الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي

كلية العلوم الدقيقة

قسم: الفيزياء

رقم الترتيب:

رقم التسلسل:

مذكرة تخرج مقدمة لنيل شهادة

ماستر أكاديمي

مجال: علوم المادة

تخصص: فيزياء تطبيقية إشعاع و طاقة

من إعداد: منصر لندة

العبيد سندس

الموضوع

توزيع درجة الحرارة في المجفف الشمسي

نوقشت يوم: 2018/06/09

أمام لجنة المناقشة المكونة من الأساتذة:

اللبي عبد القادر	أستاذ محاضر" ب "	جامعة الشهيد حمه لخضر ـ الوادي ـ	رئيسا
ليتيم فتحي	أستاذ مساعد " أ "	جامعة الشهيد حمه لخضر ـ الوادي ـ	مناقشا
حاج عمار محمد علي	أستاذ مساعد " أ "	جامعة الشهيد حمه لخضر ـ الوادي ـ	مناقشا
عطية محمد الهادي	أستاذ محاضر" أ "	جامعة الشهيد حمه لخضر ـ الوادي ـ	مؤطرا

الموسم الجامعي 2018/2017

الإهداء

إلى الشمعة التي احترقت لتضيء دربي، إلى غاليتي، إلى العظيمة أمي

إلى سندي أخي الغالي، إلى الحضن الدافئ عائلتي الحبيبة

إلى حبيباتي صديقات العمر، إلى رفقاء الدرب زملاء الدراسة.

لندة

الحمد لله رب العالمين و الصلاة و السلام على خاتم الأنبياء و المرسلين

أهدي هذا العمل إلى:

من لا يمكن للكلمات أن توفي حقهما

إلى من لا يمكن للأرقام أن تحصي فضائلهما

إلى والداي العزيزين أدامهما الله لي

إلى إخوتي و أخواتي إلى كل أفراد عائلتي

إلى الأصدقاء و كل من ساندني.

سندس

الشكر و العرفان

الحمد لله رب العالمين، و الصلاة و السلام على أشرف المرسلين سيدنا محمد الأمي الأمين دليل رشاد الناس أجمعين.

الحمد لله الذي و فقنا لإنجاز هذه المذكرة، كما نتقدم بالشكر للأستاذ المشرف عطية محمد الهادي و الأستاذ خشخوش عبد الرحمن على النصائح و التوجيهات التي قدماها لنا.

كما نتقدم بجزيل الشكر للجنة المناقشة

وفي الأخير لا ننسى فضل كل من علمنا حرفا طوال حياتنا الدراسية.

لندة وسندس

فهرس المحتويات

فهرس الأشكال..... VI
فهرس الجداول..... VII
قائمة الرموز..... VIII

المقدمة العامة..... 2

الفصل الأول: مفاهيم عامة حول المجففات

I - 1 المقدمة..... 5
I - 2 تعريف التجفيف..... 5
I - 3 طرق التجفيف..... 5
I - 3 - 1 التجفيف الشمسي الطبيعي (التقليدي)..... 5
I - 3 - 1 - 1 مزايا التجفيف الشمسي الطبيعي (التقليدي)..... 6
I - 3 - 1 - 2 عيوب التجفيف الشمسي الطبيعي (التقليدي)..... 6
I - 3 - 2 التجفيف الصناعي..... 7
I - 3 - 2 - 1 مزايا التجفيف الصناعي..... 7
I - 3 - 2 - 2 عيوب التجفيف الصناعي..... 7
I - 3 - 3 التجفيف الشمسي المباشر..... 8
I - 3 - 3 - 1 مزايا التجفيف الشمسي المباشر..... 8
I - 3 - 3 - 2 عيوب التجفيف الشمسي المباشر..... 8
I - 3 - 4 التجفيف الشمسي الغير مباشر..... 9
I - 3 - 4 - 1 مزايا التجفيف الشمسي الغير مباشر..... 9
I - 3 - 4 - 2 عيوب التجفيف الشمسي الغير مباشر..... 9
I - 4 المجففات الشمسية المختلطة..... 10
I - 5 المجففات الشمسية الهجينة..... 10
I - 5 - 1 مزايا المجففات الشمسية الهجينة..... 11
I - 5 - 2 عيوب المجففات الشمسية الهجينة..... 11
I - 6 أنواع المجففات حسب طبيعة حركة الهواء..... 11
I - 6 - 1 مجففات الحمل الطبيعي..... 11
I - 6 - 2 مجففات الحمل القسري..... 11
I - 7 بعض أنواع المجففات..... 13
I - 7 - 1 المجفف الشمسي ذو النفق..... 13
I - 7 - 2 المجفف الشمسي الشبه المختلط..... 13
I - 7 - 3 المجفف الشمسي الرأسي ذو التهوية..... 14
I - 7 - 4 مجفف شمسي للأسماك تحت التفريغ..... 15
I - 7 - 4 - 1 آلية عمل المجفف الشمسي للأسماك تحت التفريغ..... 16

I - 8 مجالات استعمال المجفف الشمسي..... 17
I - 9 التجفيف في الصناعات الغذائية..... 18
I - 10 الخاتمة..... 18

الفصل الثاني: دراسة تحليلية للتجفيف الشمسي غير المباشر

II - 1 مقدمة..... 20
II - 2 الظواهر الفيزيائية التي تحدث خلال عملية التجفيف..... 20
II - 2 - 1 الانتقال الحراري..... 20
II - 2- 1 - 1 التجفيف بالحمل الحراري..... 20
II - 2 - 1 - 2 التجفيف بالتوصيل الحراري..... 22
II - 2 - 1 - 3 التجفيف بالإشعاع الحراري..... 23
II - 2 - 2 الانتقال الكتلي..... 23
II - 2 - 2 - 1 الانتشار الجزيئي..... 23
II - 2 - 2 - 2 الانتقال الكتلي الحملي..... 24
II - 3 الخواص الأساسية لهواء التجفيف..... 25
II - 3 - 1 الرطوبة..... 25
II - 3 - 2 الرطوبة النسبية..... 25
II - 3 - 3 الرطوبة المطلقة..... 25
II - 3 - 4 درجة الحرارة الجافة للغاز..... 25
II - 3 - 5 درجة الحرارة الرطبة للغاز..... 25
II - 4 الخواص الأساسية للمادة الرطبة..... 26
II - 4 - 1 أشكال توزيع الماء داخل المنتج..... 26
II - 4 - 2 النشاط المائي للمنتج..... 26
II - 4 - 3 المحتوى الرطوبي..... 27
II - 5 سرعة التجفيف..... 28
II - 6 حركية التجفيف..... 28
II - 7 تأثير عوامل هواء التجفيف على حركية التجفيف..... 30
II - 7 - 1 تأثير درجة حرارة هواء التجفيف..... 30
II - 7 - 2 تأثير سرعة هواء التجفيف..... 31
II - 7 - 3 تأثير رطوبة هواء التجفيف..... 31
II - 8 فعالية المجفف..... 31
II - 9 مردودية التجفيف..... 32
II - 9 - 1 المردودية الكتلية..... 32
II - 9 - 2 المردودية الطاقوية..... 32
II - 10 الخاتمة..... 33

الفصل الثالث: دراسة توزيع درجة الحرارة في المجفف الشمسي

III - 1 المقدمة..... 35

III - 2 عناصر المجفف الشمسي..... 35
III - 2 - 1 غرفة التجفيف..... 35
III - 2 - 2 لاقط شمسي مسطح..... 38
III - 2 - 3 المروحة..... 39
III - 2 - 4 الخلية الشمسية..... 39
III - 3 مبدأ عمل المجفف..... 39
III - 4 وصف منطقة التجربة..... 40
III - 5 الأجهزة المستخدمة في القياس..... 40
III - 6 وصف التجربة..... 40
III - 7 النتائج المتحصل عليها..... 42
III - 8 الخاتمة..... 45
الخاتمة العامة..... 46
المراجع..... 47
الملحق..... 51

فهرس الأشكال

رقم الشكل **الصفحة**

الفصل الأول

الشكل (I - 1) : تجفيف شمسي طبيعي للمحاصيل الزراعية..... 6
الشكل (I - 2) : مجفف صناعي يعمل بالكهرباء..... 7
الشكل (I - 3) : مجفف شمسي مباشر..... 8
الشكل (I - 4) : رسم تخطيطي وصورة فوتوغرافية لمجفف شمسي غير مباشر..... 9
الشكل (I - 5) : رسم تخطيطي لمجفف شمسي مختلط..... 10
الشكل (I - 6) : مجفف شمسي هجين يستعمل مروحة لتحريك الهواء داخل المجفف..... 10
الشكل (I - 7) : أهم أنواع المجففات الشمسية..... 12
الشكل (I - 8) : المجفف ذو النفق و آلية عمله..... 13
الشكل (I - 9) : المجفف الشمسي الشبه المختلط..... 14
الشكل (I - 10) : المجفف الشمسي الرأسي ذو التهوية..... 15
الشكل (I - 11) : صورتان لمجفف شمسي للأسماك تحت التفريغ من الأمام و الخلف..... 16
الشكل (I - 12) : مخطط لمجفف شمسي للأسماك تحت التفريغ..... 17

الفصل الثاني

الشكل (II - 1) : رسم تخطيطي لانتقال الحرارة والكتلة أثناء التجفيف..... 24
الشكل (II - 2) : منحنى حركية التجفيف..... 29
الشكل (II - 3) : تطور الهواء خلال عملية التجفيف بالحمل الحراري..... 32

الفصل الثالث

الشكل (III - 1) : رسم تخطيطي يوضح غرفة التجفيف بعد صنعها..... 38
الشكل (III - 2) : لاقط شمسي مسطح..... 38
الشكل (III - 3) : صورة المروحة المستخدمة..... 39
الشكل (III - 4) : صورة الخلية الشمسية..... 39
الشكل (III - 5) : صور فوتوغرافية لأجهزة القياس..... 40
الشكل (III - 6) : التركيب التجريبي للمجفف الشمسي غير المباشر..... 41
الشكل (III - 7) : مخطط للمواضع التي تقاس الحرارة عندها..... 42
الشكل (III - 8) : منحنى تغير درجة حرارة الجو بدلالة الزمن..... 42
الشكل (III - 9) : منحنى تغير درجة حرارة مدخل و مخرج اللاقط بدلالة الزمن..... 43
الشكل (III - 10) : منحنى تغير درجة حرارة القسم السفلي من الغرفة بدلالة الزمن..... 44
الشكل (III - 11) : تغير درجة حرارة القسم العلوي من الغرفة بدلالة الزمن..... 44
الشكل (III - 12) : منحنى تغير درجة حرارة مخرج الغرفة بدلالة الزمن..... 45
الشكل (III - 13) : العينة قبل و بعد عملية التجفيف..... 45

فهرس الجداول

رقم الجدول **الصفحة**

الفصل الثالث

الجدول (III - 1): الأدوات المستعملة في الصنع..... 35

الجدول (III - 2): مراحل صنع غرفة المجفف الشمسي..... 36

الجدول (III - 3): الأحوال الجوية للتجربة..... 41

قائمة الرموز

❖ الرموز اللاتينية :

Q	كمية الحرارة المحولة بالحمل الحراري في وحدة الزمن (W)
A	سطح التبادل الحراري بالحمل (m^2)
Pr	رقم براندل
Gr	رقم غيرشوف
Re	رقم رينولدز
v	السرعة (m/ s)
Q	تدفق الحرارة بالتوصيل (W)
Q	تدفق الحرارة بالإشعاع (W)
T_1	درجة حرارة مصدر الانبعاث (K)
T_2	درجة حرارة المنتج (K)
A_1	سطح الجسم المتلقي للإشعاع (m^2)
A_2	السطح المرسل للأشعة تحت الحمراء (m^2)
N_A	عدد الجزيئات لكل لتر
D_{AB}	معامل الانتشار(جزيئه×mol/m)
C	التركيز (mol/l)
X	المسافة المقطوعة (m)
H_r	الرطوبة النسبية (%)
P_v	الضغط الجزئي للبخار(Pa)
P_s	ضغط تشبع البخار(Pa)
H_a	الرطوبة المطلقة ($Kg_v . Kg_{as}^{-1}$)
M_a	كتلة الهواء (Kg_v)
M_e	كتلة الماء (Kg_{as})
a_w	النشاط المائي
P_{vp}	الضغط السطحي لبخار الماء (Pa)
X'	المحتوى الرطوبي للقاعدة الرطبة ($Kgd'eau/KgM_t$)
M_e	كتلة الماء في المنتج (kg)
M_t	الكتلة الكلية للمنتج (kg)
M_s	الكتلة الجافة (kg)
X	المحتوى الرطوبي للقاعدة الجافة ($Kgd'eau/KgM_s$)
R	سرعة التجفيف ($kg\ d'eau/m^2 \cdot s$)
M_v	كتلة الماء المتبخر(Kg)
dx	رطوبة المنتج في بداية ونهاية عملية التجفيف
x_e	رطوبة المنتج في نهاية التجفيف ($Kgd'eau/KgM_s$)
x_s	رطوبة المنتج في بداية التجفيف ($Kgd'eau/KgM_s$)

S	مساحة المادة المجففة (m^2)
dt	زمن التجفيف (s)
L_v	الحرارة الكامنة للتبخير(J/kg)
I	الاستطاعة الشمسية (W/m^2)
P_f	الطاقة الكهربائية المستهلكة من طرف المروحة (W)
A_c	سطح اللاقط (m^2)
m_f	كتلة المنتج مع الشباك (kg)
X_2	الرطوبة المطلقة للهواء عند درجة الحرارة T_2
X_a	الرطوبة المطلقة للهواء عند درجة الحرارة T_a
X_{2e}	الرطوبة المطلقة للهواء عند درجة الحرارةT_{2e}

❖ الرموزاليونانية :

α	معامل التجفيف بالحمل ($W/m^2.K$)
λ_a	الموصلية الحرارية للهواء(W/m.K)
ρ	الكتلة الحجمية للمائع (kg/m^3)
μ	اللزوجة الديناميكية (kg/m.s)
λ	الموصلية الحرارية للمنتج (W/m.K)
ε_1	الإنبعاثية للمنتج
ε_2	إنبعاثية المرسل
σ	ثابت ستيفان ـ بولتزمان
η_{ch}	فعالية المجفف
η_m	المردودية الكتلية (%)

❖ الإختصارات:

CEM	متوسط استهلاك الطاقة
RCE	نسبة استهلاك الطاقة

المقدمة العامة

المقدمة العامة

بدأت وسيلة تجفيف المحاصيل مع بداية الزراعة عندما عرف الإنسان بفطرته أنه يمكن حفظ الحبوب من التلف بتعريضها لأشعة الشمس المباشرة [1]. كما استعمل البابليون والمصريون و اليونانيون والرومان التجفيف الشمسي قبل آلاف السنين و منذ العصور القديمة، في حفظ بعض أنواع الفاكهة، الخضر، المحاصيل الحبوبية، اللحوم، الأسماك والحليب [2]. حيث يتم حصاد المنتجات الزراعية في أوقات معينة من السنة بينما يتم استهلاك الإنسان لهذه المنتجات على مدار العام و بالتالي نشوء الحاجة لتخزينها لفترات كبيرة أو صغيرة لحين استهلاكها، أضف إلى هذا أنه في كثير من الأحيان تبعد مزارع هذه المنتجات كثيرا عن مناطق بيعيها واستهلاكها مما يتطلب أيضا تخزينها لفترات زمنية طويلة [3].

التجفيف هو إحدى الطرائق القديمة المستعملة بشكل واسع لحفظ الأغذية، إذ أنه يعمل على إزالة الرطوبة منها مما يؤدي إلى توقف نشاط الأحياء المجهرية وضمان عدم تلفها [4].

