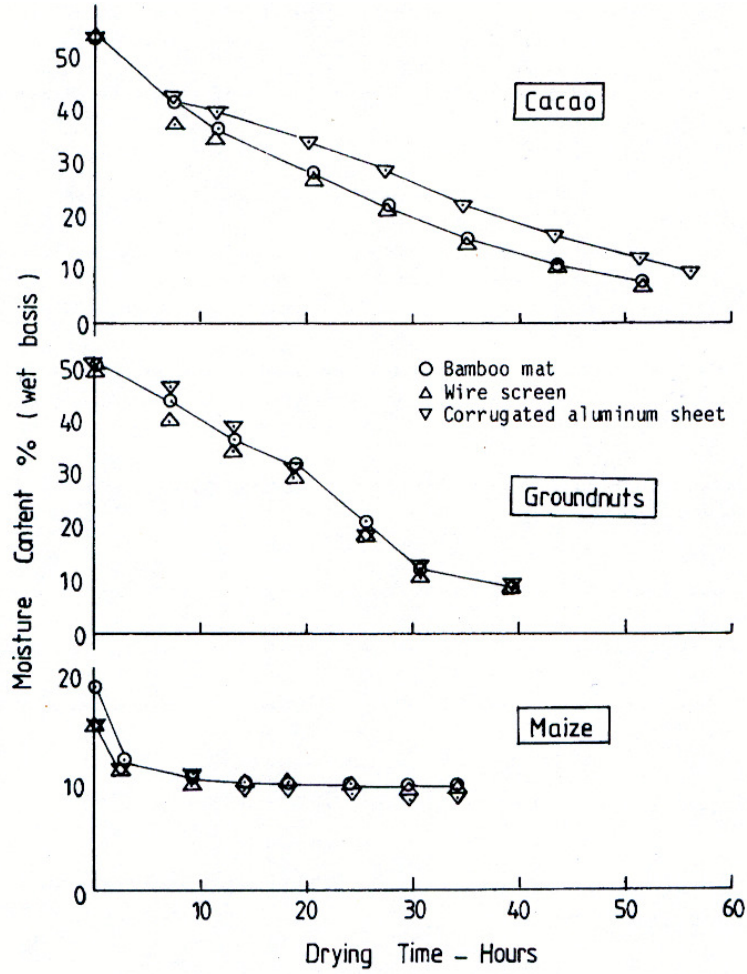


شكل (3-9): نوع آخر من مجفف الخيمة.

ان الاختلافات بمعدلات التجفيف للكاكاو وحب العزيز *Groundnuts* والذرة المجففة بمجفف الخيمة عند استعمال سطوح تجفيف مختلفة وهي الخيزران والقماش السلكي والصفيحة الألمنيومية المضلعة كانت معنوية ، من الواضح ان صفيحة الألمنيوم لاتسمح ببزل الماء من الكاكاو مقارنة مع لخيزران والقماش السلكي ويكون التجفيف عندها اقل كما ان الخيزران لا يختلف معنويا عن القماش السلكي في عملية التجفيف. شكل (3-11).

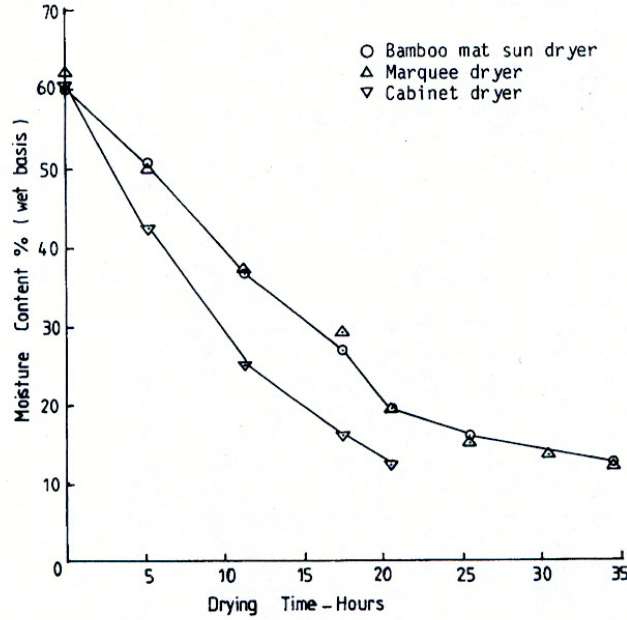


شكل (10-3): صورتان فوتوغرافيتان لمجفف الخيمة. (Minka,2000).



شكل (3-11) : استعمال أسطح تجفيف مختلفة لأغذية مختلفة.

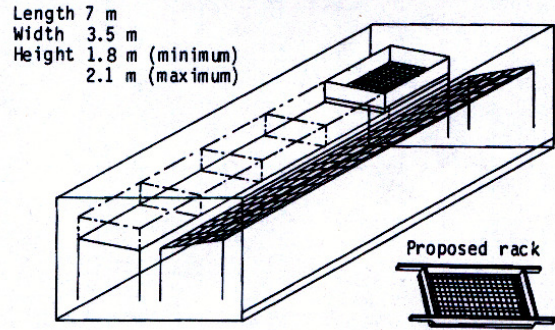
عند مقارنة اداء المجفف الشمسي الصندوقي *Cabinet Solar Dryer* مع مجفف الخيمة والمجفف الشمسي الخيزران وجد ان معدل تجفيف موز الجنة *Plantain* كان اعلى في حالة استعمال المجفف الشمسي الصندوقي من الطريقتين الاخرتين شكل (3-12) ، ووصلت درجة الحرارة في المجفف الشمسي الى 20 - 30 °م فوق درجة حرارة الجو، ولهذا فان هذا المجفف مفيد في تجفيف الأغذية المختلفة



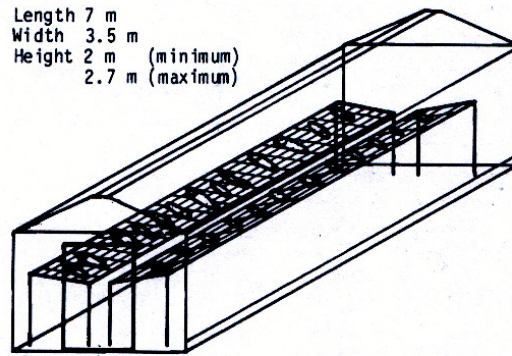
شكل (12-3): انخفاض الرطوبة مع الزمن عند استخدام طرائق تجفيف مختلفة.

تستخدم مجففات شمسية مباشرة كبيرة لتجفيف الاسماك وهي على ثلاثة انواع هي *Brace Type* و *House Type* و *Do Dryer* شكل (13-3). ان مجفف القبة وفيه تعلق الأسماك لكي تجف . وطريقة عمل هذه المجففات هي ان الاشعة الشمسية تخترق البولي اثيلين الشفاف وتسقط على السمك ويقوم الاخير بامتصاص هذه الاشعة.

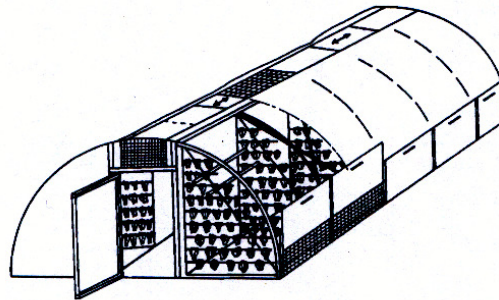
إن المجفف نوع القبة يصنع من المعدن واما البقية فتصنع من الخشب ، الشعاع الشمسي يمر خلال البولي اثيلين بطول موجي 180 مايكرومتر الى الغرفة التي بداخلها البولي اثيلين الأسود وبيعت اشعة حرارية بطول موجي 300 – 350 مايكرومتر . الحرارة تبقى داخل غرفة التجفيف وتنتقل الى الهواء الذي بداخلها بواسطة التوصيل والإشعاع ولكنه ينتقل بصورة رئيسية بواسطة الحمل ، الهواء سوف يتمدد داخل غرفة التجفيف ويصبح محمل بالرطوبة من الأسماك ويخرج إلى الخارج . فتحة التهوية يجب ان تغلق في الليل لكي لا تحصل حالة إعادة الترطيب في المنتج .



Drying racks in the Brace-type solar dryer.



8. Solar house dryer.

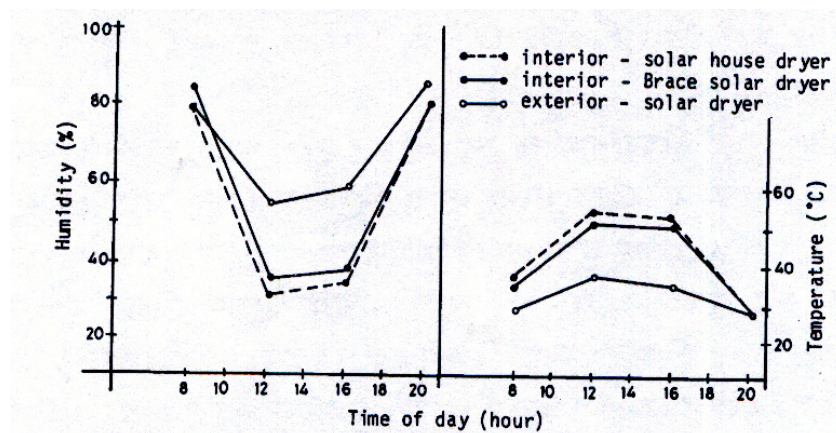


شكل (3-13): انواع مختلفة من مجففات الاسماك الشمسية

المباشرة. (Diof,1987)

يلاحظ من الشكل (3-14) إن درجة الحرارة في المجففات المختلفة متغيرة مع ساعات النهار وبلغت اقصى قيمة لها 53 °م و اقل قيمة لها 28 °م خلال شهري

شباط وايار ، بينما الرطوبة النسبية داخل المجففات فقد كانت متغيرة بين 84 و 33% عندما درجة حرارة الجو تراوحت بين 37 و 28 °م ورطوبة نسبية للجو تراوحت بين 48 و 55 % عند شدة اشعاع شمسي 15 ميكا جول/م² .
ان هواء التجفيف في المجففات كانت سرعته حوالي 25% من سرعته في الجو كما هو واضح في الجدول (3-2).

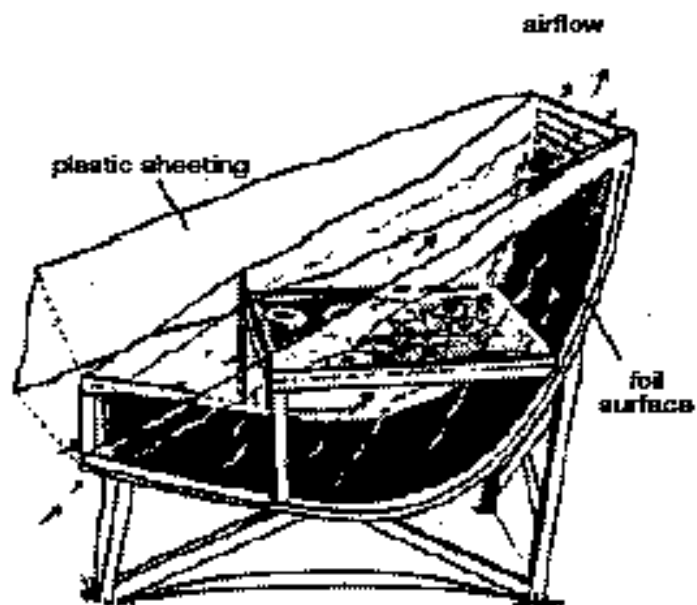


شكل (3-14): درجة الحرارة والرطوبة في المجففات الشمسية.

جدول (3-2): سرعة الرياح في الجو والمجفف الشمسي خلال ساعات النهار.

سرعة الهواء في المجفف (م/ثا)		سرعة الرياح في الجو (م/ثا)	ساعات النهار
الهواء الخارج	الهواء الداخل		
0.90	3.05	3.90	800
0.80	2.88	3.20	1200
1.20	3.90	4.54	1600
0.86	2.87	3.80	1800

وهناك نوع اخر وهو عبارة عن قناة منحنية مبطنة بطبقة رقيقة من معدن لماع Foil Surface ، ويحتوي بداخله على رف يوضع عليه الغذاء والمجفف مغطى بغطاء بلاستيكي شفاف وكما في شكل (3-15).



شكل (3-15) : مجفف شمسي مباشر ذو قناة منحنية.

المجفف الشمسي الشبه مختلط

تركيبه وطريقة عمله :

يتكون هذا المجفف كما في شكل (16-3) من هيكل خشبي طوله 76 سم وعرضه 20.5 سم وارتفاعه 10 سم وسمكه 2.5 سم يحتوي على مادة عازلة من الصوف سمكها 2.5 سم ثم حوض مصنوع من الحديد المطاوع سمك 0.1 سم طوله 70.5 سم وعمقه 4.8 سم استنادا الى نتيجة المعادلة (1) لونه اسود وغير لماع في حافته العلوية حشوة مانعة لتسرب الهواء يوضع في هذا الحوض التمر المراد تجفيفه . وطاقته الاستيعابية 6 كغم من التمر .

توجد اسلاك امتصاص معدنية سوداء على بعد 5 سم من قاع الحوض تعمل على امتصاص طاقة الإشعاع الشمسي وتسخين الهواء الملامس لها وتظليل الغذاء الموجود في الحوض من اشعة الشمس ثم وضع غطاء زجاجي سمك 0.6 سم على بعد 7.5 سم من اسلاك الامتصاص ثم وضع غطاء بلاستيكي شفاف على بعد 5 سم من الغطاء الزجاجي وهذا لغرض تقليل فقدان الحرارة العلوي من المجفف حيث تكون هنالك فجوة هوائية معزولة بينهما . يوجد هنالك نابض يلتف حول المجفف ويقوم بكبس الغطاءين البلاستيكي والزجاجي على الحوض بصورة محكمة .

وضع المجفف على هيكل حديدي مزود بثلاث مفاصل بحيث يمكن تغيير زاوية ميله حسب خطوط العرض للمنطقة التي يستعمل بها .

زود هذا المجفف بمجمع شمسي انبوبي لسحب الهواء من الجو وتسخينه وهو مكون من انبوب من الحديد المغلوق ذو لون اسود غير لماع طوله 40 سم محاط بالخشب الصاج سمك 2.5 سم من ثلاث جوانب ومن المقدمة والمؤخرة وغطائين زجاجيين سمك الواحدة منهما 0.3 سم فوق الانبوب ومزود بغطاء بلاستيكي لغرض منع دخول الهواء الى المجفف اثناء الليل وكذلك الحشرات

ويحتوي هذا المجفف على مدخنة تعمل على سحب الهواء المحمل بالرطوبة

من المجفف الشمسي الى الخارج طولها 1 م وقطرها 1.25 سم

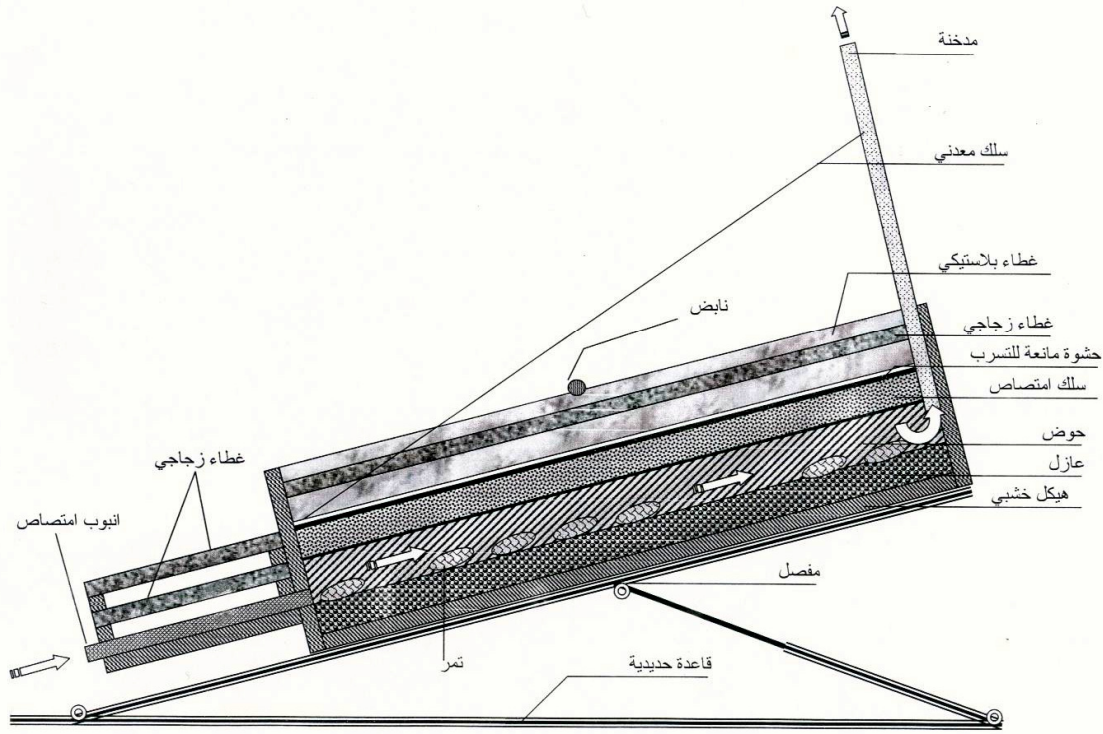
عندما يراد تجفيف التمر فإنه يوضع في الحوض ويعاد كبس الغطاء البلاستيكي والزجاجي بواسطة النابض وبشكل محكم بحيث يمنع تسرب الهواء من وإلى المجفف ثم يوضع المجفف بزاوية 20 درجة صيفاً أو 40 درجة شتاءً ويوجهه باتجاه الجنوب .

عندما يسقط الاشعاع الشمسي على الغطاء البلاستيكي فإن جزء كبير منه سينفذ على الغطاء الزجاجي ثم ينفذ وتمتصه اسلاك الامتصاص المعدنية وقسم منه يمتصه الحوض فيؤدي الى تسخين الحوض والتمر معا وبالوقت نفسه فإن المجمع الشمسي الانبوبي الموجود في المقدمة سوف يسخن الهواء بفعل طاقة الاشعاع الشمسي الساقطة عليها مما تؤدي الى تسخين الهواء الموجود في الانبوب وتقل كثافته ويزداد حجمه ويتحرك بسرعة الى داخل المجفف وتزداد حركة الهواء الداخل مع زيادة طاقة الاشعاع الشمسي .



شكل (16-3): صورة فوتوغرافية للمجفف الشمسي الشبيه مختلط.

مختلط.(الحلفي ، 2007)



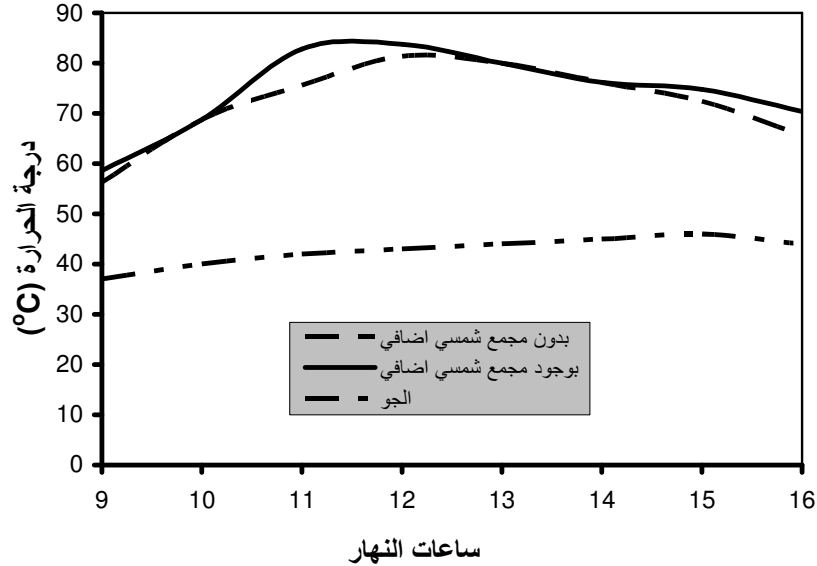
شكل (3-17): مقطع رأسي للمجفف الشمسي الشبه مختلط.

اداء المجفف الشمسي

يوضح الشكل (3-18) ان درجة الحرارة في المجفف الشمسي المزود بمجمع انبوبي وبدونه ازدادت مع زيادة ساعات النهار ووصلت الى اقصى قيمة لها عند منتصف النهار وبلغت 83 و 81 °م على التوالي ، وهذا بسبب تغير طاقة الاشعاع الشمسي الساقطة على المجفف الشمسي مع ساعات النهار ، اذ تؤدي الى رفع درجة الحرارة في المجفف الشمسي بسبب زيادة الطاقة الممتصة والطاقة المنتزعة مع زيادة ساعات النهار .

كما نلاحظ من الشكل نفسه ان درجة الحرارة في المجفف الشمسي المضاف اليه مجمع انبوبي صغير كانت اعلى منها عند عدم إضافته ، وهذا يعود الى ان الاخير يؤدي الى تسخين اولي للهواء المار من خلاله الى المجفف الشمسي مما يؤدي الى

رفع درجة حرارته .ان المجمع الانبوبي الصغير يعمل على التعجيل في رفع درجة حرارة الهواء الداخل الى المجفف الشمسي خلال ساعات النهار الاولى (9 و 10 و 11) اذ كانت درجات الحرارة بدون وبوجود المجمع الانبوبي خلال تلك الساعات هي (56 ، 68 ، 75 °م) و(58.6 ، 69 ، 82.8 °م) على التوالي .



شكل (3-18) معدل درجة الحرارة في المجفف الشمسي وفي الجو لشهر ايلول 2006.

حساب رطوبة التمر مع الزمن :

في هذه الحالة لابد من حساب قيمة ثابت التجفيف نظريا وكالاتي:

$$x_{t+1} = x_e + (x_t - x_e) \exp(-k\Delta t) \dots \dots \dots (3-1)$$

x_{t+1} : المحتوى الرطوبي للتمر عند مرور زمن معين ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg solid}$)

x_e : المحتوى الرطوبي المتوازن ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg solid}$)

x_t : المحتوى الرطوبي للتمر عند فقد كم معين من الرطوبة ($\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg solid}$)

يلاحظ من الشكل (5-19) ان رطوبة التمر تنخفض مع زيادة زمن التجفيف في حالة استعمال المجفف الشمسي والتجفيف الشمسي الطبيعي والقيم المحسوبة الا انه

كان مقدار الانخفاض في القيم المحسوبة اعلى منه عند استعمال المجفف الشمسي والتجفيف الشمسي الطبيعي .

، وهذا يعود الى ان القيم المحسوبة تعتمد على معادلات نظرية تفترض عدم وجود معوقات في التمر اثناء التجفيف مثل وجود طبقة تمنع تبخر الماء بسهولة من التمر ووجود السكريات والاملاح وهذه العوامل تعمل على اعاقا تبخر الماء من التمر اثناء عملية التجفيف

كما نلاحظ من النتائج ان مقدار الانخفاض بالرطوبة عند استعمال المجفف الشمسي كان اعلى بكثير منه عند استعمال التجفيف الشمسي الطبيعي ، وهذا يعود الى تعرض التمر المجفف بالتجفيف الشمسي الطبيعي الى التغيرات في الظروف البيئية مثل انخفاض درجة حرارة الجو وزيادة الرطوبة النسبية للهواء وهذا يؤدي الى اعادة امتصاص الرطوبة من الجو وخصوصا اثناء مدة الليل والمحسوبة من خلال المعادلة الاتية:

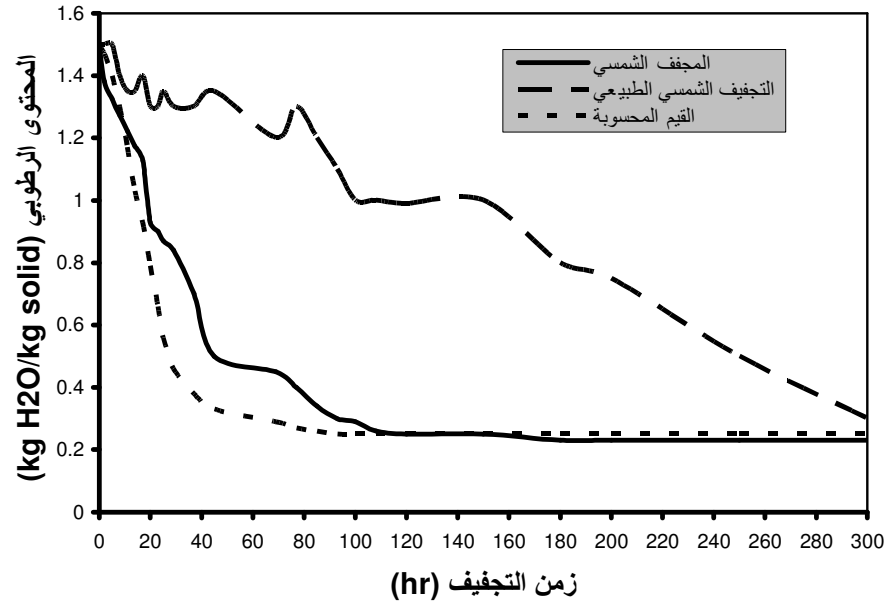
$$R_a = [(x_{sr} - x_{ss}) / x_{ss}] \times 100 \dots \dots \dots (3-2)$$

حيث:

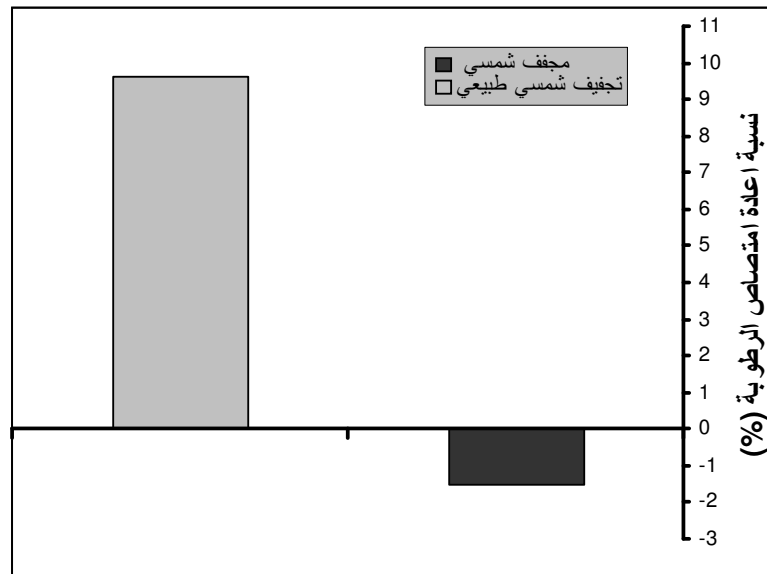
x_{sr} : نسبة الرطوبة في التمر عند شروق الشمس (%)

x_{ss} : نسبة الرطوبة في التمر عند غروب الشمس (%)

فقد اوضحت النتائج المبينة في شكل (20-3) ان استعمال التجفيف الشمسي الطبيعي ادى الى زيادة معدل نسبة اعادة امتصاص الرطوبة من الجو بشكل كبير اذ بلغت 9.6 % ، بينما عند استعمال المجفف الشمسي فأن قيمة معدل معامل امتصاص الرطوبة كانت سالبة وبلغت -1.5 % وهذا يشير الى انه يحصل هنالك فقد في رطوبة التمر بسبب ان المجفف الشمسي يحافظ على التمر من التعرض للظروف البيئية وخصوصا خلال مدة الليل وتبقى فيه طاقة حرارية مخزونة تؤدي الى تبخر كمية من الرطوبة .



شكل (3-19) المحتوى الرطوبي. المحسوب والمقاس في المجفف الشمسي والتجفيف الشمسي الطبيعي.



شكل (3-20) نسبة اعادة امتصاص الرطوبة في التمر اثناء تجفيفه بالمجفف الشمسي والتجفيف الشمسي الطبيعي.

يلاحظ من الشكل (3-21) ان كفاءة التجفيف اليومية المحسوبة والمقاسة في التمر اثناء تجفيفه بالمجفف الشمسي والتجفيف الشمسي الطبيعي من المعادلة الاتية:

$$\eta_{da} = \frac{(x_t - x_f)w\lambda / (x_1 + 1)}{I_{Ta}A_C t_a} \times 100 \dots \dots \dots (3-4)$$

η_{da} : كفاءة التجفيف اليومية (%).

I_{Ta} : طاقة الاشعاع الشمسي المقاسة (واط/م²)

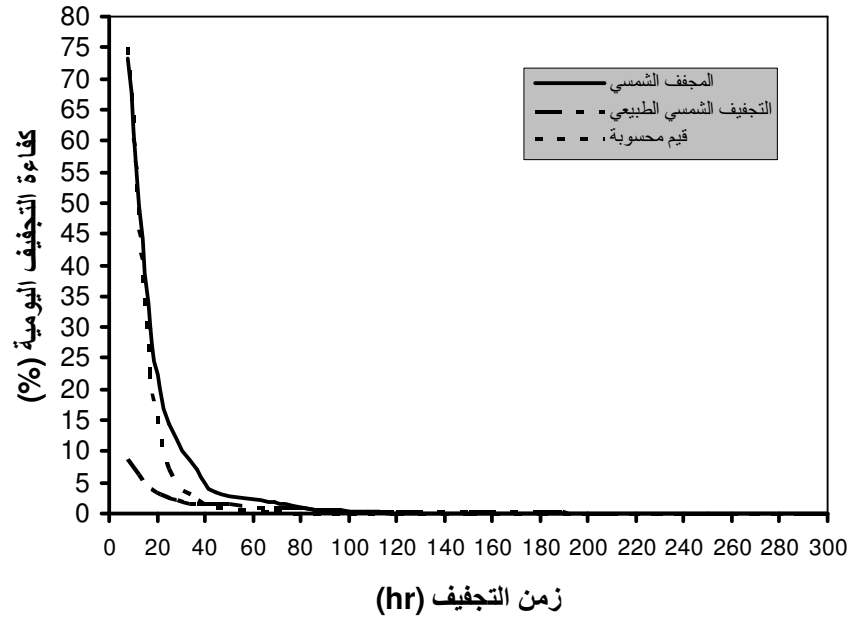
t_a : زمن التجفيف المقاس .(ثانية)

قد انخفضت مع زيادة زمن التجفيف ، ويكون الانخفاض على اشدّه عند الساعات من 0-30 ساعة في حالة استعمال المجفف الشمسي والقيم المحسوبة . وذلك لانه في الساعات الاولى من التجفيف تحدث عملية التبخر الثابت ويتبخر الماء الحر الموجود قرب السطح بسرعة ، اما بعد هذه المرحلة فتبدأ مرحلة التبخر المتنازل ويكون الماء مرتبط وينتقل عن طريق الخاصية الشعرية الى السطح ويواجه مقاومة كبيرة وهذا يتطلب زمن اكبر ولهذا تنخفض كفاءة التجفيف اليومية.

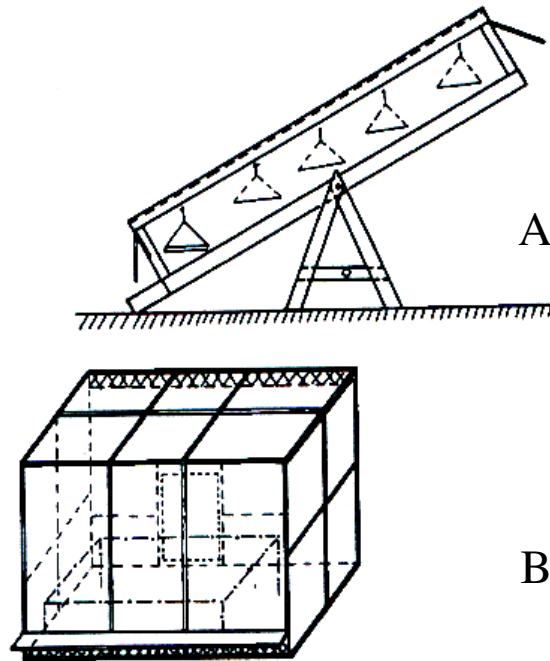
هنالك تصاميم أخرى للمجففات الشمسية المباشرة مثل مجفف تؤست *Toast* –

Type Dryer ومجفف البيت الزجاجي *Greenhouse – Type Dryer* وكما في

شكل (3-22)



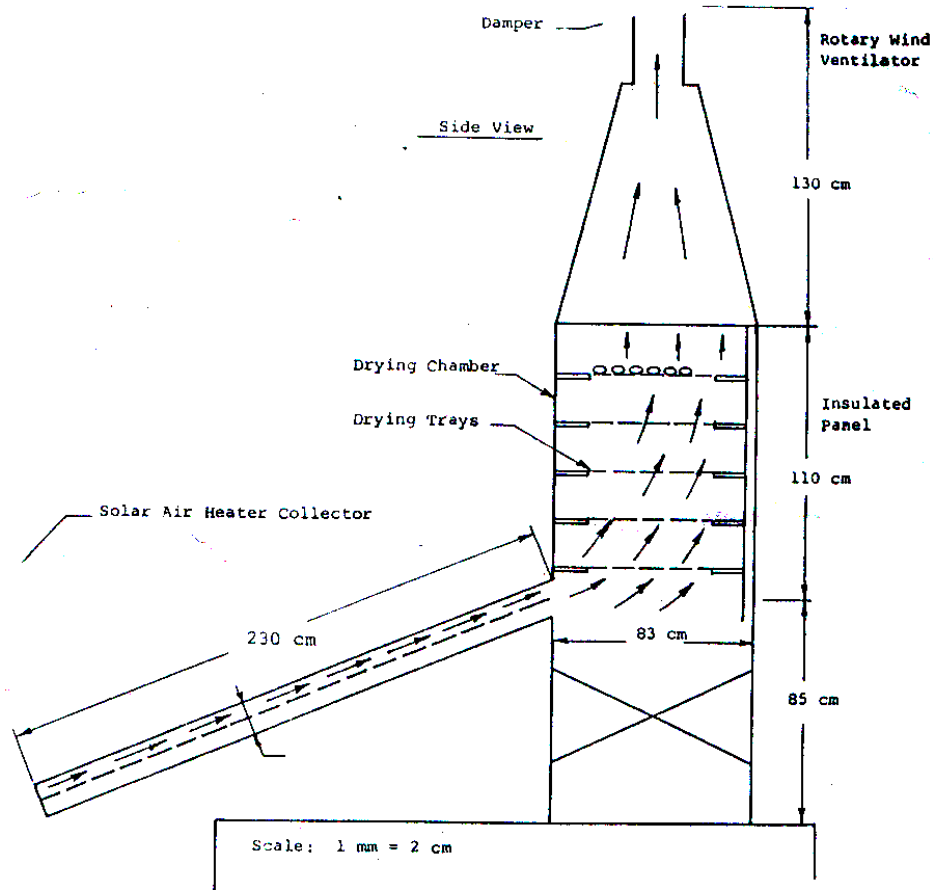
شكل (3-21): كفاءة التجفيف اليومية المحسوبة والمقاسة. في التمر اثناء تجفيفه بالمجفف الشمسي



شكل (3-22): مجففات شمسية مباشرة ، a: مجفف
توست ، b: مجفف البيت الزجاجي.