يعمل التجفيف على إيقاف نشاط البكتيريا والتخمر والإنزيمات في المنتج مما يحميها من التلف مع الاحتفاظ بنكهتها وقيمتها الغذائية لتصبح سهلة الخزن وخفيفة الوزن. إلا أن الأغذية المجففة تحت أشعة الشمس تتعرض إلى التغيرات في الظروف الجوية المختلفة و التلوث بالأحياء المجهرية والغبار والحشرات [4]، كما أن أشعة الشمس المباشرة تحتوي على الأشعة فوق البنفسجية التي تؤدي إلى تفكك الكربوهيدرات و تفكك 40 % من سلاسل النشأ و تقل لزوجته كما أنها تؤثر على مضادات الأكسدة الطبيعية الموجودة في الزيوت فتكون بيروكسيدات بدرجة عالية وكذلك تؤثر على الاركوستيرول و تحوله إلى فيتامين D، كما تزيد في الحموضة الكلية و أيضا تؤدي إلى فقد الصبغات الموجودة في خلايا الفواكه [5].

وتحتاج عملية التجفيف الشمسي إلى مساحة كبيرة وزمن طويل نسبيا، لهذا لم يتم الاعتماد على طريقة التجفيف الشمسي على نطاق واسع، فضلا على الأمطار التي تفشل عملية التجفيف الشمسي الطبيعي وذلك بإعادة ترطيب المنتج المراد تجفيفه، كذلك فإن معدل التجفيف البطيء يزيد من مخاطر التلف نتيجة لوجود البكتيريا [4،6].

بسب تلك المساوئ الناتجة عن التجفيف الشمسي الطبيعي فقد عمد الإنسان إلى التجفيف الصناعي أي استعمال الحرارة المولدة لغرض التجفيف باستخدام المجففات الآلية [7]، وهي المجففات الميكانيكية التي تعتمد في عملها على الطاقة الكهربائية و تمتاز بالسرعة العالية في تجفيف الأغذية إلا أنها تعطي منتج غير متجانس و ذو نوعية غير جيدة [4]، نتيجة تصلب الطبقة الخارجية من المادة الغذائية و التي تمنع انتشار عملية التجفيف بشكل تام [7]، كما أنها مكلفة للغاية لاعتمادها في تسخين الهواء على الطاقات (كهرباء، غاز ...) ذات المصدر البترولي الذي يعتبر من أهم عوامل تلويث البيئة، من هنا بدأ التفكير في تصميم مجفف يتميز بمواصفات المجففات الصناعية إلا أنه يعتمد في تسخين الهواء على الطاقات الشمسية، التي تزخر بها الجزائر حيث يصل معدل ساعات الإشعاع السنوي في المناطق الصحراوية التي تشكل 86% من المساحة الكلية للوطن إلى 3500 ساعة في السنة ، و هذا ما يجعلها مصدر طاقوي لا يستهان به [8]، حيث يشترط في الطريقة البديلة للتجفيف اعتمادها على تقنية بسيطة و زهيدة الثمن وفعالة لتصبح في متناول الجميع ليسهل اقتنائها و تشغيلها بكل يسر[1].

لذلك طورت مجففات تعمل بالطاقة الشمسية تعتمد على طاقة الإشعاع الشمسي و تحولها إلى طاقة حرارية باستخدام مجمع شمسي [2]، و مما يجدر ذكره أن المجففات الشمسية هي أجهزة ذات تقنية بسيطة تنحصر مهمتها فيما يلي [1]:

- تخفيض درجة رطوبة بعض المحاصيل الزراعية والتي منها الحبوب (القمح والأرز)، الفواكه (الموز و التمور)، الخضار (الطماطم)، النباتات الجذرية (الجزر)، البقول (الفول السوداني) و غيرها.
- توفير جو ملائم لمواصلة عملية التبخر الطبيعية عندما تكون الظروف الجوية (الحرارة، الرطوبة وسرعة الرياح) غير مناسبة لإتمام عملية التجفيف طبيعيا مثل انخفاض درجة حرارة الجو وارتفاع الرطوبة النسبية.

إن التجفيف بالمجففات الشمسية غير المباشرة يعطي منتوج متجانس غير منكمش و ذو قيمة غذائية أفضل من المجففات الكهربائية و التجفيف الشمسي الطبيعي (التقليدي). تنخفض رطوبة الأغذية مع زيادة ساعات النهار [4].

تدرس هذه المذكرة مشكلة التوزيع الحراري داخل مجفف شمسي غير مباشر يعمل بالحمل القسري، ويطرح بعض التعديلات لتحسين توزيع الحرارة داخل غرفة التجفيف مع الدراسة التجريبية للنموذج المقترح. فهل ستنجح هذه التعديلات في توزيع الحرارة بصفة منتظمة داخل المجفف؟

كما تتضمن هذه المذكرة ثلاثة فصول تتلخص في ما يلي :

الفصل الأول:

يوضح هذا الفصل المفاهيم العامة حول المجففات، و يشرح مفهوم التجفيف و طرقه العديدة المختلفة المتمثلة في التجفيف الشمسي الطبيعي (التقليدي)، التجفيف الشمسي الصناعي، التجفيف الشمسي المباشر و غير المباشر مع ذكر ايجابيات و سلبيات كل طريقة، كما يذكر مجالات استعمال المجففات وأهمية التجفيف في الصناعات الغذائية.

الفصل الثاني:

يطرح الفصل الثاني دراسة نظرية للتجفيف الشمسي غير المباشر، بداية بالظواهر الفيزيائية التي تحدث خلال عملية التجفيف، مرورا بالظروف المتحكمة في سير حركية التجفيف من بينها خواص هواء التجفيف والمادة الرطبة. ليفسر ما يحدث داخل المادة الرطبة أثناء التجفيف.

الفصل الثالث:

يظهر نتائج توزيع درجة الحرارة في المجفف الشمسي، بعد صنع غرفة التجفيف مع شرح مراحل الصنع و إجراء تعديل عليها بتقسيمها إلى قسمين بواسطة لوح فاصل به ثقوب موزعة بانتظام قصد تحسين توزيع الحرارة، مع تحليل و مناقشة هذه النتائج.

وتختم المذكرة بخاتمة عامة تقدم فيها حوصلة النتائج المتحصل عيها من هذه العمل التجريبي.

الفصل الأول:

مفاهيم عامة حول المجففات

I - 1 المقدمة :

يعتبر التجفيف بالطاقة الشمسية من أقدم الاستخدامات البشرية التي عرفها الإنسان و ذلك من خلال تعامل تلقائي بسيط مع عوامل الجو و الهواء و الشمس فلا بديل للتجفيف الهوائي الشمسي في الحياة الزراعية للمنتجات المختلفة التي ينتجها الحقل من حبوب و فواكه و منتجات أخرى [3]. أما طريقة التجفيف الشمسي التقليدي تبقى من تقنيات التجفيف المعروفة في إطار التقاليد المتعارف عليها بين المجتمعات خاصة الريفية المعزولة، ومع بداية التطور الصناعي بدأ استعمال المجففات الصناعية غير أنها مكلفة للغاية لاعتمادها في تسخين الهواء على الطاقات (كهرباء،غاز...) ذات المصدر البترولي، الذي يعتبر من أهم عوامل تلويث البيئة وطرق التجفيف الشمسية التقليدية تؤدي إلى إنتاج منتجات ذات نوعية منخفضة، ومن هنا بدأ التفكير في تصميم مجفف يتميز بمواصفات المجففات الصناعية إلا أنه يعتمد في تسخين الهواء على الطاقة الشمسية [8]، ويعرف بالتجفيف الشمسي الذي يعتمد على الطاقة الشمسية في عملية تجفيف المادة الغذائية [9].

لذا سيكون الموضوع الأساسي لهذا الفصل عن المفاهيم العامة حول المجففات و أنواعها بإيجابياتها وسلبياتها.

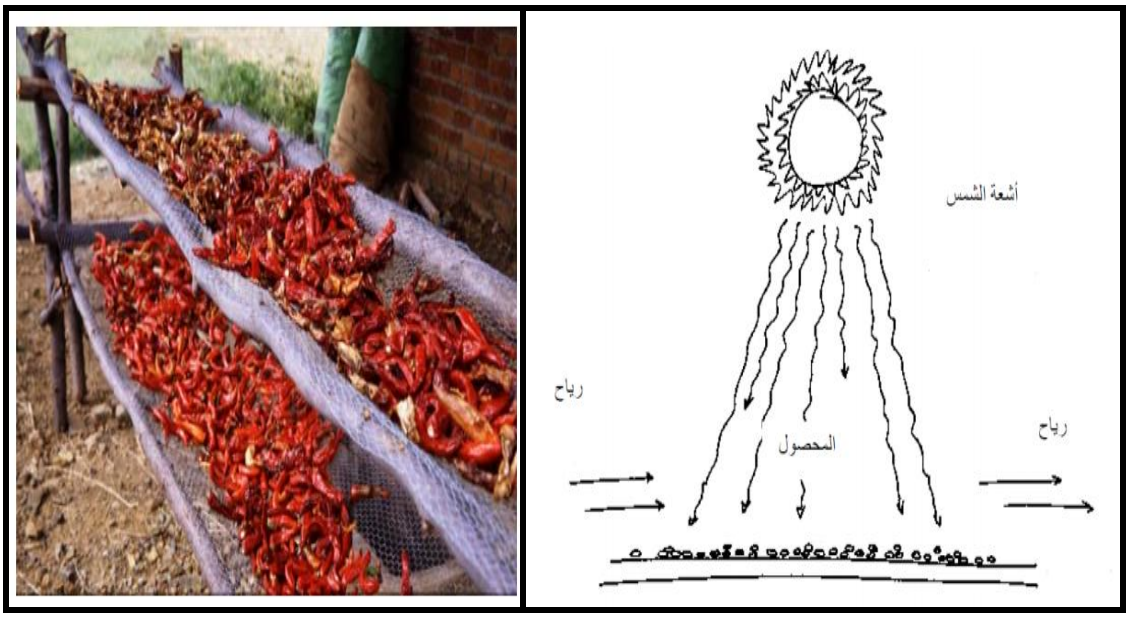
I - 2 تعريف التجفيف :

التجفيف هو عملية داخلية الهدف منها نزع السائل المتشرب من طرف جسم صلب أو سائل (غالبا ما يكون الماء) كليا أو جزئيا [8]، لأن المواد الغذائية تحتوي على نسب مختلفة من الماء و هي بحالتها الطازجة، و إن المواد الغذائية ذات الرطوبة العالية تكون عرضة للتلف بسبب نمو الأحياء المجهرية في المحاليل المائية واستعمالها لمكونات هذه المواد في تغذيتها.إن إزالة الرطوبة من هذه المواد تضمن إمكانية حفظها من التلف لمدة زمنية طويلة مع إمكانية استعمال هذه الأغذية بعد ذلك بإضافة جزء من الماء أو الماء بكامله لاسترجاع المنتج واستعماله، و يطلق على عملية إزالة الماء من المواد الغذائية بالتجفيف [10].

I - 3 طرق التجفيف

I - 3 - 1 التجفيف الشمسي الطبيعي (التقليدي):

تعتمد هذه الطريقة على تعريض المحصول للهواء وحرارة الشمس الطبيعية، و تجفف المحاصيل الزراعية بالاستخدام المباشر لأشعة الشمس (تجفيف تقليدي) لفترات زمنية طويلة، وهي أبسط طريقة للتجفيف الشمسي [3،11]. حيث يتم توزيع الأغذية على الرفوف أو الحصير أو في أسرة، أو حتى على الأرض، أي بشكل مستوي مما يسمح للشمس والرياح بتجفيفها مع شرط تقليبها إلى أن تجف [12]. كما يبين الشكل (I - 1) :



الشكل (I - 1): تجفيف شمسي طبيعي للمحاصيل الزراعية [8،13].

I - 3 - 1 - 1 مزايا التجفيف الشمسي الطبيعي (التقليدي) :

للتجفيف الشمسي الطبيعي العديد من الفوائد و الإيجابيات نذكر منها : [3،8]

- ✓ تؤدي إلى إعطاء نوعية لا بأس بها من الأغذية المجففة.
- ✓ طاقة شمسية متوفرة طوال السنة و بدون تكلفة.
- ✓ لا تتطلب وسائل و معدات باهظة الثمن.
- ✓ تقنية سهلة لا تتطلب معرفة ولا دراسة معمقة و يمكن لكل فرد القيام به.

I - 3 - 1 - 2 عيوب التجفيف الشمسي الطبيعي (التقليدي) :

لكن لهذه الطريقة العديد من المساوئ و السلبيات منها ما يلي : [4،14]

- ✓ بطيء في التجفيف و غير منتظم.
- ✓ تتطلب تدخلا بشريا منتظما، و حماية الأغذية و جمعها في حالة هطول الأمطار.
- ✓ تحتاج هذه الطريقة إلى زمن و مساحة كبيرين للتجفيف.
- ✓ تعرض الأغذية إلى التلوث بالغبار و الإصابة بالحشرات و تعرضها للطيور و القوارض مما يؤدي إلى تشويه منظرها أو إتلافها كليا.
- ✓ احتمال تغير البنية الميكروبيولوجية، اللون و الطعم لتعرضها مباشرة لأشعة الشمس مما ينتج عنه نوعية رديئة.

I - 3 - 2 التجفيف الصناعي :

يحدث بتأثير الهواء المسخن أو الغازات الناتجة عن الاحتراق [14]. لقد استخدمت هذه الطريقة في الأماكن التي يقل فيها الإشعاع الشمسي فقد كانت تعتمد على طاقة الكتل الحيوية، وذلك بوضع المحصول في وعاء خاص يتم تعريضه إلى هواء حار صادر نتيجة حرق الأخشاب أو غيرها من الكتل الحيوية، وقد تطورت هذه الطريقة باستخدام الأفران الحرارية التي تعتمد على الغاز أو الكهرباء كمصدر للطاقة [1]. وهذا ما يوضحه الشكل (I - 2):

الشكل (I - 2): مجفف صناعي يعمل بالكهرباء [15].

I - 3 - 2 - 1 مزايا التجفيف الصناعي :

للمجففات الصناعية عدة مزايا مقارنة بالمجففات الشمسية الطبيعية منها : [8،9]

- ✓ تتوفر فيه النظافة و الشروط الصحية.
- ✓ يستغرق وقت أقل من التجفيف الشمسي الطبيعي.
- ✓ الأغذية المجففة المتحصل عليها تكون أكثر جودة من الأغذية المجففة طبيعيا.
- ✓ الحفاظ على المنتج من عوامل التلوث.
- ✓ التحكم الجيد في سير عملية التجفيف.
- ✓ إمكانية استمرار عملية التجفيف ليلا، كذلك في الأيام التي تشهد تقلبات جوية.

I - 3 - 2 - 2 عيوب التجفيف الصناعي :

و لكن للمجففات الصناعية سلبيات أيضا خاصة من جهة استهلاك الطاقة نذكر منها : [8]

- ✓ تكلفة التشغيل باهظة لاعتمادها في تسخين الهواء على الطاقة الكهربائية أو الغاز.
- ✓ بعض المناطق الريفية بعيدة عن الشبكة الكهربائية و محطات التزود بالطاقة.

I - 3 - 3 التجفيف الشمسي المباشر :

تعتمد هذه الطريقة على مبدأ الاستفادة من الطاقة الشمسية و الحركة الطبيعية للهواء الجوي، لأجل التخلص من جزء كبير من الرطوبة في الغذاء، و بالتالي زيادة فترة الحفظ. و تعتمد أيضا على الحالة الجوية و بخاصة درجة الحرارة و الرطوبة النسبية الخارجية [15]. المجفف الشمسي المباشر هو الذي تتعرض فيه المادة المراد تجفيفها مباشرة لأشعة الشمس، و يسمى أيضا مجفف الخزانة الحراري لأن هذا المجفف يتكون من صندوق معزول عند قاعدته مغطى بالزجاج أو البلاستيك الشفاف الذي يعمل على رفع درجة الحرارة بالداخل [16]. و هو ما يظهره الشكل (I - 3):

الشكل (I - 3): مجفف شمسي مباشر [15،17].

I - 3 - 3 - 1 مزايا التجفيف الشمسي المباشر :

للمجففات الشمسية المباشرة عدة مزايا مقارنة بالمجففات الطبيعية من ناحية النوعية و المجففات الصناعية من ناحية الطاقة المستخدمة : [8،18،19]

- ✓ قصر مدة التجفيف مقارنة بالتجفيف الطبيعي.
- ✓ يوفر حماية أفضل ضد الغبار و الحشرات و الحيوانات و الأمطار.
- ✓ بساطة عملية التجفيف فهو لا يحتاج إلى تقنية عالية أو يد عاملة مؤهلة لتسيره.
- ✓ طاقة مجانية عكس المجففات الصناعية المكلفة أي عدم الحاجة إلى رؤوس أموال كبيرة.

I - 3 - 3 - 2 عيوب التجفيف الشمسي المباشر:

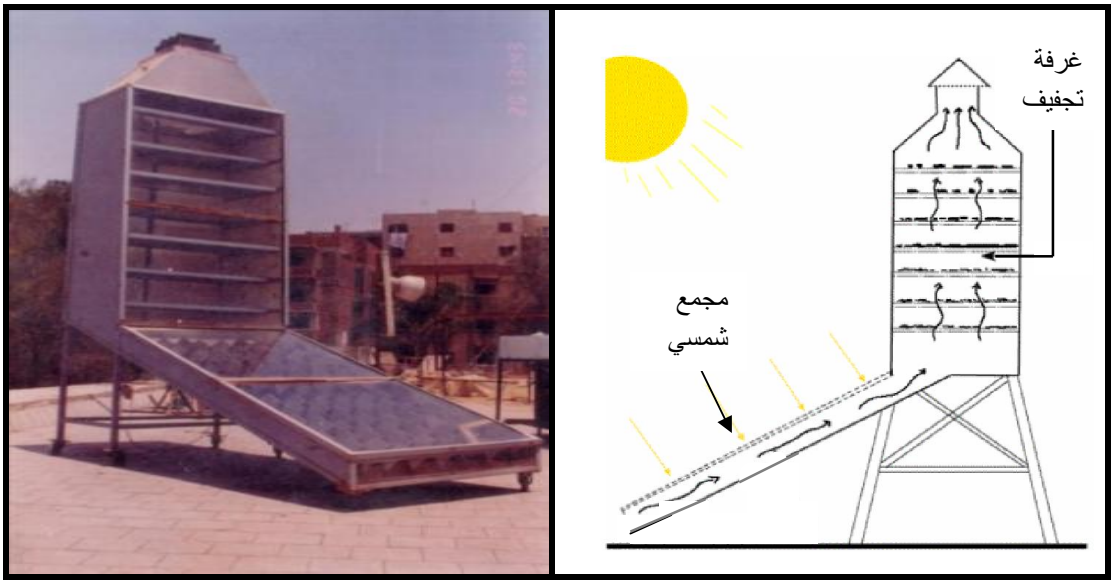
ولكن للمجففات الشمسية المباشرة سلبيات نذكر منها : [8،18]

- ✓ تعريض المنتج مباشرة لأشعة الشمس يسبب تلف للفيتامينات خاصة A و C، بواسطة الأشعة الفوق البنفسجية.
- ✓ انخفاض القيمة الغذائية و تغير لون المنتج، كالخضار يتغير لونها من الأخضر إلى الأصفر بسبب أشعة الشمس المباشرة.

✓ سهولة كسر الزجاج وهذا ما يحتم تبديله كلما اقتضى الأمر.

I - 3 - 4 التجفيف الشمسي غير المباشر:

في هذه الطريقة من التجفيف الغذاء لا يتعرض إلى الإشعاع الشمسي مباشرة[4]، و هذا النوع من المجففات الشمسية غير المباشرة تتكون عادة من جزأين: الجزء الأول عبارة عن مجمع الأشعة الشمسية مغطى من الأعلى بغطاء شفاف مصنوع من الزجاج أو البلاستيك [20]. و من الأسفل بصفيحة معدنية (غالبا ما تكون من الألمنيوم) مطلية بالأسود [8]، و يقوم المجمع بالتقاط أشعة الشمس ثم يحولها إلى طاقة حرارية حيث أن هذه الأخيرة تسمح بتسخين الهواء و نقله عبر أنبوب إلى الجزء الثاني و هو عبارة عن غرفة تجفيف يتم وضع المنتج بداخلها لتسمح للهواء الساخن بالتدفق عبر المنتجات الرطبة المراد تجفيفها [19،20]. كما يمثل الشكل (I - 4) :



الشكل (I - 4): رسم تخطيطي وصورة فوتوغرافية لمجفف شمسي غير مباشر [21،22].

I - 3 - 4 - 1 مزايا التجفيف الشمسي غير المباشر :

للمجففات الشمسية غير المباشرة مزايا مقارنة بالمجففات الشمسية المباشرة نذكر أهمها : [19،23]

✓ المنتج لا يتعرض لأشعة الشمس مباشرة لذلك يحافظ على لون المنتج و قيمته الغذائية (خاصة الفيتامينات A و C).

✓ تشغيله لا يتطلب الطاقة الكهربائية أو الوقود الأحفوري.

✓ يوفر حماية من الغبار و القوارض و الحشرات.

I - 3 - 4 - 2 عيوب التجفيف الشمسي غير المباشر :

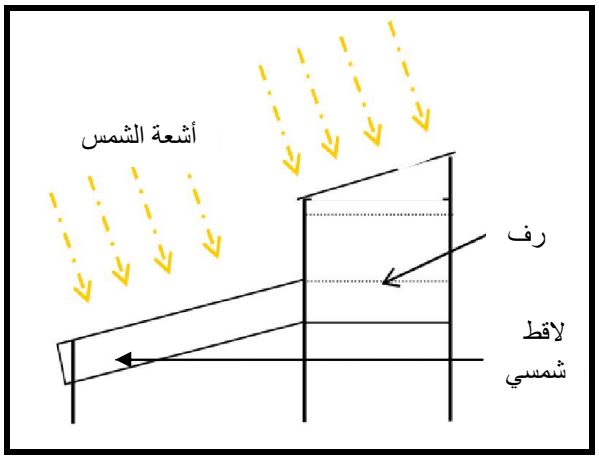
كما أن لهذه المجففات عدة سلبيات نذكر منها : [8،19]

✓ تركيبه معقد.

- ✓ ذو تكلفة عالية بالنسبة للمجفف الشمسي المباشر.
- ✓ سرعة التجفيف متغيرة حسب أحوال الجو من غيوم، مطر ورياح ...إلخ.

I - 4 المجففات الشمسية المختلطة :

تجمع هذه المجففات بين خصائص المجففات المباشرة وغير مباشرة في التركيب والعمل في آن واحد، فإن العمل المشترك للإشعاع الشمسي المباشر على المنتج المراد تجفيفه و مجمع الطاقة الشمسية هو توفير الحرارة اللازمة لعملية التجفيف [21]. و هذا ما يشير إليه الشكل (I - 5):

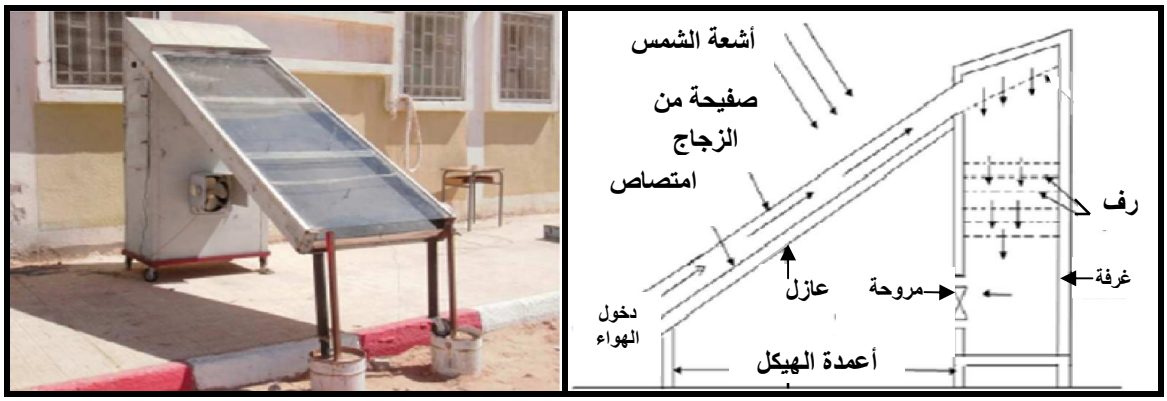


الشكل (I - 5): رسم تخطيطي لمجفف شمسي مختلط [24].

I - 5 المجففات الشمسية الهجينة :

في هذا النوع من المجففات يتدخل مصدر (إضافي) ثانوي للطاقة (طاقة كهربائية أو طاقة احتراق الفحم أو الغاز أو الخشب، الكتلة الحيوية...إلخ) و هذا لغرضين : [25]

- ✓ الطاقة (الإضافية) الثانوية تساعد في إبقاء درجة الحرارة ثابتة داخل المجفف بغض النظر عن الطقس، فيكون هنا تدخل الطاقة الثانوية لإكمال الفارق و الوصول إلى الدرجة المثلى للتجفيف.
- ✓ الطاقة الثانوية تستعمل لتحريك الهواء في مجففات الحمل القسري، و تبقى الطاقة الشمسية مصدر أساسي و وحيد لتسخين الهواء. كما في الشكل (I - 6) :



الشكل (I - 6): مجفف شمسي هجين يستعمل مروحة لتحريك الهواء داخل المجفف [18].

I - 5 - 1 مزايا المجففات الشمسية الهجينة :

لهذا النوع من المجففات عدة مزايا مقارنة بالمجففات الشمسية المذكورة سابقا و المجففات الصناعية نذكر منها ما يلي : [25،8]

- ✓ التحكم الجيد في درجة الحرارة و سرعة التجفيف داخل المجفف.
- ✓ زيادة كبيرة في الإنتاج مقارنة بالمجففات الشمسية لأن المعدات يمكنها العمل في الليل أو في موسم الأمطار إذا لزم الأمر.
- ✓ التحرر من التبعية للعوامل المناخية المتبدلة.
- ✓ استهلاك طاقة منخفضة مقارنة بالمجففات الصناعية.

I - 5 - 2 عيوب المجففات الشمسية الهجينة :

لكن لهذا النوع بعض السلبيات أيضا منها : [25،8]

- ✓ تكلفة التركيب و الإنشاء جد باهظة الثمن.
- ✓ الحاجة إلى الإمداد المحلي بالوقود و الكهرباء و الغاز.
- ✓ الحاجة إلى الأفراد المؤهلين للصيانة و التسيير.

I - 6 أنواع المجففات حسب طبيعة حركة الهواء :

توجد عدة أنواع من المجففات الشمسية ذات الجريان الطبيعي أو ذات الجريان القسري، وهي إما من النوع المباشر و فيها يتعرض الغذاء إلى الإشعاع الشمسي المباشر أو من النوع الغير مباشر و فيه الغذاء لا يتعرض إلى الإشعاع الشمسي. و هناك نوع آخر من المجففات الشمسية المختلطة و فيها يتعرض الغذاء إلى الإشعاع الشمسي و الهواء الساخن في الوقت نفسه و آخر نوع هو المجففات الشمسية الهجينة التي تحتوي على سخانات كهربائية و مراوح تستخدم في الصباح أو الليل أو في الظروف غير الطبيعية [4]. يمكن تميز من مختلف المجففات الشمسية السابقة صنفين حسب طريقة حركة الهواء داخل المجفف وهما : [25،8]

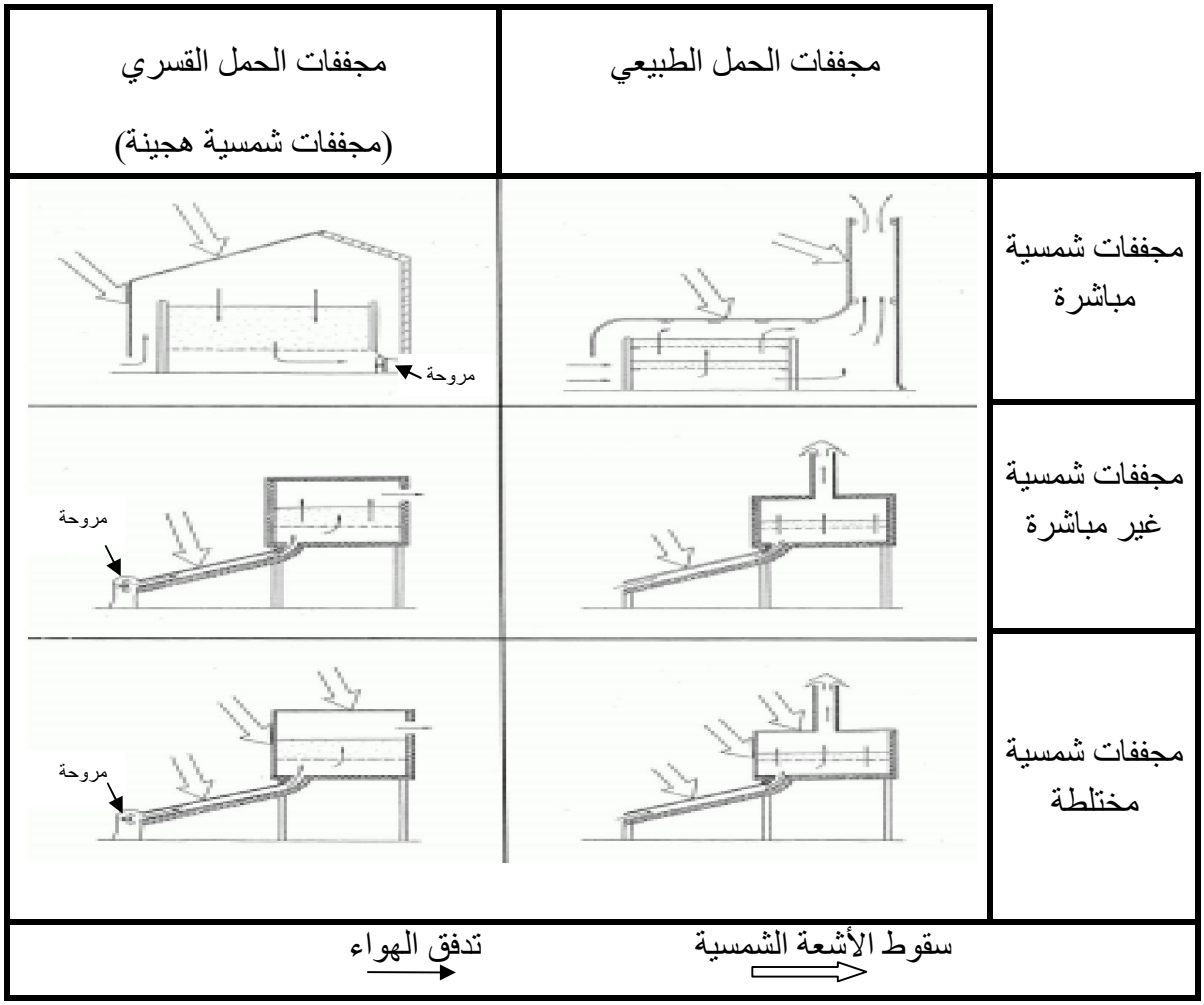
I - 6 - 1 مجففات الحمل الطبيعي :

تعتمد على الفرق في الضغط بين الهواء الداخلي و الخارجي، مما يدفع الهواء البارد للداخل من الفتحة السفلية للمجفف، فترتفع درجة حرارة الهواء بعد مروره على السطح الماص الحراري فتنخفض كثافته فيتحرك نحو الأعلى مجففا المنتجات المراد تجفيفها و عندما يمتص الرطوبة و يبرد يتم طرحه إلى الوسط الخارجي.

I - 6 - 2 مجففات الحمل القسري :

تكون حركة الهواء قسرية لما يتم تدوير الهواء الساخن في داخل المجفف بواسطة منظومة مراوح يتم اختيارها بحسب كمية الهواء اللازمة لإتمام عملية التجفيف و سرعته المطلوبة، و هذا النوع يسمح بإمكانية عالية في التحكم بعملية التجفيف. و يمكن اعتبار هذا الصنف من المجففات هجين لاستعمال مصدر آخر للطاقة غير الطاقة الشمسية.

الشكل (I - 7) يلخص الفرق بين المجففات الشمسية المباشرة و غير المباشرة والمجففات الشمسية المختلطة، حسب طبيعة حركة الهواء في كل نوع.



الشكل (I - 7): أهم أنواع المجففات الشمسية [13].