المجففات الشمسية غير المباشرة Indirect Solar Dryers

وفي هذا النوع يكون المجمع الشمسي منفصل عن غرفة التجفيف التي تنتقل اليها الحرارة من دون تعرض المواد الغذائية الى الاشعاع الشمسي. شكل (3-23) ان المجمع الشمسي هو اداة تجهيز الطاقة الحرارية ، اذ انه نوع خاص من المبادلات الحرارية يقوم بتحويل طاقة الاشعة الشمسية الساقطة الى طاقة حرارية تنتقل بوساطة مائع التشغيل (الهواء) ثم ينتقل بصورة طبيعية الى غرفة التجفيف المحتوية على عدة رفوف مشبكة موضوعة عليها المادة الغذائية فيمر عليها الهواء الساخن ، وتحتوي غرفة التجفيف على فتحة خلفية تسمح بخروج بخار الماء الناتج .



شكل (3-23): مجفف شمسي غير مباشر ذو حمل طبيعي.

هنالك مجفف شمسي مباشر اخر يعمل بالحمل الطبيعي يتكون من جزئين اساسيين هما المجمع الشمسي الذي مساحته 2.4 م² ذي صفيحة امتصاص مضلعة بزاوية 55 درجة مزود بفتحة لدخول الهواء البارد وفتحتين من اعلى جانبيه لخروج الهواء الساخن الى غرفة التجفيف التي تتكون من الهيكل الحديدي (33) شكل (24-3) وهو مصنع من حديد الزاوية من النوع المثقب وارتفاعه 1.96 م وعرضه 0.551 م وطوله 1 م يحتوي على حواجز عرضية عددها اثنان مثبتة على محيطه الخارجي وقاعدة علوية يوضع عليها المجفف واخرى سفلية تستخدم لتثبيت الهيكل على الارض .

الانابيب البلاستيكية

استخدم انبويان بلاستيكيان (10) حيث كل انبوب قطره 0.11 م وطوله 1.581 م وسمكه 0.005 م ومن النوع المرن لغرض نقل الهواء الحار من المجمع الشمسي الى غرفة التجفيف . استخدم عازل من مادة الاسبستوس بسمك 0.02 م لعزل الانابيب عن المحيط الخارجي .

ثبتت هذه الانابيب من احد نهاياتها على جانبي مجرى خروج الهواء من المجمع الشمسي عن طريق تحويله بلاستيكية مبطنة بطبقة معدنية رقيقة ومعزولة من الخارج بالاسبستوس بحيث يمكنه ان يدور بالزاوية المرغوبة .

اما النهايات الاخرى فقد ثبتت على جانبي اسفل غرفة التجفيف بوساطة تحويله بلاستيكية مبطنة بطبقة معدنية رقيقة ومعزولة من الخارج بالاسبستوس .

جدران غرفة التجفيف

صنعت جدران غرفة التجفيف من هياكل خشبية غلفت من الداخل بصفائح خشبية (41) سمك 0.004 م ثم بعدها وضع العازل (40) من مادة الرغوة بسمك 0.025 م وغلفت من الخارج بصفائح خشبية (42) سمكها 0.01 م وطولها 1 م وعرضها 0.55 م من الجوانب وهي مثلثة الشكل من الاعلى . اما من الخلف فقد غلفت بوساطة صفائح خشبية سمكها 0.004 م وطولها 1 م وعرضها 1 م

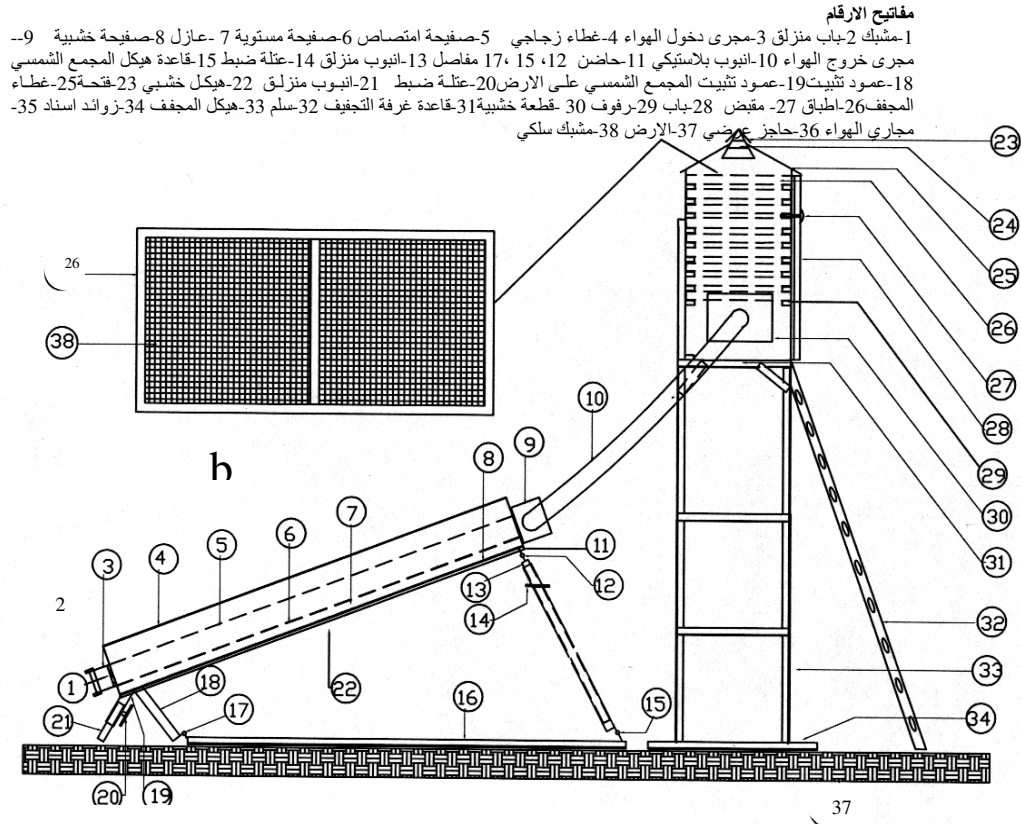
اما باب غرفة التجفيف (28) فقد صنع من هيكل خشبي مغلف من الداخل بصفائح خشبية سمك 0.004 م ثم بعدها وضع العازل من مادة الرغوة ثم غلفت من

الخارج بوساطة صفيحة من معدن الالمنيوم سمك 0.002 م وابعاد هذا الباب هي م 1*1 .

صنعت قاعدة غرفة التجفيف (31) من هيكل خشبي ومغلف من الداخل بصفائح خشبية سمك 0.004 م ثم وضع فيها عازل من مادة الرغوة وبعد ذلك غلفت من الخارج بوساطة صفائح خشبية سمكها 0.004 م . اما الجزء العلوي من غرفة التجفيف فهو بشكل مثلث ابعاده م 0.313*1 ، ومزود من الاعلى بفتحة تهوية (24) طولها 1 م وعرضها 0.025 م ذات غطاء خشبي منزلق (43) يستخدم لغرض غلق غرفة التجفيف اثناء الليل كما في شكل (24-4) و (25-4) ، هذا الجزء مكون أيضا من هيكل خشبي مغلف من الداخل بصفائح خشبية سمكها 0.004 م ووضع بعدها عازل من مادة الرغوة بسمك 0.025 م وغلفت من الخارج بصفائح من الالمنيوم (39) .يحتوي الجزء العلوي على غطاء (23) طول كل جانب منه 0.099 م لغرض حماية غرفة التجفيف من الامطار والاتربة .

الاطباق المشبكة Beds

ان الوظيفة الاساسية لهذه الاطباق (26) هي وضع المادة الغذائية فيها وبما انها مشبكة فسيمر عليها الهواء الحار من جميع الجهات . احتوت غرفة التجفيف على تسعة اطباق مشبكة وضعت بعضها فوق البعض الاخر مستندة على رفوف جانبية (29) تبرز الى الداخل بمسافة قدرها 0.05 م بحيث تمكن الاطباق من التحرك الى الخارج او الداخل من خلال انزلاقها عليها . ابعاد كل طبق هي م 0.5 0.9 * ومثبت عليها من الاسفل مشبك مصنوع من الحديد المقاوم للصدأ *stainless steel* ، وفيه حاجز خشبي من المنتصف.



شكل (24-3): منظر جانبي للمجفف الشمسي.

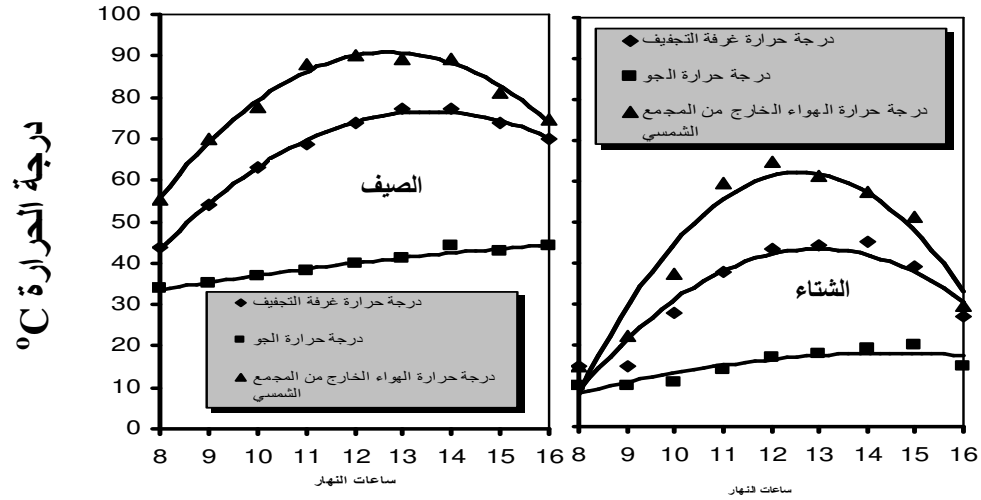


شكل (25-3): صورة فوتوغرافية للمجفف الشمسي الغير المباشر ذو

الحمل الطبيعي. (الحلفي ، 2006)

اداء المجفف الشمسي غير المباشر

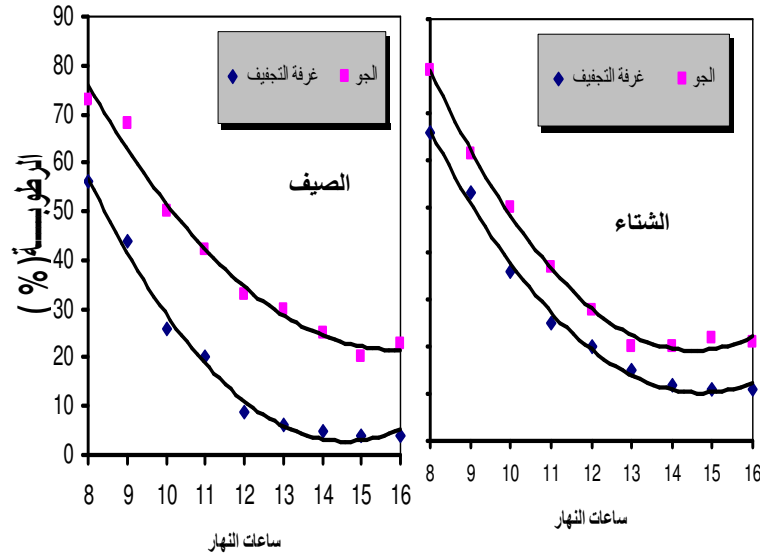
ان درجة الحرارة في غرفة التجفيف قد ازدادت مع زيادة ساعات النهار ووصلت الى أقصى قيمة لها عند الساعة الثانية بعد الظهر ثم بعد ذلك انخفضت حتى وصلت الى اقل قيمة لها عند الساعة الرابعة عصرا وفصلي الشتاء والصيف من عام(2004). ويعزى هذا إلى استمرار انتقال الحرارة الى غرفة التجفيف المعزولة عن المحيط الخارجي وارتفاع درجة الحرارة بداخلها عند الساعة الثانية والثالثة بعد الظهر نتيجة لبقاء صفيحة الامتصاص ساخنة عند هاتين الساعتين اذ تزداد درجة حرارة غرفة التجفيف بسبب حدوث حالة التجميع الحراري فيها شكل (26-3).



شكل (26-3): معدل درجة الحرارة في غرفة التجفيف والجو وللهاواء الخارج من المجمع الشمسي خلال فصلي الشتاء والصيف لعام 2004.

اما الرطوبة النسبية في غرفة التجفيف فقد لوحظ في الشكل (27-3) الذي يبين الرطوبة النسبية في غرفة التجفيف والجو خلال ساعات النهار ولفصلي الشتاء والصيف من عام 2004 ان الرطوبة النسبية في غرفة التجفيف والجو انخفضت مع زيادة ساعات النهار. الا انها في الجو ازدادت عند الساعة الرابعة عصرا . وهذا يعود الى ارتفاع درجة الحرارة في غرفة التجفيف والجو مع زيادة ساعات النهار مما ادى الى انخفاض الرطوبة النسبية . كما يعود السبب في زيادة الرطوبة النسبية عند الساعة الرابعة عصرا في الجو الى انخفاض درجة حرارة الجو وانخفاض طاقة الإشعاع الشمسي بشكل كبير .

كما نلاحظ من الشكل ان مقدار الرطوبة النسبية في غرفة التجفيف هي اقل بكثير منها في الجو وهذا بسبب ارتفاع درجة الحرارة في غرفة التجفيف وزيادة حركة الهواء فيها مما أدى إلى خروج بخار الماء من الفتحة العلوية لغرفة التجفيف . ونلاحظ من الأشكال ايضا ان الاختلافات بين الرطوبة النسبية في الجو وفي غرفة التجفيف ازدادت مع زيادة ساعات النهار



شكل (27-3): معدل الرطوبة النسبية في الجو وفي
غرفة التجفيف خلال فصلي الشتاء والصيف لعام
2004

الطاقة الحرارية المفقودة:

حساب الطاقة الحرارية المفقودة من المجمع الشمسي :

تحدث عملية فقدان الحرارة من جميع جوانب المجفف الشمسي واكبر فقدان حراري يحدث من صفيحة الامتصاص وبأتجاه الاعلى وتحسب كمية الطاقة المفقودة من المعادلة الاتية :

$$Q_L = U_L A_c (T_p - T_a) \dots \dots \dots (3-5)$$

حيث:

Q_L : كمية الطاقة المفقودة من المجمع الشمسي (واط)

U_L : معامل انتقال الحرارة الكلي (واط/م² م⁰)

A_c : مساحة المجمع الشمسي (م²)

T_p : درجة حرارة صفيحة الامتصاص (م⁰)

T_a : درجة حرارة الجو (م⁰)

ويحسب معامل انتقال الحرارة الكلي من المعادلة الاتية :

$$U_L = U_t + U_e + U_b \dots \dots \dots (3-6)$$

$$q_{L-t} = \left[h_{p-t} (T_p - T_g) + \frac{\sigma (T_p^4 - T_g^4)}{\frac{1}{\epsilon_p} + \frac{1}{\epsilon_g} - 1} \right] A \dots \dots \dots (3-7)$$

حيث:

U_t : معامل انتقال الحرارة من السطح العلوي (واط/م² م⁰)

U_e : معامل انتقال الحرارة من الجوانب (واط/م² م⁰)

U_b : معامل انتقال الحرارة من الاسفل (واط/م² م⁰)

يحدث فقدان الحرارة الى الجو من صفيحة الامتصاص بسبب ارتفاع درجة حرارتها بطريقتي الحمل والاشعاع . ولحساب كمية الحرارة المنتقلة من صفيحة الامتصاص عند درجة حرارة T_p الى الغطاء الزجاجي عند درجة حرارة T_g
 q_{L-t} : كمية الحرارة المفقودة من صفيحة الامتصاص الى الغطاء الزجاجي (واط)

h_{p-t} : معامل انتقال الحرارة بالحمل بين صفيحة الامتصاص والغطاء الزجاجي
(واط/م² م⁰)

σ : ثابت Stefan-Boltzmann وقيمه 5.6697*10⁻⁸ (واط/م² كلفن⁴)

ε_p : انبعاثية طلاء صفيحة الامتصاص

ε_g : انبعاثية الغطاء الزجاجي

يحسب h_{p-g} من المعادلة الاتية :

$$h_{p-g} = \frac{N_u k}{L} \dots\dots\dots (3-8)$$

N_u : رقم Nusselt

k : الموصلية الحرارية للهواء (واط/م⁰)

L : سمك الحيز الهوائي (م)

يحسب رقم نسلت من المعادلة الاتية:

$$N_u = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{R_a \cos \beta} \right]^+ \left[1 - \frac{(\sin 1.8 \beta)^{1.6} 1708}{R_a \cos \beta} + \left(\frac{R_a \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+ \dots\dots\dots (3-9)$$

ويحسب رقم Ralieg من المعادلة الاتية :

$$R_a = \frac{g \beta' \Delta T L^3}{\nu_a \alpha_a} \dots\dots\dots (3-10)$$

حيث ان معامل التمدد الحجمي هو:

$$\beta' = \frac{1}{T_{ag}} \dots\dots\dots (3-11)$$

حيث:

g : التعجيل الارضي (م/ثا²)

β' : معامل التمدد الحجمي للهواء بضغط ثابت (1/كلفن)

ϑ_a : اللزوجة الكاينماتيكية (م²/ثا)

α_a : معامل الانتشارية الحرارية (م²/ثا)

ΔT : الفرق بين درجتي حرارة صفيحة الامتصاص والغطاء الزجاجي (م⁰)

T_{ag} : درجة حرارة الطبقة الهوائية (كلفن)

يحسب مقدار فقدان الحرارة من السطح الخارجي للغطاء الزجاجي الى الجو بالحمل والاشعاع من المعادلة الاتية :

$$q_{L-g} = (h_{r,g-a} + h_w)(T_g - T_a)A_c \dots\dots\dots(3-12)$$

$h_{r,g-a}$: معامل انتقال الحرارة بالاشعاع من السطح الخارجي للغطاء الشفاف عند

درجة حرارة T_g الى الجو عند درجة حرارة T_{sky} ويعطى من المعادلة الاتية :

$$h_{r,g-a} = \varepsilon_g \sigma (T_g^2 - T_{sky}^2)(T_g + T_{sky})A_c \dots\dots\dots(3-13)$$

تحسب درجة حرارة السماء T_{sky} من العلاقة الاتية:

$$T_{sky} = 0.0552T_a^{1.5} \dots\dots\dots(3-14)$$

h_w : معامل انتقال الحرارة بسبب الريح (واط/م² م⁰) ويحسب من المعادلة الاتية :

$$h_w = 5.7 + 3.8v \dots\dots\dots(3-15)$$

v : سرعة الريح (م/ثا)

يحسب $h_{r,p-g}$ من المعادلة الاتية:

$$h_{r,p-g} = \frac{(T_p - T_g)(T_p^2 + T_g^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_p}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_g}\right) - 1} \dots\dots\dots(3-16)$$

لذلك فإن معامل انتقال الحرارة من السطح العلوي يعطى من المعادلة الاتية:

$$U_t = \left[\frac{1}{h_{p-g} + h_{r,p-g}} + \frac{1}{h_w + h_{r,g-a}} \right]^{-1} \dots\dots\dots(3-17)$$

تتسرب الحرارة من اسفل المجمع الشمسي حيث يحسب مقدارها بأستخدام معامل انتقال الحرارة من السطح السفلي بموجب المعادلة الآتية:

$$U_b = 1 / \left[\frac{x_1}{k_1} + \frac{x_b}{k_{ib}} + \frac{1}{h_w} \right] \dots\dots\dots (3-18)$$

x_1 : سمك الاطار الخشبي (م)

x_b : سمك طبقة العازل السفلية (م)

k_1 : الموصلية الحرارية للاطار الخشبي (واط/م²م)

k_{ib} : الموصلية الحرارية للطبقة العازلة (واط/م²م)

يحدث فقدان الحرارة من جوانب المجمع الشمسي بواسطة عمليتي الحمل والاشعاع بالفقدان الحراري الجانبي ، ويحسب بأفتراض سريان الحرارة ببعد واحد ويمكن تمثيله بالمعادلة الآتية:

$$q_{L-e} = H_c P_c \frac{k_{i.e}}{x_{i.e}} (T_p - T_a) \dots\dots\dots (3-19)$$

H_c : الارتفاع الخارجي للمجمع (م)

P_c : محيط المجمع (م)

$k_{i.e}$: الموصلية الحرارية لطبقة العازل الجانبية (واط/م²م)

$x_{i.e}$: سمك طبقة العازل الجانبية (م)

يحسب معامل الفقدان الحراري من الجوانب من المعادلة الآتية:

$$U_e = \frac{(UA)_e}{A} \dots\dots\dots (3-20)$$

A : مساحة صفيحة الامتصاص (م²)

$(UA)_e$: حاصل ضرب معامل انتقال الحرارة من السطح الجانبي في مساحة جوانب المجمع وبالتعويض في معادلة 16 ينتج:

$$U_e = \frac{(k_{i.e} / x_{i.e}) H_c P_c}{A} \dots\dots\dots (3-21)$$

حساب الطاقة الحرارية المفقودة من الانابيب البلاستيكية:

من معادلة Fourier يمكن حساب الطاقة الحرارية المفقودة وكالاتي:

$$Q = -kA_r \left(\frac{dT}{dr} \right) \dots\dots\dots(3-22)$$

عند الشروط الحدية $r = r_i, T = T_i, r = r_o, T = T_o$

تستخدم هذه المعادلة في حساب الطاقة الحرارية المفقودة من الانبوب وكالاتي:

$$Q_1 = \frac{2\pi kL(T_1 - T_2)}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \dots\dots\dots(3-23)$$

$$Q_2 = \frac{2\pi kL(T_2 - T_3)}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} \dots\dots\dots(3-24)$$

$$Q_i = h_i 2\pi r_1 L (T_i - T_o) \dots\dots\dots(3-25)$$

$$Q_o = h_o 2\pi r_3 L (T_3 - T_o) \dots\dots\dots(3-25)$$

$$Q_i = Q_o = Q_1 = Q_2 = Q_p$$

بعد جمع المعادلات اعلاه ينتج:

$$Q_p = 2(T_i - T_o) / \left[\frac{1}{h_i 2\pi r_1 L} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi k_A L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi k_B L} + \frac{1}{h_o 2\pi r_3 L} \right] \dots\dots\dots(3-26)$$

حساب الطاقة الحرارية المفقودة من غرفة التجفيف:

تحسب من قانون فورير لكل مادة وكالاتي:

$$Q_A = k_A A \frac{(T_1 - T_2)}{X_A} \dots\dots\dots(3-27)$$

$$Q_B = k_B A \frac{(T_2 - T_3)}{X_B} \dots\dots\dots(3-28)$$

$$Q_C = k_C A \frac{(T_3 - T_4)}{X_C} \dots\dots\dots(3-29)$$

$$Q_i = h_i A (T_i - T_1) \dots\dots\dots(3-30)$$

$$Q_o = h_o A (T_4 - T_o) \dots\dots\dots(3-31)$$

$$Q_A = Q_B = Q_C = Q_i = Q_o = Q_1$$

بعد جمع المعادلات اعلاه ينتج:

$$Q_1 = \frac{2(T_i - T_o)}{\frac{1}{h_i A} + \frac{x_A}{k_A A} + \frac{x_B}{k_B A} + \frac{x_C}{k_C A} + \frac{1}{h_o A}} \dots\dots\dots(3-32)$$

$$Q_2 = \frac{2(T_i - T_o)}{\frac{1}{h_i A_1} + \frac{x_A}{k_A A_2} + \frac{x_B}{k_B A_2} + \frac{x_C}{k_C A_2} + \frac{1}{h_o A_2}} \dots\dots\dots(3-32)$$

$$Q_3 = \frac{2(T_i - T_o)}{\frac{1}{h_i} + \frac{x_A}{k_A A_1} + \frac{x_B}{k_B A_1} + \frac{x_C}{k_C A_1} + \frac{1}{h_o A_1}} \dots\dots\dots(3-33)$$

$$Q_4 = \frac{2(T_i - T_o)}{\frac{1}{h_i} + \frac{x_A}{k_A A_2} + \frac{x_B}{k_B A_2} + \frac{x_C}{k_C A_2} + \frac{1}{h_o A_2}} \dots\dots\dots(3-34)$$

$$Q_5 = \frac{2(T_i - T_o)}{\frac{1}{h_i} + \frac{x_A}{k_A A_3} + \frac{x_B}{k_B A_3} + \frac{x_C}{k_C A_3} + \frac{1}{h_o A_3}} \dots\dots\dots(3-35)$$

إذاً الطاقة الحرارية الكلية المفقودة من المجفف الشمسي Q_i هي:

$$Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_P + Q_L \dots\dots\dots(3-36)$$

حيث:

Q_1 : الطاقة الحرارية المفقودة من جدارين متماثلين

Q_2 : الطاقة الحرارية المفقودة من الجانب الخلفي

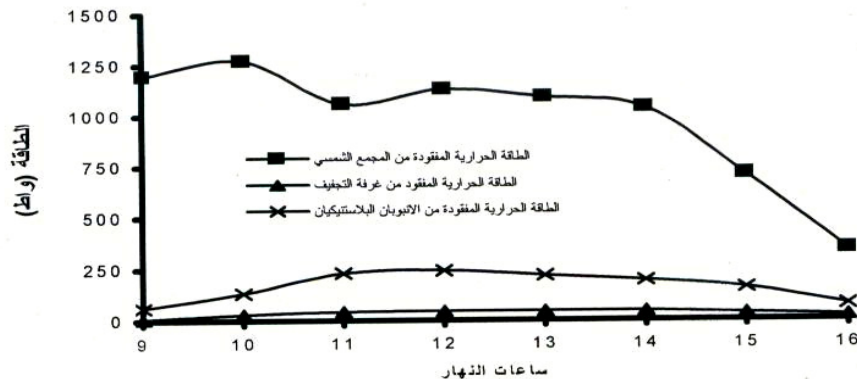
Q_3 : الطاقة الحرارية المفقودة من الباب

Q_4 : الطاقة الحرارية المفقودة من الاسفل

Q_5 : الطاقة الحرارية المفقودة من الاعلى وانه ذو جانبيين

يلاحظ من الشكلين (3-28) و (3-29) ان الطاقة الحرارية المفقودة من المجمع الشمسي هي اكبر من تلك المفقودة في الانبوبات البلاستيكيان والاخيران اكبر من تلك المفقودة في غرفة التجفيف في فصلي الصيف والشتاء . كما نلاحظ ان الطاقة الحرارية المفقودة من المجمع الشمسي تكون اعلى عند الساعتين التاسعة والعاشر صباحا في فصلي الصيف والشتاء وهذا بسبب زيادة الفرق في درجة حرارة الجو والمجمع الشمسي مما يؤدي الى زيادة معامل الفقدان الحراري الكلي بشكل كبير . بينما لم تحدث هذه الحالة في الانبوبات البلاستيكيان وغرفة التجفيف بسبب وجود المادة العازلة (الرغوة) وهي ذات عزل حراري كفوء.

يلاحظ من الشكل (3-30) ان الطاقة الحرارية المفقودة من المجفف الشمسي في فصل الصيف هي اعلى من تلك المفقودة في فصل الشتاء ماعدا ساعات النهار الاولى وهي الساعتين التاسعة والعاشر صباحا. وهذا يعود الى ان زيادة معامل الفقدان الحراري الكلي في فصل الصيف بسبب ارتفاع درجات حرارة صفيحة الامتصاص فتكون هنالك طاقة حرارية فائضة تفقد عن طريق السطح العلوي من المجمع الشمسي الى الجو وخصوصا عند ساعات الحمل الاقصى وهي من الساعة العاشرة صباحا ولغاية الساعة الثانية بعد الظهر .



الكفاءة الحرارية الكلية:

تحسب من خلال معرفة الطاقة المنتزعة q التي تحسب من المعادلة الاتية:

$$q = mc_p(T_o - T_i).....(3-37)$$

وقسمتها على طاقة الاشعاع الشمسي I مضروباً في حاصل قسمة درجة حرارة الهواء الداخل الى غرفة التجفيف T_{in} على درجة حرارة الهواء الخارج من المجمع الشمسي T_o وكالاتي:

$$\eta_T = \frac{q}{I} \times \frac{T_{in}}{T_o} \dots\dots\dots (3-38)$$

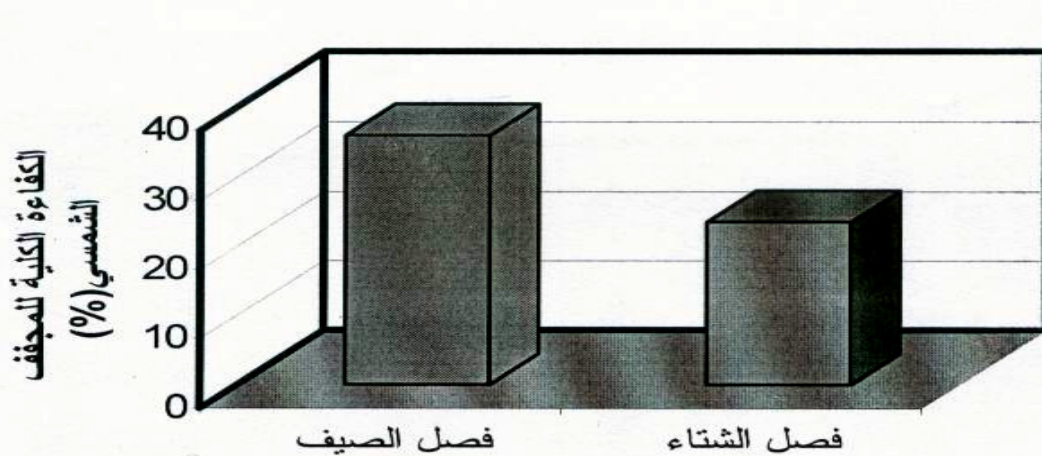
حيث:

m : التدفق الكتلي للهواء (كغم/م².ثا)

c_p : الحرارة النوعية للهواء (كج/كغم.م⁰)

T_i : درجة حرارة الهواء الداخل الى المجمع الشمسي (م⁰)

يلاحظ من الشكل (3-31) ان الكفاءة الحرارية الكلية للمجفف الشمسي في فصل الصيف اعلى منها في فصل الشتاء وهذا بسبب ارتفاع درجة حرارة صفيحة الامتصاص خلال ساعات الحمل الاقصى مما يؤدي الى زيادة درجة حرارة الهواء فتزداد حركته الداينميكية وهذا بدوره يزيد من الطاقة المنتزعة وبالتالي زيادة كل من كفاءة المجمع الشمسي وكفاءة غرفة التجفيف والذي بدوره سينعكس ايجاباً على الكفاءة الحرارية الكلية مؤدياً الى زيادتها ، اذ ان مقدار الزيادة بالطاقة المنتزعة سيكون اكبر بكثير من الزيادة بمعامل الفقدان الحراري الكلي.



شكل(3-31):الكفاءة الحرارية الكلية للمجفف الشمسي في فصلي الصيف والشتاء.

ثابت ومعدل التجفيف:

يحسب من المعادلة الاتية :

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = A \exp(-kt) \dots \dots \dots (3-39)$$

حيث:

MR : نسبة الرطوبة

M : المحتوى الرطوبي على اساس الوزن الجاف (غم ماء/غم مادة جافة)

M_e : المحتوى الرطوبي المتوازن (غم ماء/غم مادة جافة)

M_o : المحتوى الرطوبي الاولي (غم ماء/غم مادة جافة)

A : ثابت

k : ثابت التجفيف (ساعة⁻¹)

t : زمن التجفيف (ساعة)

بعد رسم العلاقة بين المحتوى الرطوبي والزمن وكان معامل الارتباط يتراوح بين

0.79 و 0.95 ومنها تستخرج قيمة k .

يحسب معدل التجفيف من المعادلة الاتية:

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e) \dots \dots \dots (3-40)$$

حيث:

$\frac{dM}{dt}$: معدل التجفيف (غم ماء/غم.مادة جافة. ساعة)

يلاحظ من الشكل (3-32) ان هنالك مرحلتين للتجفيف هما التجفيف بمعدل ثابت اذ ان معدل التجفيف لايتغير مادام هنالك ماء حر بالقرب من سطح الغذاء ويبقى معدل التجفيف ثابت الى ان يصل الى المحتوى الرطوبي الحرج الذي بعده ينخفض معدل التجفيف وتسمى هذه المرحلة بمعدل التجفيف المتناقص وان عملية خروج الرطوبة تكون اصعب مما في الحالة الاولي كون الماء يكون مرتبط.

كما اظهرت النتائج ان لطريقة التجفيف تأثير على المحتوى الرطوبي الحرج ، ففي حالة التجفيف الشمسي الطبيعي نلاحظ ان المحتوى الرطوبي الحرج يحصل عند ازالة محتويات رطوبة اقل مما في حالة استعمال المجفف الشمسي والمجفف الكهربائي ، كما ان الاخير يحصل فيه عند ازالة محتويات رطوبة اعلى من المجفف الشمسي ، وهذا بسبب ارتفاع درجة الحرارة الذي يؤدي الى تبخر كم كبير من الرطوبة الموجودة في الغذاء ويتبخر جميع الماء الحر بسرعة، وهذا ما يحدث في المجفف الكهربائي ويليه المجفف الشمسي.

يلاحظ من الشكل (3-33) ان الزمن اللازم لمعدل التجفيف الثابت هو اقل من الزمن اللازم لمعدل التجفيف المتناقص لانه في حالة الاخير يجب التغلب على القوى الرابطة للماء داخل الخلية وانه يجب ان يصعد الى السطح عن طريق الخاصية الشعرية وهذه العملية تحتاج الى زمن كبير فمثلا الزمن اللازم لمعدل التجفيف الثابت للمشمش المجفف بالمجفف الشمسي هو 3 ساعة بينما يتطلب 33 ساعة لمعدل التجفيف المتناقص .كما نلاحظ من الشكل نفسه ان زيادة زمن التجفيف ادت الى انخفاض في معدل التجفيف للأغذية المجففة بطرائق تجفيف مختلفة جميعها وكان الانخفاض بمعدل التجفيف بطريقة التجفيف الشمسي الطبيعي اقل مما في حالة المجفف الشمسي والاخير اقل من المجفف الكهربائي. يلاحظ من جدول (1-3) ان ثابت التجفيف للأغذية المجففة بالمجفف الشمسي اعلى من التجفيف الشمسي الطبيعي والمجفف الكهربائي وذلك لان التجفيف الشمسي الطبيعي يتطلب زمنا اكبر بكثير من طريقتي التجفيف الاخرتين ، بينما في حالة المجفف الكهربائي فأن سبب انخفاض ثابت التجفيف له هو نتيجة بقاء الرطوبة محبوسة داخل الغذاء بسبب الانكماش والتصلب السطحي ولذلك يطول زمن التجفيف بشكل نسبي مقارنة مع المجفف الشمسي الا ان الاختلافات بينهما طفيفة وكذلك اختلاف الظروف من ضغط ودرجة حرارة ورطوبة اذ ان المجفف الكهربائي يمكن التحكم بظروفه بسهولة بينما يصعب ذلك في المجفف الشمسي اذ ان درجة الحرارة والرطوبة متغيرة مع الزمن.