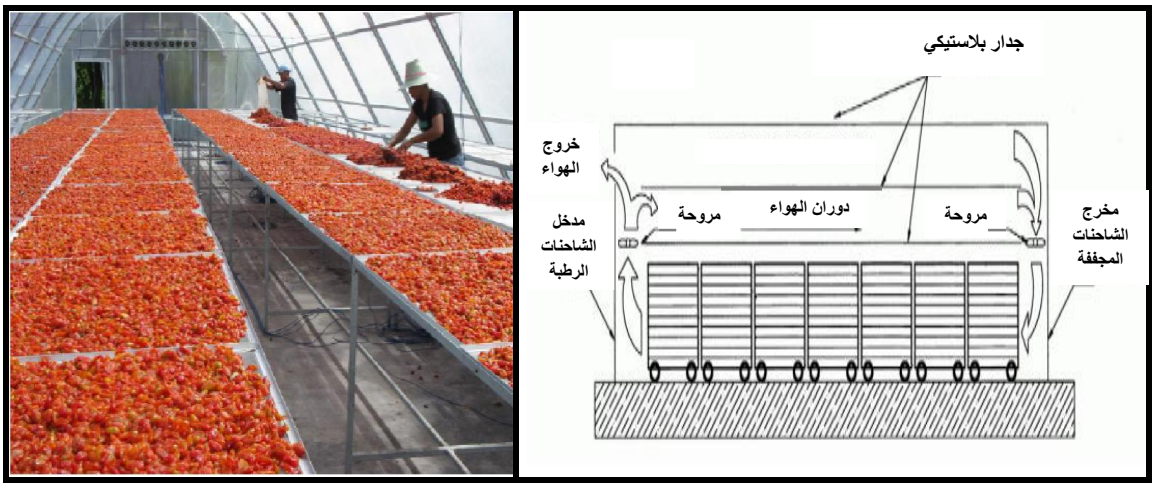
I - 7 بعض أنواع المجففات الشمسية :

تختلف المجففات تبعا لتنوع المحاصيل الزراعية، فهناك مجففات برجية لتجفيف المحاصيل ذات الثمار الحبيبية (الحبوب و البقول و ما شابهها)، و هناك مجففات مستوية لتجفيف المحاصيل ذات الحجم الكبير (الخضار و الفواكه و التمور) و كذلك تختلف المجففات الشمسية تبعا لمصدر الطاقة اللازم لتحريك الهواء داخلها، ففي المناطق النائية حيث لا يوجد مصدر كهربائي لتحريك الهواء داخل المجفف يستعاض عن الكهرباء بتطبيق مبدأ السريان الطبيعي، أما في حالة توفر مصدر كهربائي رخيص فيمكن استخدام تعمل على دفع الهواء بطريقة قسرية أي ما يسمى بالسريان القسري [1]. ومن بين أنواع المجففات الشمسية نذكر ما يلي :

I - 7 - 1 المجفف الشمسي ذو النفق :

يعد من المجففات المخصصة لتجفيف المحاصيل الكبيرة وفي عمليات حفظ بعض الأطعمة [17].كما يظهر الشكل (I - 8)، والمجفف الشمسي ذو النفق هو عبارة عن جدار من البلاستيك الشفاف الذي يتحمل درجة الحرارة المرتفعة (يسبب الاحتباس الحراري)، يحتوي بداخله خط من العربات المكدسة مع صواني عدة محملة بالمحصول المراد تجفيفه، ويمتاز بوجود مراوح كهربائية صغيرة تعمل على دفع الهواء المشبع بالرطوبة الناتجة عن تبخر الماء، الموجود في المحصول إلى الوسط الخارجي وسحب هواء آخر إلى داخل النفق و هذا يساعد على اختصار وقت التجفيف كما يساعد على الاحتفاظ بصفات المنتج [19]. و لهذا النوع من المجففات مزايا عدة نذكر بعض منها : [15]

- يؤدي استخدام المجفف ذو النفق إلى تسريع عملية التجفيف إلى الضعف مقارنة مع المجفف الشمسي التقليدي.
- صمم بطريقة تسمح بتجفيف شتى أنواع المنتجات الزراعية (خضراوات و فواكه) بسرعة، خاصة تلك التي تحتوي على نسب عالية من الرطوبة.
- مشكلة تلوث المنتجات المجففة بالغبار و الحشرات غير قائمة.



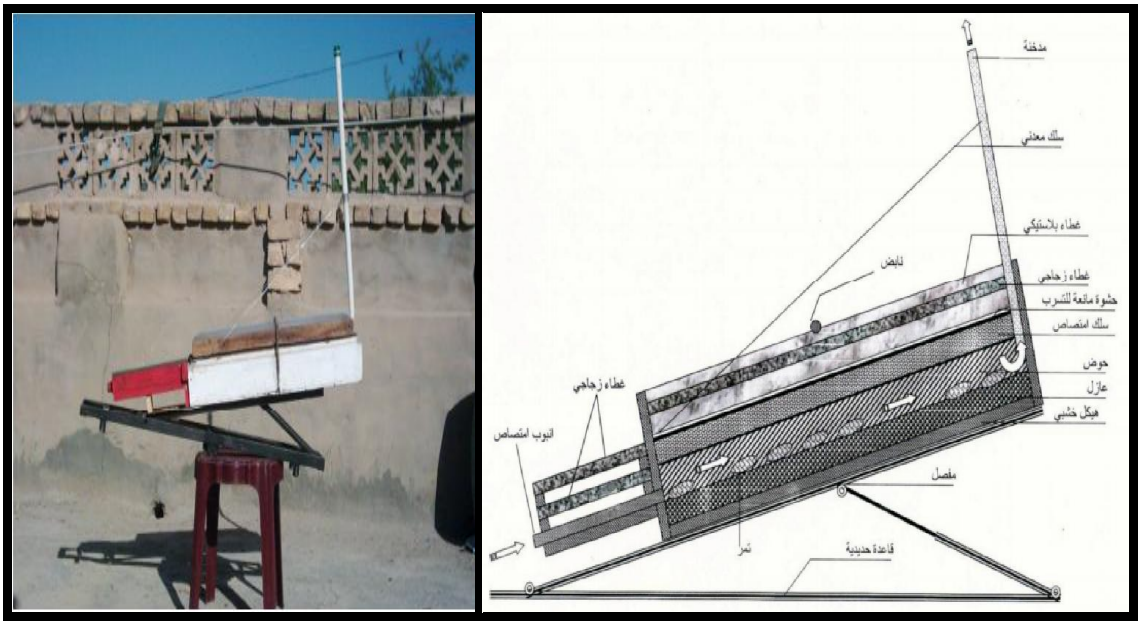
الشكل (I - 8): المجفف ذو النفق و آلية عمله [27،26].

I - 7 - 2 المجفف الشمسي الشبه المختلط :

إن تصميم وتصنيع مجفف شمسي شبه مختلط لتجفيف التمر يحتاج إلى مساحة قليلة، و يشترط أن يكون التمر فيه مظلل من الإشعاع الشمسي وهو من المجففات الشمسية المختلطة ذات الجريان الطبيعي. يتكون هذا المجفف - أنظر الشكل (I - 9) - من هيكل خشبي يحتوي على مادة عازلة من الصوف و حوض في حافته العلوية حشوة مانعة لتسرب الهواء يوضع فيه التمر المراد تجفيفه، وأسلاك امتصاص معدنية سوداء ومجمع شمسي أنبوبي صغير يسحب الهواء من الجو و يسخنه ثم ينقله داخل الحوض وهو مثبت على هيكل حديدي بشكل مفصلي كما يحتوي هذا المجفف على مدخنة تعمل على سحب الهواء المحمل بالرطوبة من المجفف الشمسي إلى الخارج [5].

من مميزات المجفف الشمسي الشبه المختلط : [5]

- يحمي التمر من التعرض للظروف البيئية خاصة الرطوبة حتى خلال مدة الليل حيث تبقى فيه طاقة حرارية مخزونة تؤدي إلى تبخر كمية من الرطوبة.
- يحافظ على لون التمر من الدكنة مع تقليل مدة التجفيف.
- يحافظ على القيمة الغذائية للتمر.



الشكل (I - 9): المجفف الشمسي الشبه المختلط [5].

I - 7 - 3 المجفف الشمسي الرأسي ذو التهوية :

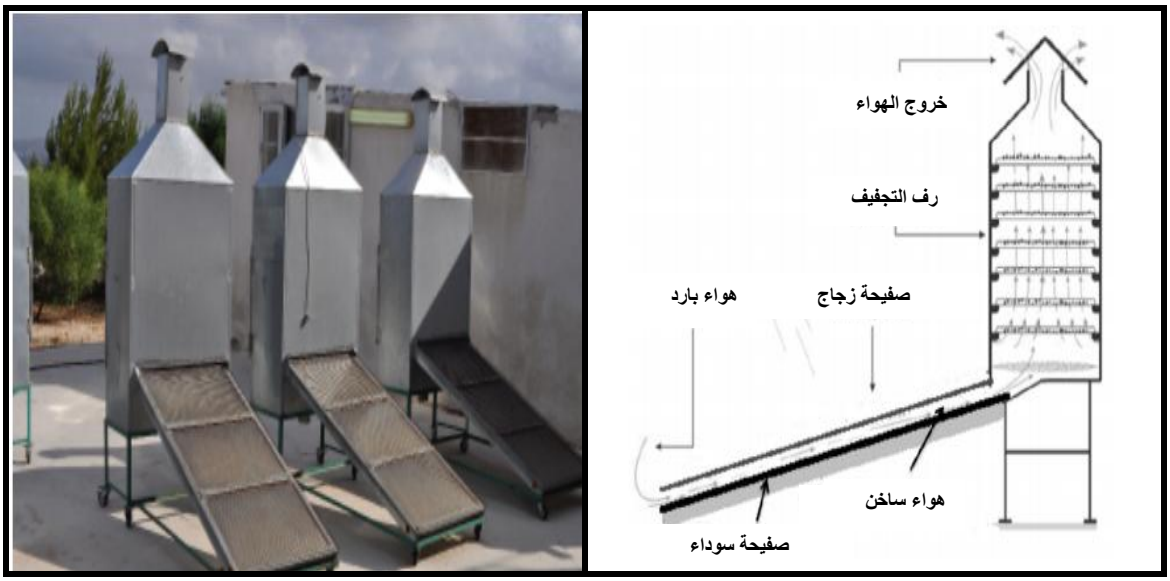
إن تصميم هذا المجفف يعتمد على ثلاثة أقسام كما في الشكل (I - 10) هي:

- مجمع شمسي مسطح مائل بزاوية معينة.
- حجرة تجفيف رأسية تحتوي على عدد من صواني التجفيف.
- نظام لتدفق الهواء.

يعمل المجفف بواسطة الخلايا الشمسية التي تعمل على رفع درجة حرارة الهواء داخل المجمع الشمسي، ويحدث تدفق الهواء فيه بصورة طبيعية حيث يتم دخول الهواء الجوي الساخن من الخلايا المجمعة للطاقة الشمسية عبر أنابيب خاصة إلى داخل المجفف حيث يمر على الغذاء المراد تجفيفه عبر ثقوب صواني التجفيف المصنوعة من الستانلس ستيل الغير قابل للصدأ، حاملا معه بخار الماء من الغذاء المنشور عليه ليخرج الهواء الرطب من خلال صمام في أعلى حجرة التجفيف [15].

من أهم ايجابيات هذا المجفف : [15]

- اعتماده على الطاقة الشمسية في التجفيف، و سهولة التشغيل و الصيانة .
- إسراع عملية التجفيف مقارنة بالتجفيف المباشر.
- الحفاظ على القيمة الغذائية للغذاء المجفف لعدم تعرضه لأشعة الشمس المباشرة.



الشكل (I - 10): المجفف الشمسي الرأسي ذو التهوية [15،28].

I - 7 - 4 مجفف شمسي للأسماك تحت التفريغ :

يعتمد مبدأ عمل المجفف الشمسي تحت التفريغ الموضح في الشكل (I – 12) على ثلاثة أجزاء مهمة هي : [29]

أ- غرفة تجفيف :

اسطوانية الشكل سوداء اللون مزودة بحوامل لتعليق الأسماك بداخلها وتوضع غرفة التجفيف في صندوق خشبي مزود بمادة عازلة و يغطى السطح العلوي للصندوق بالزجاج.

ب- وحدة التفريغ :

تتكون من مضخة تفريغ تربط مع غرفة التجفيف عن طريق أنبوب بلاستيكي عند النهاية الأخرى أسفل غرفة التجفيف، و زود بصمامات للتحكم بمقدار التفريغ، و مصيدة للبخار المتكثف في نهاية غرفة التجفيف.

ج ـ وحدة إنتاج الطاقة الكهربائية :

تتكون من خلية شمسية تميل مع الأفق بزاوية محددة، ومسيطر شحنة، بطاريتين، ساعة و عاكس. تقوم هذه الوحدة بإنتاج الطاقة الكهربائية لتشغيل مضخة التفريغ و مقياس درجة الحرارة. والخلية الشمسية وملحقاتها موضوعة على هيكل حديدي.

I ـ 7 ـ 4 ـ 1 ـ آلية عمل المجفف الشمسي للأسماك تحت التفريغ :

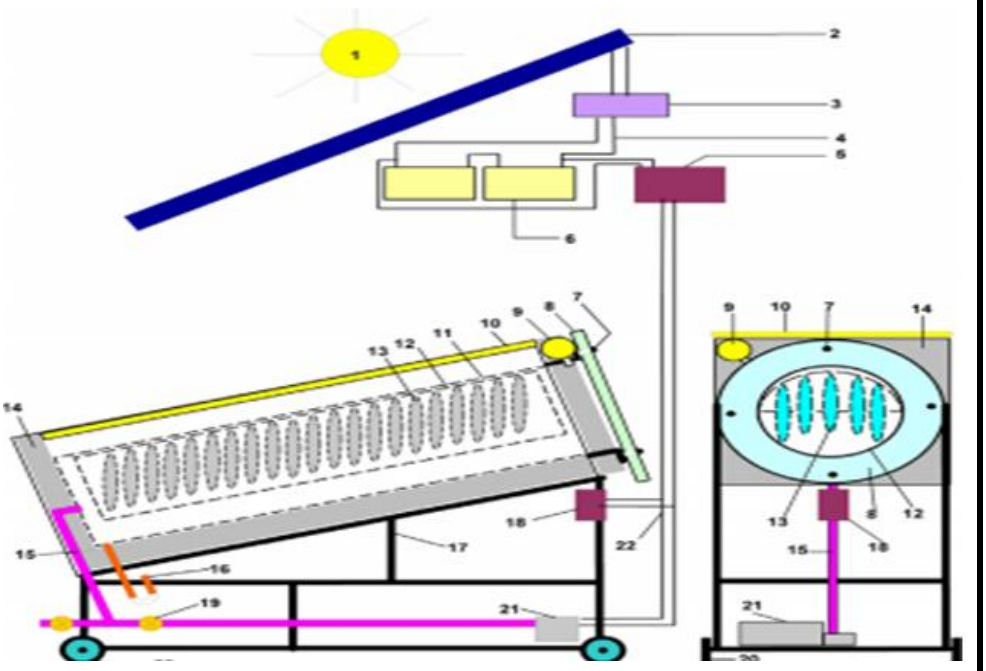
توجه كل من غرفة التجفيف الشمسي والخلية الشمسية باتجاه الأشعة الشمسية، وتعلق الأسماك في غرفة التجفيف ثم يغلق الباب بإحكام بحيث أنه عند سقوط أشعة الشمس على الغطاء الزجاجي لغرفة التجفيف فإنه ينفذ إلى السطح الأسود في الغرفة كما يظهر الشكل (I ـ 11). نتيجة لامتصاص أشعة الشمس فانه يسخن و يبعث أشعة حرارية إذ يقوم الزجاج بمنع تسرب الأشعة الحرارية خلاله إلى المحيط [29].

تنتقل الحرارة عبر السطح الأسود لغرفة التجفيف إلى داخلها مما يؤدي لانتقال الحرارة إلى الأسماك عن طريق التوصيل و الإشعاع. فتسخن الأسماك و ينتج عن ذلك تبخر الماء الموجود فيها و نتيجة للتخلخل بالضغط داخل غرفة التجفيف فإن بخار الماء يسحب للخارج حيث يتكثف عند النهاية السفلى من غرفة التجفيف و يخرج من الأنبوبة المنحنية إلى الخارج [29].

من مميزاته ما يلي : [30،29]

- قصر مدة التجفيف.
- المجفف الشمسي للأسماك تحت التفريغ يقلل الرطوبة مما يمنح أسماك مجففة جيدا و ذات قيمة غذائية.
- يحافظ على المنتج من الظروف البيئية و المناخية.

الشكل (I ـ 11): صورتان لمجفف شمسي للأسماك تحت التفريغ من الأمام و الخلف [29].



1- الشمس 2- الخلية الشمسية 3- مسيطر الشحنة 4- أسلاك كهربائية 5- عاكس 6- بطاريات 7- صامولة 8- غطاء بلاستيكي شفاف 9- مقياس ضغط التفريغ 10 - غطاء زجاجي 11- غرفة التجفيف (اسطوانة سوداء) 12- هيكل تعليق الأسماك 13- اسماك 14- عازل 15- أنبوب سحب الهواء الرطب 16- أنبوب إخراج الماء 17- هيكل حديدي 18- مقياس درجة الحرارة 19- صمام 20- إطار 21- مضخة تفريغ 22- أسلاك كهربائية

الشكل (I - 12): مخطط لمجفف شمسي للأسماك تحت التفريغ [29].

I - 8 مجالات استعمال المجفف الشمسي :

استخدم الإنسان التجفيف الشمسي بواسطة الطاقة الشمسية في جميع أنحاء العالم في عدة مجالات نذكر منها : [8]

- ✓ تجفيف السمك (السنغال و الكنغو)، اللحوم...إلخ
- ✓ تجفيف الخضر : الفلفل، البصل، الطماطم و الجزو(مالي)...
- ✓ تجفيف الفواكه : الموز، العنب، البلح، المنجا والمشمش
- ✓ تجفيف المحاصيل الزواعية : كالأرز (تايلاند والفلبين)، الحبوب (الولايات المتحدة الأمريكية)، البن و الفول السوداني، الذرة، الزنجبيل، الفاصوليا و الكاكاو...

- ✓ تجفيف الأعلاف لتغذية قطعان الماشية.

I - 9 التجفيف في الصناعات الغذائية :

الجزء الكبير من الأغذية المصنعة التي نستهلكها يوميا تعرضت للتجفيف مسبقا، وذلك لحفظها في شروط معينة، و من هذه الصناعات نذكر ما يلي : [8]

- ✓ العجائن الغذائية.
- ✓ اللحم الجاهز مثل: جامبو...
- ✓ الأجبان.
- ✓ السكر البلوري الناتج عن عملية التبخير.
- ✓ عصير الفواكه.
- ✓ مواد على مسحوق: الحليب، الكاكاو...

I - 10 الخاتمة :

قد تطرق هذا الفصل إلى دراسة عامة حول المجففات، حيث تم التعرف على طرق التجفيف وأهمه التجفيف الشمسي المباشر و غير المباشر، إضافة إلى ذلك يميز نوعين من المجففات الشمسية، وهي المجففات الشمسية المختلطة والمجففات الشمسية الهجينة موضحا الفرق بينهما. كما ذكر عدة أنواع أخرى للمجففات الشمسية، تختلف عن بعضها البعض في آلية تجفيف المواد الغذائية، و في الأخير بيّن مجالات استعمال المجففات الشمسية وأهمية عملية التجفيف في الصناعات الغذائية.

الفصل الثاني:

دراسة نظرية للتجفيف الشمسي غير المباشر

II - 1 مقدمة

لجأ الانسان إلى عملية التجفيف لحماية منتجاته الزراعية من التلف وتخزينها لأطول مدة ممكنة وذلك عن طريق خفض النشاط المائي والرطوبة للمواد المراد تجفيفها; مما يؤدي إلى إيقاف نشاط الاحياء المجهرية وبالتالي ضمان عدم تلف هذه المنتجات، لذلك يطرح هذا الفصل كيفية حدوث ذلك والظواهر التي تميز عملية التجفيف في المجفف الشمسي غير المباشر من انتقال للحرارة والكتلة بين المنتج وهواء التجفيف، ويشرح أيضا الظروف الواجب توفرها من حيث درجة حرارة، سرعة ورطوبة هواء التجفيف وتأثير كل منها على حركية التجفيف، ويبين أشكال توزع الماء داخل المواد الرطبة وكيفية التخلص منه أثناء التجفيف.

II - 2 الظواهر الفيزيائية التي تحدث خلال عملية التجفيف :

أثناء عملية التجفيف يلاحظ حدوث ظاهرتين فيزيائيتين متداخلتين فيما بينهما، وهذا ناتج عن التفاعل الحاصل بين المنتج المراد تجفيفه والهواء الذي يحتويه، فالظاهرة الأولى الانتقال الحراري الذي يحدث من الهواء باتجاه المنتج والظاهرة الثانية وهي الانتقال الكتلي (بخار الماء) من المنتج باتجاه الهواء [8].

II - 2 - 1 الانتقال الحراري :

يتم انتقال الحرارة بسبب حدوث فرق في درجة الحرارة بين الهواء والمنتج وذلك راجع لرفع درجة حرارة الهواء في الغرفة، ويؤدي هذا الانتقال إلى خفض درجة الحرارة فيها وبالتالي خفض الضغط في غرفة التجفيف، وعموما أثناء عملية التجفيف يحدث الانتقال الحراري بأنواعه الثلاثة :التوصيل، الحمل والإشعاع، ويتم استخدامها بمفردها أو في توليفة مع بعضها البعض [32،33].

II - 2 - 1 - 1 التجفيف بالحمل الحراري:

في التجفيف، ربما يكون الحمل الحراري الأسلوب الأكثر شيوعا لنقل الطاقة، ويتم النقل الحراري عن طريق الاتصال بين مائع متحرك وسطح ما، وفي التجفيف يكون الاتصال بين الهواء المتدفق و الجسم المراد تجفيفه والذي قد يكون على شكل جزيئات، قطرات أو لويحات [32]. ويتم وفق المعادلة التالية [12]:

$$Q = \alpha.A.(T_a - T_s) \qquad (1 - II)$$

حيث:

Q: كمية الحرارة المحولة بالحمل الحراري في وحدة الزمن (W).

A: سطح التبادل الحراري بالحمل (m^2).

α: معامل التجفيف بالحمل ($W/m^2.K$).

في هذا النوع من الانتقال الحراري نستطيع تمييز نوعين من الحمل:

أ- الحمل الطبيعي :

في هذه الحالة حركة المائع متعلقة بالتغير في كتلته الحجمية مع درجة الحرارة، هذا التغير (الفرق) يخلق قوة جاذبة تساعد في انتقال جزيئات المائع [8].

ب- الحمل القسري:

حركة المائع في هذه الحالة مستقلة تماما عن الظاهرة الحرارية، حيث تجرى بطريقة ميكانيكية مثل مضخة أو مروحة [8].

وهذه بعض الملاحظات لتوضيح استعمالات المعادلة (II -1):

لا يتم دائما تحديد سطح التبادل للمنتج المراد تجفيفه بشكل جيد، لذلك في المواد الصلبة الحبيبية والتي تكون جسيماتها غير متجانسة الحجم تستخدم الصيغة (II -1) لتحديد متوسط قطر الجسيم (سطح التبادل)، كمية الطاقة المنقولة للمنتج إلى أن يجف أكثر أهمية من سطح التبادل الذي هو أيضا مهم، ولذلك فإن تخفيض حجم الجزيئات التي تشكل المنتج سيكون عاملا لتحسين عملية التجفيف. بالإضافة إلى ذلك، فإنه يسهل انتشار الرطوبة نحو سطح الجزيئات.

الفرق (T_a- T_s) ليس ثابتا على طول غرفة التجفيف. في الواقع تزداد درجة حرارة المنتج بشكل عام أثناء التجفيف بينما تنخفض درجة حرارة غازات التجفيف. وعموما فإن وقت التجفيف يقل عند زيادة فرق درجة الحرارة بين المنتج والغاز (الهواء). ومع ذلك فإن الحساسية الحرارية للمنتج (درجة الحرارة القصوى التي يمكن أن يتحملها المنتج) تحد من قيمة الفرق خاصة في نهاية التجفيف.

يمكن تقدير معامل التبادل عن طريق العلاقات التي تنطوي على أرقام بلا أبعاد مع مراعاة خصائص غاز التجفيف وكذلك الموصلية العالية، اللزوجة المنخفضة والقدرة الحرارية العالية للمنتج. يمكن حساب معامل التبادل الحراري بالحمل من رقم نوسالت [33]:

$$Nu = \alpha\, d_p / \lambda_a \qquad (2 - II)$$

$$Nu = C\, Re^m\, Pr^n \qquad (3 - II)$$

بالنسبة للحمل القسري [8]:

$$Nu = f(Re, Pr) \qquad (4 - II)$$

بالنسبة للحمل الحر(الطبيعي) [8]:

$$Nu = f(Gr, Pr) \qquad (5 - II)$$

λ_a : الموصلية الحرارية للهواء (W/m.K).

Pr : رقم براندل ويساوي 0.7 في حالة الهواء.

Gr : رقم غيرشوف.

C : ثابت تعديل تجريبي.

m : قريبة من 0.8 و n من 0.5.

Re : رقم رينولدز:

وهو مهم جدا لتحديد نظام الجريان (التدفق) وتحدد قيمته بالعلاقة التجريبية التالية [34]:

$$Re = \frac{\rho \times v \times d}{\mu} \qquad (6\text{- II})$$

ρ : الكتلة الحجمية للمائع (kg/m^3).

v : السرعة (m/s).

d : قد تكون طول أو قطر.. (m).

μ : اللزوجة الديناميكية ($kg/m.s$).

اعتمادا على هذا العدد نميز ثلاثة حالات للتدفق هي [34]:

- إذا كان $Re \leq 2100$ يكون نظام الجريان انسيابيا (صفائحي) أي أن سرعته تكون منخفضة و معدل التدفق منخفضا.
- إذا كان $Re \geq 3000$ يكون نظام الجريان مضطرباً يظهر عندما تزداد السرعة وتظهر دوامات ويكون فيه معدل التدفق عاليا.
- إذا كان $2100 < Re < 3000$ يكون نظام الجريان غير مستقر(انتقاليا).

II - 2 - 1 - 2 التجفيف بالتوصيل الحراري:

وهنا لا يتم توفير الطاقة الحرارية اللازمة للتجفيف بواسطة غاز يتحرك حول المنتج المجفف، ولكن يتم عن طريق الاتصال المباشر بين المنتج والجدار الساخن، يتم امتصاص الأبخرة الناتجة عن التجفيف أو مدفوعة بغاز متدفق يكون معدل تدفقه منخفضا دائما مقارنة مع ذلك المطلوب لتجفيف الحمل الحراري. كلما انخفض تدرج درجة الحرارة بين الجدار والمنتج يجب أن يكون سطح التبادل أكبر [32].

يعطي تدفق الحرارة بالتوصيل الحراري بالعلاقة التالية [12]:

$$\frac{Q}{A} = \lambda . \frac{dT}{dx} \qquad (7\text{ - II})$$

Q : تدفق الحرارة بالتوصيل (W).

A : سطح التبادل الحراري بالتوصيل (m^2).

λ : الموصلية الحرارية للمنتج ($W/m.K$).

$\frac{dT}{dx}$: التدرج في درجة الحرارة بين الجدار الساخن والمنتج .

II - 2 - 1 - 3 التجفيف بالإشعاع الحراري:

في هذه الحالة يتم نقل الطاقة اللازمة للتبخر عن طريق الإشعاع، عملية التجفيف هذه فعالة جدا لإزالة الماء خاصة عندما يكون المنتج المراد تجفيفه غير حساس للحرارة. قد تكون الينابيع الساخنة منبعثة من بواعث الغازات القابلة للاحتراق أو بواعث الكهرباء أو الشمس [32،33]. كمية الحرارة Q (بالواط) المنقولة إلى المنتج المراد تجفيفه لكل وحدة زمنية محددة بقانون ستيفان- بولتزمان [12،32،33]:

$$Q = A_1\, C\, [(\frac{T_1}{100})^4 - \left(\frac{T_2}{100}\right)^4]\varphi \qquad (8 - II)$$

$$C = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1\,(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1)}{A_2}} \qquad (9 - II)$$

Q : تدفق الحرارة بالإشعاع (W).

T_1 : درجة حرارة مصدر الانبعاث (K).

T_2 : درجة حرارة المنتج (K).

A_1 : سطح الجسم المتلقي للإشعاع (m^2).

A_2 : السطح المرسل للأشعة تحت الحمراء (m^2).

φ : عامل معقد يأخذ بعين الاعتبار الوضع النسبي للمصدر والمنتج (عندما يحيط المرسل بالمنتج يكون $\varphi = 1$).

ε_1 : الإنبعاثية للمنتج.

ε_2 : إنبعاثية المرسل.

σ : ثابت ستيفان ـ بولتزمان ($\sigma = 5.673 \times 10^{-8}\ W/m^2.K^4$).

II - 2 - 2 الانتقال الكتلي :

نقل الحرارة ونقل الكتلة هي عمليات حركية يمكن أن تحدث وتجري دراستها بشكل منفصل أو مشترك، ودراستها بشكل منفصل يكون أبسط، ولكن إذا قمنا بدراستها بشكل مشترك سندرك بسهولة أن كلتا العمليتين يتم نمذجتهما بواسطة معادلات رياضية مماثلة في حالة الانتشار والحمل الحراري (لا يوجد تشابه كبير بين انتقال الكتلة والإشعاع الحراري) [40]، حيث يتم انتقال الكتلة في الأوساط المادية التي يكون فيها فرق في التركيز(كتلي أو مولي)، ويتم ذلك إما بالانتشار الجزيئي أو بالحمل إلى غاية تساوي التركيز [8].

II - 2 - 2 - 1 الانتشار الجزيئي :

انتقال الكتلة بالانتشار الجزيئي، هو تشابه مباشر لانتقال الحرارة بالتوصيل، والانتشار الجزيئي يتم في مائع بحركة منتظمة في سريان رقائقي [8].

قانون فيك للانتشار الجزيئي :

ينص قانون فيك على أنه عند وجود خليط من المادة A والمادة B بتركيز أعلى للمادة A فإنه ينشأ سريان من المادة A في اتجاه انخفاض التركيز. إذا كانت المادة A في الخليط تنتقل في إتجاه X فإن قانون فيك يعطى كالآتي [25]:

$$N_A = D_{AB} \frac{dC}{dX} \qquad (10 - II)$$

N_A : عدد الجزيئات لكل لتر.

D_{AB} : معامل الانتشار(جزيئه×mol/m).

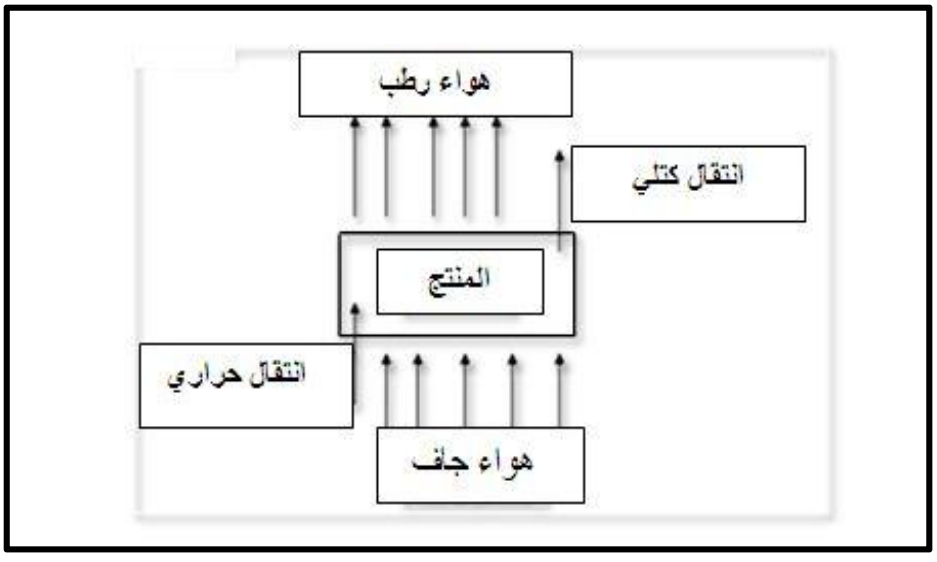
C : التركيز (mol/l).