معامل استرجاع الماء ونسبة الرطوبة بعد الاسترجاع:

تم حسابهما من المعادلتين الاتيتين:

$$R_f = c(100 - m) / (w_d - m_r) \times 100 \dots \dots \dots (3-41)$$

$$R_H = \frac{(c - w_s)}{c} \times 100 \dots \dots \dots (3-42)$$

R_f : معامل استرجاع الماء

c : وزن النموذج بعد الاسترجاع (غم)

m : نسبة الرطوبة في النموذج قبل التجفيف (%)

w_d : وزن النموذج المجفف (غم)

m_r : نسبة الرطوبة في النموذج المجفف (%)

w_s : وزن المادة الجافة في النموذج (غم)

R_H : نسبة الرطوبة بعد الاسترجاع (%)

يشير الجدول (3-3) الى ان معامل استرجاع الماء ونسبة الرطوبة بعد الاسترجاع هي اعلى عند استعمال المجفف الشمسي في تجفيف الاغذية منه عند استعمال المجفف الكهربائي والتجفيف الشمسي الطبيعي وللأغذية جميعها وهذا قد يؤدي الى تجانس عملية التجفيف في الاغذية المجففة بالمجفف الشمسي بشكل اكبر من الطريقتين الاخرتين مما جعل التجفيف ينتقل الى داخل الغذاء وتخرج الرطوبة منه اضافة الى ذلك يكون الانكماش قليل مما يجعل المسامية اعلى في الغذاء المجفف فيه وهذا يؤدي الى سهولة استرجاع المنتج بعد اضافة الماء اليه كما انه يمتص اكبر كمية من الماء مقارنة مع الطريقتين الاخرتين اضافة الى ذلك فأن المجفف الكهربائي يسبب التصلب السطحي وهذا يجعل الغذاء يمتص كمية اقل من الماء مما يؤدي الى انخفاض معامل استرجاع الماء ونسبة الرطوبة بعد الاسترجاع ،.

النشاط المائي:

نلاحظ من الشكل (3-34) ان النشاط المائي للأغذية المجففة بالتجفيف الشمسي الطبيعي اعلى من المجفف الكهربائي والاخير اعلى من المجفف

الشمسي وهذ يعود الى انه في حالة التجفيف الشمسي الطبيعي فأن الغذاء معرض للتغيرات في الظروف الجوية كتغير الرطوبة ودرجة الحرارة اذ انه عندما ترتفع رطوبة الجو فأن الغذاء يمتص رطوبة منه وهذا دائما يحدث اثناء الليل . اما في حالة المجفف الكهربائي فيسبب حصول حالة التصلب السطحي للاغذية المجففة به ، بسبب ان سرعة التجفيف تؤدي الى سرعة خروج الرطوبة من الغذاء وبالتالي يحصل ترسب للسكريات في الانابيب الشعرية في الغذاء وتتصلب وتتسد المسامات وبالتالي تحجز الرطوبة في داخل الغذاء وتمنع خروجها الى الخارج اضافة الى وجود طبقة سطحية صلبة تمنع خروج الرطوبة من الغذاء.

معامل انتشار الرطوبة:

يحسب من المعادلتين الاتيتين:

$$D = \frac{R^2 k}{\pi^2} \dots\dots\dots(3-43)$$

$$D = \frac{R^2 k}{5.7331} \dots\dots\dots(3-44)$$

تستخدم المعادلة (3-43) للاغذية الدائرية الشكل بينما المعادلة (3-44) تستخدم للاغذية الاسطوانية الشكل.

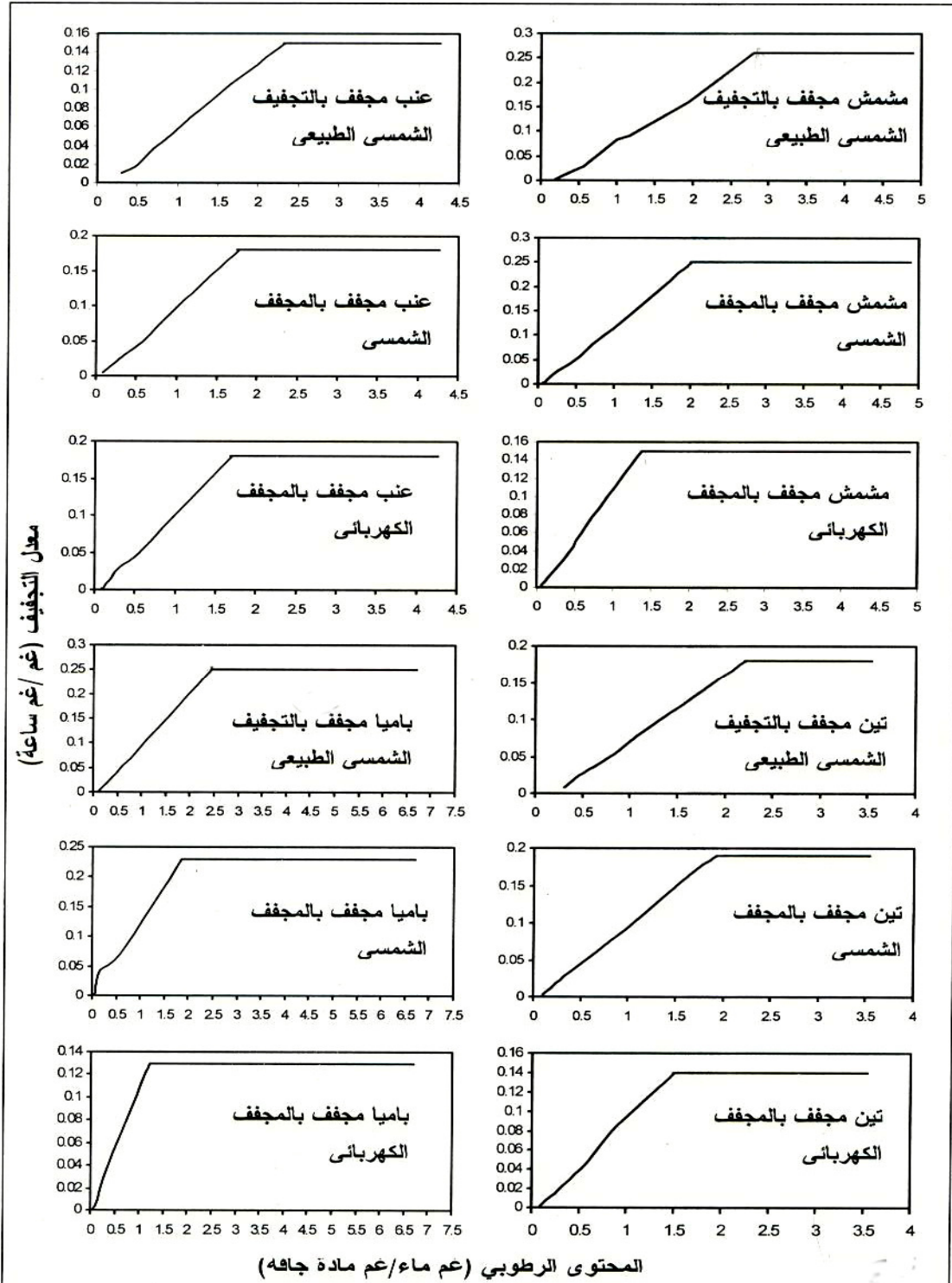
حيث:

D : معامل انتشار الرطوبة (سم²/ثا)

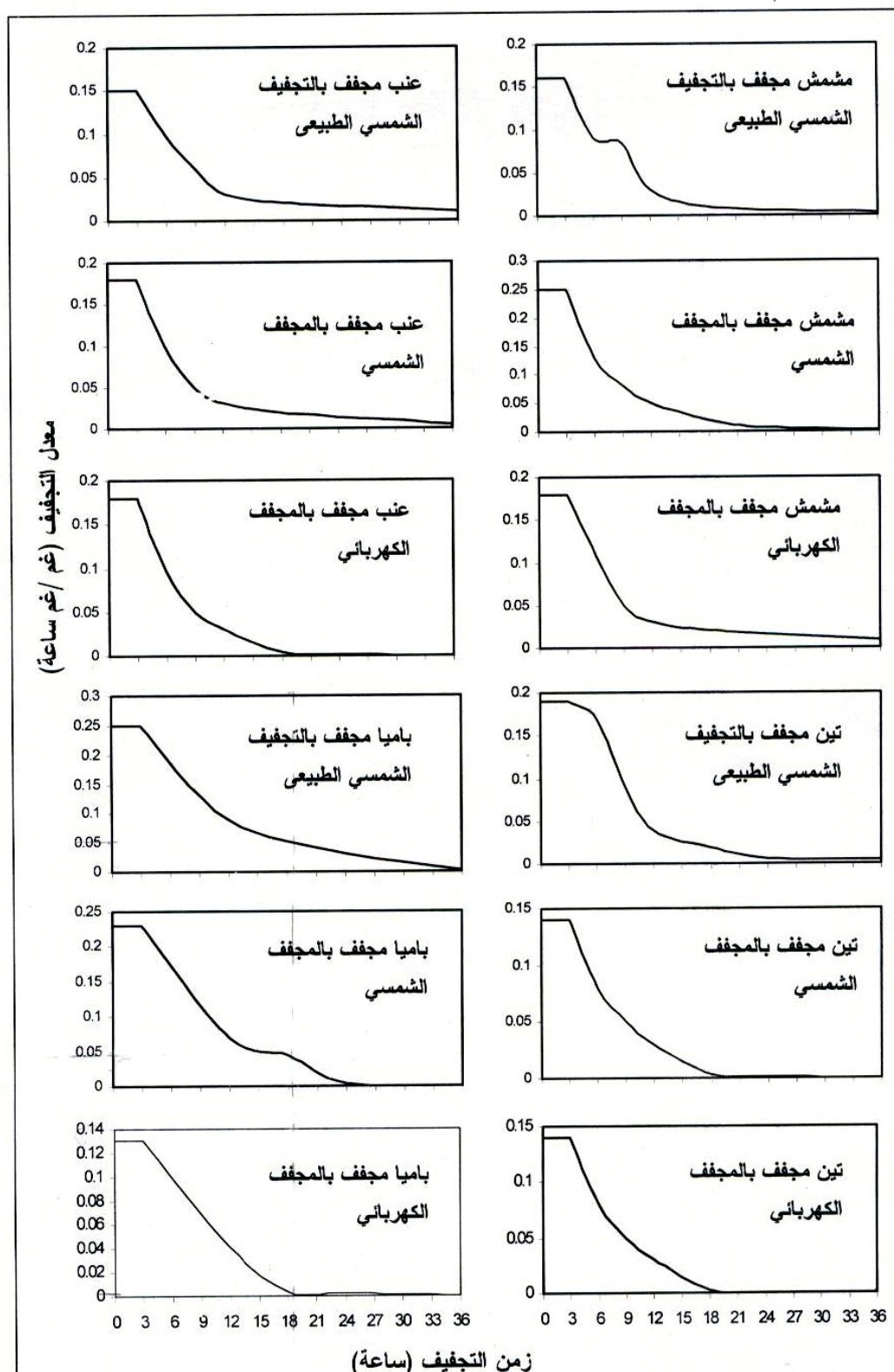
R : نصف قطر الغذاء (سم)

نلاحظ من الشكل (3-35) ان معامل انتشار الرطوبة للاغذية المجففة بالمجفف الشمسي هي اعلى من طريقتي التجفيف الاخرتين للاغذية جميعها ماعدا التين والعنب فقد كانت متقاربة جدا ، وهذا يشير الى ان خروج الرطوبة من الاغذية بواسطة المجفف الشمسي هي افضل من طريقتي التجفيف الاخرتين ، اما في حالة العنب والتين فأن تقاربهما قد يعود الى وجود الطبقة الشمعية التي تعيق خروج الرطوبة منها الا ان المجفف الكهربائي يسبب انكماش كبير للاغذية المجففة وهذا بدوره ايضا يعيق انتشار الرطوبة وخروجها من الغذاء. كما ان

الرطوبة المزالة في مرحلة معدل التبخر المتنازل تكون عن طريق الانتشار الرطوبي



شكل (32-3): العلاقة بين معدل التجفيف والمحتوى الرطوبي للاغذية المختلفة والمجففة بطرائق تجفيف مختلفة.

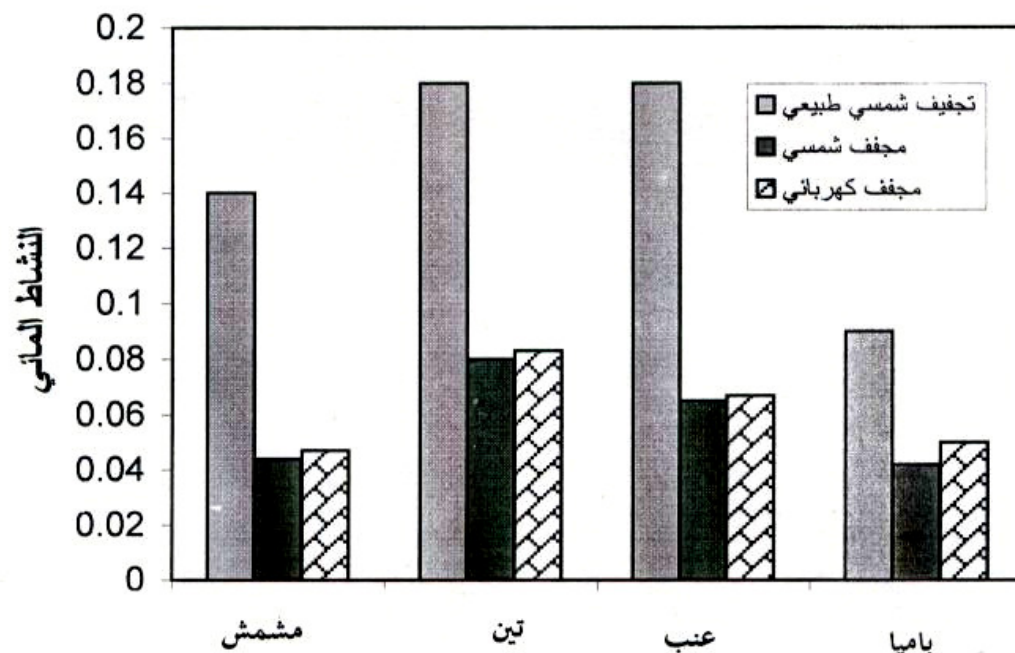


شكل (3-33): العلاقة بين معدل التجفيف والمحتوى الرطوبي للاغذية المختلفة والمجففة بطرائق تجفيف مختلفة.

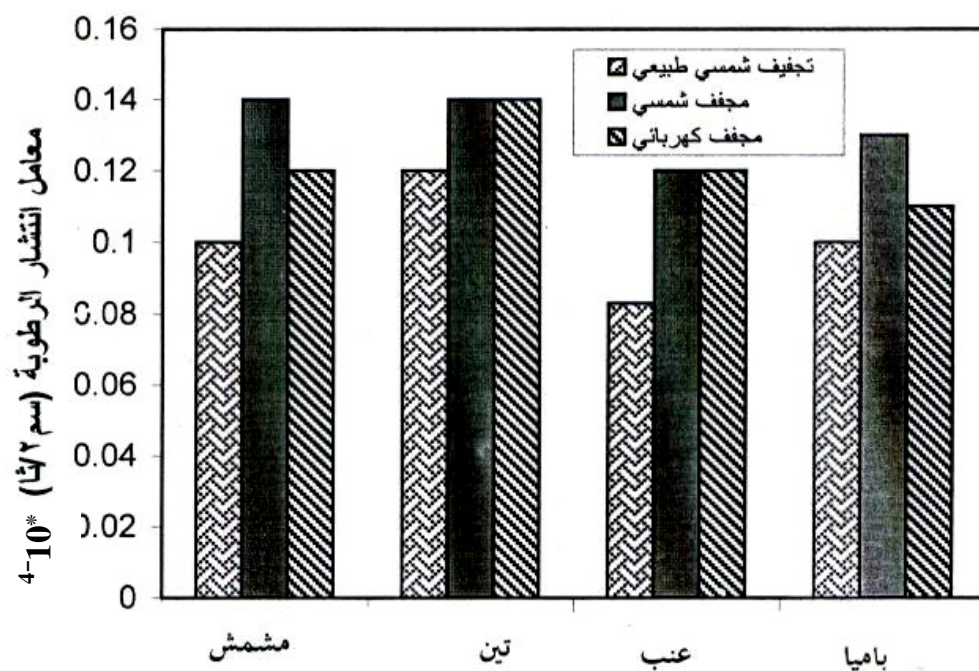
جدول(3-3): تأثير طرائق التجفيف على ثابت التجفيف ومعامل استرجاع الماء ونسبة الرطوبة بعد الاسترجاع لعدة اغذية.

الاغذية	طرائق التجفيف	ثابت التجفيف (ساعة ⁻¹)	معامل استرجاع الماء	نسبة الرطوبة بعد الاسترجاع (%)
مشمش	تجفيف شمسي طبيعي	0.094 ^ج	0.378 ^ب	60.01 ^ب
	مجفف شمسي	0.129 ^أ	0.406 ^أ	62.10 ^أ
	مجفف كهربائي	0.113 ^{أب}	0.306 ^ج	51.03 ^ج
	المعدل	0.112 ^ب	0.363 ^ب	57.71 ^ب
تين	تجفيف شمسي طبيعي	0.092 ^ج	0.321 ^ب	40.69 ^ب
	مجفف شمسي	0.106 ^أ	0.465 ^أ	58.28 ^أ
	مجفف كهربائي	0.103 ^{أب}	0.311 ^ج	38.60 ^ج
	المعدل	0.100 ^ج	0.365 ^ب	45.85 ^ج
عنب	تجفيف شمسي طبيعي	0.073 ^ج	0.243 ^ب	31.70 ^ب
	مجفف شمسي	0.106 ^أ	0.627 ^أ	68.45 ^أ
	مجفف كهربائي	0.105 ^{أب}	0.238 ^ج	25.90 ^ج
	المعدل	0.107 ^ج	0.369 ^ب	42.01 ^د
باميا	تجفيف شمسي طبيعي	0.107 ^ج	0.618 ^ب	79.68 ^ب
	مجفف شمسي	0.130 ^أ	0.634 ^أ	80.71 ^أ
	مجفف كهربائي	0.110 ^{أب}	0.548 ^ج	77.94 ^ج
	المعدل	0.600 ^أ	0.600 ^أ	79.94 ^أ

- الاحرف المتشابهة تشير الى عدم وجود فروق معنوية بين المعاملات
- الاحرف المختلفة تشير الى وجود فروق معنوية بين المعاملات



شكل (3-34): النشاط المائي لأغذية مجففة بطرائق تجفيف مختلفة .



شكل (3-35): معامل انتشار الرطوبة لأغذية مجففة بطرائق تجفيف مختلفة.

يلاحظ من الشكل (3-36) ان نسبة التشرب للمشمش والتين والبابايا قد تأثرت معنويا بطرائق التجفيف وأعطى المجفف الشمسي اعلى نسبة استرجاع الماء من التجفيف الشمسي الطبيعي و المجفف الكهربائي للأغذية الثلاث وبلغت 2.25 ، 2.06 ، 4.66 غم ماء / غم مادة جافة للمشمش والتين والبابايا على التوالي . وهذا يعود الى ان تآثر البروتين ومطاطية الخلايا والقوة الانتفاخية للمركبات النشوية والاصماغ داخل الخلايا والمركبات الغروية في الانسجة الغذائية يكون اقل عند استعمال المجفف الشمسي في تجفيف الأغذية مقارنة مع التجفيف الشمسي الطبيعي والمجفف الكهربائي بسبب ان درجة الحرارة ترتفع بشكل تدريجي وليس بصورة مفاجئة كما يحصل في حالة المجفف الكهربائي الذي يسبب تلف للخلايا. ومن ملاحظاتي النظرية رأيت انه في حالة التجفيف الشمسي الطبيعي فان الأغذية تتعرض الى التلوث ومهاجمة الحشرات والاشعة فوق البنفسجية التي تسبب ضررا للأغذية مما يجعل الأغذية اقل قدرة على امتصاص الماء. ولم يظهر تأثير معنوي لطرائق التجفيف على نسبة استرجاع الماء للعنب.

اما بخصوص الاس الهيدروجيني فقد اظهرت النتائج في الشكل (3-37) ان الاس الهيدروجيني للمشمش والتين والعنب والبابايا لم يتأثر معنويا بطرائق التجفيف . وظهر هنالك انخفاض طفيف في الاس الهيدروجيني للأغذية المجففة عن الأغذية الطازجة وكان الاس الهيدروجيني للأغذية المجففة بالمجفف الشمسي اقرب الى الاس الهيدروجيني للأغذية الطازجة من التجفيف الشمسي الطبيعي والمجفف الكهربائي .

يوضح الشكل (3-38) ان الامتصاص الضوئي للمشمش والعنب والبابايا قد تأثر معنويا بطرائق التجفيف وكانت اقل قيمة له عند استعمال المجفف الشمسي ثم التجفيف الشمسي الطبيعي ثم المجفف الكهربائي . وهذا يعود الى ان التلون البني يكون اقل في حالة استعمال المجفف الشمسي اذ ان درجة الحرارة المستعملة فيه هي اقل من تلك المستعملة في المجفف الكهربائي وتزداد بشكل تدريجي مع الزمن . اما في حالة التجفيف الشمسي الطبيعي فان الأغذية تتعرض الى اشعة الشمس بشكل مباشر مما يؤدي الى رفع درجة حرارة الأغذية بشكل كبير نتيجة تركيز الإشعاع

الشمسي عليها مما يؤدي الى حصول تفاعلات ميلارد او اكسدة حامض الاسكوربيك ورداءة لون الأغذية المجففة بهذه الطريقة اذ انها تكتسب رطوبة من الجو اثناء الليل.

بينما لم تظهر اختلافات معنوية بين طرائق التجفيف على الامتصاص الضوئي للتين . كما بينت النتائج انه لم يظهر تباين معنوي بين المشمش الطازج والمشمش المجفف بالتجفيف الشمسي الطبيعي وبالمجفف الشمسي ، ولم يظهر اختلاف معنوي بين طريقة التجفيف الشمسي الطبيعي والمجفف الشمسي ، الا ان كلاهما اختلفا معنويا مع المجفف الكهربائي وكذلك بالنسبة للعنب والباميا فقد كانت الاختلافات معنوية بينهما . وهذا بسبب ارتفاع درجة حرارة سطوح الأغذية المجففة بالمجفف الكهربائي مما يؤدي الى رداءة اللون ، وكان الامتصاص الضوئي للأغذية المجففة بالتجفيف الشمسي الطبيعي والمجفف الشمسي والمجفف الكهربائي اعلى من الامتصاص الضوئي للأغذية الطازجة . وهذا يعود الى حدوث التلون البني في الأغذية المجففة اذ ان لون الأغذية الطازجة افضل من الأغذية المجففة ، كما ان لون الأغذية المجففة بالمجفف الشمسي افضل من الأغذية المجففة بالمجفف الكهربائي وبالتجفيف الشمسي الطبيعي.

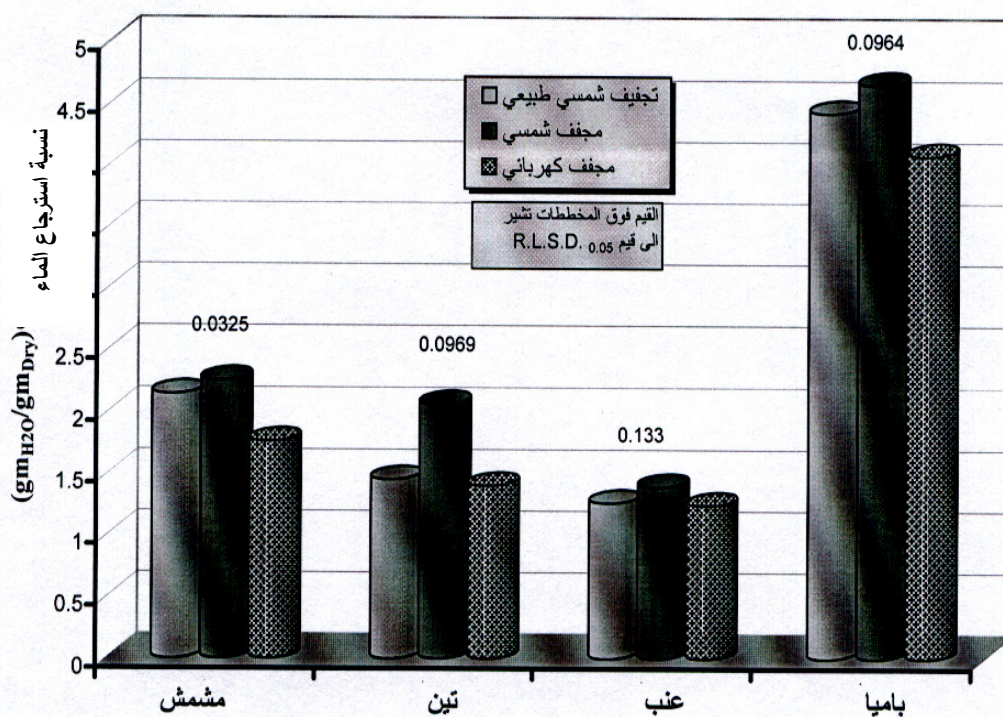
يلاحظ من الشكل (3-39) ان طرائق التجفيف كان لها تأثير معنوي على فيتامين C للأغذية جميعها . واعطى المجفف الشمسي اعلى قيمة من فيتامين C مقارنة مع التجفيف الشمسي الطبيعي والمجفف الكهربائي للأغذية جميعها ، ثم يليها التجفيف الشمسي الطبيعي ثم المجفف الكهربائي . وهذا يعود الى ان المدة الزمنية التي تتعرض فيها الأغذية الى الحرارة العالية هي اقل عند استخدام المجفف الشمسي منه عند استعمال المجفف الكهربائي مما يؤدي الى تقليل الفقدان في فيتامين C من الأغذية . اما في حالة التجفيف الشمسي الطبيعي فان الأغذية تتعرض الى شدة الإشعاع الشمسي المباشر مما يؤدي الى زيادة الفقدان في فيتامين C بشكل اكبر مما لو استخدم المجفف الشمسي . الا ان الفروقات بين طرائق التجفيف في حالة المشمش والتين لم تكن معنوية . وكذلك الفروقات بين التجفيف الشمسي الطبيعي والمجفف الكهربائي لم تكن معنوية .

كما بينت النتائج ان محتوى الأغذية الطازجة من فيتامين C اعلى من محتواها عندما تكون مجففة ولطرائق التجفيف جميعها. وهذا يحدث بسبب ان الأغذية المجففة تفقد فيتامين C بسبب حدوث الاكسدة لفيتامين C بتاثير الحرارة والاكسجين .

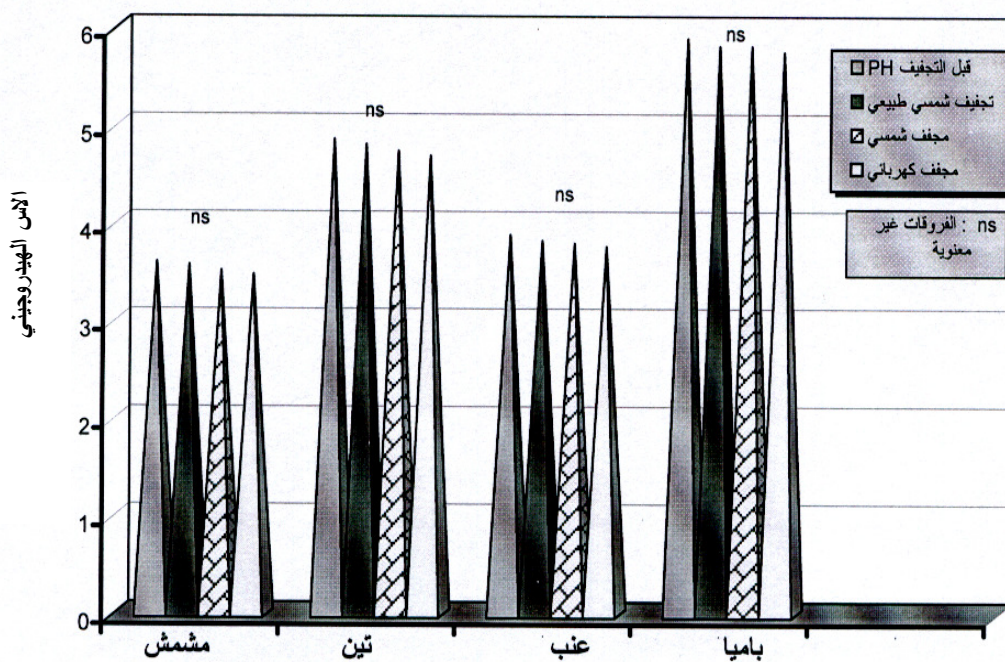
يلاحظ من الشكل (3-40) ان طرائق التجفيف قد اثرت معنويا على محتوى الأغذية من السكريات الكلية . وكان محتوى الأغذية المجففة منها اعلى عند استعمال المجفف الشمسي مقارنة مع التجفيف الشمسي الطبيعي والمجفف الكهربائي ، ثم يليه التجفيف الشمسي الطبيعي ثم المجفف الكهربائي . وهذا نتيجة لحدوث التلون البني بشكل اقل عند استعمال المجفف الشمسي مقارنة مع المجفف الكهربائي ويرافق الاخير حدوث عملية الكرملة أيضا بسبب الحرارة العالية .مما يجعل السكريات في الأغذية المجففة بالمجفف الكهربائي اقل من تلك المجففة بالمجفف الشمسي كما انه لم تحصل كرملة للسكر في الأغذية المجففة بالمجفف الشمسي اما التين المجفف بالمجفف الكهربائي فقد كان محتواه من السكريات الكلية اعلى معنويا من التجفيف الشمسي الطبيعي .

يلاحظ من الشكل (3-41) ان طرائق التجفيف كان لها تاثير معنوي على محتوى الأغذية من بيتا - كاروتين ، ماعدا محتوى التين المجفف من بيتا - كاروتين اذ لم يتاثر معنويا بطرائق التجفيف .ولم تظهر فروق معنوية بين المشمش المجفف بالتجفيف الشمسي الطبيعي وبالمجفف الكهربائي.

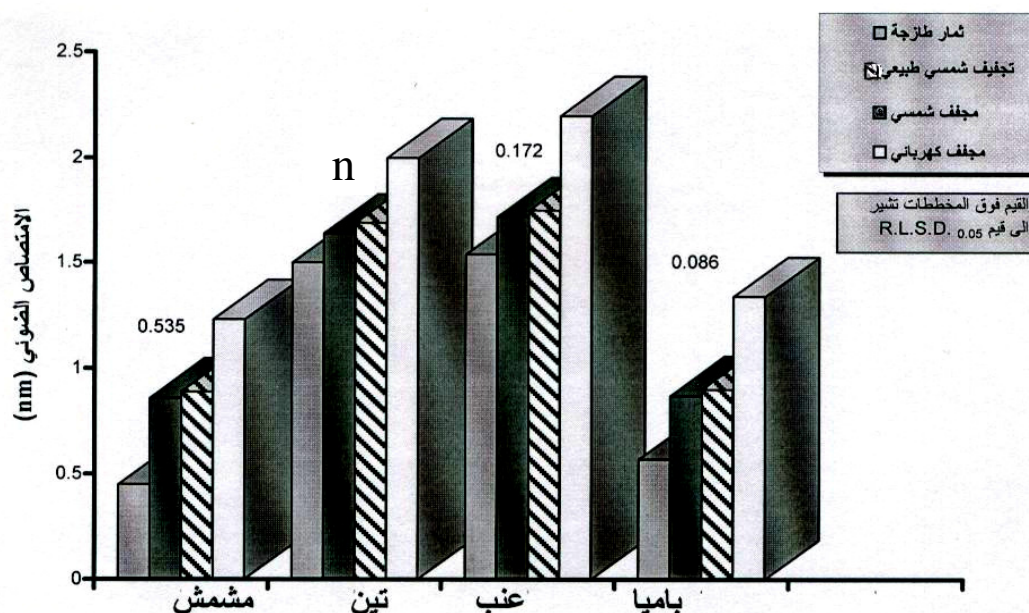
بينت النتائج ان محتوى الأغذية من بيتا - كاروتين كان اعلى عند استعمال المجفف الشمسي منه عند استعمال المجفف الكهربائي والتجفيف الشمسي الطبيعي ، ثم يليه المجفف الكهربائي ثم التجفيف الشمسي الطبيعي . وهذا يعود الى ان فقد الكاروتينات من الأغذية المجففة عند استعمال المجفف الشمسي يكون اقل من استعمال التجفيف الشمسي الطبيعي بسبب عدم تعرض الأغذية الى الضوء الذي يسبب تلف الكاروتينات ، وكذلك ارتفاع درجة الحرارة المفاجئة تؤثر عليه كما يحدث في المجفف الكهربائي. كما اوضحت النتائج ان محتوى الأغذية الطازجة من بيتا - كاروتين كان اعلى منه عند استعمال طرائق التجفيف المختلفة للأغذية



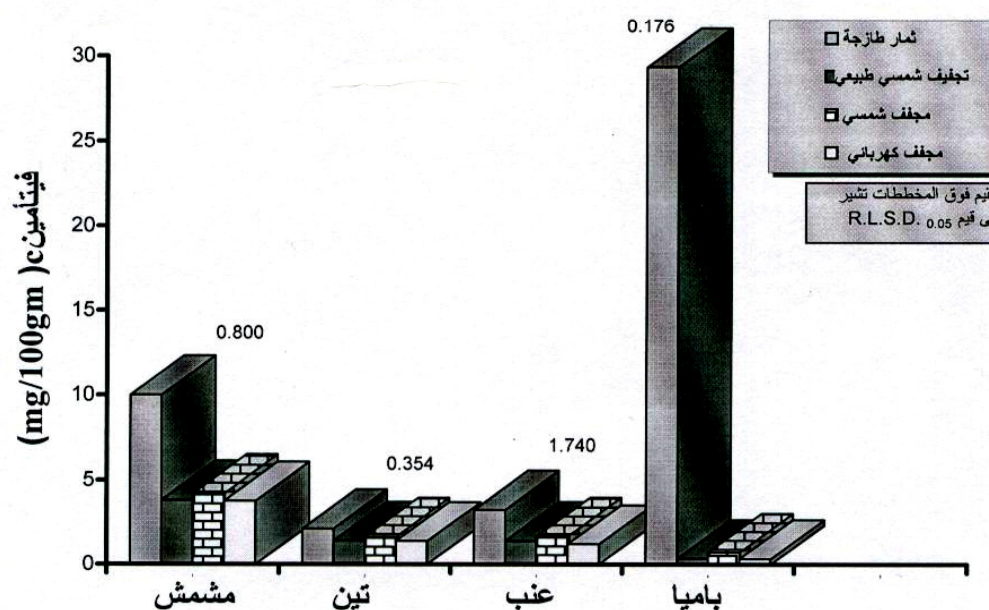
شكل (3-36): نسبة استرجاع الماء لعدة أغذية وبطرائق تجفيف مختلفة .