X : المسافة المقطوعة (m).

II - 2 - 2 - 2 الانتقال الكتلي الحملي :

في الانتقال الكتلي بالحمل تنقل الكتلة (أو كمية المادة) مباشرة للمائع المذاب. والحمل هو شكل من أشكال الانتقال السريع بالمقارنة بالانتشار الجزيئي. وعند ترك المائع المذاب يتحرك لوحده أو بفعل التيار الكتلي الناتج من زيادة ذوبان المادة، نسمي هذا النوع بالحمل الكتلي الطبيعي (الحر)، لكن عند التأثير على المائع بقوة كعملا ميكانيكيا (مروحة) نسمي الحمل بالحمل الكتلي القسري [8].

ويلخص الشكل (II - 1) الظواهر الحاصلة أثناء التجفيف :



الشكل (II - 1) : رسم تخطيطي لانتقال الحرارة والكتلة أثناء التجفيف [31].

II - 3 الخواص الأساسية لهواء التجفيف

II - 3 - 1 الرطوبة :

يشير هذا المصطلح إلى السائل الموجود في الجسم الصلب أو السائل أو المعجون، ويجب إزالته أثناء التجفيف [18].

II - 3 - 2 الرطوبة النسبية :

الرطوبة النسبية أو درجة الرطوبة هي نسبة الضغط الجزئي للبخار في الخليط إلى ضغط تشبعه في نفس الخليط، تؤخذ في نفس درجة الحرارة [18].

$$H_r = \frac{Pv}{Ps(T)} \cdot 100 \qquad 0\ \% \leq H_r \leq 100\ \% \qquad (11\text{- II})$$

H_r : الرطوبة النسبية (%).

P_v : الضغط الجزئي للبخار(Pa).

P_s : ضغط تشبع البخار(Pa).

II - 3 - 3 الرطوبة المطلقة :

تسمى الرطوبة المطلقة أو محتوى الرطوبة، وهي كتلة الرطوبة الممزوجة بكيلو غرام واحد من الغاز الجاف، نرمز لها ب H_a وتعطي بالعلاقة التالية [18]:

$$H_a = \frac{M_a}{M_e} \qquad [Kg_v \,.\, Kg_{as}^{-1}] \qquad (12\text{ - II})$$

M_a : كتلة الهواء (Kg_v).

M_e : كتلة الماء (Kg_{as}).

II - 3 - 4 درجة الحرارة الجافة للغاز:

درجة الحرارة الجافة للغاز هي درجة الحرارة المشار إليها بواسطة مسبار درجة الحرارة الذي يتم وضعه في تيار الغاز [21].

II - 3 - 5 درجة الحرارة الرطبة للغاز:

درجة الحرارة الرطبة هي درجة الحرارة التي تعطى بواسطة مسبار مضمن في الفتيل يوضع في التيار الغازي ويتم ترطيبه بشكل دائم بماء نقي، أي أنّ درجة الحرارة الرطبة هي درجة الحرارة التي تؤخذ عن طريق مادة صلبة مبللة أثناء مرحلة ثبات سرعة التجفيف [21].

II - 4 الخواص الأساسية للمادة الرطبة

II - 4 - 1 أشكال توزيع الماء داخل المنتج :

باعتبار المنتجات الزراعية أجسام مسامية فإن توزيع الماء داخلها يكون كالتالي:

أ- الماء الحر:

ويملأ أغلب أجزاء فراغات الجسم وهو موجود على شكل سائل بواسطة القوة الشعيرية [41]، وهذه المياه تكون قريبة من السطح (القشرة) وتتبخر من خلال هذا الأخير عندما يتعرض المنتج لأي حرارة مباشرة كأشعة الشمس وبذلك فهي تفقد ببساطة [25].

ب- الماء المرتبط :

يشكل طبقة رقيقة (غشاء) مع جدار الثغر، وهو موجود في شكل سائل بواسطة القوة الشعيرية القوية [41]، وهي تتحرك وتنفذ من خلال الأغشية الخلوية من التركيز العالي إلى التركيز المنخفض، وعموما فإنّ هذا النوع من المياه يمكن بعملية التجفيف السيطرة عليه وإزاحته ببعض الطاقة الحرارية [25].

ت- الماء المتحد:

وهذه المياه لا يمكن السيطرة عليها وإزاحتها لأنّها من أصل وتركيب الثمرة ونسبتها بسيطة ولا تحتاج إلى الإزاحة لأنّ بإزاحتها يتغير تركيب الثمرة وشكلها [25].

ث- بخار الماء:

ويتواجد في الفراغ الخالي من الماء السائل، وهو ممزوج بالهواء الجاف [41].

II - 4 - 2 النشاط المائي للمنتج :

النشاط المائي هو عامل رئيس ومهم في عمليات تصنيع الأغذية مثل النمو الميكروبي وتكوين السموم والتفاعلات الإنزيمية، وهو الذي يحدد العمر الخزني للغذاء، حيث النشاط المائي للماء الحر يساوي 1، الماء المرتبط بشكل ضعيف يكون اكبر من 0.7، الماء المرتبط بشكل معتدل يكون اكبر من 0.3 واقل من 0.7، الماء المرتبط بقوة يكون النشاط المائي له أقل من 0.3 [35].

النشاط المائي في منتج ما هو نسبة الضغط السطحي لبخار الماء P_{vp} على ضغط بخار الماء في حالة التشبع P_s في درجة حرارة معينة للمنتج، ويكتب كما يلي [44]:

$$a_w = \frac{Pvp}{Ps} \qquad (13 - II)$$

a_w : النشاط المائي.

P_{vp} : الضغط السطحي لبخار الماء (Pa).

إذا كان الجسم في حالة توازن رطوبي مع الهواء المحيط به (عدم وجود الانتقالات الحرارية والكتلية) يترتب عن ذلك تساوي الضغط السطحي لبخار الماء مع ضغط بخار الماء في حالة التشبع أي $P_{vp}= P_s$ ومنه فإن النشاط المائي يصبح مساوياً للرطوبة النسبية ($a_w = HR$)، ويكتب على النحو التالي [45]:

$$a_w = \frac{Pvp}{Ps} = \frac{HR(\%)}{100} \qquad (14 - II)$$

لتتم عملية التجفيف، يجب أن تكون الرطوبة النسبية للهواء أقل من النشاط المائي للمنتج ($HR < a_w$) بحيث يكون ضغط البخار على سطح المنتج أكبر من الضغط الجزئي للبخار في الهواء ($P_{vp} > P_v$) [43].

II - 4 - 3 المحتوى الرطوبي:

المحتوى الرطوبي أو الرطوبة النسبية للمنتج وتمثل النسبة المئوية لكتلة الماء الموجودة في المنتج بالنسبة إلى كتلته الكلية [42]. ويعبر عنه بالغرامات من الماء لكل 100g من المادة الرطبة، الوحدة هي % MH (المادة الرطبة) أو % BH (القاعدة الرطبة) ويكتب [37]:

$$X' = \frac{Me}{Mt} \times 100 \qquad (15 - II)$$

$$M_e = M_t - M_s \qquad (16 - II)$$

X' : المحتوى الرطوبي للقاعدة الرطبة ($Kgd'eau/KgM_t$)، وغالبا تكون بالنسبة المئوية.

M_e : كتلة الماء في المنتج (kg).

M_t : الكتلة الكلية للمنتج (kg).

M_s : الكتلة الجافة (kg).

ويمكن التعبير أيضا عن المحتوى الرطوبي بالنسبة بين كتلة الماء في المنتج والكتلة الجافة لذات المنتج (الرطوبة المطلقة) بالعبارة التالية [33]:

$$X = \frac{Me}{Ms} \qquad (17 - II)$$

حيث :

X : المحتوى الرطوبي للقاعدة الجافة ($Kgd'eau/KgM_s$).

تكون العلاقات للانتقال من تعريف لآخر كما يلي [36]:

$$X = \frac{X'}{1-X'} \qquad (18 - II)$$

$$X' = \frac{X}{1+X} \qquad (19 - II)$$

II - 5 سرعة التجفيف :

تعرّف سرعة التجفيف على أنّها النسبة بين كتلة الماء المتبخر من المنتج لكل وحدة زمنية وكتلة المادة وهي مجففة، أو ببساطة الفرق في المحتوى الرطوبي (Δm) للفاصل الزمني (Δt)، وهو المقدار الذي يميز وتيرة التحول [21].

سرعة التجفيف دالة لعدّة عوامل أهمها [21]:

- الطبيعة، المسامية، الشكل والرطوبة للمنتج.
- درجة الحرارة، الرطوبة وسرعة الهواء.

وتكتب عبارة سرعة التجفيف كما يلي [18]:

$$R = \frac{-dMv}{S \cdot dt} = \frac{Ms \cdot dx}{S \cdot dt} \qquad (20 - II)$$

$$M_v = M_s \, . \, dx \qquad (21 - II)$$

$$dx = x_e - x_s \qquad (22 - II)$$

R : سرعة التجفيف ($kg\ d'eau/m^2 \cdot s$).

M_v : كتلة الماء المتبخر (Kg).

M_s : كتلة المادة وهي جافة (Kg).

dx : رطوبة المنتج في بداية ونهاية عملية التجفيف .

x_e : رطوبة المنتج في نهاية التجفيف ($Kgd'eau/KgM_s$).

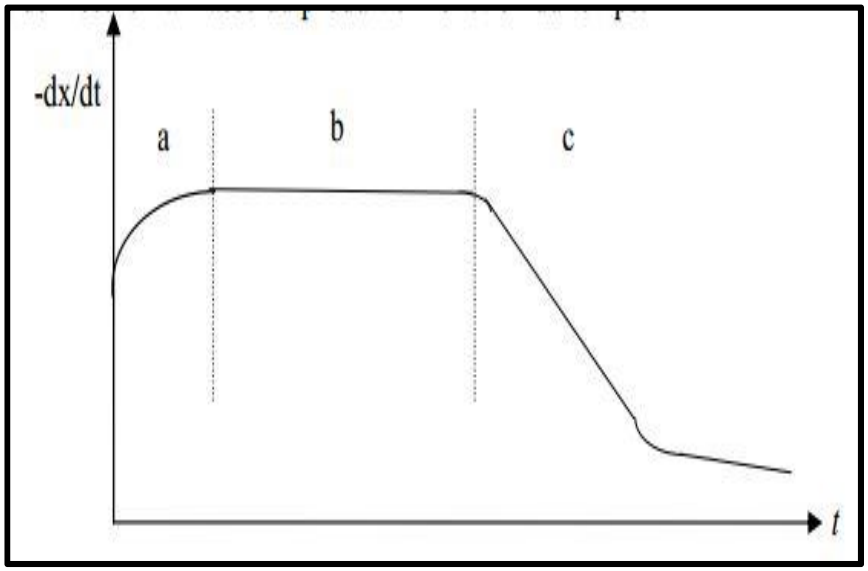
x_s : رطوبة المنتج في بداية التجفيف ($Kgd'eau/KgM_s$).

S : مساحة المادة المجففة (m^2).

dt : زمن التجفيف (s).

II - 6 حركية التجفيف :

تتم دراسة حركية تجفيف المنتجات المختلفة من خلال منحنيات تمثل تطور سرعة التجفيف كدالة للزمن [21]. يتم الحصول على هذه المنحنيات عند إخضاع طبقة رقيقة من منتج ما لتيار هواء ثابت درجة الحرارة، الرطوبة والسرعة ثمّ قياس كتلة المنتج كدالة للزمن [31]. هذه المنحنيات تميز السلوك العام لمنتجات مختلفة أثناء عملية التجفيف [21].



الشكل (II - 2): منحنى حركية التجفيف [39].

المنحنى أعلاه يمثل حركية التجفيف بدلالة الزمن. لكن في الكثير من الأحيان يتم أيضا رسم منحنى حركية التجفيف بدلالة الرطوبة المتبقية في المادة أثناء التجفيف [31].

من خلال المنحنى الممثل لحركية التجفيف نلاحظ ثلاث مراحل رئيسية هي :

أ- المرحلة الأولى: مرحلة الإحماء (المنطقة a)

عندما يتم تعريض منتج درجة حرارة سطحه T_s و ذو ضغط جزئي لبخار الماء P_s لتيار من الهواء الساخن يحدث تبادل للحرارة والكتلة بين المنتج والهواء الجاف، لكي يتم حملها كبخار تتطلب كميات الماء الموجودة في المنتج طاقة كافية للتبخير، تؤدي الحرارة الزائدة التي يوفرها الهواء إلى زيادة حرارة المنتج حتى تصل إلى درجة حرارة وسط التجفيف. هذه الفترة عادة ما تكون قصيرة جدا مقارنة مع الوقت الكلي للتجفيف [31].

ب- المرحلة الثانية: مرحلة السرعة الثابتة (المنطقة b)

في هذه المرحلة تبقى سرعة التجفيف ثابتة في أغلب المواد، الرطوبة تنتقل إلى السطح في شكل سائل بسبب القوة الشعيرية، يحدث توازن بين الانتشار الغشائي و آلية انتقال الرطوبة الداخلية إلى السطح، درجة الحرارة تبقى منتظمة في أنحاء المادة لأن التدفق الحراري أستعمل في تبخير الماء إلى السطح [18]، عند توقف انتقال الرطوبة إلى السطح تتوقف السرعة عن الثبات، بالنسبة للمنتجات الغذائية والعضوية لا توجد عادة مرحلة تجفيف ذات سرعة ثابتة، وهذا راجع إلى أن جدران الخلايا تعطل الانتقال السريع للرطوبة إلى السطح الخارجي للمنتج بسبب تصلب وتقلص سطح المنتج وهذا ناتج عن انتقال المواد المذابة (الانتقال الكتلي) التي كانت تسد المسام [31].

ت- المرحلة الثالثة: مرحلة التباطؤ (المنطقة c)

خلال هذه الفترة، لم يعد سطح المنتج مشبعا ببخار الماء ويتم التحكم في نقل الكتلة من خلال الآليات المعقدة لحركة الماء من الداخل إلى سطح المنتج، وتمثل هذه المرحلة كل التجفيف تقريبا، يتم تفسير تباطؤ سرعة التجفيف بالظواهر التالية :

- **اختفاء الماء الحر من سطح المنتج :**

منطقة التبخر التي كانت على سطح المنتج تتحرك لتصبح داخل المنتج [31]، لذلك يتحول الماء المرتبط داخل المنتج إلى بخار، أما الماء الحر الموجود على السطح إلى سائل، وهذه الظاهرة تتعلق ببداية انخفاض المنحنى [25].

- **سمك المنتج :**

كلما زاد سمك المنتج كلما كان المسار الذي يعبره بخار الماء أطول، وبالتالي يفسر هذا إلى حد كبير تباطؤ معدل التجفيف [31].

- **انتشار الماء داخل المنتج :**

تتغير حسب نسبة الماء داخل المنتج، فكلما كانت جافة تنقص سماحيتها للماء [31].

- **القوة الميكانيكية لجدران الخلايا :**

تمنع جدران الخلايا بخار الماء من المرور بكميات كبيرة إلى سطح المنتج [25].

- **التقشير:**

بعض المركبات القابلة للذوبان بما في ذلك السكريات والأملاح تصاحب الماء المتبخر أثناء مرحلة السرعة الثابتة وتتموضع على السطح، هذه الظاهرة تسمى التقشير وهي مسؤولة عن التركيز العالي لهذه المركبات القابلة للذوبان على السطح والتي تغلق مسام المنتج. تراكم وتجفيف هذه المذابات تجعل سطح المنتج لامسامي (غير نفاذي) [31].

II - 7 تأثير عوامل هواء التجفيف على حركية التجفيف

II - 7 - 1 تأثير درجة حرارة هواء التجفيف:

إنّ درجة حرارة هواء التجفيف لها تأثير كبير على سرعة التجفيف، حيث كلما زادت درجة حرارة الهواء زادت معه درجة حرارة المنتج المجفف، نتيجة لذلك فإنّ معدلات خروج الماء (انتقال الكتلة) من المنتج ترتفع أيضا [24]، ومع ذلك يجب ألا تكون درجة حرارة الهواء عالية جدا فذلك قد يؤدي إلى تلف المنتج، حيث يجب تعريض معظم الفواكه والخضروات إلى درجة حرارة مابين (60 – 65°C) ماعدا الملفوف والبصل تكون أقل من (57°C)، لا ينبغي تعريض المكسرات لدرجة حرارة أعلى من (54°C) باستثناء الجوز يجب ألا يتجاوز(43°C)، عند تعريض المنتجات إلى درجة حرارة أعلى مما يجب فإنها تفقد جودتها، فتظهر بلون داكن وينقص عمر تخزينها [38].

II - 7 - 2 تأثير سرعة هواء التجفيف:

سرعة تدفق هواء التجفيف يزيد من معدل فقدان الرطوبة من المنتج وبالتالي تزداد سرعة التجفيف [38]، سرعة هواء التجفيف له أثر إيجابي على حركية التجفيف خاصة في بداية العملية، بينما في المواد التي تتحكم حركية التجفيف فيها بالهجرة الداخلية للماء، فسرعة هواء التجفيف يكون لها أثر ضعيف جدا [24].

II - 7 - 3 تأثير رطوبة هواء التجفيف:

يلعب بخار الماء في الهواء دورا مهما جدا في سلوك حركية التجفيف في عدد من المنتجات. كما هو الحال مع سرعة الهواء [24]، فعندما تكون الرطوبة النسبية للهواء المحيط بالمنتج منخفضة تزداد سرعة التجفيف. يؤدي تسخين الهواء إلى تقليل الرطوبة النسبية بما يكفي للإنتاج مستويات الرطوبة النسبية المنخفضة المطلوبة لتسريع التجفيف [38].

II - 8 فعالية المجفف :

بالنسبة للمجفف الشمسي الذي يعمل بالحمل الحراري القسري تعطى عبارة فعاليته كالتالي [12] :

$$\eta_{ch} = \frac{mf.(X_o - X).L_v/(X_o + 1)}{(I.Ac + Pf).t} \qquad (23 - II)$$

L_v : الحرارة الكامنة للتبخير (J/kg).

I : الاستطاعة الشمسية (W/m^2).

P_f : الطاقة الكهربائية المستهلكة من طرف المروحة (W).

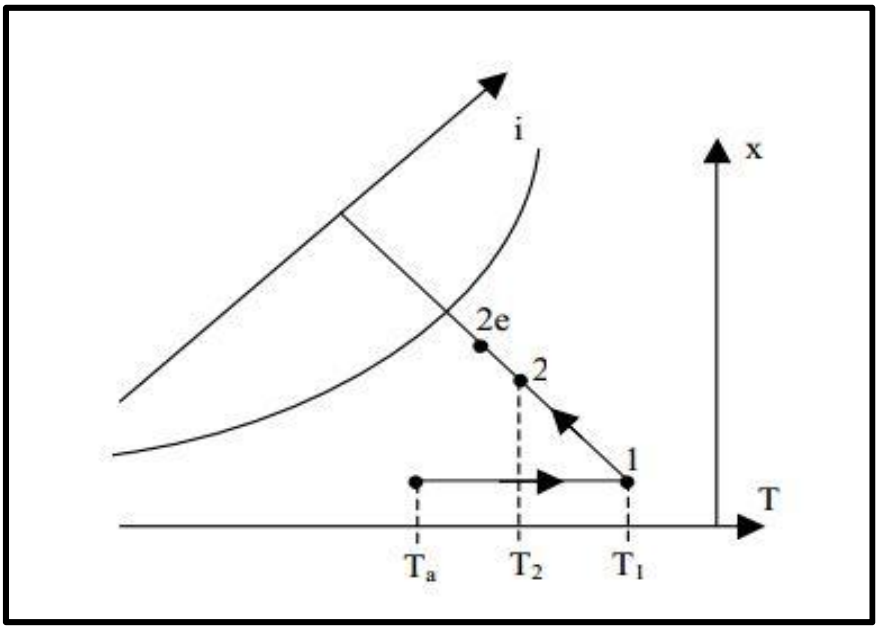
A_c : سطح اللاقط (m^2).

m_f : كتلة المنتج مع الشباك (kg).

t : الزمن.

II - 9 مردودية التجفيف

II - 9 - 1 المردودية الكتلية :



الشكل (II - 3) : تطور الهواء خلال عملية التجفيف بالحمل الحراري [46].

يترك الهواء غرفة التجفيف عند النقطة 2، ويخرج عند النقطة 2e ـ أنظر الشكل (II - 3) ـ إذا تمّ الوصول إلى حالة التوازن بين الهواء والمنتج أي HR2e = aw، ويتم تحديد المردودية الكتلية كالآتي :

$$\eta_m = \frac{X2 - Xa}{X2e - Xa} \qquad (24 - II)$$

حيث :

η_m : المردودية الكتلية (%).

X_2 : الرطوبة المطلقة للهواء عند درجة الحرارة T_2.

X_a : الرطوبة المطلقة للهواء عند درجة الحرارة T_a.

X_{2e} : الرطوبة المطلقة للهواء عند درجة الحرارة T_{2e}.

المردود الكتلي يعتمد بشكل كبير على طبيعة وحجم المنتج والمحتوى الرطوبي ودرجة الحرارة وسرعة الهواء حول المنتج.

II - 9 - 2 المردودية الطاقوية :

في عملية التجفيف يتم تعريف كميتين تميزان الطاقة المستهلكة [46]:

- متوسط استهلاك الطاقة CEM هو مقدار الطاقة اللازمة لتبخير 1 كغ من المياه الموجودة في المنتج :

$$CEM = \frac{i1 - i_a}{X2 - Xa} \qquad (25 - II)$$

ـ نسبة استهلاك الطاقة المعبر عنها بواسطة :

$$RCE = \frac{CEM}{L_v} \qquad (26 - II)$$

ويمكن كتابته كما يلي :

$$RCE = \frac{i1 - i_a}{(X2 - Xa)L_v} \qquad (27 - II)$$

II - 10 الخاتمة :

من خلال هذا الفصل تم التعرف على أهم ظاهرتين فيزيائيتين تحدثان أثناء عملية التجفيف، وهما الانتقال الحراري الذي تم شرح كيفية التجفيف بالأنواع الثلاثة له (التجفيف بالحمل ــ التجفيف بالتوصيل ـ التجفيف بالإشعاع)، وكذلك الانتقال الكتلي وقد تبين أنه السبب في ظهور بخار الماء أثناء التجفيف، كما يعرض أهم خواص هواء التجفيف وكذلك الخواص المميزة للمواد الرطبة، ليعرج بعدها على منحنى حركية التجفيف الذي يميز أغلب عمليات التجفيف للمواد الرطبة، شارحا مراحله الثلاث بالتحليل والتفسير مبينا العوامل الأساسية ذات التأثير المباشر على حركية التجفيف، ويعرف أيضا المر دودية الكتلية و الطاقوية للتجفيف.

الفصل الثالث:

دراسة توزيع درجة الحرارة في المجفف الشمسي

III - 1 المقدمة :

ضمن هذا الفصل نهدف لصنع غرفة تجفيف باستعمال أدوات بسيطة وغير مكلفة، و دراسة توزيع درجات الحرارة في مجفف شمسي غير مباشر (رأسي ذو تهوية) يعمل بالحمل القسري. حيث فصلت الغرفة إلى قسمين؛ قصد التحسين في توزيع الحرارة بواسطة لوح من البوليستيران المغلف بالألمنيوم ذو ثقوب تسمح بمرور الحرارة للجزء العلوي لها. كما تم وصف جميع عناصر المجفف الشمسي ودور كل عنصر في عملية التجفيف. يظهر هذا الفصل أيضا التركيب التجريبي المستعمل والنتائج المتحصل عليها مع تحليليها و تفسيرها.

III - 2 عناصر المجفف الشمسي :

التركيب التجريبي المستعمل عبارة عن مجفف شمسي غير مباشر يعمل بالحمل القسري (أي باستعمال مروحة) حيث يتكون من عدة عناصر وهي :

III - 2 - 1 غرفة التجفيف :

إن صنع غرفة التجفيف يتطلب توفر الأدوات المبينة في الجدول (III – 1)، كما أن صنعها يمر بعدة مراحل و هذا ما يوضحه الجدول (III - 2).

الجدول (III - 1) : الأدوات المستعملة في الصنع.

	علبة مكعبة الشكل أبعادها 46×34×52.5 سم.
	ألواح بوليستيران (عازل حراري) سمكها 2 سم.

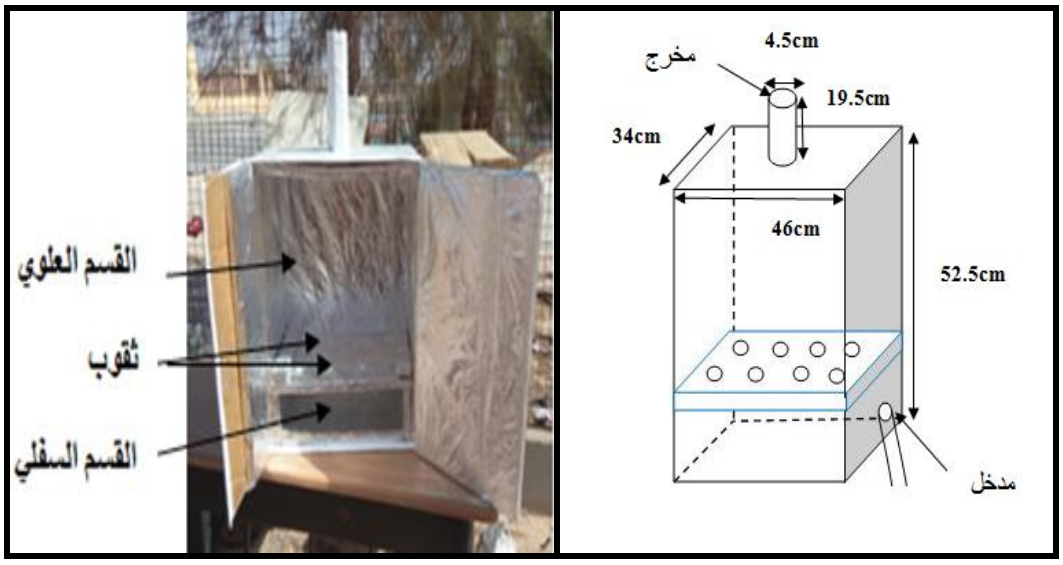
ورق ألمنيوم (لحفظ الحرارة).	
أدوات أولية (شريط لاصق، أنبوب معدني قطره 2 سم، مشرط).	

الجدول (III - 2) : مراحل صنع غرفة المجفف الشمسي.

تؤخذ قياسات العلبة و بواسطة مشرط تقص ألواح البوليستيران حسب الأبعاد المتحصل عليها.	
ثقب الجانب السفلي لإحداث مدخل للهواء الساخن قطره 1.5 سم و مخرج للهواء الرطب في أعلى الغرفة ذو شكل أسطواني ارتفاعه 19 سم وقطره 4.5 سم.	

تغليف جميع ألواح البوليستيران المشكلة بالألمنيوم والحرص على إخراج الهواء الموجود بينهما وخاصة الثقوب التي يعتمد تغليفها على الدقة.	
صنع لوح من البوليستيران واخذ قياساته بدقة لإحداث ثمانية ثقوب موزعة بانتظام على سطحه قطر كل ثقب 2 سم، ويغلف بالألمنيوم.	
إحاطة كل الجهات (الجوانب، الأعلى و الأسفل) الداخلية للعلبة بالألواح المغلفة، و يوضع اللوح المثقوب في الغرفة حيث يقسمها إلى قسمين قسم سفلي ارتفاعه 8 سم والذي يحوي المدخل، أما العلوي ارتفاعه 37.5 به مخرج؛ لتحسين توزيع درجات الحرارة داخل الغرفة.	
تغليف العلبة من الخارج بغلاف أبيض يحفظها من العوامل الجوية.	

بعد الانتهاء من صنع غرفة التجفيف الشمسي نتحصل على الشكل (III ـ 1) الذي يظهر النموذج النهائي لها بجميع الأبعاد.

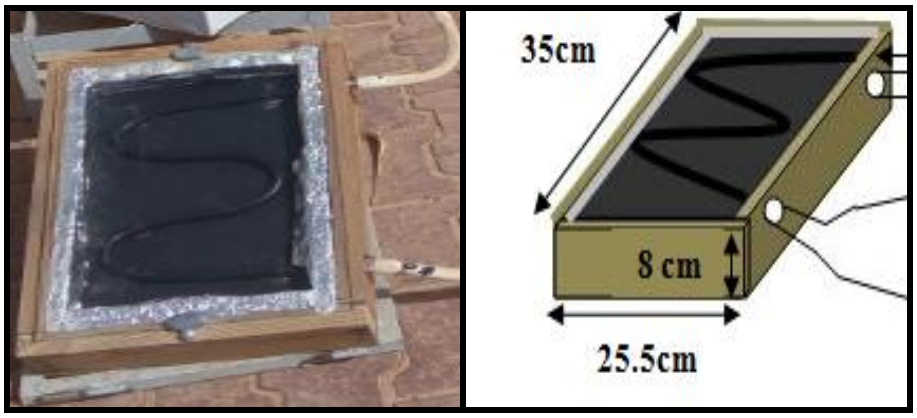


الشكل (III - 1) : رسم تخطيطي يوضح غرفة التجفيف بعد صنعها.

3 - 2 - 2 لاقط شمسي مسطح :

أ ـ وصف اللاقط :

اللاقط الشمسي المستعمل مصنوع من صندوق خشبي أبعاده 35×25.5×8 سم معزول من كل الجهات بالبوليستيران المغلف بالألمنيوم يوجد بداخله صفيحة معدنية مصبوغة باللون الأسود غير اللامع مثبت عليه أنبوب نحاسي مصبوغ بالأسود لمرور الهواء الذي يتم تسخينه، ويغطى سقف الصندوق بزجاج ذو سمك 3 مم. كما نرى في الشكل (III - 2) :



الشكل (III - 2) : لاقط شمسي مسطح.

ب ـ عمل اللاقط :

تسقط الأشعة على زجاج اللاقط فتنكسر على الصفيحة، هذه الأخيرة تعكسها إلى الزجاج مما يحدث ظاهرة الاحتباس الحراري. و عند مرور الهواء في الأنابيب يكتسب حرارة من الوسط الداخلي (بين الصفيحة المعدنية و الزجاج) والذي بدوره ينقلها إلى غرفة التجفيف.

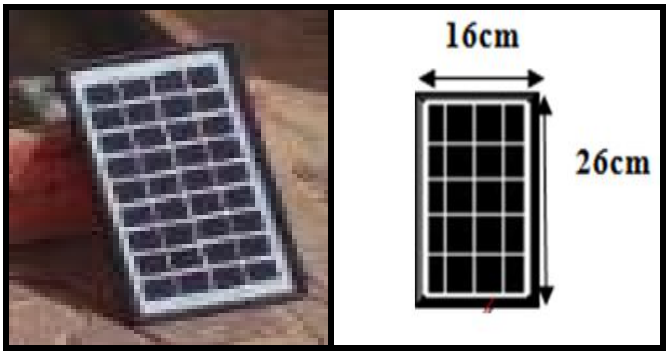
3 - 2 - 3 المروحة :

المروحة المستعملة في التجربة كما يوضح الشكل (III - 3) صغيرة الحجم تعمل بتيار شدته 0.13 A و جهد 12 V، يصل بينها وبين اللاقط الشمسي أنبوب حيث تسحب الهواء إلى داخل اللاقط الشمسي.

الشكل (III - 3) : صورة المروحة المستخدمة.

3 - 2 - 4 الخلية الشمسية :

خلية شمسية بأبعاد 16×26 سم توصل بالمروحة لتزويدها بالتيار الكهربائي الذي تنتجه من الإشعاع الشمسي، و جهدها يقدر ب 9 V. أنظر الشكل (III - 4) :



الشكل (III - 4): صورة الخلية الشمسية.