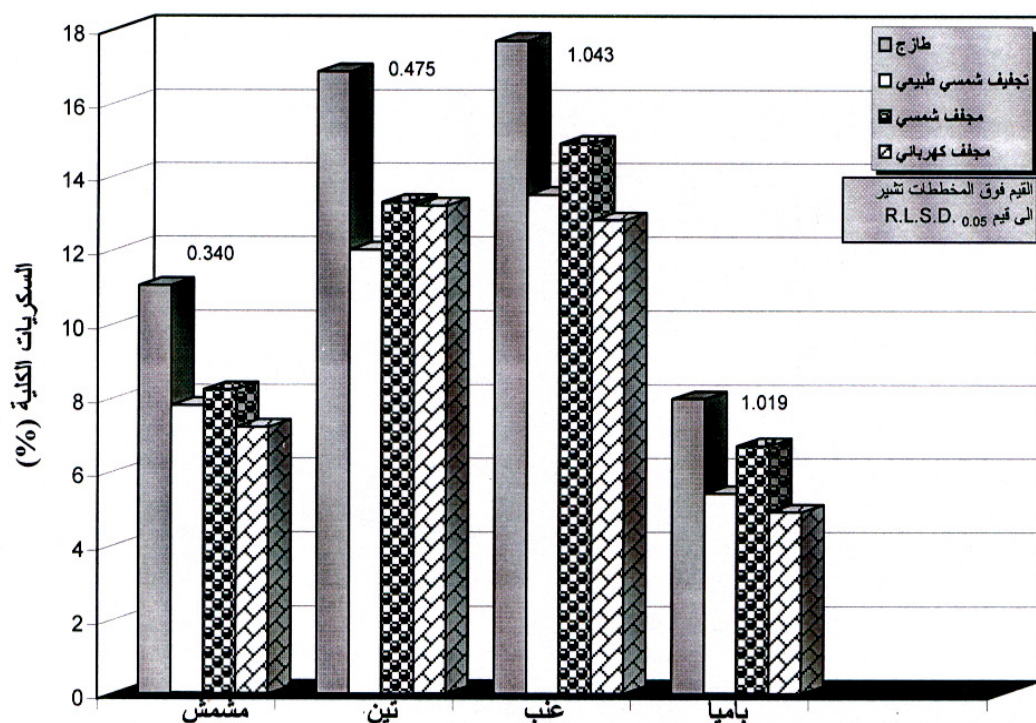
شكل (3-37): الاس الهيدروجيني لعدة أغذية وبطرائق تجفيف مختلفة .



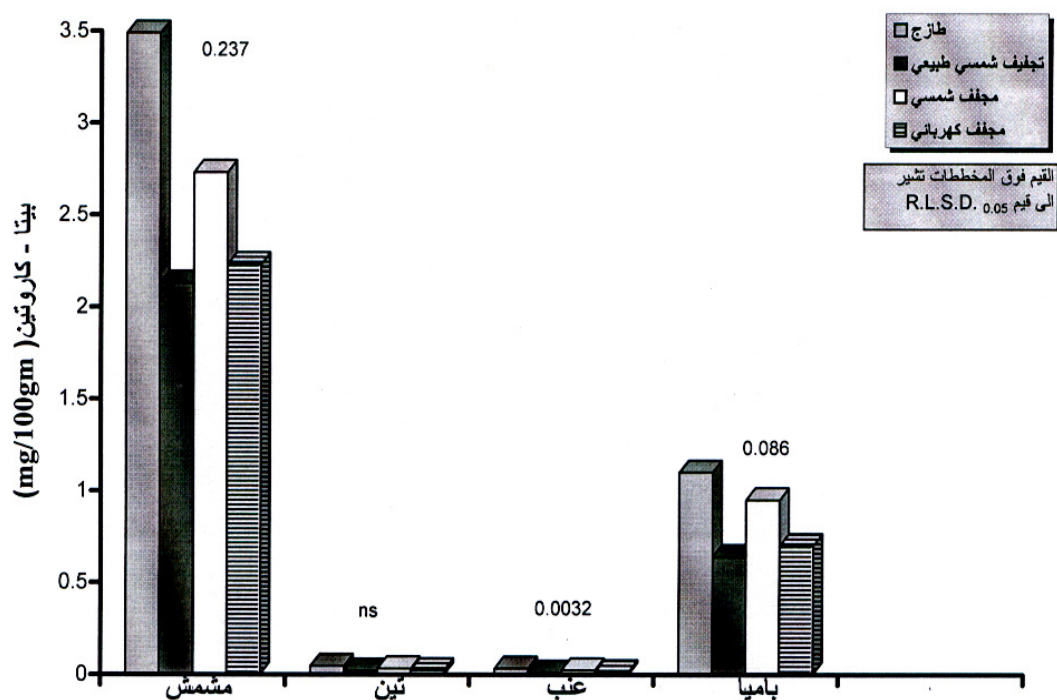
شكل (3-38): الامتصاص الضوئي لعدة أغذية وبطرائق تجفيف مختلفة



شكل (3-39): فيتامين C لعدة أغذية وبطرائق تجفيف مختلفة .



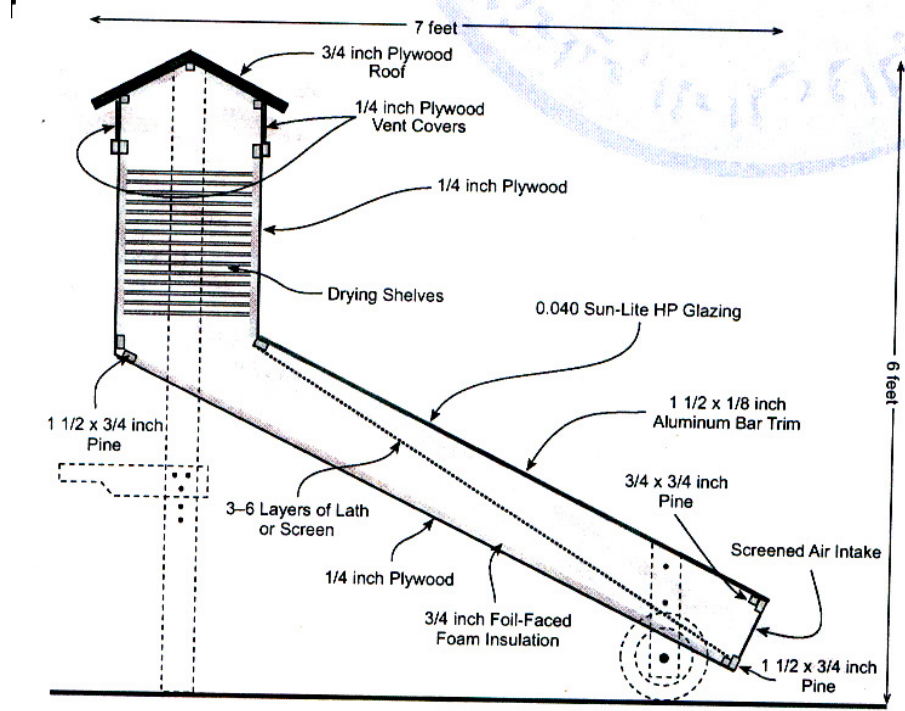
شكل (3-40): محتوى الأغذية الطازجة والمجففة بطرائق تجفيف مختلفة من السكريات الكلية.



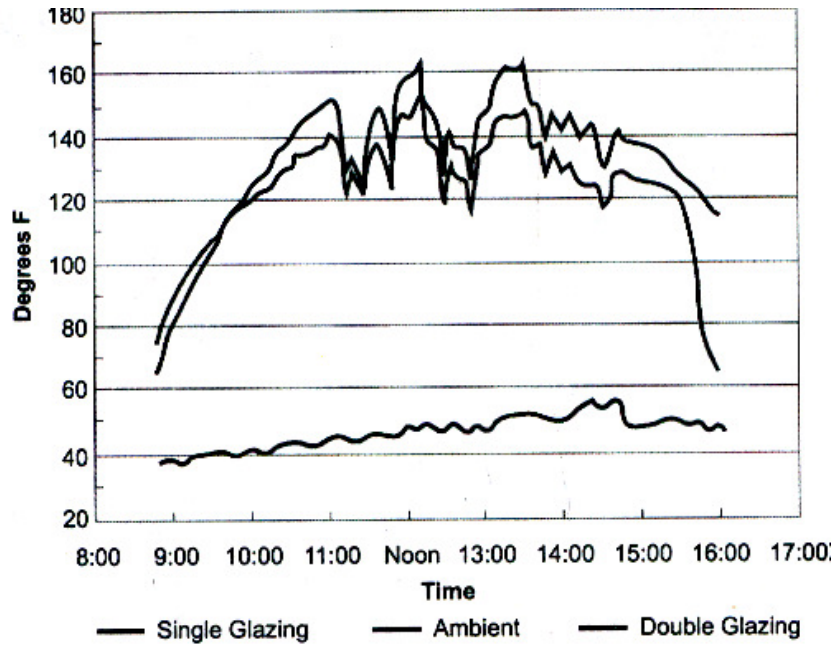
شكل (3-41): محتوى الأغذية الطازجة والمجففة بطرائق تجفيف مختلفة من بيتا-كاروتين .

هنالك عدد من المجففات تم تطويرها وتحسين اداءها وهي تتكون من صناديق خشبية مزودة بفتحات تهوية من الاعلى والاسفل ،الغذاء يوضع على قماش سلكي وهو ينزلق بداخل الصناديق. المجمع الشمسي يكون باتجاه الجنوب دائما ومزود بغطاء بلاستيكي شفاف او زجاج وممتص معدني اسود يصل الى اسفل الصناديق . الهواء يدخل من اسفل سخان الهواء الشمسي ويسخن بواسطة الممتص المعدني الاسود ،الهواء الساخن يرتفع الى الاعلى ويخرج من فتحة التهوية العلوية شكل (3-42). عند تشغيل هذه المجففات فانها تعطي درجات حرارة من 54-82 درجة مئوية وهو ملائم لتجفيف اغلب الاغذية والبسترة ، وهذه المجففات قد تعمل على تجفيف الاغذية خلال يوم واحد ،حتى عندما يكون الجو غائم جزئيا وعند وجو الضباب وكذلك الجو الرطب جدا وهي تستوعب من 35-40 تفاحة او خوخ متوسط الحجم مقطع الى شرائح رقيقة. عند استخدام طبقتين من الزجاج بينهما فجوة مقدارها 19 ملم في المجمع الشمسي فان درجة الحرارة فيه تكون اعلى قليلا من حالة استخدام طبقة واحدة، شكل (3-43) ان استعمال طبقتين من الزجاج هو ليس ضروريا في المجمعات الشمسية على الرغم من انه يقلل فقدان الحرارة ولكن يزداد كلفة بناء المجفف، كما ان احدي مشاكله تسبب تكثيف للرطوبة الموجودة في الهواء بين الطبقتين.

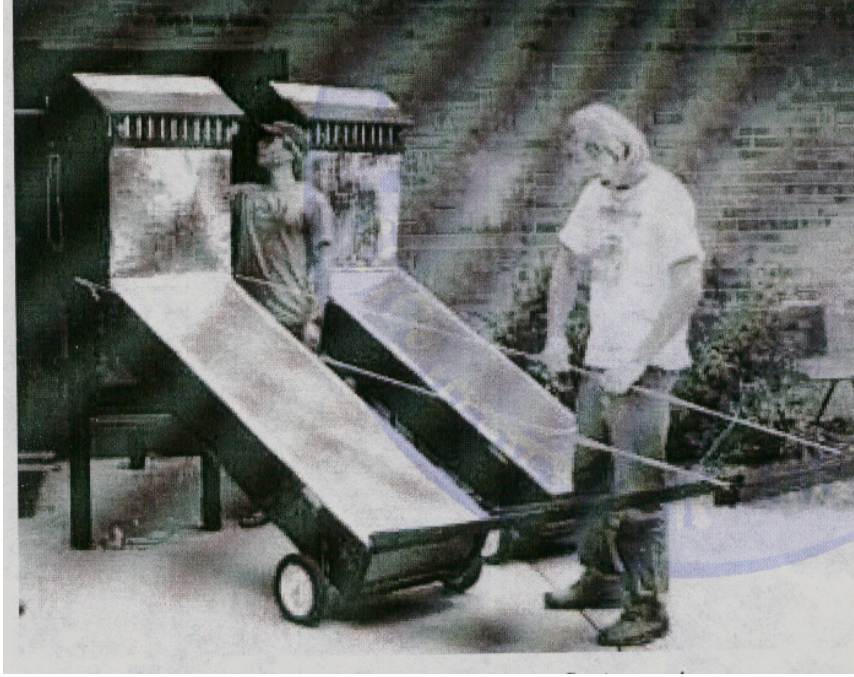
وكذلك يوضع عاكس على ضلع غرفة التجفيف المواجهة للجنوب فوق نهاية المجمع الشمسي شكل (3-44) . يتم طلاء هذا الضلع بلون لامع او يغطي بطبقة رقيقة من الالمنيوم او بواسطة مرآة حيث تنعكس بعض الطاقة الاضافية الى المجمع الشمسي وايضا يحمي الخشب من التشققات ويمنع تحطمه .بفعل اشعة الـUV وان زاوية الانعكاس تساوي زاوية سقوط الاشعاع .



شكل(42-3): مجفف شمسي غير مباشر ذو صفيحة امتصاص مشبكة.

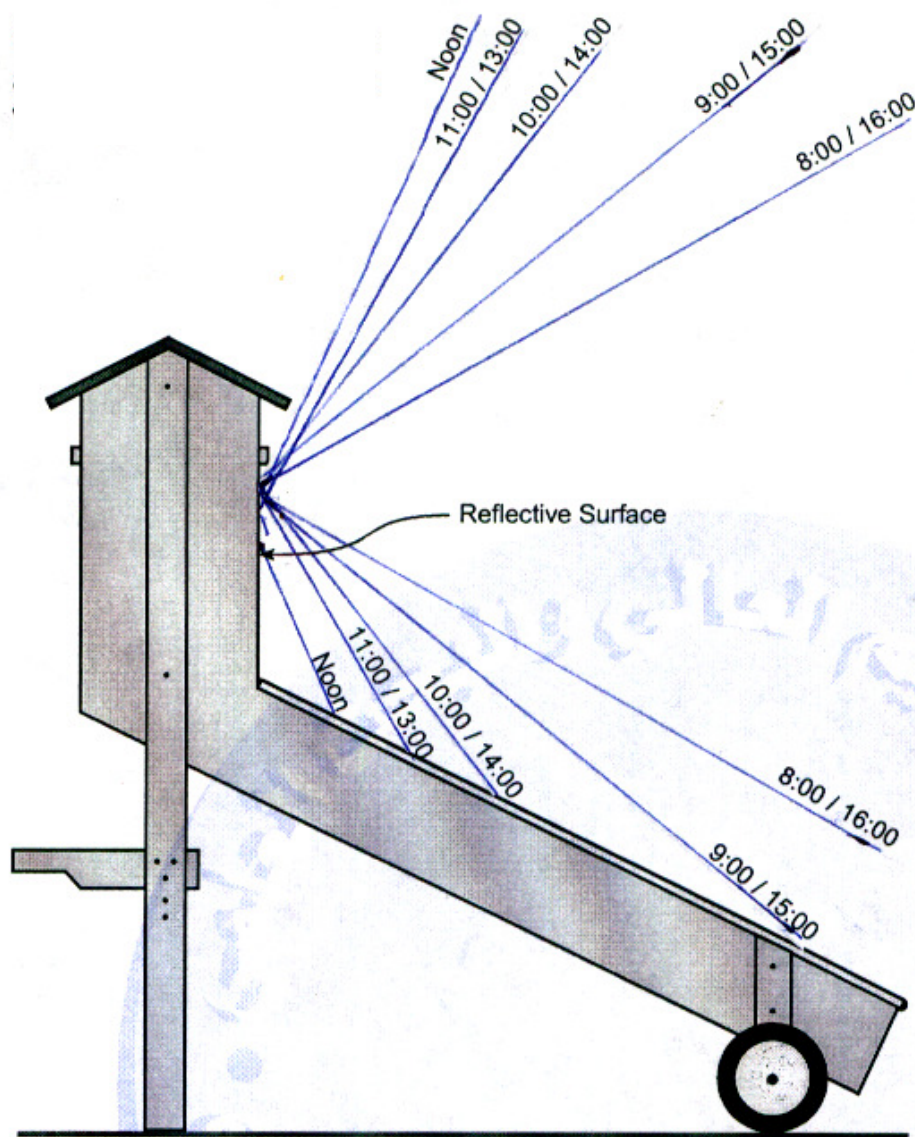


شكل(43-3): درجة الحرارة في المجفف الشمسي عند استخدام أكثر من طبقة زجاج في المجمع الشمسي.
(Scanlin,1997)

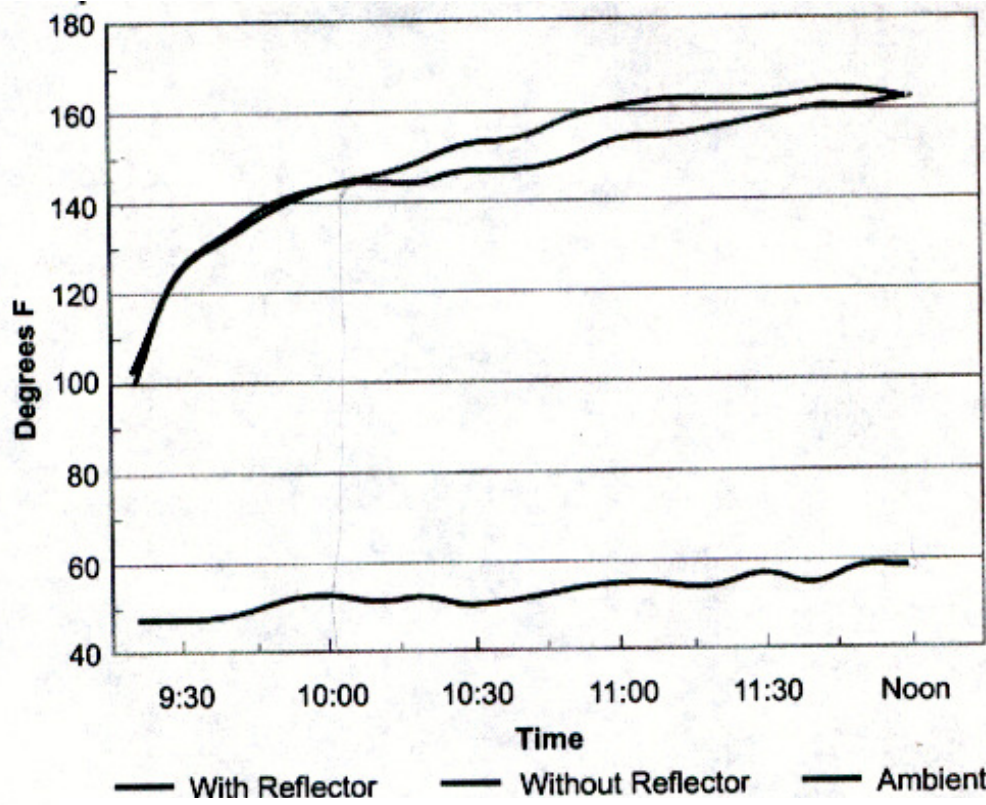


شكل(3-44): وجود عاكس على مجمع المجفف الشمسي.

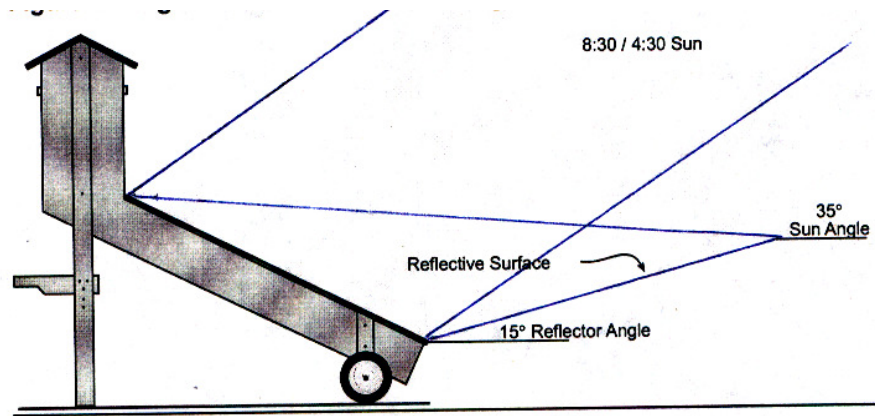
يوضح الشكل (3-45) ان المجفف الشمسي اذا ماتم تحريكه بحيث يواجه اشعة الشمس باستمرار (يتعقب الشمس) فانه سوف يعطي طاقة اضافية الى المجفف الشمسي خلال اليوم. كما يلاحظ من الشكل (3-46) ان هنالك زيادة قليلة في درجة الحرارة عند استخدام عاكس مفرد في مقدمة المجمع الشمسي والمجفف يتم تحريكه عدة مرات خلال اليوم لكي يكون ادائه افضل مايمكن وهذه العملية تجعله يتعقب زاوية السميت للشمس . زاوية الارتفاع من العاكس ايضا لاتحتاج الى تنظيم خلال اليوم وتكون 15 درجة فوق خط الافق في الصباح والمساء و 45 درجة فوق خط الافق عند الظهر شكل (3-47) و (3-48) . ان العاكس يضيف من 2.4 - 4.8 درجة مئوية للمجفف ويزيل رطوبة اكثر قليلا من المجفف الشمسي الذي بدون عاكس.



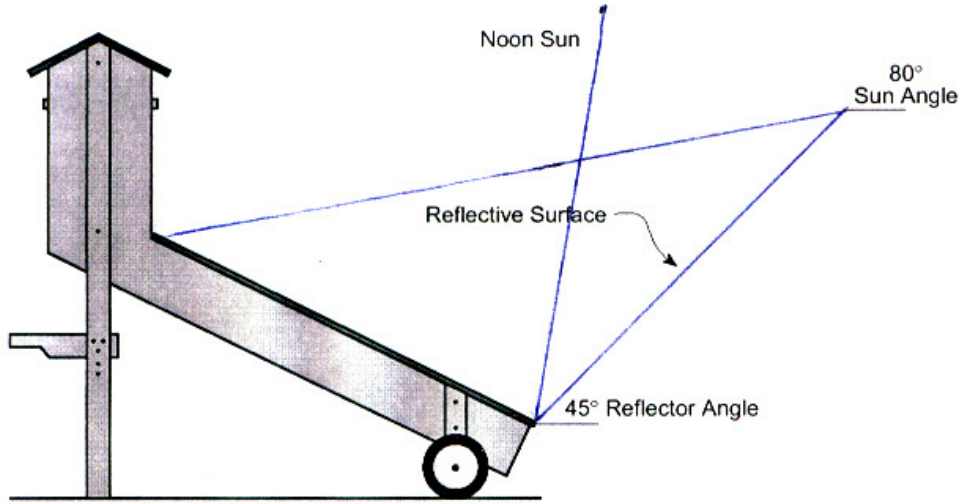
شكل (3-45): تعقيب المجفف الشمسي لأشعة الشمس.



شكل (3-46): درجات الحرارة في المجفف الشمسي عند استخدام الجدار العاكس المواجه للجنوب.



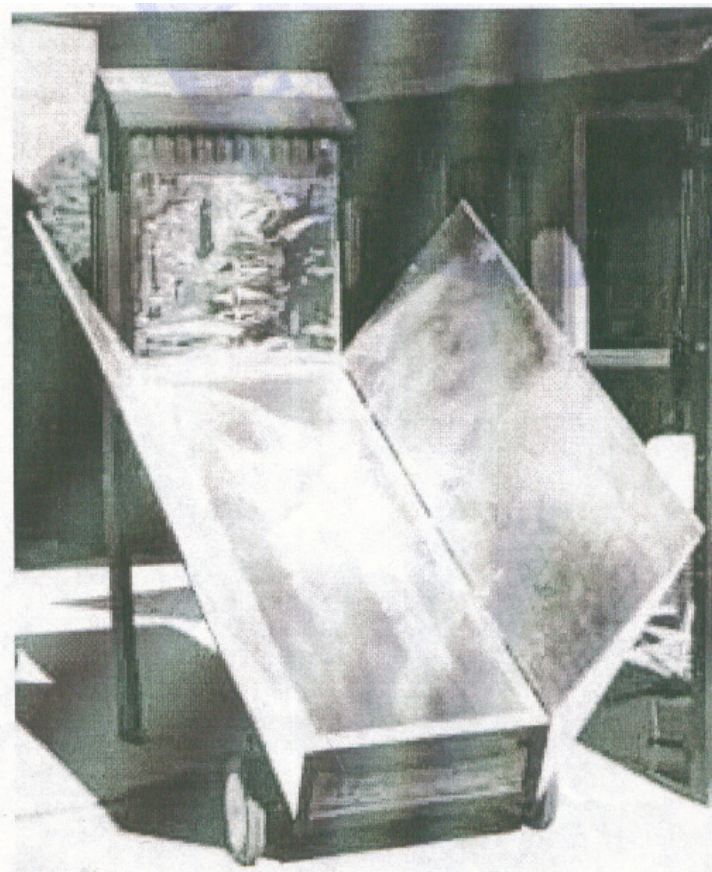
شكل (3-47): استخدام عاكس مفرد في مجمع المجفف الشمسي.



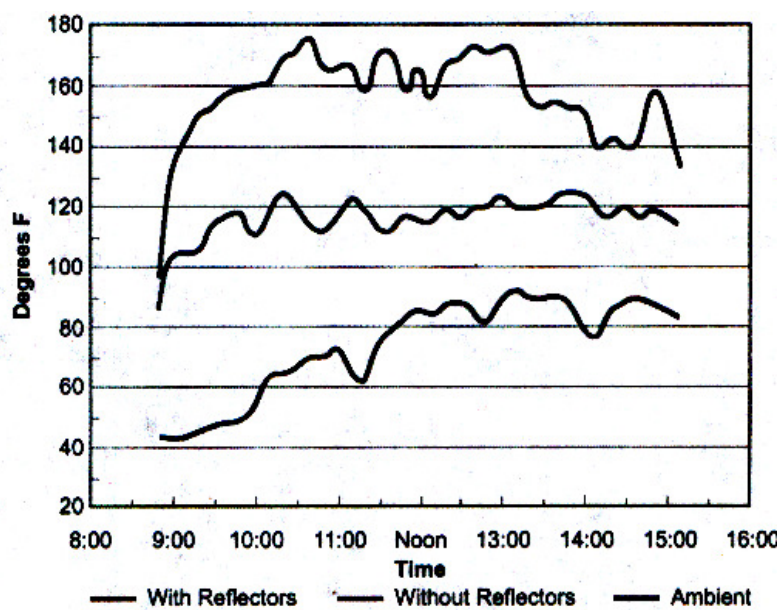
شكل (3-48): زاوية الارتفاع من العاكس في مجمع المجفف الشمسي.

هنالك طريقة اخرى لتحسين اداء المجففات الشمسية باستخدام العاكسات Reflectors ويمكن ان توضع على جانبي المجمع الشمسي شكل (3-49). وهذه الطريقة يمكن ان تزود المجمع الشمسي بطاقة اعلى من العاكس المفرد او الزجاج المتعدد وان الزاوية المثالية لها 120 درجة من سطح المجمع الشمسي. يلاحظ من الشكل (3-50) ان هنالك زيادة معنوية في درجة الحرارة عند استخدام العاكسات ، الا انه تظهر مشكلة عند عدم تدوير المجفف (التعقيب Traking) وهي حدوث ظل للعاكس على المجمع الشمسي . وهنا استخدام العاكس المفرد هو افضل من العاكسات الجانبية في حالة عدم تعقيب الشمس .

يلاحظ من الشكل (3-50) ان وجود العاكس ادى الى زيادة في درجة الحرارة في غرفة التجفيف اكثر من حالة عدم وجوده.



شكل (3-49) : استخدام عاكسات على جانبي مجمع المجفف الشمسي.

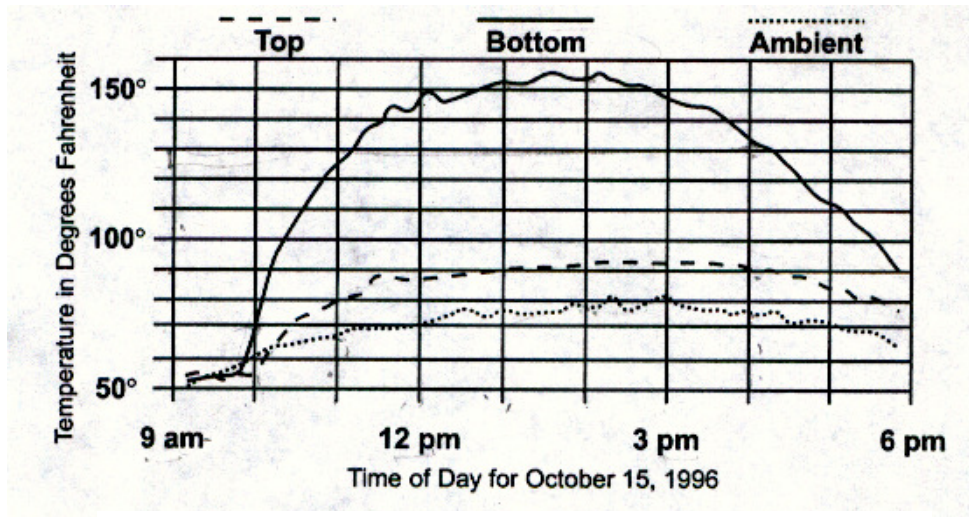


شكل (3-50) : تأثير العاكسات على درجة الحرارة في المجفف الشمسي.

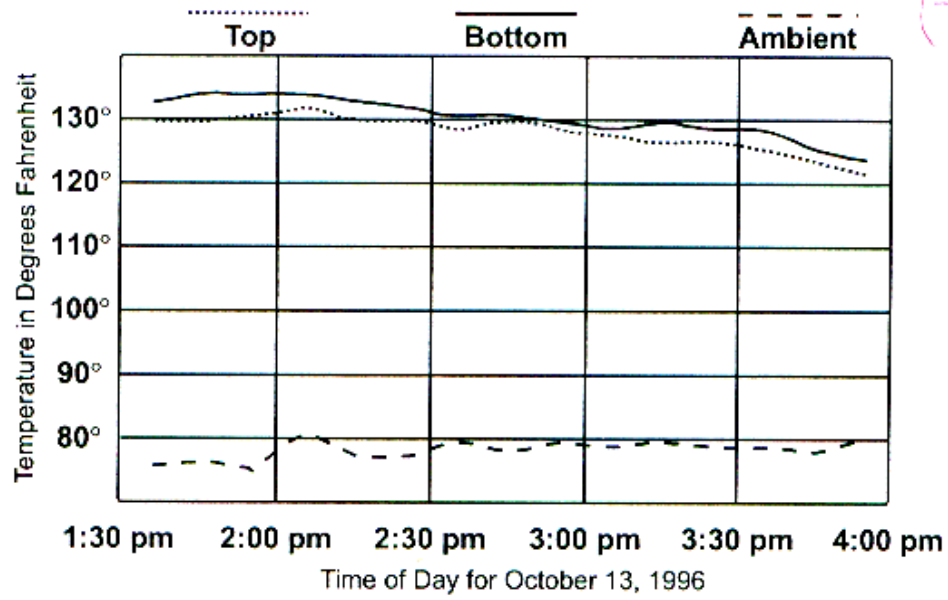
يوضح الشكل (3-51) درجة الحرارة اسفل طبق الغذاء ودرجة حرارة الجو ، وضعت فيه 25 شريحة من التفاح في يوم مشمس والرطوبة النسبية فيه 62% و93% ففي نهاية اليوم فان التفاح الموجود في الاطباق الخمسة قد جفت بينما الاطباق الخمسة العلوية فانها لم تجف.

يوضح الشكل (3-52) ان المجفف يعمل في مساء اليوم الثاني وهو محمل بالغذاء وبدون استعمال العاكسات ان درجة الحرارة في اعلى المجفف قد ازدادت كما ان الغذاء الموجود في الاعلى قد جف وفي نهاية ذلك اليوم قد جف جميع التفاح وظهرت عليه علامات تشبه التشققات. وكذلك بالنسبة للشكل (3-53).

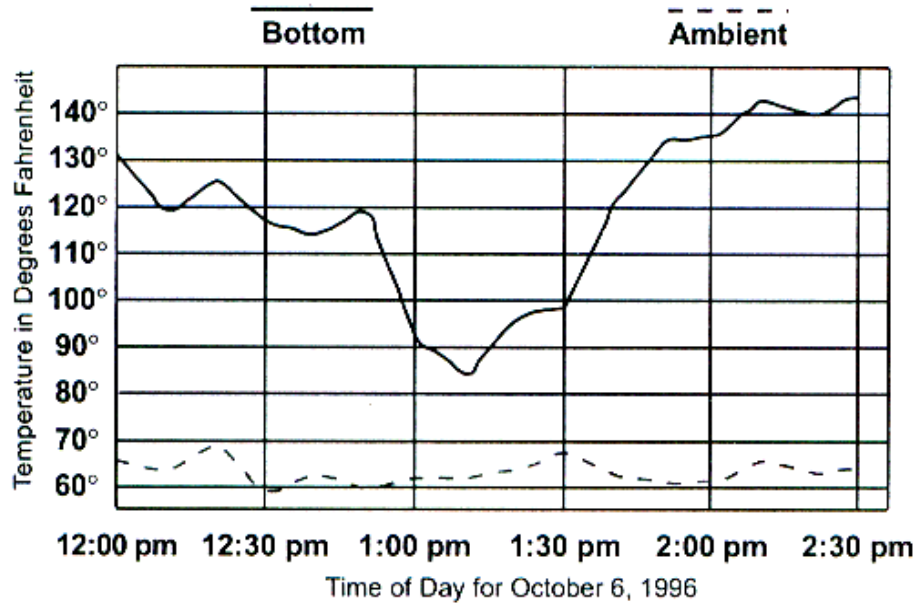
هنالك بعض المشاكل تظهر مع ارتفاع درجة حرارة التجفيف حيث ان فيتامين C يفقد عند درجة الحرارة 167 فهرنهايت اكثر من عندما تكون 131 فهرنهايت وان اكبر كمية من فيتامين C تفقد خصوصا اذا تعرض الى ضوء الشمس مع الحرارة



شكل (3-51) : درجة الحرارة اسفل الطبق في المجفف الشمسي لليوم الاول للتجفيف.



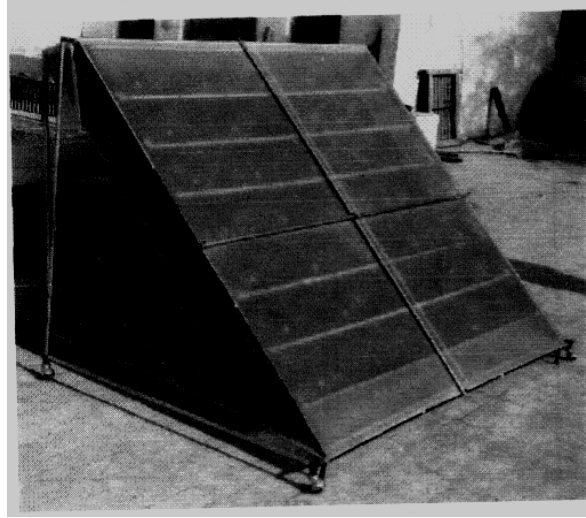
شكل (3-52) : درجة الحرارة اسفل واعلى اطباق المجفف الشمسي لليوم الثاني للتجفيف.



شكل (3-53) : درجة الحرارة اسفل الطبق تحت المجفف الشمسي.

المجفف الشمسي المتنقل المتعدد الرفوف *Multi-Shelf Portable Solar Dryer*

يعمل هذا المجفف بالحمل الطبيعي شكل (3-54) ومساحته 3.34 م² وهو يعتمد على نوع الغذاء المراد تجفيفه وهو يجفف من 10 - 30 كغم ومدة التجفيف فيه تتراوح بين 2 - 4 ايام شمسة وهو يتكون من اربعة اجزاء رئيسية تمثل الاطباق المتعددة والتي تكون بشكل طاولة وزجاج متحرك وشفافة تظليل. الهواء يدخل من الاسفل ويتحرك باتجاه الاعلى ويمر خلال الأغذية الموجودة على الاطباق ومن ثم يخرج الى الخارج من الفتحة العلوية.. شفافة التظليل مصنعة من مادة الفايبيركلاس وهي مضلعة ومتقبة وذلك للسماح للهواء بالمرور من خلالها، وفي هذه الفتحات مثبت انابيب بلاستيكية لمنع الاشعاع الشمسي المباشر من السقوط على الغذاء، وهذه توضع على كل طبق بعد تحميله بالغذاء وهذه الطريقة تستعمل للأغذية التي تتطلب ان تجفف تحت الظل لتعطي منتج ذو نوعية افضل. هنالك اطار متحرك يثبت عليه البلاستيك الشفاف نوع *UV - Stable Plastic Sheet* وهو هو مثبت على اربع عجلات حديدية شكل (3-55) وهذا يفيد في رفع درجة الحرارة بصورة اكبر ومنع تاثير الرطوبة الجوية والامطار والغبار من ان تصل الى الغذاء.



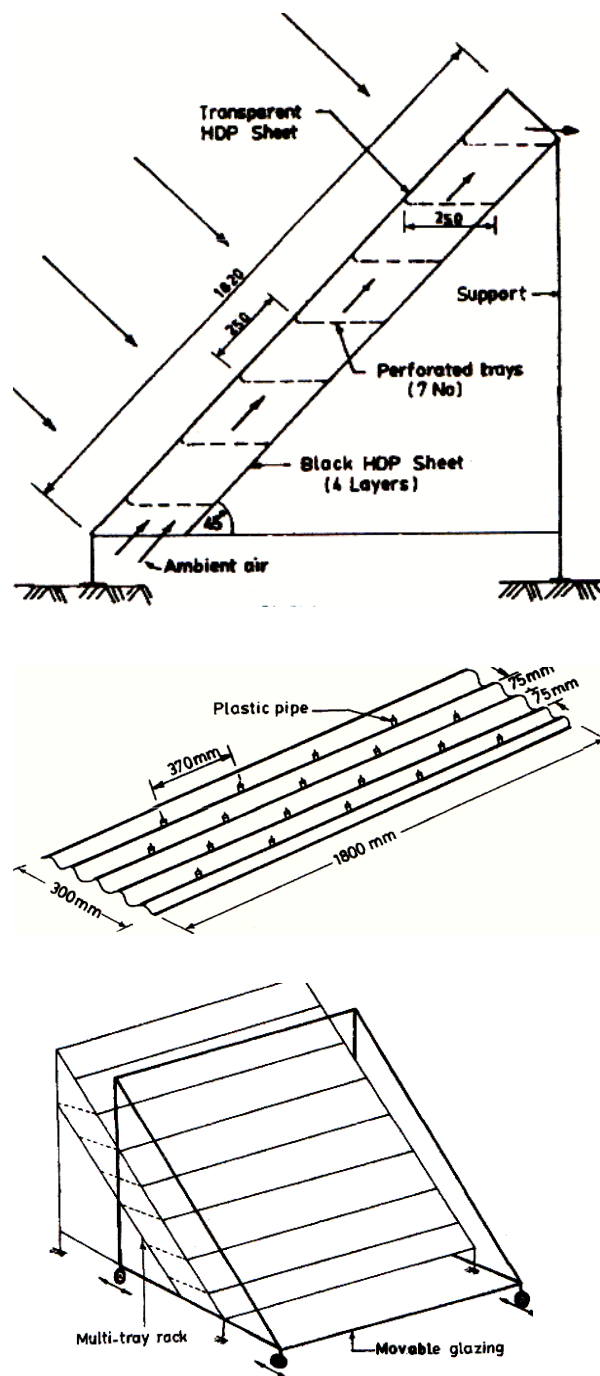
شكل (3-54) : صورة فوتوغرافية للمجفف الشمسي (Singh et al., 2004)

يوضح الشكل (3-56) ان كفاءة التجفيف القياسية *Normalized Drying Efficiency* (% كغم⁻¹) التي حسبت من المعادلة الآتية:

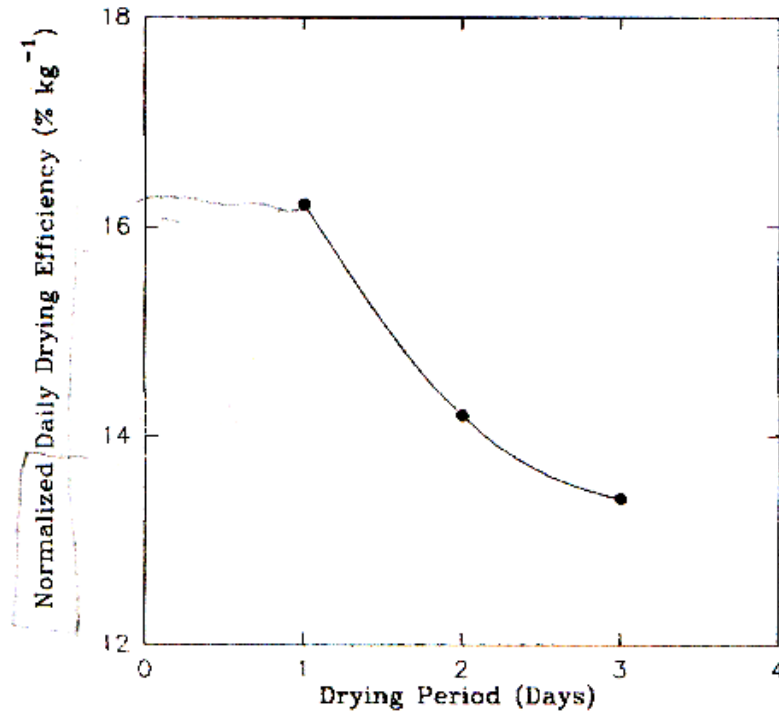
$$\eta_n = \frac{\eta_d}{W_o} \dots\dots\dots(3-45)$$

η_d : كفاءة التجفيف اليومية (%).

قد انخفضت بصورة قليلة للعنب خلال ثلاثة ايام من التجفيف نتيجة لنقصان كمية الماء المتبخرة من المنتج وزيادة زمن التجفيف وحصولا *Norton* واخرون على نتائج مشابهة للمنحنى الموجود في الشكل (3-56) وهي 16.21 % كغم⁻¹ و 14.2 % كغم⁻¹ و 13.4 % كغم⁻¹ لليوم الاول والثاني والثالث على التوالي.



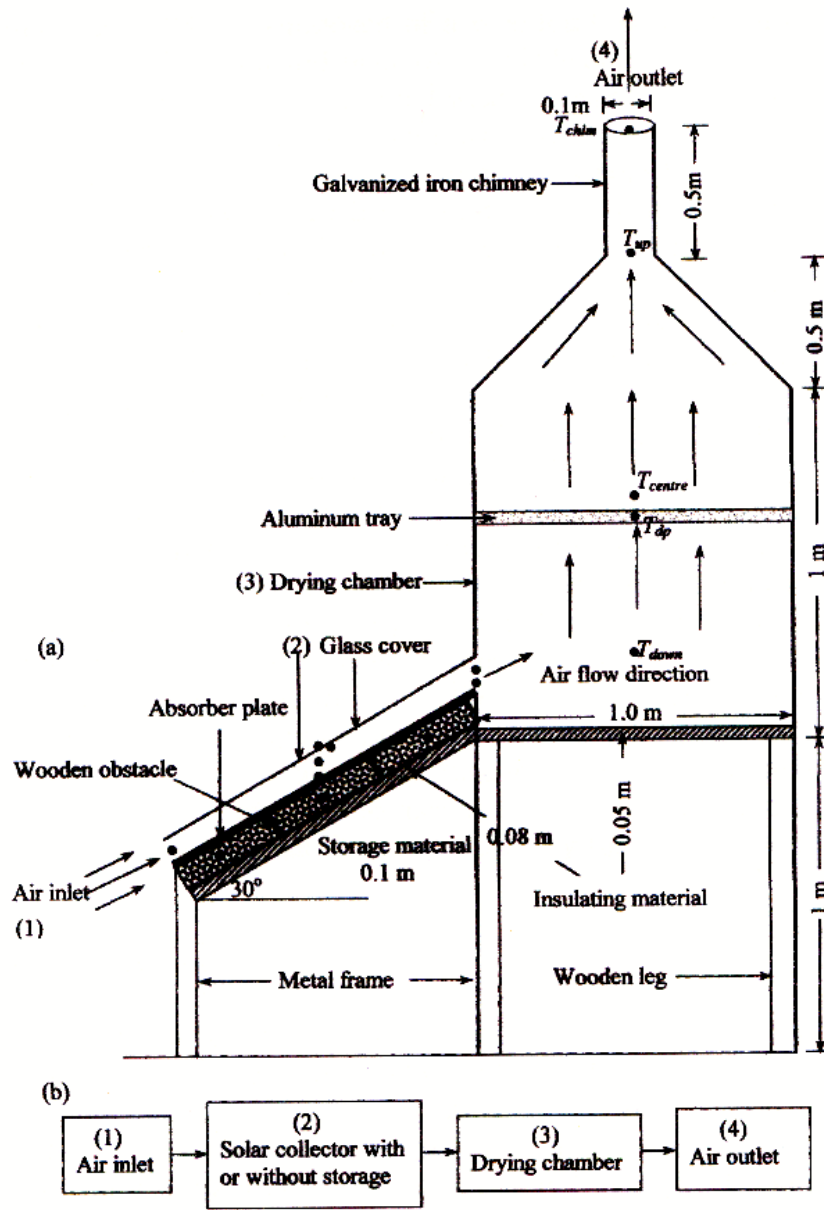
شكل (3-55): اجزاء المجفف الشمسي المتنقل. (Singh et al., 2004).



شكل (3-56) : كفاءة التجفيف القياسية للعنب المجفف.

يوجد تصميم اخر لهذا النوع من المجففات وهو ان صفيحة الامتصاص المستوية في مجمعه الشمسي كانت مصنوعة من النحاس سمكها 0.002 م ووضع اسفلها صندوق مملوء بنشارة الخشب كعازل حراري وكانت هنالك بينهما فجوة هوائية ملئت بمادة لخرن الحرارة مثل الطين والكرافيت والرمل والغرض منها هو لتجهيز غرفة التجفيف بالهواء الحار خلال فترة الليل. شكل (3-57).

ان الهواء يجري في الفجوة بين صفيحة الامتصاص واللوح الزجاجي الى غرفة التجفيف التي تتكون من مجموعة من الاطباق الالمنيومية والمزودة بمدخنة مصنوعة من الحديد المغلون طولها 0.5 م.



شكل (3-57) : مجفف شمسي ذو نظام خزن حراري.

تصميم مجفف شمسي غير مباشر ذو منظومة راجع:

تم تصميم مجفف شمسي مزود بمنظومة الراجع ، يميل بزاوية 30 درجة عن الافق سعته 25كغم من الاسماك واللحم كما في شكل (3-58) و (3-59) ، يتكون من مجمع شمسي ذي صفيحة امتصاص مضلعة بزاوية 60 درجة سوداء اللون ذات خمس قنوات ، طول القناة الواحدة 1 م وعمقها 10 سم ومساحة المجمع الشمسي هي 0.5 م² وحسبت من خلال معرفة الحرارة الكلية المطلوبة لتبخير الرطوبة وطاقة الاشعاع الشمسي المتوفرة ومن معادلة موازنة الطاقة الاتية:

$$F_R [I_T (\tau \alpha)_e - U_L (T_i - T_{am})] A_c = Q_a \rho_a (T_o - T_i) \dots \dots \dots (3-46)$$

يمكن حساب معدل الجريان الحجمي من المعادلة الاتية:

$$Q_a = \lambda \left[\frac{w_g (M_i - M_f) / (100 - M_f)}{c_a \rho_a (T_{i1} - T_f)} \right] / t_d \dots \dots \dots (3-47)$$

افترض [12] ان $T_{am} \approx T_i$ وانبعائية الزجاج (τ) قيمتها 0.85 وكذلك الامتصاصية (α) للأسطح المطلية بطلاء اسود هي 0.95 ، ومعامل الانتزاع الحراري (F_R) هو 0.7.

I_T : طاقة الاشعاع الشمسي (واط/م²)

U_L : معامل الفقدان الحراري الكلي (واط/م².°م)

T_i : درجة حرارة الهواء الداخل الى المجمع الشمسي (°م)

T_{am} : درجة حرارة الجو (°م)

T_o : درجة حرارة الهواء الخارج من المجمع الشمسي (°م)

A_c : مساحة المجمع الشمسي (م)

Q_a : معدل الجريان الحجمي للهواء (م³/سا)

ρ_a : كثافة الهواء (كغم/م³)

w_g : وزن الغذاء الرطب (كغم)

M_i : المحتوى الرطوبي الاولي للغذاء (%)

M_f : المحتوى الرطوبي النهائي للغذاء (%)

c_a : الحرارة النوعية للغذاء (جول/كغم .كلفن)

t_d : زمن التجفيف (سا)

T_{i1} : درجة حرارة الهواء تحت صينية التجفيف (م.°)

T_f : درجة حرارة الهواء فوق صينية التجفيف م.° ويمكن حسابها من معرفة الانتالبي والرطوبة عند تلك المنطقة

λ : الحرارة الكامنة لتبخير الماء (جول/كغم)

وعليه تكون مساحة المجمع الشمسي A_c في ظروف البصرة كالآتي:

$$A_c = \frac{Q_a \rho_a C_a (T_o - T_{am})}{0.57 I_T} \dots \dots \dots (3-48)$$

تم عزل المجمع الشمسي من الاسفل بواسطة نشارة الخشب سمك 5سم ومن الجوانب بنصف السمك ، يحتوي المجمع على مجرى لدخول الهواء واخر لخروجه الى غرفة التجفيف ، ومغطى بواسطة غطاء زجاجي سمك 0.4 سم .

تتكون غرفة التجفيف من ثلاثة جدران وباب مكون من صفائح خشبية سمك 0.4 سم خارجية وداخلية تفصل بينهما فجوة هوائية سمكها 1.25 سم ، وتحتوي ايضا على اطباق عددها 10 ابعاد الواحد منها 45 * 35 سم²

زودت غرفة التجفيف بأنبوب بلاستيكي قطره 5 سم مثبت في اعلى غرفة التجفيف من جانب ومن الجانب الاخر في مقدمة المجمع الشمسي ويدخل فيه بمسافة مقدارها 20 سم ، وظيفة هذا الانبوب هي سحب الهواء المحمل بالرطوبة والساخن من غرفة التجفيف الى المجمع الشمسي اذ هنالك يتم ازالة الرطوبة منه واعادته الى غرفة التجفيف وبذلك يعمل على رفع درجة الحرارة بسرعة خصوصا عند ساعات التشغيل الاولى وكذلك في الايام الباردة وتكون عملية التجفيف شبه مغلقة .

اما عند الايام ذات الحرارة المرتفعة فإنه تستخدم فتحة للتهوية مستطيلة الشكل ذات غطاء منزلق يمكن التحكم بمساحة الفتحة وان استخدامها يؤدي الى توقف عمل الانبوب الراجع تلقائيا ، ويخرج الهواء من فتحة التهوية بسرعة وتنخفض درجة الحرارة في غرفة التجفيف ومساحة هذه الفتحة هي 20 * 5 سم² .

اما في حالة الايام الغائمة او الممطرة او اثناء الليل فيستعمل طباخ نفطي بسيط معدل استهلاكه للوقود 0.22 (لتر/سا) يوضع اسفل غرفة التجفيف يعمل على تسخين انبوب عمودي عليها مزود بانبوب جانبي ومفتوح داخل غرفة التجفيف التي تكون فتحة تهويتها مفتوحة ويتوقف عمل الانبوب الراجع اذ عند تسخينه فان الهواء الموجود بداخله سوف يسخن ويتمدد وتقل كثافته ويكبر حجمه ويتحرك باتجاه غرفة التجفيف اما الغازات والابخرة الناتجة من حرق النفط فانها لا تدخل الى غرفة التجفيف اذ تنتقل الى الجو مباشرة.

لقد تم حساب مساحة فتحة التهوية: من المعادلة الاتية:

$$A_v = \frac{Q_a}{V_w} \dots\dots\dots(3-49)$$

A_v : مساحة فتحة التهوية (م²)
 V_w : سرعة الرياح (م/ثا)

حساب معدل وثابت التجفيف حسب مراحل التجفيف:

تستعمل المعادلة الاتية لحساب معدل التجفيف :

$$R_d = \frac{M_{i-1} - M_I}{\Delta t} \dots\dots\dots(3-50)$$

R_d : معدل التجفيف (كغم ماء/كغم مادة جافة.سا)
 M_{i-1} : المحتوى الرطوبي عند زمن معين (كغم ماء/كغم مادة جافة).
 M_I : المحتوى الرطوبي المراد الوصول اليه (كغم ماء/كغم مادة جافة).
 Δt : التغير في الزمن (سا)

خلال عملية التجفيف بالهواء فأن الماء يتبخر من سطح السمك وفي الوقت نفسه يتحرك الماء ومن اعلى الطبقات وباتجاه السطح ويحصل التجفيف في حالتين ففي الحالة الاولى يكون سطح السمك رطبا وتعتمد ظروف التجفيف على بعض الظروف الاولى المحيطة بالسمكة مثل سرعة الهواء والرطوبة النسبية ودرجة الحرارة والمساحة السطحية واذا كانت هذه الظروف ثابتة فأن سرعة التجفيف ستكون ثابتة يطلق على معدل التجفيف في هذه الحالة بالتجفيف بمعدل ثابت ويحسب من العلاقة الاتية :

$$\left(\frac{dM}{dt}\right)_c = \frac{M_i - M_c}{t_c} \dots\dots\dots(2-51)$$

إذا يحسب زمن هذه المرحلة كالآتي:

$$t_c = \frac{M_i - M_c}{\left(\frac{dM}{dt}\right)_c} \dots\dots\dots(3-52)$$

بعد إزالة الرطوبة ستظهر الحالة الثانية من التجفيف وهي التجفيف بمعدل متناقص
اذ تعتمد على سرعة انتقال الرطوبة من السمكة الى السطح فكلما انخفض المحتوى
الرطوبي فان سرعة انتقال الماء الى السطح ستتناقص ولذلك فأن سرعة التجفيف
تصبح بطيئة وتحسب كالآتي :

$$-\left(\frac{dM}{dt}\right) = \frac{\left(\frac{dM}{dt}\right)_c M_e}{M} \dots\dots\dots(3-53)$$

$$\int_{t_c}^t dt. = -\frac{M_c}{R_c} \int_{M_c}^{M_e} \frac{dM}{M} \dots\dots\dots(3-54)$$

إذا يحسب زمن هذه المرحلة كالآتي

$$t_f = \frac{M_c}{\left(\frac{dM}{dt}\right)_c} \ln\left(\frac{M_c}{M_e}\right) \dots\dots\dots(3-55)$$

لذا يصبح الزمن الكلي للتجفيف كالآتي:

$$t = t_c + t_f \dots\dots\dots(3-56)$$

يحسب ثابت التجفيف عند المعدل الثابت كالآتي:

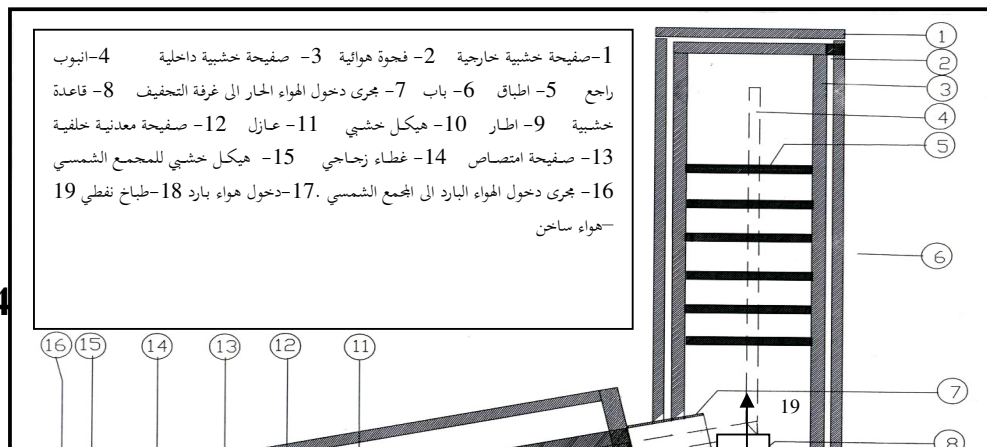
$$\frac{dM}{dt} = -k_c (M - M_c) \dots \dots \dots (3-57)$$

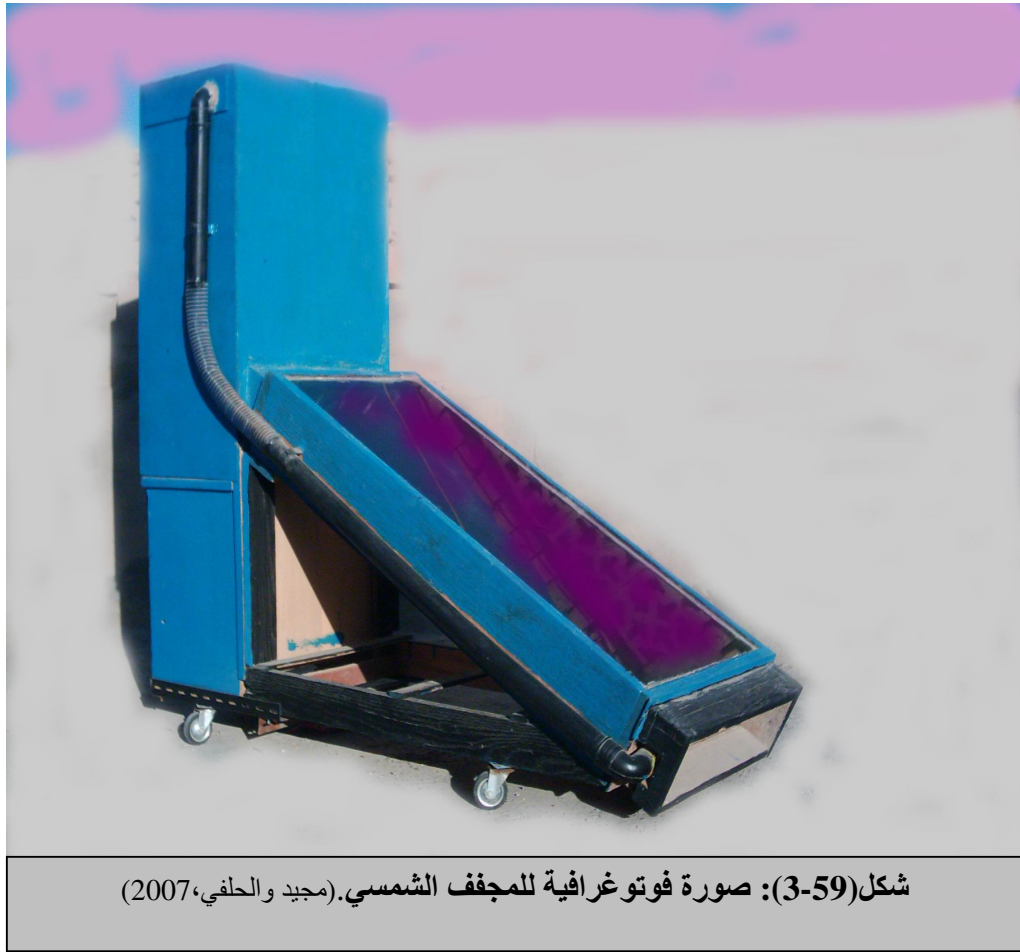
$$\int_{M_o}^M \frac{dM}{M - M_c} = - \int_0^{t_c} k_c dt \dots \dots \dots (3-58)$$

$$k_c = - \frac{1}{t_c} \ln \frac{(M_{(t)} - M_c)}{(M_o - M_c)} \dots \dots \dots (3-59)$$

وبنفس الطريقة يحسب ثابت التجفيف بمعدل متناقص :

$$k_f = - \frac{1}{t_f} \ln \frac{(M_{(t)} - M_e)}{(M_c - M_e)} \dots \dots \dots (3-60)$$





شكل(3-59): صورة فوتوغرافية للمجفف الشمسي.(مجيد والحلفي،2007)

يلاحظ من الشكل (3-60) ان اعلى طاقة للاشعاع الشمسي الساقط على السطح الافقي والمائل بزاوية 30 درجة في فصلي الصيف والشتاء كانت عند الساعة الثانية عشرة ظهرا وانخفضت بعدها ، وكانت اعلى في الشتاء وعند الاسطح المائلة

بزاوية 30 درجة منها في الصيف وعند الاسطح الافقية . بلغ معدل طاقة الاشعاع الشمسي في فصل الشتاء للاسطح الافقية والمائلة بزاوية 30 درجة 770 ، 868 واط/م² على التوالي اما في فصل الصيف فقد بلغ 754.4، 826.6 واط/م² على التوالي وهذه الطاقة كافية لتشغيل المجفف الشمسي .

اما بخصوص درجة الحرارة فيلاحظ من الشكل نفسه ان درجة الحرارة في غرفة التجفيف قد ازدادت مع زيادة ساعات النهار ووصلت الى اقصى قيمة لها عند الساعة الواحدة ظهرا ثم انخفضت في فصلي الصيف والشتاء ولزاويتي الميل 0 و 30 درجة للمجمع الشمسي بوجود وعدم وجود راجع وهذا نتيجة لزيادة طاقة الاشعاع الشمسي ثم انخفاضه بعد منتصف النهار . كانت درجة الحرارة في غرفة التجفيف اعلى عند تزويدها بالراجع من حالة عدمه .وعند استعمال الراجع فان الهواء الساخن والمحمل بالرطوبة سوف ينتقل الى المجمع الشمسي ويساهم في رفع درجة حرارته ويفقد رطوبته ثم ينتقل الى غرفة التجفيف مره اخرى وتكون الدورة شبه مغلقة .

يلاحظ من جدول (3-4) ان طاقة الاشعاع الشمسي غير كافية لتشغيل المجفف الشمسي بسبب ضعف الاشعة الشمسية نتيجة وجود الغيوم والامطار وتم حل هذه المشكلة باستعمال طباخ نفطي بسيط يقوم بتسخين الهواء الموجود داخل انبوب يخترق غرفة التجفيف ومزود بانبوب جانبي لسحب الهواء النظيف والخالي من الغازات ونواتج الاحتراق اذ يتحرك الهواء بصورة طبيعية بداخله وينتقل الى داخل غرفة التجفيف من دون ان تدخل معه نواتج الاحتراق وبذلك يضمن عدم تلوث الغذاء به وظهرت النتائج ان معدل درجة الحرارة فيه هو 66.26 °م وهي درجة مثالية لتجفيف الاغذية

اظهرت النتائج في الشكل (3-61) ان رطوبة كل من السمك واللحم المجففين بالمجفف الشمسي والتجفيف الشمسي الطبيعي قد انخفضت مع زيادة زمن التجفيف وكان مقدار الانخفاض في حالة تجفيف اللحم اعلى منها في حالة السمك ، وهذا يعود الى ان سمك شرائح اللحم اقل مما في السمك فتكون عملية تبخر الماء منه اسرع ، كما انه تطلب زمنا اقل من السمك عند استعمال طريقتي التجفيف المختلفتين

كما نلاحظ من الشكل ان مقدار الانخفاض برطوبة كل من السمك واللحم كان اعلى في حالة استعمال المجفف الشمسي منه في حالة استعمال التجفيف الشمسي الطبيعي ، وهذا يعود الى ان السمك واللحم المجففين بالمجفف الشمسي يكونان معزولان عن المحيط الخارجي ولهذا فان التغير في الظروف البيئية لا يؤثر عليه .

يلاحظ من شكل (3-62) ان معدل التجفيف انخفض معنوياً مع انخفاض المحتوى الرطوبي للسمك واللحم المجففين بطريقتي التجفيف المختلفتين ، وهذا بسبب فقدان كتلة الماء من الغذاء الى هواء التجفيف وهذا الفقدان يتناقص مع زيادة زمن التجفيف فمثلاً في السمك عند بداية التجفيف والى المحتوى الرطوبي الحرج الذي هو 1.53 (كغم ماء/كغم مادة جافة) يكون الفقدان في الرطوبة ثابت أي ان معدل التجفيف ثابت ومقداره 1.092 (كغم ماء/كغم مادة جافة). وبعد ذلك بدأ الفقدان المتناقص والذي يسمى بمرحلة التبخر المتناقص .

اظهرت النتائج ان معدل التجفيف عند استعمال المجفف الشمسي كان اعلى منه عند استعمال التجفيف الشمسي الطبيعي للسمك واللحم . الا انهما يقتربان عند المحتوى الرطوبي 1.132 (كغم ماء/كغم مادة جافة). والى النهاية ، اذ خلال هذه الفترة تكون الرطوبة قليلة في الغذاء وتنقل عن طريق الخاصية الشعرية الى السطح وبسبب وجود بعض المعوقات مثل الاملاح والعناصر المعدنية وغيرها فانها تعرقل نوعاً ما حركة الماء الى السطح .

نلاحظ من الشكلين (3-63) و (3-64) اللذين يمثلان تغير الرطوبة الحرة مع زمن التجفيف واللذين من خلالهما يمكن معرفة عدد اجزاء المنحنى المتناقص بشكل دقيق . ان مرحلة التبخر المتنازل بالنسبة للسمك المجفف بالتجفيف الشمسي الطبيعي تتمثل على شكل خط مستقيم بينما في حالة المجفف الشمسي فانها تقسم الى اربعة اجزاء ويقسم الى ثلاثة اقسام في حالة اللحم وعند كلتا طريقتي التجفيف . وان لكل جزء من هذه الاجزاء يوجد ثابت تجفيف خاص به و. يمكن ملاحظته من جدول (5-3) اذ ان ثابت التجفيف لمرحلة التبخر الثابت هو اعلى منه عند جميع مراحل التبخر المتناقص للسمك واللحم المجففين بطريقتي التجفيف المختلفتين بسبب زيادة سرعة انتقال الرطوبة الى سطح الغذاء وهذا يعني انه في تلك المرحلة يبقى سطح

المادة الغذائية مشبع بالرطوبة حيث ينتقل الماء من الداخل الى السطح ويتم ذلك بإزالة بخار الماء المتكون عبر غشاء الهواء المستعمل للتبخير ويكون في هذه المرحلة مساويا للرطوبة التي ترتفع من المادة الغذائية الى السطح وينفس المعدل ويتوقف معدل التبخر على معدل انتقال الحرارة للسطح الذي يتم تجفيفه وان معدل انتقال الكتلة يوازي معدل انتقال الحرارة بينما في مرحلة التبخر المتناقص تنخفض سرعة انتقال الرطوبة الى السطح ويبدا السطح بالجفاف وان الوقت اللازم لاجراء هذه المرحلة هو اكبر من زمن التجفيف بمعدل ثابت .

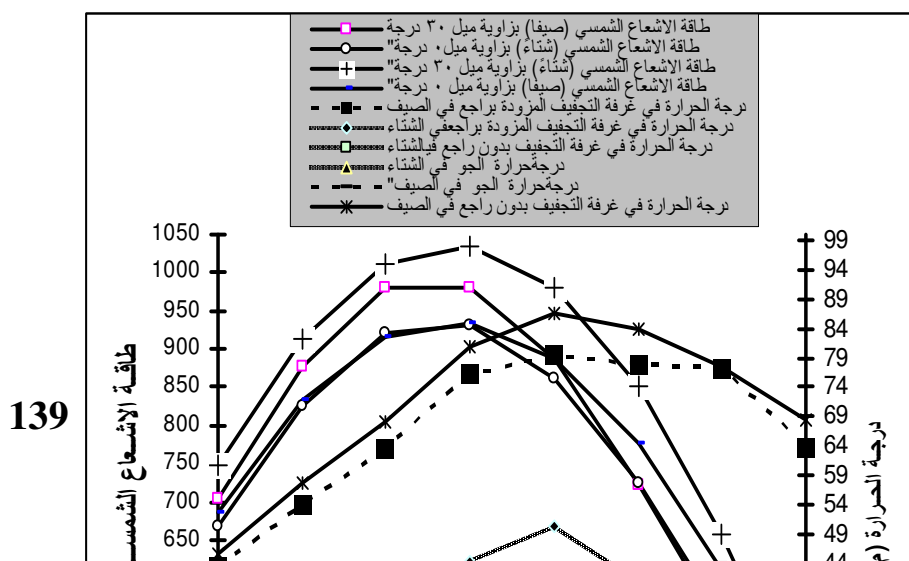
بينت النتائج ان ثابت التجفيف لمعدل التجفيف الثابت كان اعلى في حالة المجفف الشمسي منه في حالة التجفيف الشمسي الطبيعي فمثلا في حالة تجفيف السمك بالمجفف الشمسي والتجفيف الشمسي الطبيعي كان ثابت التجفيف للمعدل الثابت هو 0.326 و 0.267 سا⁻¹ على التوالي . وهذا بسبب ارتفاع درجة الحرارة في المجفف الشمسي مما يؤدي الى سرعة تبخر الرطوبة من الغذاء مقارنة مع التجفيف الشمسي الطبيعي .

وتشير نتائج الجدول الى ان فترة المعدل المتناقص يكون متعدد المراحل في السمك واللحم المجففين بطريقتي التجفيف المختلفتين ماعدا في حالة السمك المجفف بالتجفيف الشمسي الطبيعي فقد كان معدل التجفيف المتناقص يحدث في فترة واحدة فقط . وثابت معدل التجفيف لها هو 0.091 سا⁻¹

نلاحظ من الشكل (3-62) ان كفاءة التجفيف انخفضت مع زيادة زمن التجفيف للسمك واللحم المجففين بطريقتي التجفيف المختلفتين . ونلاحظ ايضا انه بعد مرور ساعة من التجفيف وصلت الكفاءة الى 90 ، 63 % للحم المجفف بالمجفف الشمسي والتجفيف الشمسي الطبيعي على التوالي بينما بعد مرور 8 ساعة وصلت كفاءة التجفيف الى 3.85 ، 3.85 % على التوالي . بينما في حالة السمك فقد وصلت الى 62.99 ، 39.76 % على التوالي بعد مرور ساعة ووصلت الى 1.87 ، 1.37 % بعد مرور 20.5 ساعة الا ان الاختلافات كانت بينهما غير معنوية بعد مرور 20.5 ساعة . ان سبب نقصان الكفاءة مع زيادة زمن التجفيف يعود الى بطيء انتقال الرطوبة الى سطح الغذاء مما يتطلب زمنا اكبر وكذلك قلة

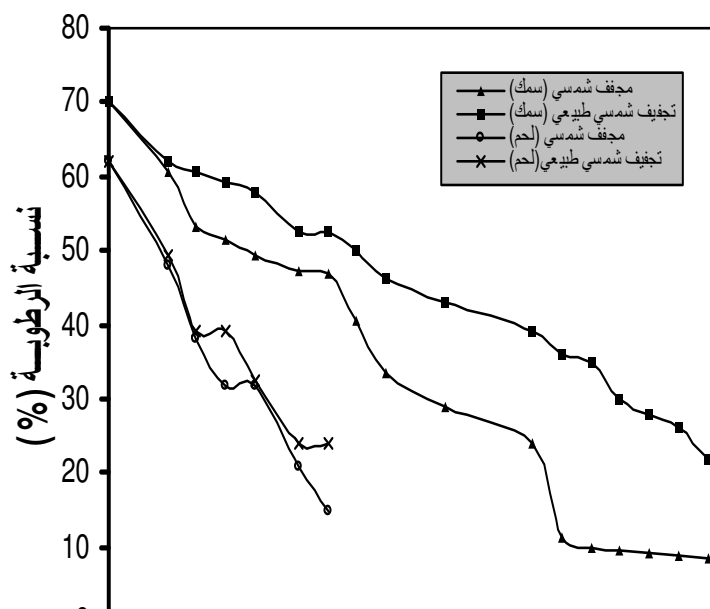
كمية الماء المتبخر بوحدة الزمن . كما تشير النتائج الى ان كفاءة التجفيف باستعمال المجفف الشمسي كانت اعلى منها عند استعمال طريقة التجفيف الشمسي الطبيعي للسّمك واللحم ماعدا في حالة السمك فان الاختلافات كانت صغيرة .

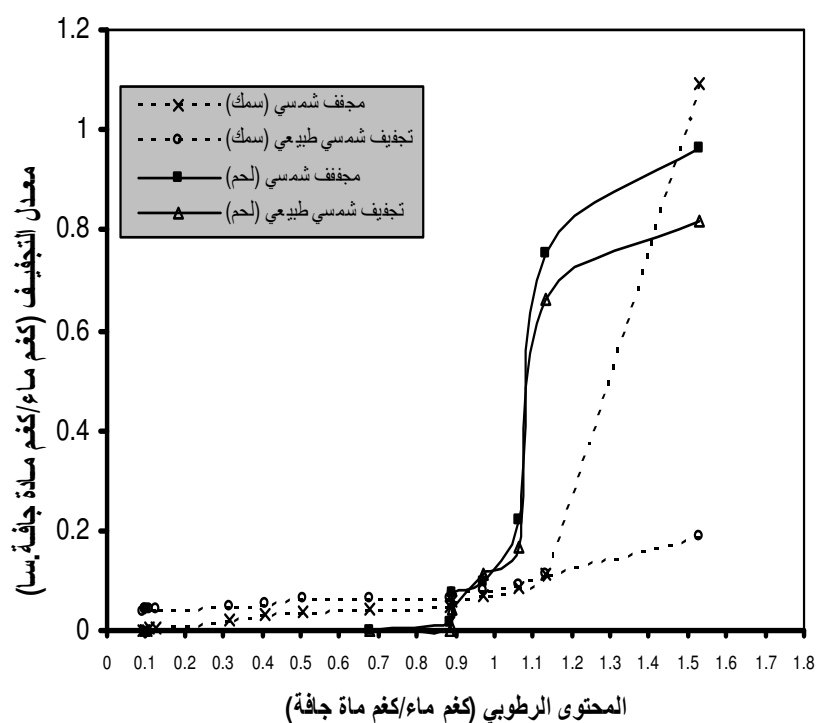
نلاحظ من الشكل (3-65) ان نسبة استرجاع الماء للسّمك واللحم كانت اعلى باستعمال المجفف الشمسي منه عند استعمال طريقة التجفيف الشمسي الطبيعي فقد وصلت نسبة استرجاع الماء للحم والسمك المجففين بالمجفف الشمسي الى 1.52 ، 2.75 (كغم ماء/كغم مادة جافة.) على التوالي بعد مرور 110 دقيقة بينما في حالة التجفيف الشمسي الطبيعي كانت 1.28 ، 1.66 (كغم ماء/كغم مادة جافة.) على التوالي عند الزمن نفسه . وهذا يعود الى انه في حالة التجفيف الشمسي الطبيعي فان سطح الغذاء يتعرض الى تركيز اشعة الشمس المباشرة فترتفع درجة حرارته بصورة كبيرة في منطقة السطح مما يؤدي الى تصلب الطبقة السطحية وكذلك تغير الظروف البيئية من درجة حرارة ورطوبة ورياح كل هذه العوامل جاءت مجتمعة لتجعل نسبة استرجاع الماء منخفضة بسبب تاثر البروتين سلبا بها وكذلك بقاء كمية من الرطوبة بداخل الغذاء مما يجعل امتصاصه للماء ضعيف.



جدول (3-4): طاقة الاشعاع الشمسي و درجة حرارة الجو و غرفة التجفيف في يوم غائم ويوم ممطر عند استعمال طباخ نفطي لاجراء عملية التجفيف

ساعات النهار	درجة حرارة الجوم O	درجة حرارة غرفة التجفيف م O	طاقة الاشعاع الشمسي واط/م ²
9	9	40	40
10	10	70	45
11	10	70	67
12	10	70	90
13	10	70	80
14	10	70	65
15	11	70	81
المعدل	9.875	66.25	66.85





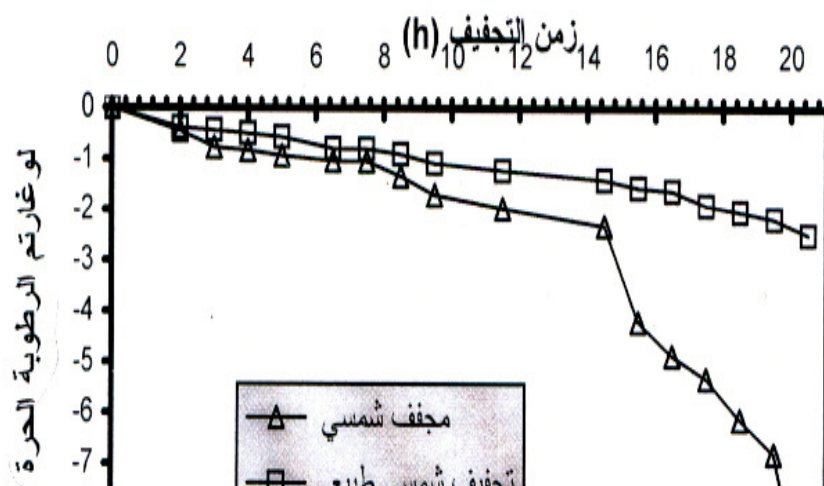
شكل (3-62): العلاقة بين المحتوى الرطوبي ومعدل التجفيف للسمك واللحم المجففين بالمجفف الشمسي والتجفيف الشمسي الطبيعي

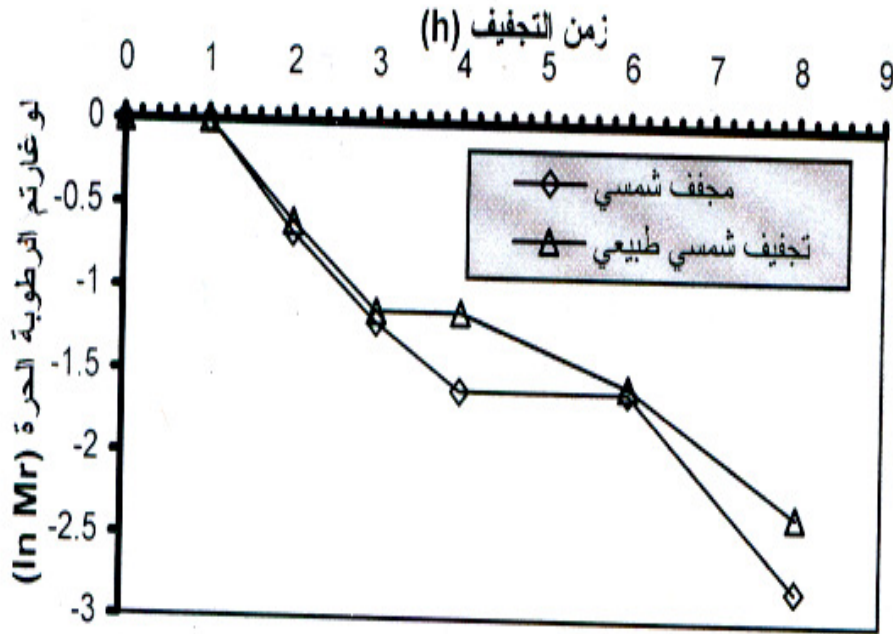
جدول (3-5) : ثابت التجفيف في مرحلتي التبخر الثابت (kc)

والمتنازل (kf) للسمك واللحم المجففين بالمجفف الشمسي والتجفيف

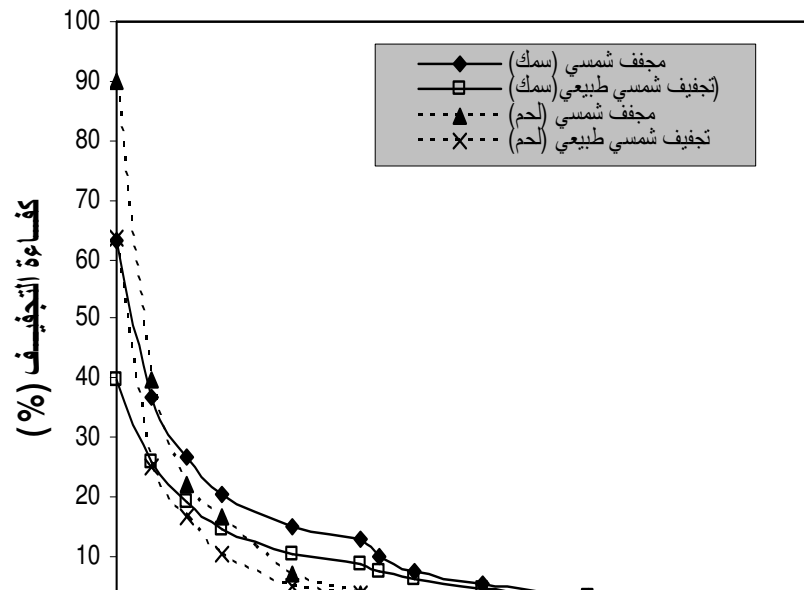
الشمسي الطبيعي.

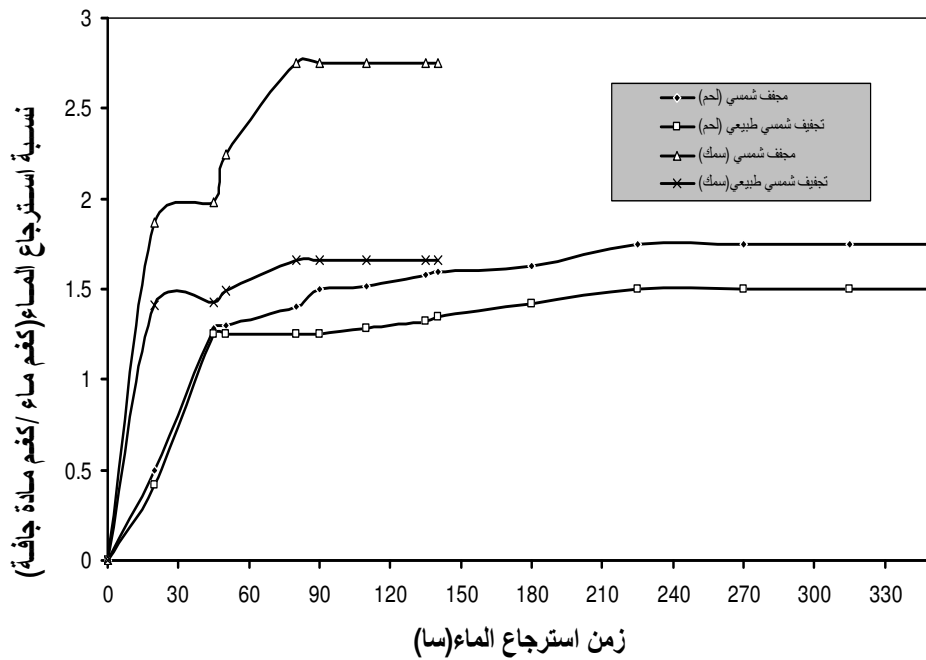
لحم		سمك		ثابت التجفيف
تجفيف شمسي طبيعي	مجفف شمسي	تجفيف شمسي طبيعي	مجفف شمسي	
0.99876	0.823000	0.267238	0.326474	Kc
0.716083	0.389486	0.091566	0.081437	Kf1
0.352296	0.240044	.....	0.112302	Kf2
0.369867	0.251997	.....	0.23857	Kf3
.....	.....	.....	0.313249867	Kf4





شكل (3-63): العلاقة بين زمن التجفيف ولو غارتم الرطوبة الحرة للحم المجفف بالمجفف الشمسي والتجفيف الشمسي الطبيعي





شكل (3-65): العلاقة بين زمن استرجاع الماء ونسبة استرجاع الماء
للسمك واللحم المجففين بالمجفف الشمسي والتجفيف الشمسي الطبيعي
تجفيف الذرة الصفراء بالطاقة الشمسية

يلاحظ من الجدول (3-6) إن طاقة الإشعاع الشمسي قد ازدادت مع زيادة ساعات النهار وصولاً إلى الساعة الثانية عشر ظهراً وبلغت 923.69 واط /م² ثم انخفضت بعد ذلك وهذا يعود إلى دوران الأرض حول محورها ونتيجة لذلك تتغير الزوايا الشمسية *Solar angles* مع ساعات النهار ،التي تشمل الزاوية السميتية *Zenith angle* وزاوية الارتفاع *altitude angle* وزاوية السميت *azimuth angle* وتصل قيمة الأخيرة إلى الصفر عند

منتصف النهار والى قيمتها العظمى عند الشروق والغروب وكذلك تغير زاوية الساعة *hour angle* مع ساعات النهار .

إن درجة الحرارة في غرفة التجفيف قد ازدادت مع زيادة ساعات النهار ووصلت إلى أقصى قيمة لها عند الساعة الواحدة ظهرا وبلغت 56 م° ثم انخفضت بعد ذلك خلال شهر كانون الثاني . ويعزى هذا الى استمرار انتقال الحرارة الى غرفة التجفيف المعزولة عن المحيط الخارجي وارتفاع درجة الحرارة بداخلها عند الساعة الواحدة بعد الظهر نتيجة لبقاء صفيحة الامتصاص ساخنة عند هذه الساعة اذ تزداد درجة حرارة غرفة التجفيف بسبب حدوث حالة التجميع الحراري فيها . يوجد تاثير لدرجة حرارة الجو وطاقة الاشعاع الشمسي على درجة الحرارة في غرفة التجفيف للمجفف الشمسي وكما مبين في العلاقة التجريبية ذات الانحدار المتعدد الاتية

$$T_{oven} = -27.84 + 3.68 \cdot 10^{-2} I_T + 2.32 T_a - 0.973$$

ونلاحظ من الجدول أيضا إن كفاءة التجفيف للذرة الصفراء بلغت 70% عند استعمال المجفف الشمسي ، بينما بلغت 35% عند استعمال طريقة التجفيف الشمسي الطبيعي وهذا يعود إلى ارتفاع درجة حرارة غرفة التجفيف والقدرة على تحويل طاقة الإشعاع الشمسي إلى طاقة حرارية باستخدام 0.5 م² فقط بينما يتطلب تجفيف نفس الكمية بطريقة التجفيف الشمسي الطبيعي مساحة قدرها 1 م² فيأخذ الغذاء مساحة اكبر لغرض تعريضه الى ضوء الشمس بينما في المجفف الشمسي وضع الإطباق يكون بصورة عمودية وبذلك فان الهواء الساخن يمر عليها ويبخر الرطوبة منها وكذلك فان سرعة إزالة الرطوبة من الغذاء بواسطة المجفف الشمسي هي اكبر منها عند استخدام التجفيف الشمسي الطبيعي وكل هذه العوامل جاءت مجتمعة لتجعل كفاءة التجفيف في المجفف الشمسي عالية

إما بالنسبة إلى رطوبة الذرة الصفراء والنشاط المائي لها الموضحة في جدول (7-3) إن كل من المحتوى الرطوبي والنشاط المائي قد انخفض مع زيادة ساعات النهار وكان مقدار الانخفاض أعلى عند استعمال المجفف الشمسي منه عند استعمال التجفيف الشمسي الطبيعي ، اذ ان المحتوى الرطوبي للذرة الصفراء وصل إلى 3% عند الساعة 15 عند استعمال المجفف الشمسي بينما وصلت إلى 17.42% عند الزمن نفسه باستعمال التجفيف الشمسي الطبيعي . وهذا بسبب ارتفاع درجة الحرارة داخل المجفف الشمسي مما

يعمل على إزالة الرطوبة من الذرة الصفراء وبالتالي يؤدي الى انخفاض النشاط المائي فيها بشكل اكبر من استعمال التجفيف الشمسي الطبيعي .

ان لدرجة الحرارة في المجفف الشمسي تاثير مباشر على معدل انخفاض المحتوى الرطوبي ودرجة الحرارة تتاثر بصورة اساسية بطاقة الاشعاع الشمسي ، لذلك تم ايجاد علاقة الارتباط المتعدد بينهم والمعادلة التالية توضح ذلك

$$w = -3.4 \cdot 10^{-2} + 1.08 \cdot 10^{-3} I_T - 1.48 \cdot 10^{-2} T_{oven}$$

وكان الارتباط معنوي وقيمة معامل الارتباط 0.90.

إن الحرارة النوعية للذرة الصفراء قد انخفضت مع زيادة ساعات النهار وكان مقدار الانخفاض أعلى عند استعمال المجفف الشمسي مئة عند استعمال طريقة التجفيف الشمسي الطبيعي . وهذا بسبب انخفاض المحتوى الرطوبي للذرة الصفراء مع ساعات النهار وبلغ معدل الحرارة النوعية 2438.73 ، 2878.98 جول / كغم م ° عند استعمال المجفف الشمسي وطريقة التجفيف الشمسي الطبيعي على التوالي . من خلال العلاقة بين الحرارة النوعية والمحتوى الرطوبي للذرة الصفراء تم الحصول على المعادلة التجريبية الآتية:

$$C_p = 1431.59 + 6082w$$

وكان الارتباط معنوي وقيمة معامل الارتباط 0.998. ومن هذه المعادلة يمكن معرفة قيمة الحرارة النوعية للذرة الصفراء عند اي محتوى رطوبي.

جدول (3-6): طاقة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة في غرفة التجفيف (المجفف الشمسي) خلال ساعات النهار.

كفاءة التجفيف (%)		طاقة الإشعاع الشمسي (واط /م ²)	درجة الحرارة م°		الزمن
المجفف الشمسي	التجفيف الشمسي		المجفف الشمسي	الجو	

	الطبيعي				
70	35	602.42	19	11	9
		763.00	40	17	10
		843.34	47	19	11
		923.69	51	20	12
		883.35	56	20	13
		763.00	45	21	14
		522.00	35	18	15
		757.28	41.85	18	المعدل
		11.2	2.45	1.32	R.L.S.D

جدول (7-3) : المحتوى الرطوبي والنشاط المائي والحرارة النوعية للذرة الصفراء المجففة بالمجفف الشمسي وطريقة التجفيف الشمسي الطبيعي خلال ساعات .

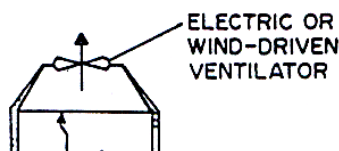
الحرارة النوعية (جول/كغم ° م)		النشاط المائي		المحتوى الرطوبي %		الزمن
المجفف الشمسي	التجفيف الشمسي	المجفف الشمسي	التجفيف الشمسي	المجفف الشمسي	التجفيف الشمسي	

	الطبيعي		الطبيعي		الطبيعي	
3327.70	3327.70	0.3016	0.3016	30.16	30.16	9
3166.52	3206.61	0.2823	0.2872	28.23	28.72	10
2885.72	3114.17	0.2460	0.27580	24.60	27.58	11
2523.63	3006.08	0.1943	0.2620	19.34	26.20	12
1798.59	2563.88	0.0624	0.1996	6.24	19.96	13
1719.54	2531.41	0.0455	0.1996	4.55	19.96	14
1649.46	2403.02	0.0300	0.1742	3.00	17.42	15
2438.73	2878.98	0.1660	0.2428	16.58	24.28	المعدل
14.23	15.67	0.0101	0.0132	1.98	2.64	R.L.S.D

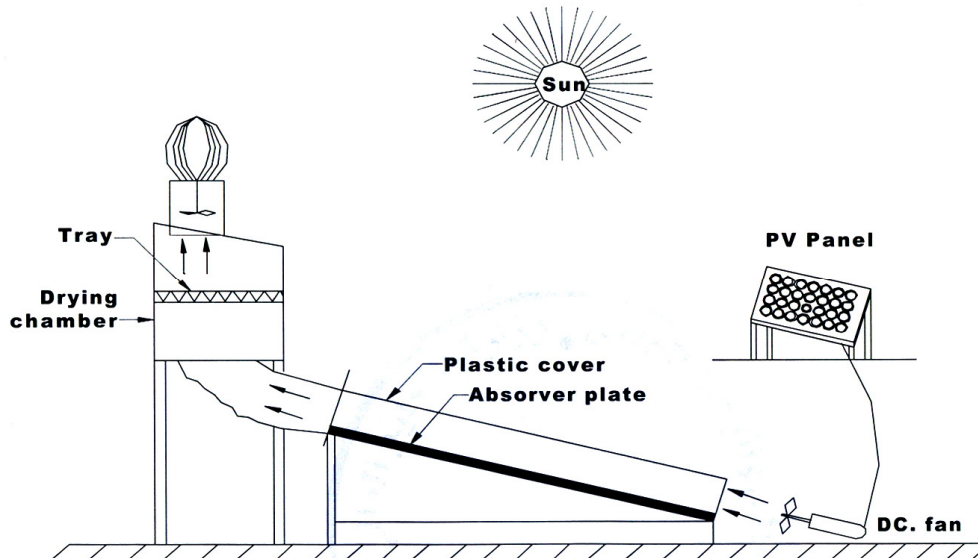
مجففات شمسية ذات حمل قسري Forced Convection Solar Dryers

هذه المجففات تكون على نوعين هما :

- أ- المجففات الشمسية المباشرة : وهي تشبه مكونات المجففات الطبيعية المباشرة لكنها تحتوي على مفرغة للهواء تقوم بسحب الهواء المار على الاغذية الى الخارج.
- ب- المجففات الشمسية غير المباشرة : وهي تشبه مكونات المجففات الشمسية غير المباشرة ذات الجريان الطبيعي ، ولكنها تحتوي على مروحة طاردة عن المركز تستخدم لدفع الهواء عبر المجمع الشمسي الى غرفة التجفيف شكل (3-66).

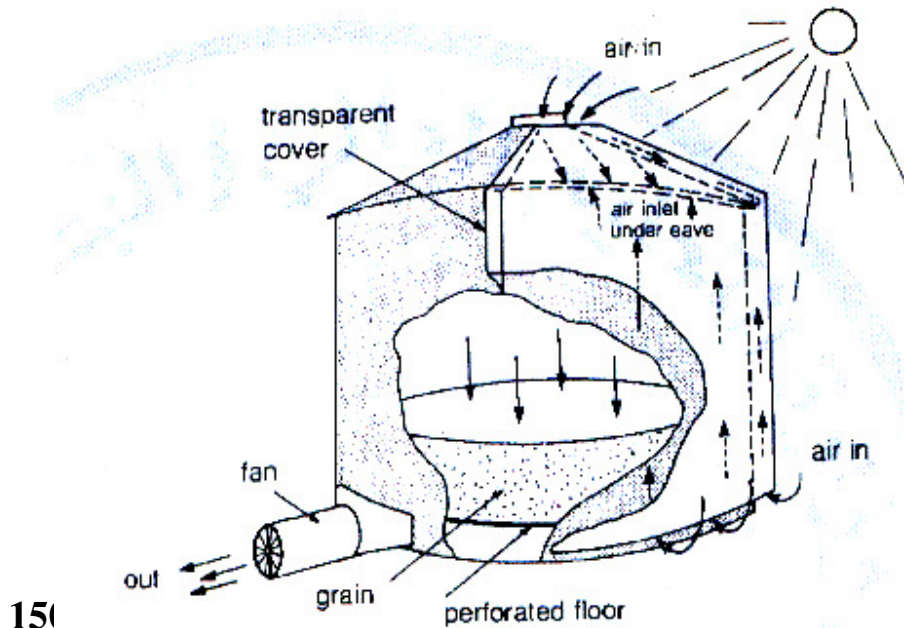


او استخدام نظام تهوية دوار يعمل بطاقة الرياح لغرض تسهيل جريان الهواء في المجفف وخروجه منه وهو محمل بالرطوبة وتوضع في اعلى غرفة التجفيف واستعملت مروحة لدفع الهواء في المجمع الشمسي وتوضع في مقدمته وتعمل بفولتية مقدارها 12 فولت ذات تيار مباشر وقدرتها 20 واط تاخذ طاقتها الكهربائية من خلية شمسية. شكل (3-67).

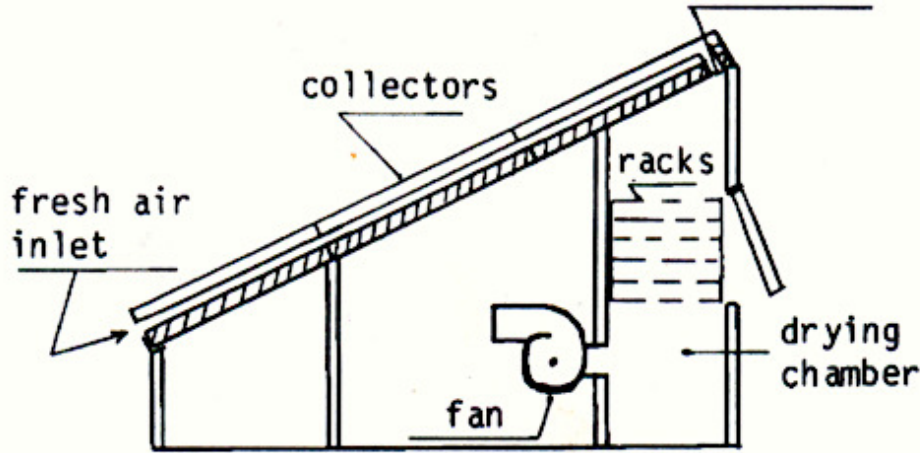


شكل (3-67):مجفف شمسي قسري غير مباشر. (Saleh & Sarkar,2002).

هنالك تصميم اخر شكل (3-68) وهو ان المجمع الشمسي يوضع على حوض الحبوب وجدران ذلك الحوض مطلية باللون الاسود وهذه المنظومة يكون جريان الهواء فيها قليل بالرغم من وجود مروحة لتحريكه بسبب صغر مساحة المجمع الشمسي ووقت التجفيف يستغرق من 2 - 3 اسبوع وهذا النوع كفاءته منخفضة.



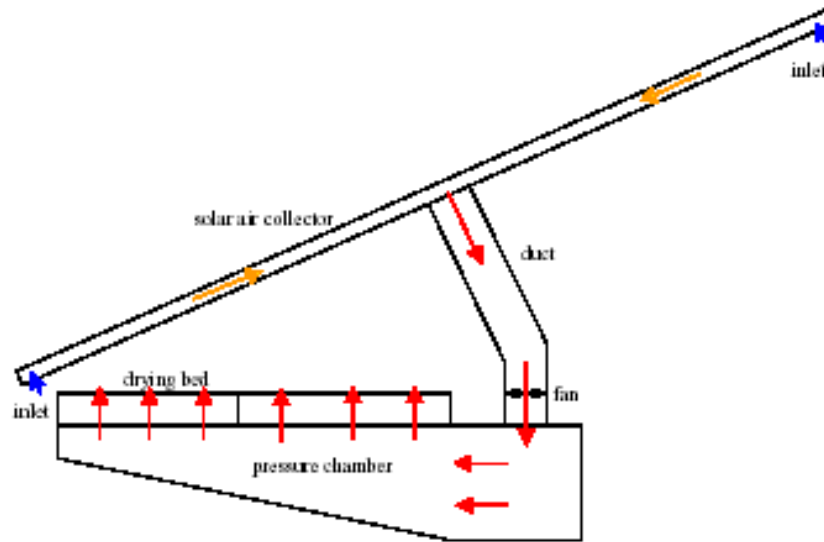
هنالك مجفف اخر من النوع القسري شكل (3-69) كبير الحجم يستخدم لتجفيف الاسماك مساحة مجمعه الشمسي 14 م² يحتوي على مروحتين وغرفة تجفيف حجمها 2 م³ وسعته 150 كغم من السمك الطازج.



شكل (3-69):مجفف شمسي قسري غير مباشر لتجفيف السمك .

هنالك تصميم اخر للمجفف الشمسي القسري شكل (3-70) و (3-71) سعته 100 كغم ومساحة مجمعه الشمسي 4.77 م² مغطاة بطبقة من البولي كاربونيت *UV – Stabilized Poly Carobonate* ، يمر الهواء خلال مسامات موجودة على صفيحة الامتصاص السوداء ، يدخل الهواء الى المجمع الشمسي من نهايته ويخرج من منتصفه والهدف من ذلك هو لتقليل الفقد بالضغط عبر المجمع الشمسي. تستعمل المروحة في هذا التصميم لسحب الهواء من المجمع الشمسي ودفعه الى غرفة التجفيف ويجب ان تكون المروحة رخيصة وذات كفاءة عالية وتحتاج الى قدرة قليلة وتعطي معدل جريان كبير للهواء ، وهنا يجب ان تكون سرعة الهواء عالية في غرفة التجفيف المملوء بالغذاء الا ان سرعتها تصل الى 0.06 م /ثا عند معدل تصريف مقداره 3000 م³/سا وهذا اقل من السرعة المثالية التي تتراوح بين 0.3 –

0.7 م/ثا . هذه المراوح تتراوح فولتيتها بين 6 - 15 فولت وقدرتها 12 واط. ان الواح الـ PV المستعملة هي من نوع *Phoenix Gold* ومعدل قدرتها 14 واط. غرفة التجفيف تحتوي على ستة اطباق عميقة تستوعب الواحدة منها 20 كغم من الذرة الصفراء شكل (3-72) كما انها مزودة بحصى وزنه 150 كغم موضوع على مشبك معدني اسفل الاطباق يستخدم للخن الحراري شكل (3-73)، حيث يمر الهواء اولا على الحصى ويكون معامل الانتقال الحراري بينه وبين الحصى كبير وبعد ذلك ينتقل الى الاطباق لغرض التجفيف .



شكل (3-70): مجفف شمسي قسري غير مباشر.



شكل (3-71): صورة فوتوغرافية للمجفف الشمسي ألقسري الغير مباشر.

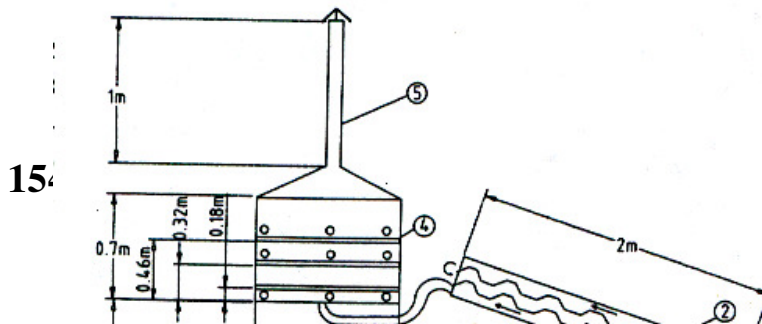


شكل (3-72): اطباق المجفف الشمسي القسري الغير مباشر.



شكل (3-73): حصى الخزن الحراري.

صمم Vlachos وآخرون في عام 2002 مجفف شمسي قسري غير مباشر شكل (3-74) يتكون من غرفة تجفيف مزودة بمدخنة شمسية والآخرى تتكون من جزئين هما قاعدة بشكل شبه منحرف موضوع في أعلى غرفة التجفيف متصلة بانبوب ضيق أبعاده $0.73 * 0.12$ م والجانب الأمامي منه هو زجاج سمكه 3 ملم ، والمدخنة معزولة من الخلف والجوانب. وضع غطاء ألومنيومي على شكل حرف V عرضه 34 سم في أعلى المدخنة ليحمي المجفف من الأمطار والمواد الغريبة ، يوجد خلوص بين المدخنة والغطاء مقداره 19 سم ليسمح للهواء المحمل بالرطوبة بالخروج من خلاله وهذه المدخنة يمكن تغيير زاوية ميلها من 90 درجة إلى 30 درجة.



لتصميم المدخنة في المجففات الشمسية القسرية او ذات الجريان الطبيعي تتبع الخطوات الاتية والمتبعة من قبل Vlachos وآخرون في 2002 :

$$F_R [I_T (\tau \alpha)_e - U_{Lch} (T_{och} - T_{od})] = V_a \rho_a C p_a / (S * H) (T_{och} - T_{od}) \dots (3-61)$$

T_{och} : درجة حرارة الهواء الخارج من المدخنة.

T_{od} : درجة حرارة الهواء الخارج من المجفف.

S : عرض المدخنة (م)

H : ارتفاع المدخنة (م).

بتطبيق معادلة العزم على المدخنة :

$$\Delta P = H (\rho_a - \rho_{ch}) g \frac{B}{760} - \tau_w [2(S + P)H / (S * P)] \dots (3-62)$$

g : التعجيل الارضي (م \ثا²)

ΔP : التغير بالضغط (نيوتن/م²)

ρ_a : معدل كثافة الهواء.

ρ_{ch} : معدل كثافة الهواء في المدخنة

B : الضغط البارومتري (ملم زئبق)

τ_w : اجهاد القص على الهواء الملامس لسطح المدخنة (نيوتن/م²)

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho_{ch} u_{ch}^2 f_{ch} \dots\dots\dots (3-63)$$

u_{ch} : معدل سرعة الهواء في المدخنة (م\ثا) $(V_a / [S * P])$

f_{ch} : معامل الاحتكاك ويحسب:

للجريان الانسيابي

$$f_{ch} = \frac{64}{R_e} \dots\dots\dots (3-64)$$

بينما للجريان المضطرب

$$f_{ch} = \frac{0.079}{R_e^{0.25}} \dots\dots\dots (3-65)$$

يحسب R_e كالآتي:

$$R_e = \frac{D_h \rho_{ch} u_{ch}}{\mu_{ch}} \dots\dots\dots (3-66)$$

D_h : معدل القطر الهيدروليكي للمدخنة ويحسب كالآتي:

$$D_h = \frac{2S * P}{S + P} \dots\dots\dots (3-67)$$

μ_{ch} : معدل لزوجة الهواء في المدخنة.

عندما f_{ch} تساوي 0.003 للجريان المضطرب فان معدل الجريان الحجمي للهواء هو:

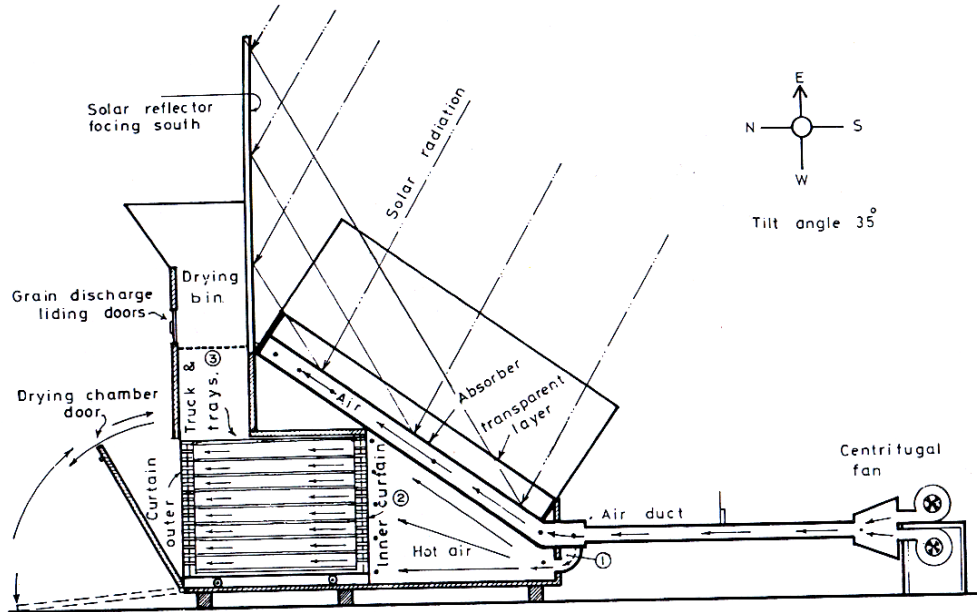
$$V_a = 0.113 \pi D_n^2 \left[\frac{D_n g}{\rho_a} (T_{ch} - T_{am}) \right] \dots\dots\dots (3-68)$$

T_{ch} : معدل درجة الحرارة في المدخنة (م⁰) وتحسب كالآتي

$$T_{ch} = \frac{(T_{do} - T_{och})}{2} \dots\dots\dots(3-69)$$

ان صندوق الخزن الحراري ابعاده الخارجية 1.3 * 1 * 0.5 م ومزود بعازل على جدرانه الداخلية . وهناك انبوب مرن يخرج من المجمع الشمسي ويدخل الى الصندوق ويتصل عند قاعدة غرفة التجفيف ، هذا الصندوق يوجد بداخله 25 وعاء معدني سعة 5 لتر مملوء بالماء ومطلية باللون الاسود لغرض خزن الحرارة. المجمع الشمسي في هذا المجفف هو بشكل انابيب متوازية ابعادها 2 * 1 * 0.27 م ومائل بزاوية 37 درجة . صفيحة الامتصاص تتكون من قطعتين مضلعتين من الالمنيوم سمكها 1.25 ملم موضوعة واحدة فوق الاخرى والمسافة بينهما 50 ملم وزجاج سمكه 3 ملم مزود بمضخة طاردة عن المركز متصلة بمقدمة المجمع الشمسي عن طريق انبوبان بلاستيكيان من النوع المرن.

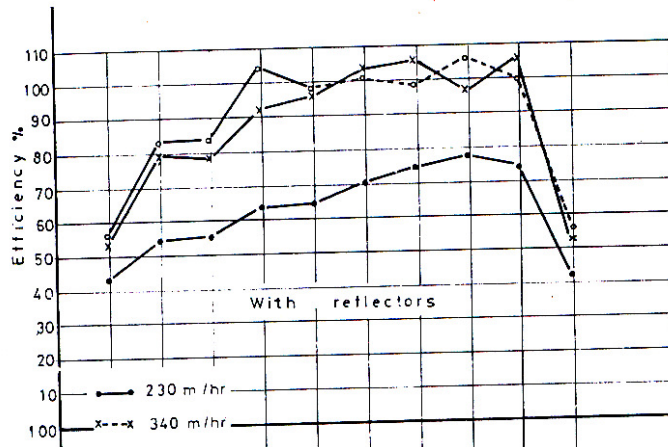
هنالك تصميم اخر لمجفف شمسي شكل (75-3) يتكون من مجمع شمسي ذي صفيحة امتصاص مستوية ومزود بعاكسات مثبتة على المجمع بزاوية مقدارها 35 درجة وعددها اثنان موضوعتان على جانبيه . مساحة سطح امتصاص الطاقة الشمسية هو 2.43 م² وطولها 4.16 م اما الجزء الاخر فهو غرفة التجفيف والحوض حيث وضعت غرفة التجفيف تحت المجمع الشمسي ومعزولة بمادة Styrofoam ابعادها 1*1*1 م . ان الهواء المسخن الخارج من المجمع الشمسي يدخل مباشرة الى غرفة التجفيف . موضع حوض الحبوب يكون فوق غرفة التجفيف ويتكون من اربعة جدران وبوابة منزلقة في الجانب الشمالي من المجفف.



شكل (3-76): مجفف شمسي قسري غير مباشر للحبوب ذو عاكسات. (Sabah, 1986).

يلاحظ من شكل (3-77) ان استخدام العاكسات ادى الى زيادة الاستفادة من الطاقة بصورة معنوية ووفقا لذلك ازدادت الكفاءة ودرجة حرارة الهواء اذ ان معدل كفاءة المجمع الشمسي ازدادت باستخدام العاكسات من 46.1 - 63.5 % ومن 64.9 - 89.3 % ومن 66.5 - 91.7 % عند معدلات جريان للهواء 230 و 340 و 400 م³ اس على الترتيب.

ان الاداء الحراري لغرفة التجفيف والحوض يتاثر بمعدل الفقدان الحراري من غرفة التجفيف الى الجو بواسطة توزيع درجة حرارة الهواء عند مدخل غرفة التجفيف والى الحوض وكذلك درجة حرارة هواء التجفيف بالاضافة الى كمية الحرارة الموجودة في الهواء.



كفاءة غرفة التجفيف تحسب من المعادلة الآتية:

$$\eta_{d.ch} = \frac{T_{in.ch}}{T_{out}} \times 100 \dots \dots \dots (3-70)$$

$\eta_{d.ch}$: كفاءة غرفة التجفيف

$T_{in.ch}$: درجة حرارة الهواء الداخلة الى غرفة التجفيف.

T_{out} : درجة حرارة الهواء الخارجة من غرفة التجفيف.

وتحسب كفاءة حوض تجفيف الحبوب من المعادلة الآتية:

$$\eta_{d.ch} = \frac{T_{in.b}}{T_{out}} \times 100 \dots \dots \dots (3-71)$$

اما الكفاءة الكلية للمنظومة فتحسب من المعادلة الآتية:

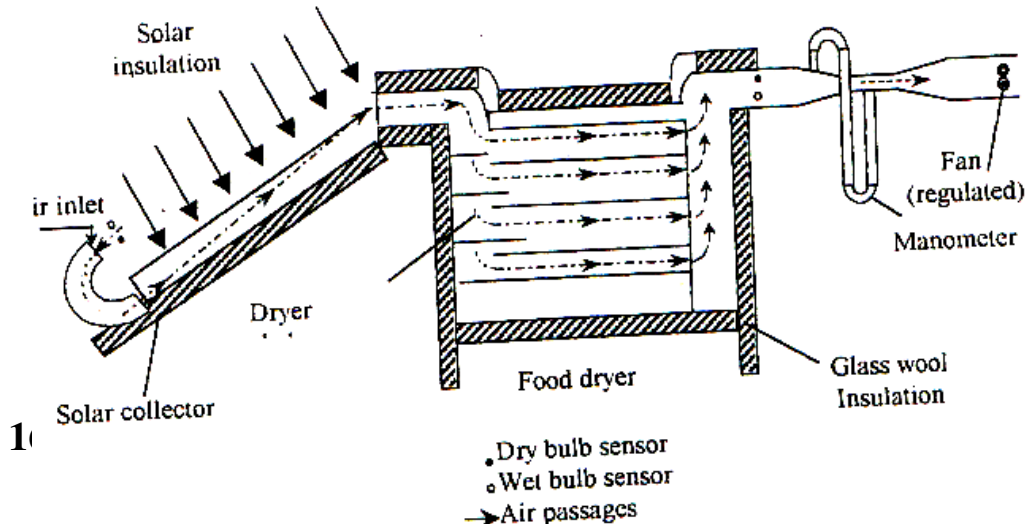
$$\eta_s = \eta_{d.ch} \times \eta_{sc} \dots \dots \dots (3-72)$$

المجفف الشمسي ذو النفق *Solar Tunnel Dryer*

هذا المجفف طوله 18 م وعرضه 2 م ومساحة مجمعه الشمسي 16 م² ومساحة التجفيف 20 م² ويحتوي على خمس مراوح لسحب الهواء من المجفف الشمسي الى الخارج قدرة كل مروحة 14 واط وتصريفها 130 م³ اساً وتعمل بتيار مباشر DC ويوجد ثلاثة اعمدة PV شمسية لتوليد التيار الكهربائي.

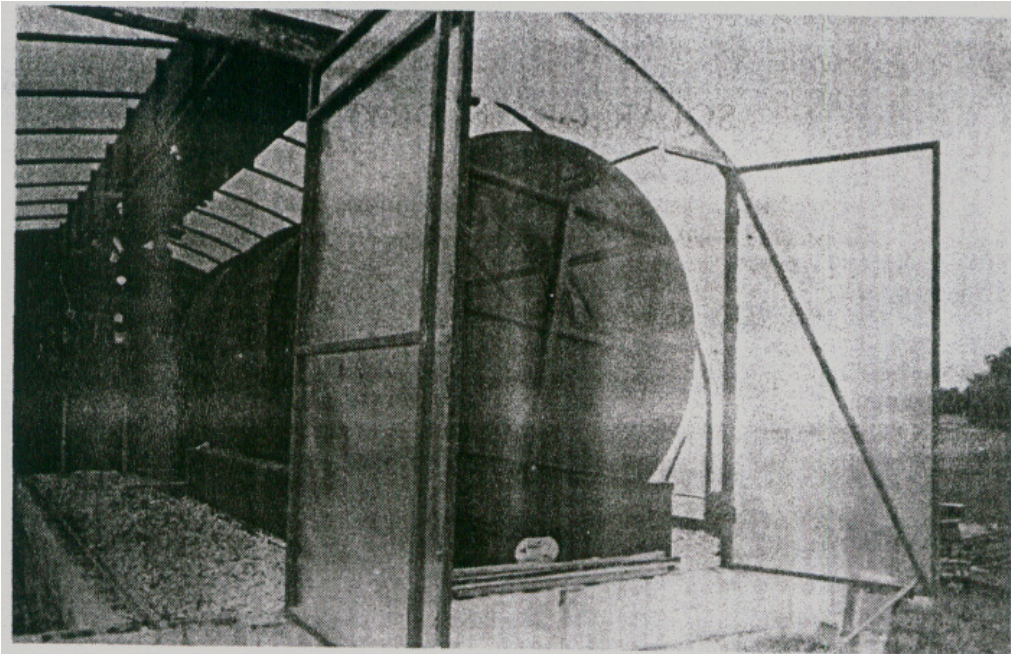
تم عزل المجفف بمادة الصوف الزجاجي. يوضع المجفف على اربع اعمد من الطابوق ويغطي النفق والمجمع الشمسي بغطاء من نوع *UV - Stablised Polythene* سمكه 0.2 ملم والمجمع مطلي بطلاء اسود لكي يمتص اشعة الشمس ، وتوضع الاغذية على اطباق مثقبة في غرفة التجفيف.

هنالك نوع من المجففات القسرية يتألف من مجمع شمسي عرضه 0.8 م وطوله 1.74 م شكل (3-78) وصفيحة الامتصاص فيه مضلعة ومكونة 12 قناة مثلثة الشكل وهذا التضليع يعمل على زيادة امتصاص طاقة الاشعاع الشمسي بسبب زيادة المساحة السطحية له لذلك فان الكفاءة الحرارية تزداد بمقدار 9 - 15 % مقارنة مع صفيحة الامتصاص المستوية ، هذه الصفيحة ذات لون اسود غير لامع امتصاصيته 0.87 ومغطاة بصفيحة زجاجية سمكها 4 ملم وبينهما فجوة هوائية مقدارها 0.03 م الجزء الاسفل من المجمع الشمسي تم عزله بمادة الصوف الزجاجي والموصلية الحرارية له 0.034 واطام 0.20 م وبسمك 5 سم غرفة التجفيف ابعادها 1.15 * 0.53 * 0.67 م ومزودة بمروحة كهربائية قدرتها 100 واط وذات سرع متغيرة.



شكل (3-78):تصميم آخر لمجفف شمسي قسري. (Sultan et

هنالك مجفف شمسي للحبوب شكل (79-3) يتكون من غطاء مصنوع من الفايبركلاس المموج الشفاف يشبه الخيمة عرضه 7.7 م وطوله 8.5 م وهو يشبه البيت الزجاجي من حيث نقل الاشعاع الشمسي خلاله وقد بني على قاعدة كونكريتية مستوية يوجد بداخل هذه الغرفة اسطوانتين وهما عبارة عن غرفتا تجفيف قطر الواحدة 2.2 م وطولها 4.4 م وطاقتها الاستيعابية تتراوح بين 3 - 4 طن من الفول السوداني . خلال عملية التجفيف فان الاسطوانتين تدوران بشكل دوري (دورتين في الساعة) لغرض تجانس التجفيف فيهما وهنالك مروحة داخل الغرفة تقوم بسحب الهواء من المحيط الخارجي الى داخل الغرفة .السطح الاسود لهاتين الاسطوانتين مثقب بنسبة 50% للسماح للهواء بالدخول اليهما من الغرفة وهو اما ان يخرج الى الخارج او يبقي يدور فيهما.



شكل (79-3) : مجفف شمسي للحبوب

التحليل الحراري لهذا المجفف

يمكن اجراء التحليل بخطوتين هما ، اولاً : تحليل انتقال الحرارة المقترن مع تسخين الهواء في الغرفة كعلامة للطاقة الشمسية ، وثانياً : انتقال الحرارة والكتلة المقترن بالتجفيف الناتج من فقد الرطوبة الى الهواء الساخن الذي يجري فوق الفول السوداني.

1-تحليل تسخين الهواء *The Analysis of Heating of Air*

الهدف من التحليل هو ان المساحة السطحية لغطاء الفاير كلاس قسمت الى عدة مقاطع مستوية يتضمن سطوح نهائية عددها اثنان وخمسة مناطق *Quenset shaped surface* . قسمت مساحة الارض الى اربعة مناطق والاسطوانة الى ثلاث مقاطع . معادلات توازن الطاقة اعتمدت في الحالة المستقرة لكل منطقة من تلك المقاطع في البيت البلاستيكي وهذه قد لخصت في الاتي:
سطح الغطاء المصنوع من الفيركلاس

$$\left[h_{ocj} + h_{ij} + h_{orj} + \sum_{K=1}^N h_{rjk} \right] \theta_j - \sum_{K=1}^N h_{rjk} \theta_k - \frac{h_{ij} \theta_a}{2} = q_j + R_j \dots (3-73)$$

حيث j تساوي 1، 2،، M ، $M=7$ وهي العدد الكلي للاجزاء المقسمة من سطح الغطاء البلاستيكي.
الاسطوانة والسطح الارضي

$$\left[h_{ij} + \sum_{K=1}^N h_{rjk} \right] \theta_j - \sum_{K=1}^N h_{rjk} \theta_k - \frac{h_{ij} \theta_a}{2} = q_j \dots \dots \dots (3-74)$$

حيث z يساوي $M+1$ ، $M+2$ ،..... N و N تساوي 14 وهي عدد اجزاء سطوح الارض والاسطوانة.

كتلة الهواء في الغرفة

$$\sum_{j=1}^N h_{ij} A_j \theta_j - \left[\frac{1}{2} \sum h_{ij} A_j + V_a \rho c_p \right] \theta_a = 0 \dots \dots \dots (3-75)$$

اختلاف معاملات انتقال الحرارة يعتمد على طبيعة انتقال الحرارة مثل الاشعاع والحمل وهذا يمكن الحصول عليه من العمل القياسي.

فيض اشعاع الطاقة الشمسية q_j يمتص بواسطة أي منطقة z ولها زاوية ميل s وتحسب من المعادلة الاتية

$$q_j \left[I_D \frac{\cos \theta_T}{\cos \theta_z} + I_d \frac{1 + \cos s}{2} + (I_D + I_d) \frac{1 - \cos s}{2} \rho_a \right] \alpha_j \dots \dots \dots (3-76)$$

اشعة السماء ذات الموجة الطويلة يمكن ان تحدد من :

$$R_j \cong h_{orj} (T_\infty - T_{sky}) \dots \dots \dots (3-77)$$

تحليل انتقال الكتلة *The Mass Transfer Analysis*

الهواء الساخن الذي ينتقل من الغرفة الى الغذاء في الاسطوانة فان رطوبة الغذاء سوف تنتقل الى الهواء. الهدف من هذا التحليل هو للاتباع بمعدل الرطوبة المفقودة من الغذاء الى الهواء بالاضافة الى درجة حرارة الهواء الذي يغادر الاسطوانة ، تتضمن المعادلات معادلة موازنة الكتلة الاجمالية للرطوبة المفقودة من الغذاء وتعطى بالمعادلة الاتية:

$$-m_p \frac{dM(t)}{dt} = m_a (W_e - W_o) \dots \dots \dots (3-78)$$

معادلة فقد البخار بالانتشار خلال الغذاء الى الهواء هي كالآتي:

$$\frac{M(t) - M_{eq}}{M_o - M_{eq}} = \sum_{n=1}^{\alpha} \frac{4}{\gamma_n^2} \exp \left(- \frac{k_1 \gamma_n^2}{\pi^2} t \right) \dots \dots \dots (3-79)$$

حيث γ_n هي قيمة eigen و k_1 هو معامل يتم تحديده تجريبيا ويعرف:

$$k_1 = \frac{D\pi^2}{a^2} \dots\dots\dots(3-80)$$

حيث D معامل الانتشار و a البعد المميز.

إذا افترض ان عملية التجفيف اديباتيكية فان الانتالبية ودرجة الحرارة الرطبة تبقى ثابتة خلال عملية التجفيف أي ان :

$$H_o = H_e$$

الانتالبية للهواء الرطب يمكن ان يعبر عنه في المعادلة الاتية:

$$H = C_{pa}T + W(C_{pw}T + L_w) \dots\dots\dots(3-81)$$

$$C_{pa}T_o + W_o(C_{pw}T_o + L_w) = C_{pa}T_e + W_e(C_{pw}T_e + L_w) \dots\dots\dots(3-82)$$

A : المساحة م²

H: الانتالبية (كج/كغم)

$h_{i,j}, h_{oc}$: معامل انتقال الحرارة في الداخل والسطح الخارجي على الترتيب (واط/م².°م)

$h_{r,j}, h_{or}$: معامل انتقال الحرارة بالاشعاع للسطح الداخلي والخارجي على الترتيب (واط/م².°م)

I_D و I_d : الاشعاع الشمسي المباشر والمنتشر على الترتيب (واط/م²)

L: الحرارة الكامنة للتبخير (كج/كغم)

m_a : معدل جريان الهواء (كغم/سا)

m_p : الوزن الكلي للحبوب في الاسطوانة (كغم)

T_o و T_e : درجة حرارة الهواء عند الخول وعند الخروج من الاسطوانة.(°م)

T_∞ : درجة حرارة الجو.(°م)

θ : الفرق بدرجات الحرارة.(°م)

S: زاوية الميل (درجة)

W_o و W_e : الرطوبة النوعية للهواء عند الدخول والخروج من الاسطوانة

(كغم/كغم)

V_a : معدل جريان الهواء (m^3 /سا)

α : الامتصاصية

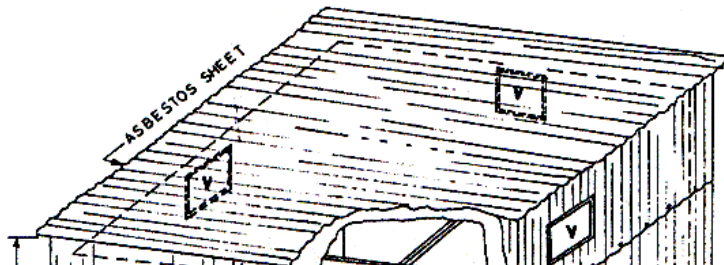
ρ_a : الانعكاسية الارضية

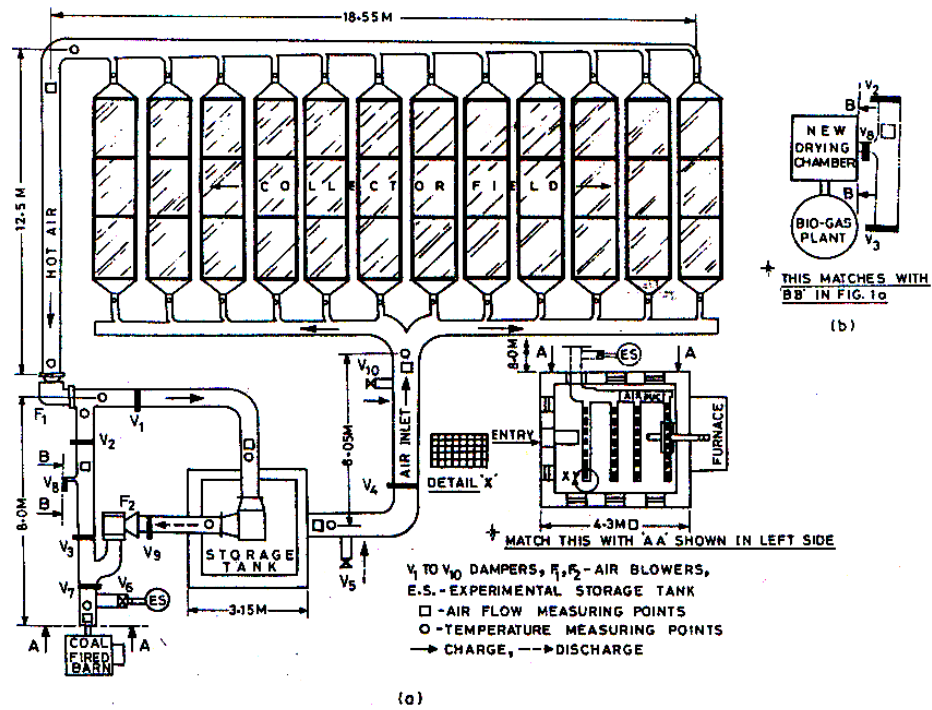
a' : هواء

w : بخار الماء

لغرض تقليل الفقدان الحراري من غرفة التجفيف التقليدية ، هنالك نوع جديد لغرفة التجفيف حجمها 85 م³ اذ تم تصميمها وتصنيعها من قبل Raju في عام 1989 والمبينة في شكل (3-80) جدران هذه الغرفة صنعت من صفائح مزدوجة من الاسبستوس وبينهما فجوة مقدارها 6 سم وقنوات مصنوعة من صفائح رقيقة من الحديد لتكسبه المتانة ، وهذه الصفائح المضلعة الهدف منها هو لمقاومة سرعة الرياح وان المسافة بينهما ملئت بقش الرز ونشارة الخشب كونها ذات عزل جيد . صنعت الرفوف والارضية من الاسبستوس وهذه الغرفة تتميز بانخفاض السعة الحرارية لها ومقاومة حرارية عالية مقارنة مع غرف التجفيف التقليدية. استعملت اعمدة خشبية بداخلها لغرض تعليق اوراق التبغ عليها.

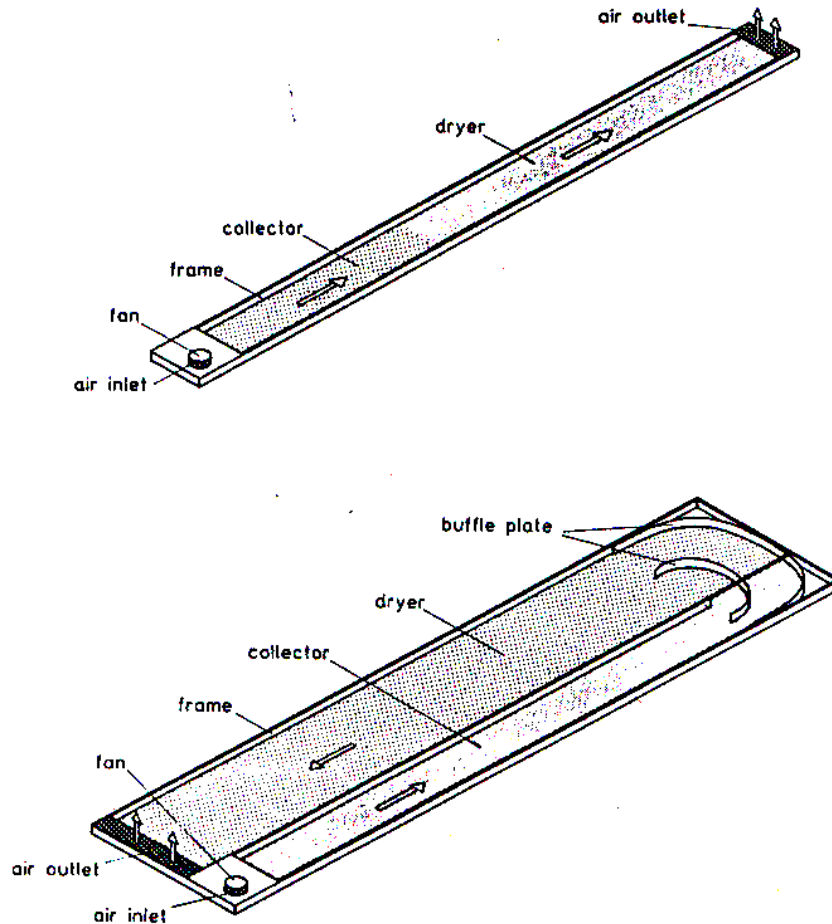
منظومة توزيع الهواء تتكون من فتحات مرتبطة مع مراوح موضوعة في اسفل غرفة التجفيف لضمان توزيع متجانس للهواء بداخلها . الهواء قبل دخوله الى غرفة التجفيف فانه يتعرض للتسخين بفعل المجمع الشمسي . ايضا لغرض تسهيل استخدام الغاز الحيوي والحارقات المجهزة في فتحة دخول الهواء وهي ترفع درجة حرارة القنوات الحديدية مما يجعل الهواء يجري عليها. مخطط الوحدة الكاملة مع المجمع ووحدة الغاز الحيوي موضحة في شكل (3-81). تستخدم محرقة الفحم في الظروف التي ينعدم فيها الاشعاع الشمسي او كمساعد.



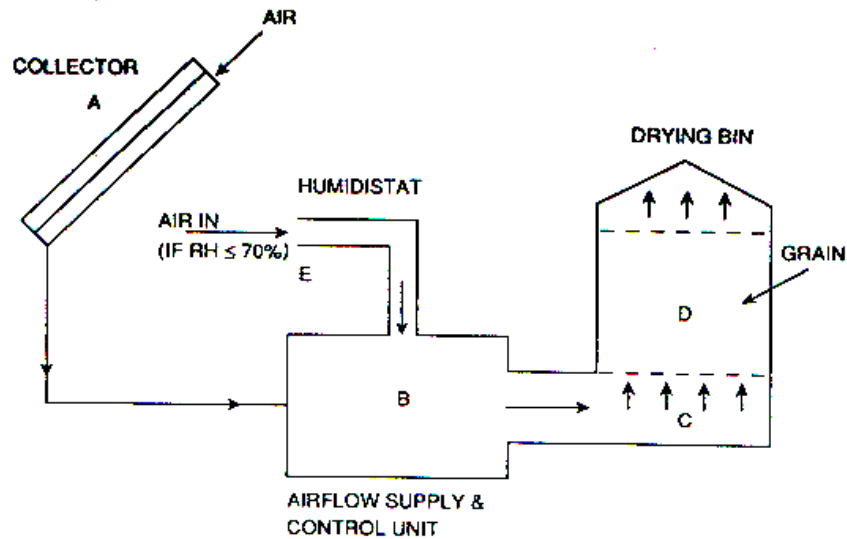


شكل (3-81) : منظومة تجفيف متكاملة.

هنالك نوع آخر من المجففات يتكون من مروحة صغيرة ومجمع شمسي وغرفة تجفيف على شكل نفق ،يقوم المجمع الشمسي والغذاء بامتصاص الطاقة الشمسية وتحويلها الى حرارة لغرض التجفيف . الطاقة الاستيعابية للمجففات الصغيرة من هذا النوع تتراوح بين 50 - 300 كغم شكل (3-82) ولكن عند الساعات الاكثر من 1000 كغم فان المجمع الشمسي والنفق يكونان متوازيان. شكل بعض الاحيان يتم تثبيت هذا المجفف على الارض وتغطي كل مكوناته بواسطة غطاء شفاف وتوضع مادة بلاستيكية سوداء بين النفق والمجمع الشمسي ويوضع تحتها مادة عازلة. يصل طول هذا المجفف الى 20 م ، وهنالك عدة انواع من المراوح التي تستخدم لدفع وتحريك الهواء الساخن وكل مروحة تحتاج الى قدرة مقدارها 100 واط وتعمل بتيار متناوب.

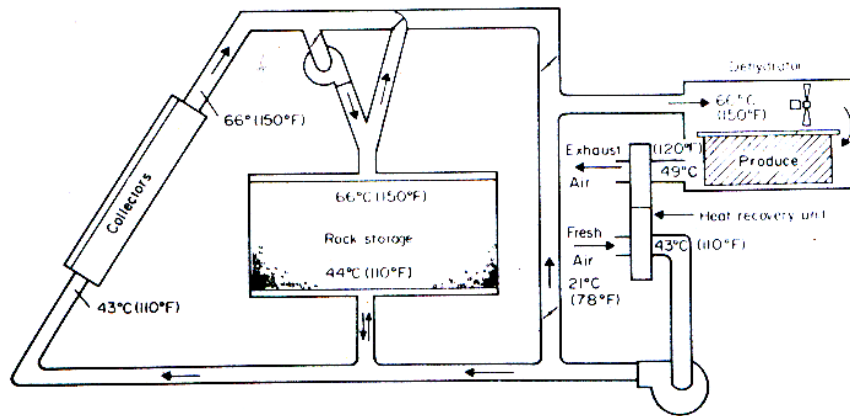


هنالك تصميم لمجفف شمسي قسري مزود بمنظومة خزن حراري يتكون من مجمع شمسي كفاءته 40% ووحدة خزن حراري الغرض منها استمرار عملية اثناء الليل بحيث تمنع حصوله على امتصاص الرطوبة من الجو مرة اخرى ، وهذه العملية تحصل بدون استعمال مروحة. شكل (3-83).



شكل (3-83): مجفف شمسي قسري ذو منظومة خزن حراري أخرى. 161

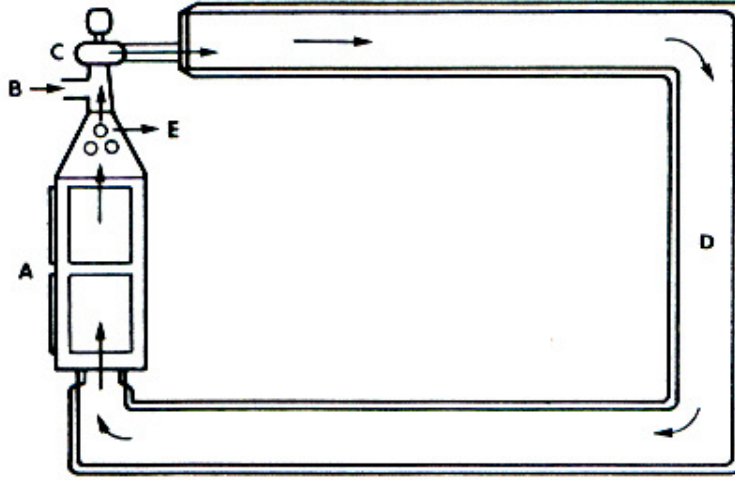
اما التصميم الاخر فهو ان مجمعه الشمسي بدون لوح زجاجي ويحتوي على ثلاث مراوح واحدة في غرفة التجفيف والثانية تسحب الهواء من الجو وبعض الهواء الخارج من غرفة التجفيف وتدفعه الى المجمع الشمسي والى غرفة الخزن الحراري وهناك مروحة ثالثة تسحب الهواء من المجمع الشمسي وتدفعه الى غرفة الخزن الحراري ومنها الى غرفة التجفيف بحيث تكون درجة الحرارة عندها 66 °م وكما هو موضح في الشكل (3-84).



شكل (3-84): مجفف شمسي قسري مجمعه بدون لوح زجاجي.

هنالك مجفف شمسي شكل (3-85) طول مجمعه الشمسي 24 م وهو بشكل انبوب اسود قطره 0.9 م مغطى بمادة البولي اثيلين بقطر 1 م . يتم سحب الهواء

الى المجفف بواسطة مروحة قدرتها 1 حصان وهناك غرفة تجفيف تحتوي على اثنا عشر طبق مساحة الواحد منها 0.6 م وكل طبق يستوعب 3 كغم من الفواكه وسرعة الهواء الذي يمر على الاطباق 90 – 130 م/دقيقة. تصل الكفاءة الحرارية له 13% وكفاءة التجفيف فيه منخفضة بسبب خروج الهواء العادم منه وهو محمل بالرطوبة.



شكل (3-85) : مجفف شمسي قسري انبوبي.

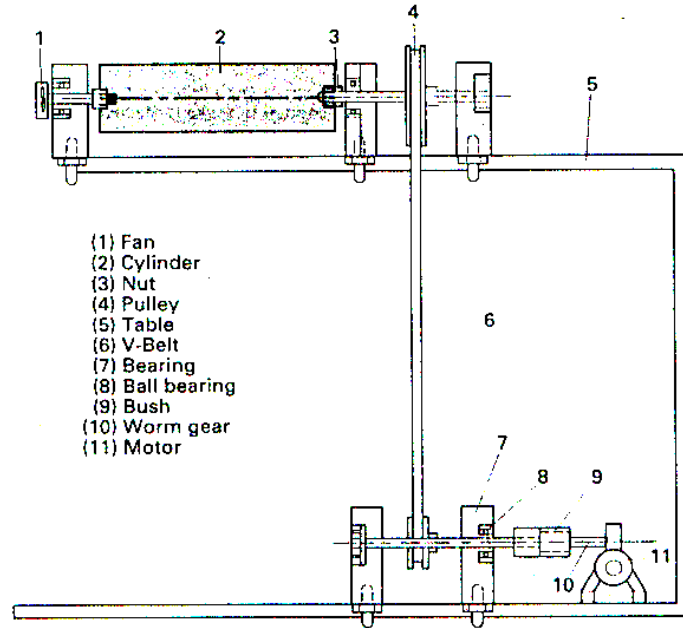
المجفف الشمسي الدوراني Solar Rotary Dryer

يتكون هذا المجفف من اسطوانة دوارة مائلة قليلا باتجاه الامام ومصنوعة من الحديد المغلون شكل (3-86) المادة الرطبة تدخل من احد نهاياتها وتخرج من النهاية الاخرى مادة جافة . خلال تدوير الاسطوانة يحصل تقليب للغذاء الموجود بداخلها ، هذه الاسطوانة سمكها 1.5 ملم وملحومة مع وجهين لها عند نهايتها بصفيحة سمكها 6 ملم ، هذان الوجهان مثقبان لتسهيل دخول وخروج الهواء اليها ومنها وهما متصلان مع محوري دوران ، احد الوجهين مزود بمروحة تساعد على مرور الهواء الساخن خلال الحبوب لكي يجف . هذه الاسطوانة طولها 1 م وقطرها 0.28 م ومطلية بلون اسود غير لامع من سطحها الخارجي وهي تمثل المجمع الشمسي وغرفة التجفيف بالوقت نفسه.

الهواء يدخل من احد الوجهين المثقبين بواسطة سحب المروحة وعندما يكون في تماس مع جدران الاسطوانة فانه يسخن وجهها ويغادر الهواء المحمل بالرطوبة من الوجه الاخر. سرعة المحرك الكهربائي المستعمل في هذا المجفف هي 1440 دورة

بالدقيقة يتم تخفيض هذه السرعة باستعمال مسننين احدهما من النوع الدودي worm والاخر من نوع لولبي *helical* وعدد اسنان المسنن الاول هي 3 سن والثاني 30 سن ، ونسبة التخفيض 10:1 ولهذا فان سرعة المسنن الثاني هي 144 دورة بالدقيقة. والتخفيف الثاني يتم بواسطة بكرتين مختلفتين بالاقطار الاولى قطرها 7 سم مرتبطة مع المسنن الثاني والبكرة الثانية قطرها 40 سم متصلة مع محور اسطوانة التجفيف وعليه تكون سرعة اسطوانة التجفيف 26 دورة بالدقيقة.

اجرى Muller وآخرون في عام 1989 في يوغسلافيا بعض التحويلات على البيت البلاستيكي التقليدي وهي استخدام ثلاث قطع من الـ PVC المحمولة على مساند لتثبيت الطبقتين الاضافيتين . استعمل نسيج من القماش الاسود الرقيق كملتص للطاقة الشمسية امتصاصيته 97% من طاقة الاشعاع الشمسي وثانيا طبقة ذات فقاعات هوائية لتقليل الفقدان الحراري من الجانب الخلفي شكل (3-87) هذه الطبقات الاضافية يمكن ان تزال بسهولة ويبقى كبيت بلاستيكي طبيعي عند عدم استخدامه.



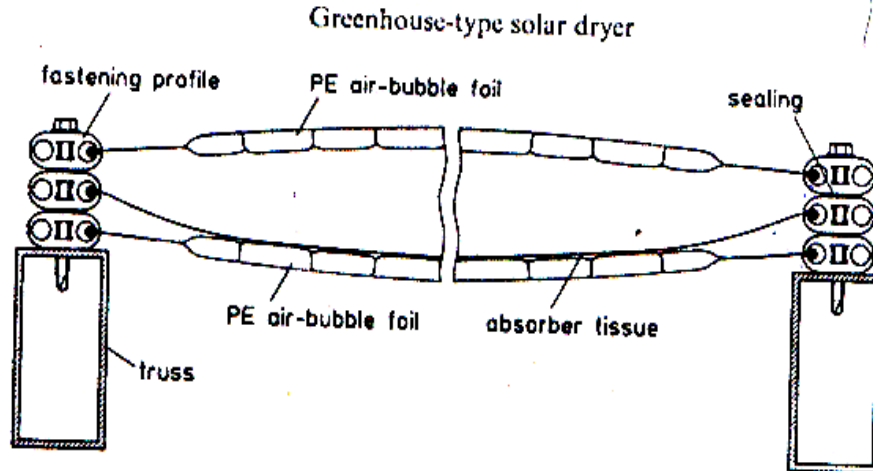
شكل (3-86): مجفف شمسي دوراني.

الجزء الشمالي والجزء الجنوبي من سطحه استخدمتا كمسخنات للهواء لغرض زيادة المساحة السطحية . السطح الموجه للجنوب امتد ليصل الى الارض شكل (3-88)

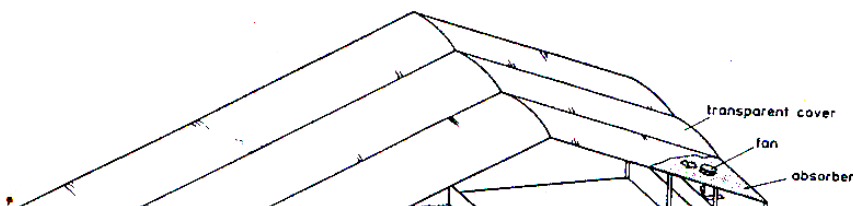
، ويصل طول السخانات هنا الى 17 م وهذا يعطي مساحة مقدارها 34 م² لكل سخان هواء.

قسم المجفف من الداخل الى عدة اقسام وفي كل واحد وضعت عدة صناديق مصنوعة من الخشب طول الواحد منها 5 م وعرضه 2 م وارتفاعه 1.2 م . المواد تنتشر داخل ارضية هذه الصناديق المصنوعة من القرميد . هذه الارضية تثبتت على بعد 0.5 م فوق ارضية من الكونكريت وهذه تمت تغطيتها بقماش لمنع الدقائق الصغيرة بالسقوط الى الاسفل ويعطي توزيع متجانس لجريان الهواء. ان كل جزء تجفيف يعمل منفصل عن الجزء الاخر وله مروحة خاصة به موضوعة بين الجزء الممتص والغطاء وتعمل بتيار متناوب وقدرة مقدارها 520 واط.

يسبب الهواء من الجزء الشمالي البارز ويدفعه بين الغطاء العلوي والنسيج الرقيق ويذهب الهواء الى المواد الموجودة في المجفف ويجففها ويخرج من خلال فتحات التهوية الموجودة في الجدران الجانبية . الجدار الشمالي من المجفف يخفض بواسطة بكرة كهربائية ونسبة تدوير الهواء يمكن ان تنظم بواسطة رفع وخفض هذا الجدار . يتم نقل المواد المجففة بواسطة ساحبات متوسطة الحجم بحيث ارتفاعها الكلي اقل من 2.4 م.

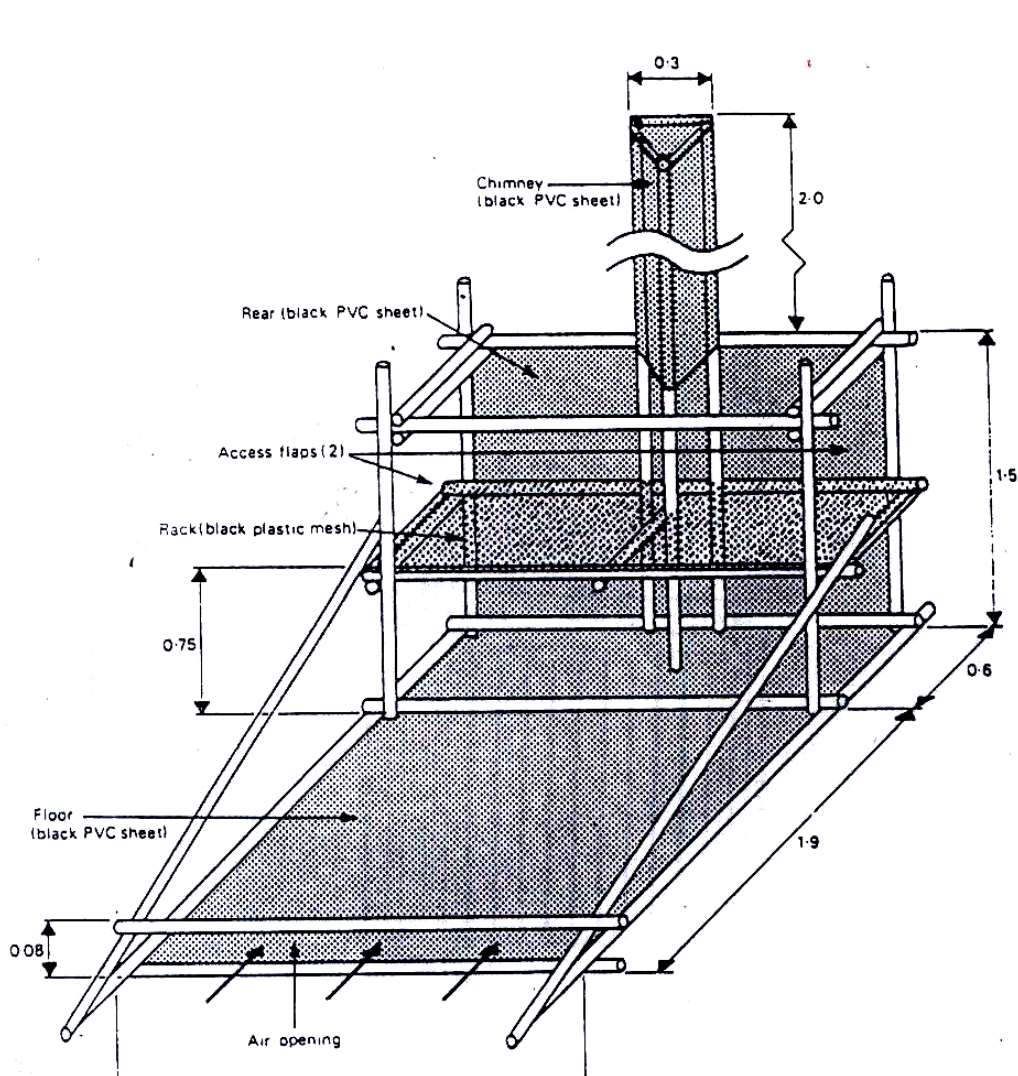


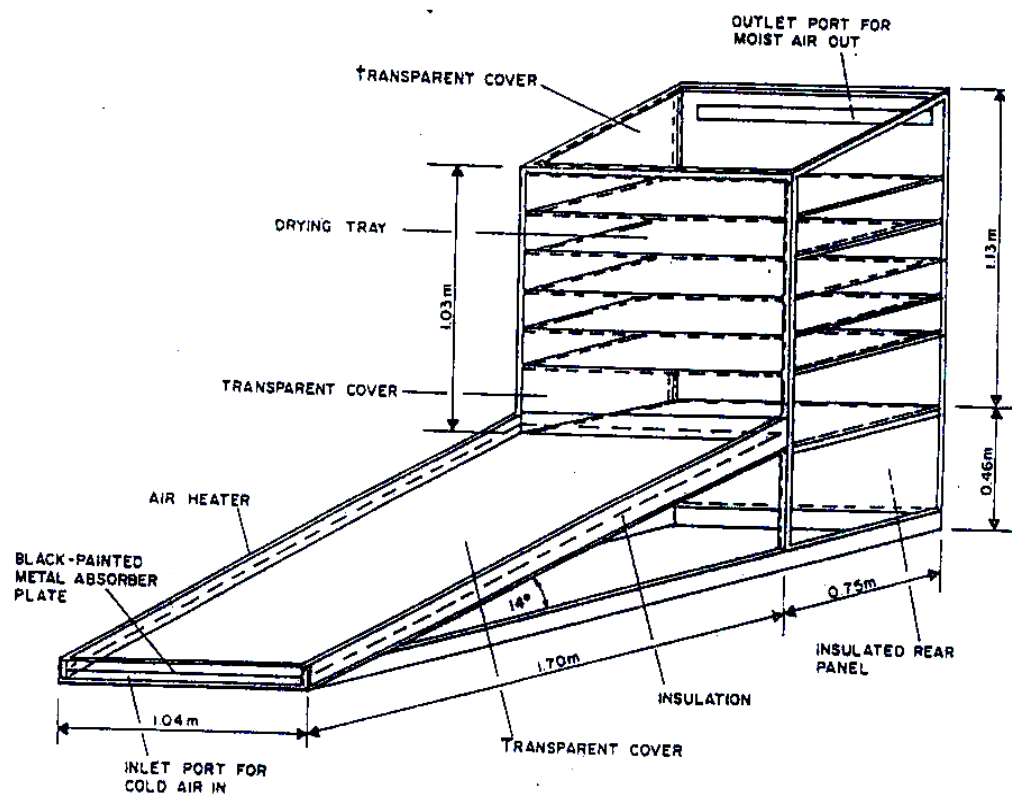
شكل (3-87) : مجفف شمسي قسري غير مباشر على شكل بيت زجاجي.



المجفف الشمسي المختلط Mixed solar dryer

وفيه تتعرض المادة الغذائية الى الاشعاع الشمسي والهواء الحار الناجم عن المجمع الشمسي بوقت واحد حيث ان غرفة التجفيف تحتوي على لوح زجاجي شفاف ، شكل (3-89) و (3-90).





تصميم المجفف الشمسي المختلط

وفيه يمر الهواء الساخن الى طبق الغذاء من مجمع شمسي يقوم بتسخين الهواء ودفعه الى غرفة التجفيف وبالوقت نفسه السطح العلوي من الطبق يمتص طاقة شمسية مباشرة عبر اللوح الزجاجي . المكونات الأساسية لهذا المجفف هي فتحة لدخول الهواء الى المجمع الشمسي وغرفة تسخين الهواء وغرفة تجفيف ومدخنة تقوم بسحب الهواء من غرفة التجفيف . عندما يدخل الهواء الى غرفة التسخين (المجمع الشمسي) ترتفع درجة حرارته وتقل كثافته ويتمدد فيندفع الهواء باتجاه الاعلى بواسطة قوة *bouncy* التي تساوي وزن الهواء الجوي المزاح بواسطة تمدد الهواء الخفيف بداخل الهواء حيث المجمع موجه باتجاه الجنوب ويميل بزاوية تحدد اعتمادا على خط عرض المدينة وكما مر سابقا في الفصل الثاني. والتسخين الثاني هو ناتج من المجمع الشمسي الموجود على غرفة التجفيف وتجفف الاغذية عن طريق انتقال الحرارة بالحمل والتوصيل.

صمم (2001) Basunia & Abe مجفف شمسي مختلط ذو ثلاثة رفوف يعمل بالحمل الطبيعي لتجفيف الحبوب (الرز) شكل (91-3) و (92-3). هذا النوع من المجففات هو افضل من الانواع الاخرى (المجففات الصندوقية ، مجففات ذات ارضية مفتوحة (*open floor dryer*) .

هنالك نقاط عدة يجب التعرض لها عند التصميم وهي :

1- حساب كمية الرطوبة الواجب ازلتها من الغذاء الطازج لغرض الوصول الى المحتوى الرطوبي الذي يجعل عملية الخزن امينة في وقت معين وتحسب من المعادلة الآتية:

$$w_w = \frac{W_g (X_i - X_f)}{100 - X_f} \dots\dots\dots(3-83)$$

حيث:

W_g : الكتلة الاولية للغذاء التي سوف تجفف (كغم).

X_i : المحتوى الرطوبي الاولي على اساس رطب (%).

X_f : المحتوى الرطوبي النهائي على اساس رطب (%).

2- ان فترة حصاد المحصول مهمة جدا في عملية التجفيف حيث خلال هذه الفترة يجب معرفة الرطوبة النسبية للجو ودرجة حرارة الجو.

3- معرفة عدد الساعات المشمسة في اليوم لغرض تحديد زمن التجفيف الكلي وهي غالبا ماتكون من الساعة الثامنة صباحا ولغاية الساعة الرابعة والنصف عصرا. وهذا يؤثر على معدل التجفيف (كغم / سا) الذي يتم تحديده من كتلة الرطوبة المزالة بواسطة الحرارة الناتجة من الطاقة الشمسية وزمن التجفيف وحسب المعادلة الآتية:

$$W_r = \frac{w_w}{t_d} \dots\dots\dots(3-84)$$

t_d : زمن التجفيف الكلي المطلوب لازالة الرطوبة من الغذاء الرطب (ساعة).

4- حساب كمية الهواء المطلوبة للتجفيف ، ويمكن تقديرها من معادلة موازنة الطاقة او من المخطط السايكرومترى وكالاتي : (Basunia & Aby, 1996)

$$w_w \lambda = w_a C_{pa} \rho_a (T_i - T_f) \dots\dots\dots(3-85)$$

W_a : حجم الهواء المطلوب لامتصاص الماء من الغذاء (م³)

$$w_a = \frac{w_w \lambda}{C_{pa} \rho_a (T_i - T_f)} \dots \dots \dots (3-86)$$

λ : الحرارة الكامنة لتبخر الماء ومقدارها 2620 (كج \ كغم) .

C_{pa} : السعة الحرارية النوعية (كج \ كغم . $^{\circ}$ م).

ρ_a : كثافة هواء التجفيف (كغم \ $م^3$).

T_i, T_f : درجة الحرارة النهائية والاولية على الترتيب ($^{\circ}$ م).

المشكلة في تصميم المجفف الشمسي هي تحديد درجة الحرارة الاولية ودرجة حرارة هواء التجفيف قبل المرور خلال الطبق الحامل للغذاء والكمية الصحيحة من الهواء لازالة الرطوبة من الغذاء . ان الحرارة الكامنة للتبخر والحرارة النوعية للهواء معروفة وكذلك درجة الحرارة النهائية يمكن ايجادها من نسبة الرطوبة والمحتوى الحراري من المخطط السايكرومترى.

5-معدل الجريان الحجمي للهواء ($م^3$ \ سا) يمكن الحصول عليه من قسمة

حجم الهواء على زمن التجفيف الكلي وكالاتي:

$$Q_a = \frac{w_a}{t_d} \dots \dots \dots (3-87)$$

Q_a : معدل الجريان الحجمي للهواء ($م^3$ \ سا) .

ويمكن حسابه ايضا من المعادلة التالية:

$$Q_a = \frac{R}{\rho_a (x_f - x_i)} \dots \dots \dots (3-88)$$

R : معدل التجفيف (كغم ماء \ كغم مادة جافة) .

x_f : نسبة الرطوبة الاولية (كغم ماء \ كغم مادة جافة) .

x_i : نسبة الرطوبة النهائية (كغم ماء \ كغم مادة جافة) .

6-طاقة الاشعاع الشمسي اليومية لتحديد الطاقة المستلمة بواسطة المجفف

باليوم ومساحة المجمع الشمسي المطلوبة.

من الطاقة الحرارية المفيدة المطلوبة لتبخر الرطوبة والاشعاع الشمسي المستلم من قبل المجمع الشمسي المائل ، تحسب مساحة المجمع الشمسي (A_c) م² من العلاقة الآتية:

$$A_c IR_b \eta = Q_u = Q_a \rho_a C_{pa} (T - T_f) t_d \dots \dots \dots (3-89)$$

Q_u : الطاقة المفيدة الكلية المسالمة بواسطة هواء التجفيف (كج) .

I : طاقة الاشعاع الشمسي الكروي الساقط على السطوح الافقية خلال فترة التجفيف (كج ا م²) .

t_d : زمن التجفيف

η : كفاءة المجمع الشمسي وهي تتراوح بين 30 % - 50 %

(Sodha et al., 1987).

7-مساحة المجفف الشمسي وابعاده.

في حالة المجفف الشمسي الطبيعي فان عمق الطبق الحامل للغذاء مهم جدا بحيث يجب ان يكون اختياره يجعل الاختلاف بالضغط عبره يسمح بمرور كمية من الهواء خلاله وهو بالنسبة للحبوب مهم جدا. لجعل الهواء مستمر بالجريان خلال الطبق استخدمت ثلاث رفوف باعماق ضحلة مع مراعات ترك مساحة بمقدار 5 % من الاطباق لتسمح للهواء بالمرور على الاطباق من الامام الى الخلف وبالعكس بحرية.

ان عرض المجفف يجب ان لا يكون اكثر من 90 سم ليستطيع العمل بسهولة عند تحميله وعدم تحميله وبعمق متجانس وسهولة تنبئته على الارض من الخلف. اما الطول فهو حسب متطلبات المنظومة . عمق كل طبق 5 سم بدلا من استخدامه طبقة واحدة بسمك 15 سم طول كل طبق يمكن حسابه من المعادلة الآتية:

$$L_g = \frac{W_p}{3\rho_g b_g d_g} \dots \dots \dots (3-90)$$

L_g : طول طبق الحبوب (م) .

ρ_g : كثافة الحبوب الرطبة (كغم / م³).

b_g : عمق طبق الحبوب (م).

d_g : عرض طبق الحبوب (م).

8-سرعة الريح تستخدم لحساب ابعاد فتحة التهوية وذلك من خلال قسمة معدل جريان الهواء الحجمي على سرعة الريح وكالاتي:

$$A_v = \frac{Q_a}{V_w} \dots\dots\dots(3-91)$$

A_v : مساحة فتحة التهوية (م²) .

V_w : سرعة الريح (م / سا).

طول فتحة التهوية تساوي طول المجفف على عرض فتحة التهوية وتحسب كالاتي:

$$B_v = \frac{A_v}{L_v} \dots\dots\dots(3-92)$$

B_v : عرض فتحة التهوية (م²).

L_v : طول فتحة التهوية (م).

air pressure head عمود ضغط الهواء

الاختلاف بالضغط عبر طبق الحبوب يكون فقط نتيجة لاختلاف الكثافة بين الهواء الحار داخل المجفف والهواء الجوي. العلاقة المستخدمة لتحديد ضغط الهواء هي :

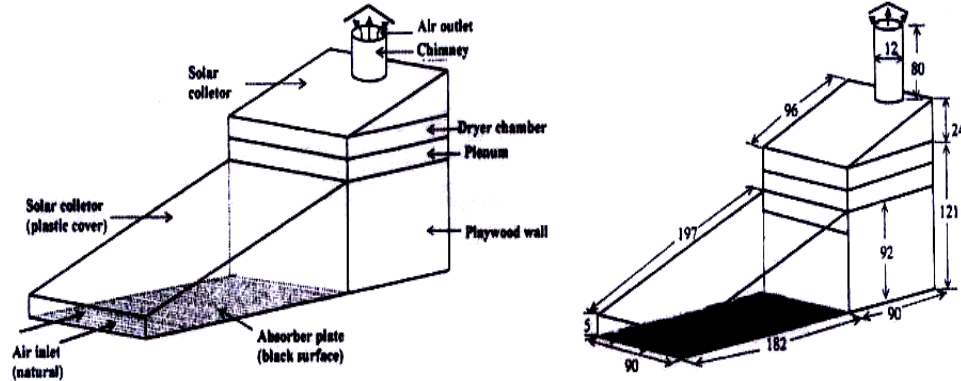
$$P = 0.00308 g(T_i - T_{am})H \dots\dots\dots(3-93)$$

P : ضغط الهواء (باسكال).

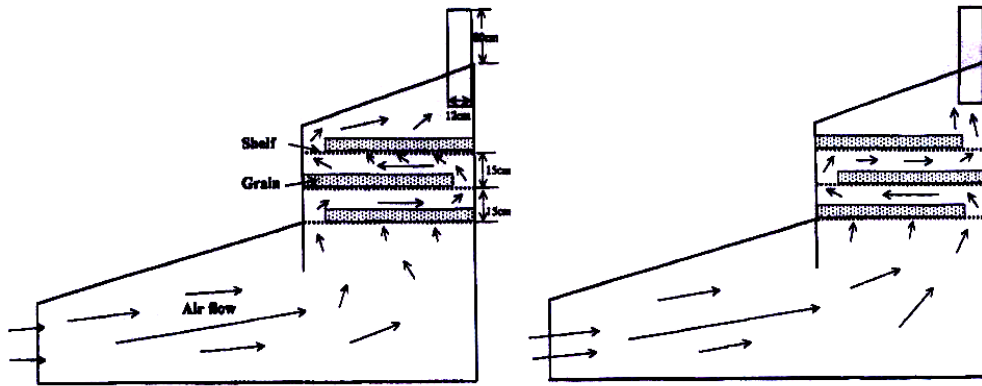
g : التعجيل الارضي (م / ثا²).

T_{am} : درجة حرارة الجو (م⁰).

H : عمود الضغط ويمثل ارتفاع عمود الهواء الحار من قاعدة المجفف الى نقطة تصريف الهواء من المجفف. (م).



شكل (3-91): المجفف الشمسي المختلط موضحة عليه الأبعاد. (Basunia & Abe, 2001)



شكل (3-92): جريان الهواء في المجفف الشمسي المختلط.

المجففات الشمسية الهجينة Hybrid Solar Dryer

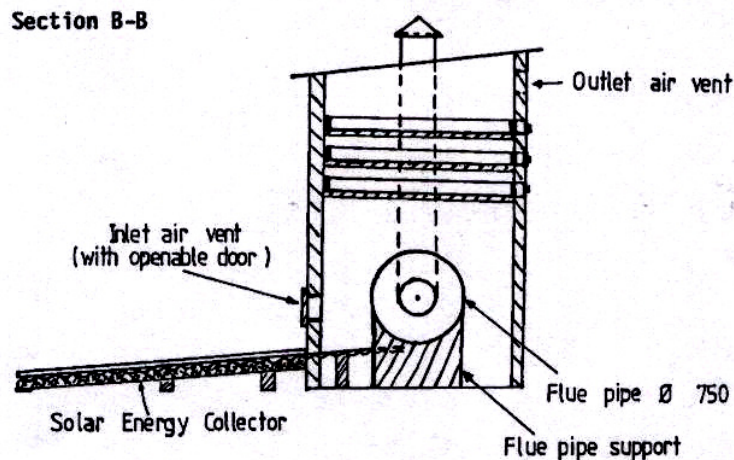
تزود هذه المجففات بسخان كهربائي ومروحة في غرفة التجفيف ، الغرض منها هو استخدام المجفف في الظروف الجوية غير الطبيعية مثل الغيوم والامطار او استخدامها كمساعد للمجفف الشمسي في الصباح حيث يكون الاشعاع الشمسي قليلا

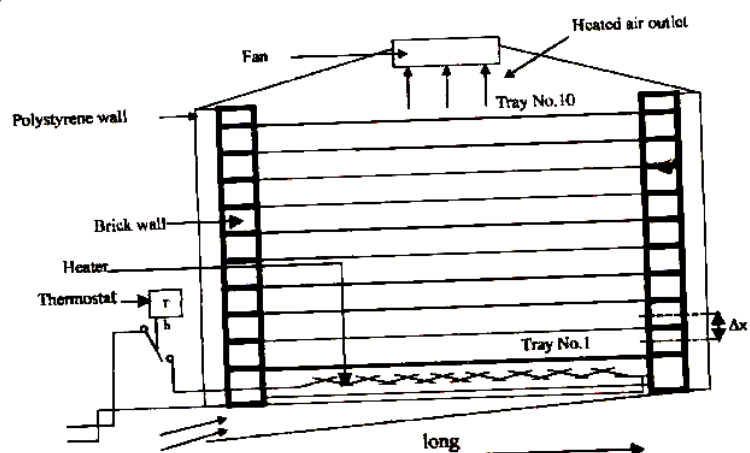
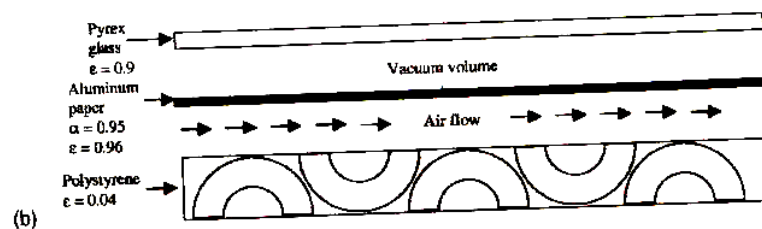
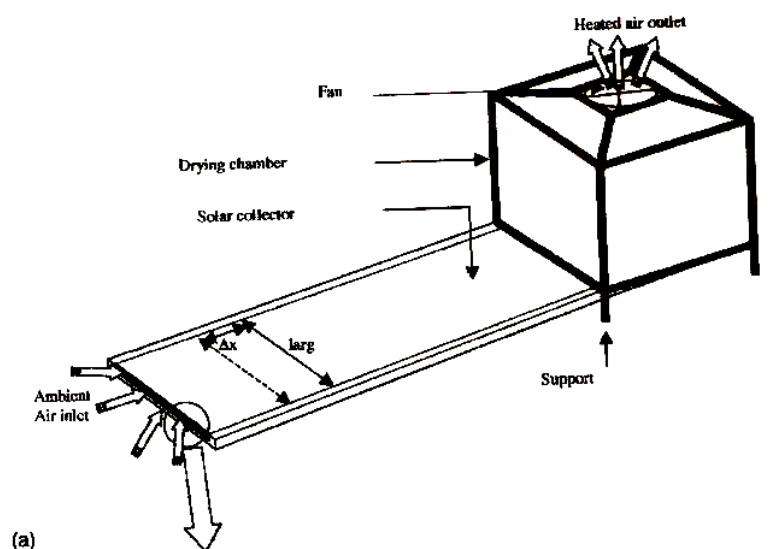
وغير كافي للتجفيف او في الليل حيث ينعدم الاشعاع الشمسي او قد يستخدم حرق النباتات او الوقود كمصدر للطاقة شكل (3-93).

يوضح الشكل (3-94) مجفف شمسي هجين يتكون من صفيحة من ال polystyrene سمكها 0.04 م وجدار من الطابوق سمكه 0.1 م يحتوي على عشرة اطباق تشكل المسافة بين طبق واخر 0.1 م ويحتوي على مروحة تستخدم لتحريك الهواء داخل المجفف وتوزيعه بشكل متجانس.

المجمع الشمسي هو من النوع المستوي flat air collector شكل b-1 مرتبط بغرفة التجفيف . يتكون المجمع من صفيحة زجاجية glass pyrex plate سمكها 0.01 م استخدمت كغطاء ويحتوي ايضا على صفيحة من الالمنيوم سمكها 0.001 م مصبوعة بلون اسود تدعى هذه الصفيحة بصفحة الامتصاص. واستخدم عازل من نوع polystyrene سمك 0.04 م.

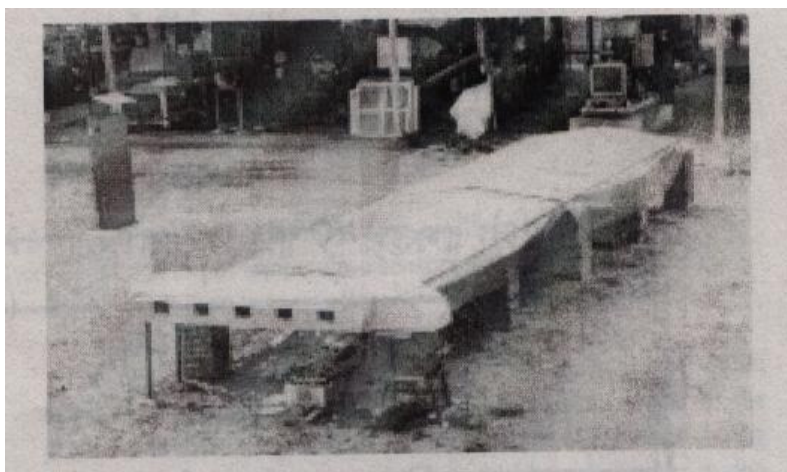
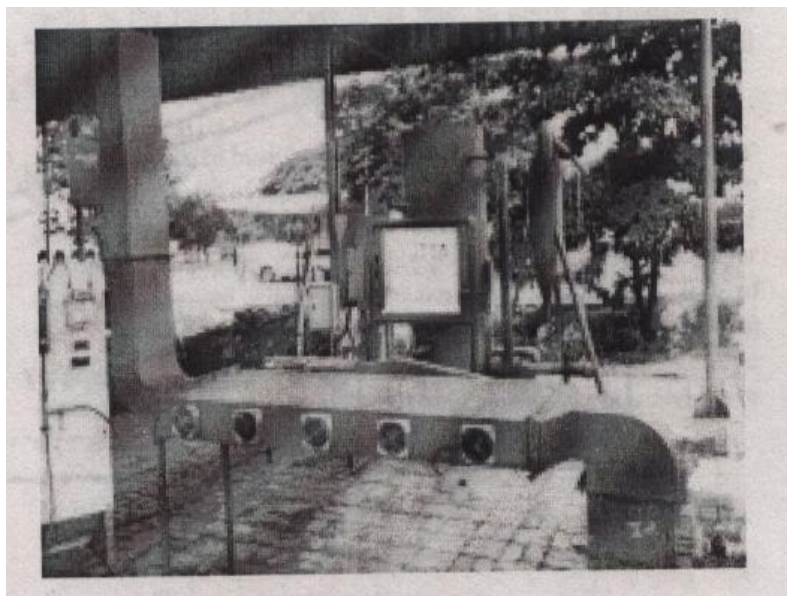
يجري الهواء بين صفيحة الامتصاص والعازل ، اما المسافة بين صفيحة الامتصاص والزجاج فهي مفرغة من الهواء لتقليل الفقدان الحراري العلوي. اضيف سخان كهربائي الى المجفف شكل c - 1 يستخدم في الظروف البيئية غير الجيدة وعندما تكون درجة حرارة الهواء الخارج من المجمع الشمسي اقل من 50 م . تتم السيطرة على عمل السخان بواسطة الثرموستات الذي يوضح عند فتحة خروج الهواء من المجمع الشمسي.





هنالك تصميم اخر من المجففات الشمسية الهجينة شكل (3-95) التي تعمل بحرق بقايا النباتات كمصدر للطاقة *solar – biomass hybrid dryer* والتي تتكون من مجمع شمسي ذي صفيحة امتصاص مستوية ونفق تجفيف كلاهما وحدة واحدة ، عرض المجفف 1.8 م وطول المجمع 4 م وطول المجفف 4.24 م . العازل المستخدم هو من نوع الصوف الزجاجي *glass wool* بسبك 4 سم واستخدمت طبقة من البولي اثيلين الحاجب لاشعة فوق البنفسجية *UV stabilized* *polyethylene sheet* سمكه 0.2 ملم. يحتوي المجفف على مبادل حراري من النوع الانبوبي يمر فيه الهواء الداخل الى المجمع ويحتوي المجمع على خمس مراوح قدرة الواحدة منها 14 واط . تصريف الهواء الكلي هو 130 م³/سا وانايب المبادل الحراري متصلة بغرفة التجفيف وتحتوي الاخيرة على مدخنة *chimmney* في هذا المجفف تتراوح درجة الحرارة بين 65 – 70 م°

الطاقة المطلوبة لتجهيز هواء حار بواسطة المبادل الحراري عند درجة حرارة 70 م هي 12.7 كيلو واط ومقدار الوقود المستهلك 2.44 كغم/سا والمحركة مصنوعة من الحديد عرضها 0.3 م وطولها 0.275 م وارتفاعها 0.4 م . الموقد يحتوي على 44 فتحة قطر الواحدة منها 1.5 سم لغرض زيادة كفاءة ونوعية الاحتراق . تكون المحركة متصلة بالمدخنة التي تعمل على سحب الغازات ومعدل جريانها فيه 139 م³ / سا وهو ذو شكل مستطيل ابعاده 275. م * 0.16 م وارتفاعه 1 متر .



شكل (3-95): صورة فوتوغرافية للمجفف الشمسي الهجين
المزود بمحرقة. (Mastekbayeva et al., 1998).