3 - 3 مبدأ عمل المجفف :

يبدأ عمل المجفف الشمسي بسحب المروحة للهواء من الوسط الخارجي لتدفعه إلى اللاقط الشمسي (حمل قسري) عبر أنبوب، فيتم تسخينه عن طريق تحويل الإشعاع الشمسي الساقط على سطح اللاقط إلى طاقة حرارية، مما يمنح الهواء حرارة عالية للانتقال للغرفة عبر أنبوب طوله 9 سم و قطره 1.5 سم فيتوزع الهواء الساخن في القسم السفلي من الغرفة.

يصعد الهواء الساخن من خلال الثقوب الموزعة في اللوح إلى القسم العلوي الذي يحوي المنتج الرطب المراد تجفيفه، لينتج فرق في درجة الحرارة بين الهواء و المنتج فيؤدي للتبادل الحراري بينهما، ليخرج الهواء من الغرفة حاملا معه الرطوبة (هواء رطب).

3 - 4 وصف منطقة التجربة :

أجريت الدراسة التجريبية في ولاية واد سوف الواقعة في الجنوب الشرقي للجزائر، تمتد أراضيها بين خطي طول 6˚- 8˚ شرقا ودائرتي عرض 31˚- 34˚ شمالا، تتميز بطابع صحراوي جاف حار صيفا وبارد شتاءا حيث يصل المتوسط الحراري في فصل الصيف إلى 34°C وقد يتعدى في بعض الأحيان 50°C، وفي فصل الشتاء يكون المتوسط الحراري 10°C، وقد تصل أحيانا إلى ما دون الصفر ليلا، التيارات الهوائية نشطة على مدار السنة في الوادي، فتهب رياح شمالية وشمالية شرقية من فيفري إلى أفريل، وتهب رياح شرقية من أوت إلى أكتوبر، وتهب رياح جنوبية حارة خلال الصيف، ونظرا لقلة هطول الأمطار بسبب بعد المنطقة عن البحر (يصل المتوسط السنوي للتساقط بالمنطقة إلى 80.3 ملم) فإن أغلب أيام السنة تكون مشمسة وهذا ما يجعلها منطقة غنية بالطاقة الشمسية [47].

3 - 5 الأجهزة المستخدمة في القياس :

- **جهاز قياس درجة الحرارة :** هو جهاز رقمي لقياس درجة الحرارة موصول بمزدوج حراري (Thermocouples)، يعطي قيمة درجة الحرارة في المكان الموضوع فيه المزدوج.
- **ميزان :** لوزن العينة قبل عملية التجفيف و بعدها.

الشكل (III - 5) يبين الأجهزة المستخدمة في القياس :

الشكل (III - 5): صور فوتوغرافية لأجهزة القياس.

3 - 6 وصف التجربة :

لقد تمت التجربة يوم 2018/04/29 على مستوى مخبر الطاقات المتجددة بجامعة الوادي تحت الظروف الجوية المسجلة في الجدول (III - 3) التالي :

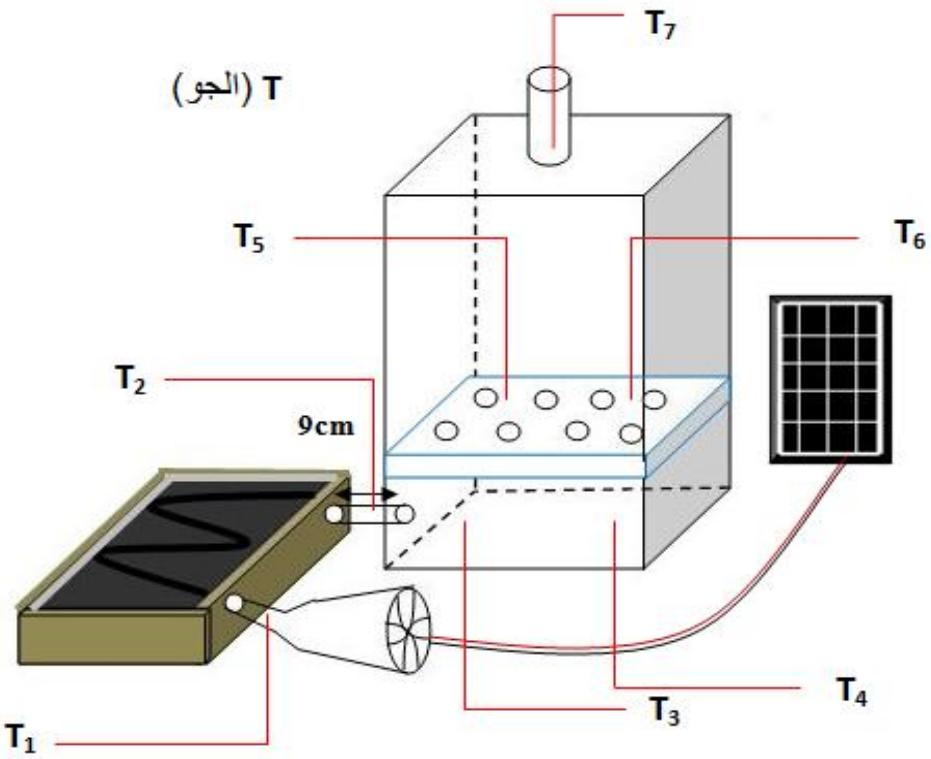
الجدول (III - 3): الأحوال الجوية للتجربة [48].

شروق الشمس	5:45 h
غروب الشمس	18:47 h
درجة الحرارة المحيطة	16 - 33 C°
الرطوبة	33 %
الرياح	13 km/h

جهز التركيب التجريبي كما هو موضح في الشكل (III - 6) مع وضع اللاقط بزاوية ميلها 30° موجه جهة سقوط الأشعة الشمسية. أخذت أوراق نبتة النعناع كعينة للدراسة و وضعت في شباك معدني وكان وزنهما معا 120 غ ووزن الشباك وحده 90 غ.

الشكل (III - 6) : التركيب التجريبي للمجفف الشمسي غير المباشر.

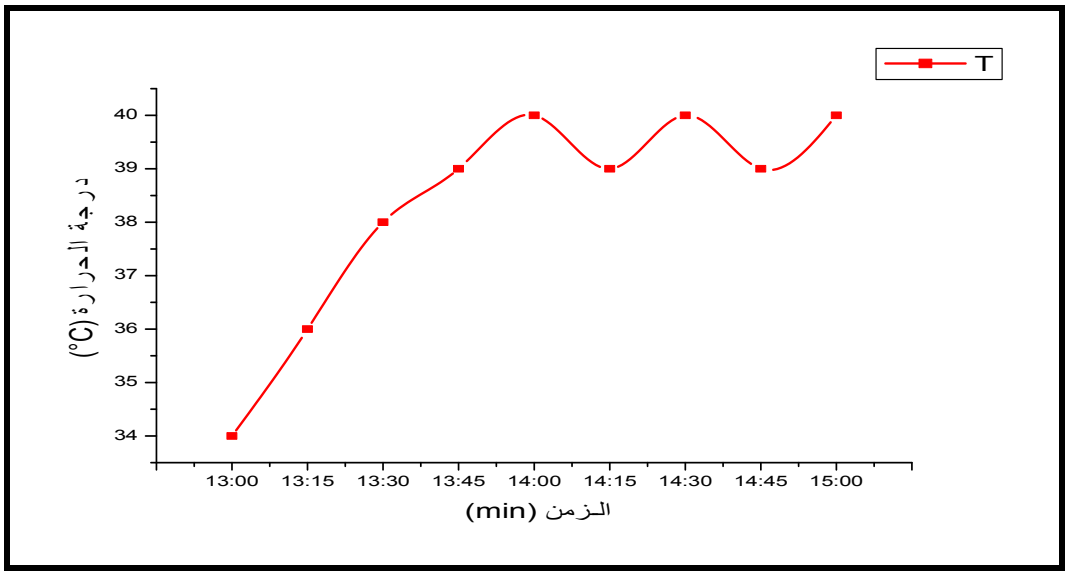
نثبت المزدوجات الحرارية داخل الغرفة كما في الشكل (III – 7)، ثم نغلقها و نبدأ بقياس درجة الحرارة كل 15 دقيقة.



الشكل (III - 7) : مخطط للمواضع التي تقاس الحرارة عندها.

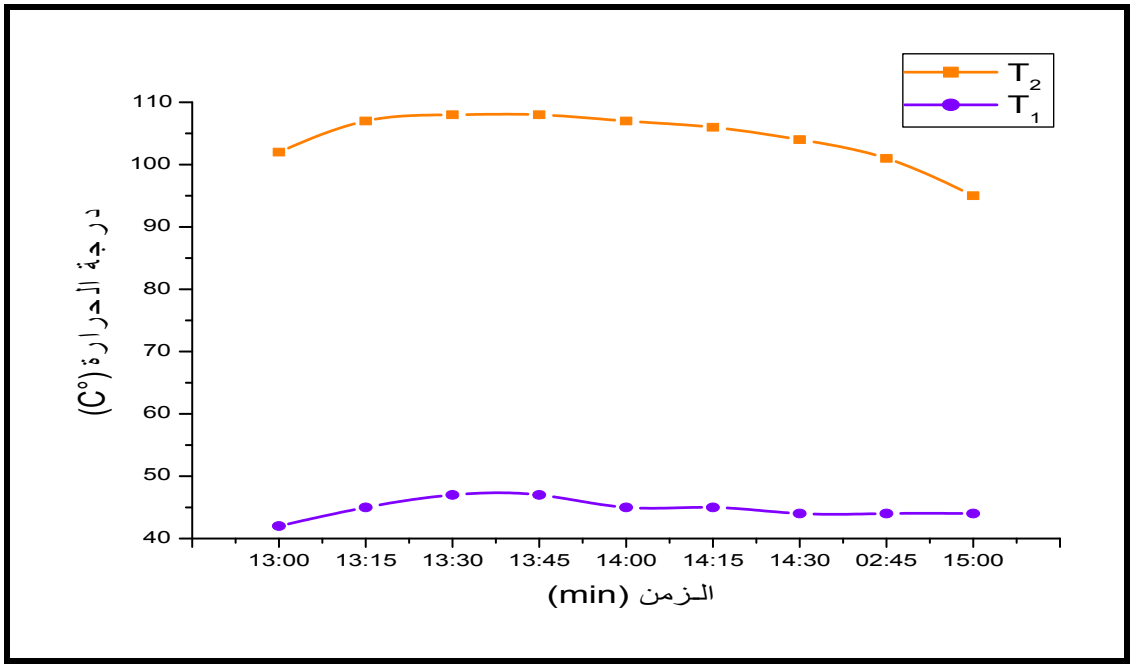
3 - 7 النتائج المتحصل عليها : (جميع النتائج المسجلة في الملحق)

❖ نلاحظ في الشكل (III - 8) أن درجة الحرارة المحيطة بالنظام في ارتفاع مستمر إلى أن تبلغ ذروتها عند 40°C على الساعة 14:00 دقيقة، تبدأ بعدها في التذبذب بين درجتي حرارة 40°C و 39°C.



الشكل (III - 8): منحنى تغير درجة الحرارة المحيطة بالنظام بدلالة الزمن.

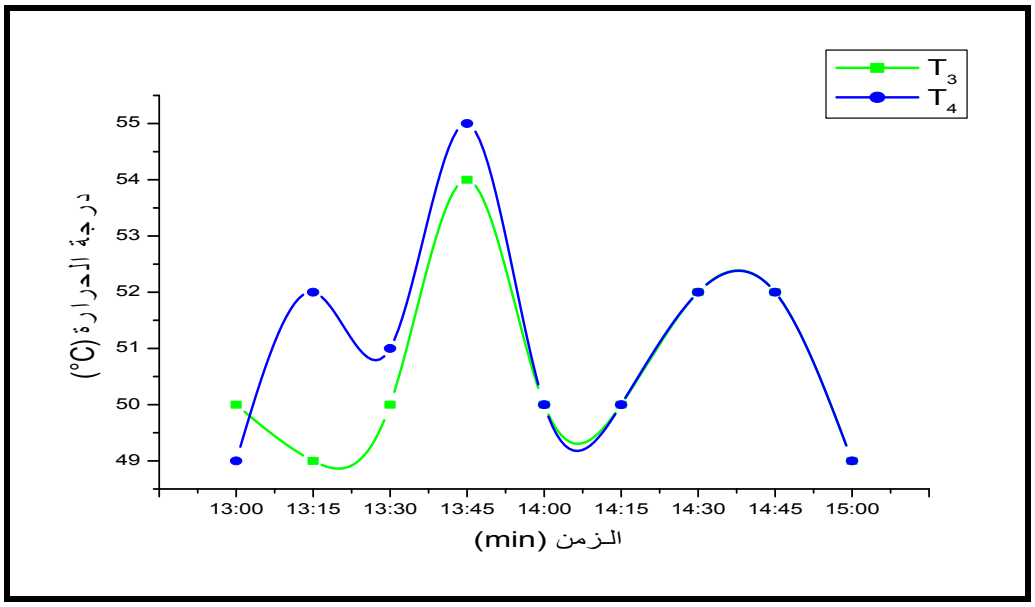
❖ الشكل (III – 9) يظهر الفرق الكبير في درجة حرارة الهواء الداخل إلى اللاقط و الخارج منه، وهذا راجع إلي الانتقالات الحرارية بين الصفيحة الزجاجية والماص الحراري مما يرفع درجة حرارة الهواء الموجود بينهما، لتنتقل هذه الطاقة الحرارية إلى الهواء داخل الأنابيب، فيخرج من اللاقط بدرجة حرارة مرتفعة.



الشكل (III - 9): منحنى تغير درجة حرارة مدخل و مخرج اللاقط بدلالة الزمن.

❖ من خلال الشكل (III - 10) نلاحظ أن درجة الحرارة في القسم السفلي للغرفة تتراوح بين [49°C - 55°C] و نميز فيه مرحلتين :

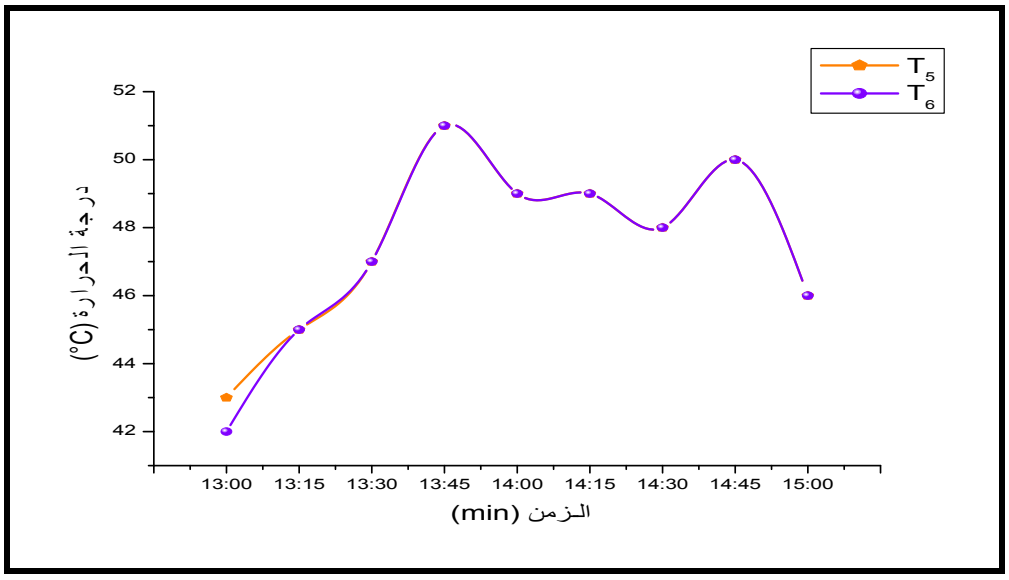
- درجة حرارة $T_4 > T_3$ في المجال [13:15 h -14:00 h]، وهذا بسبب تدفق الهواء الساخن بالحمل القسري ليتوزع داخل الغرفة بداية من الجهة الأبعد إلى الجهة الأقرب.
- درجة حرارة $T_4 = T_3$ في المجال [14:00 h -15:00 h]، لأن الهواء الساخن توزع بانتظام في جميع أنحاء القسم السفلي.



الشكل (III - 10): منحنى تغير درجة حرارة القسم السفلي من الغرفة بدلالة الزمن.

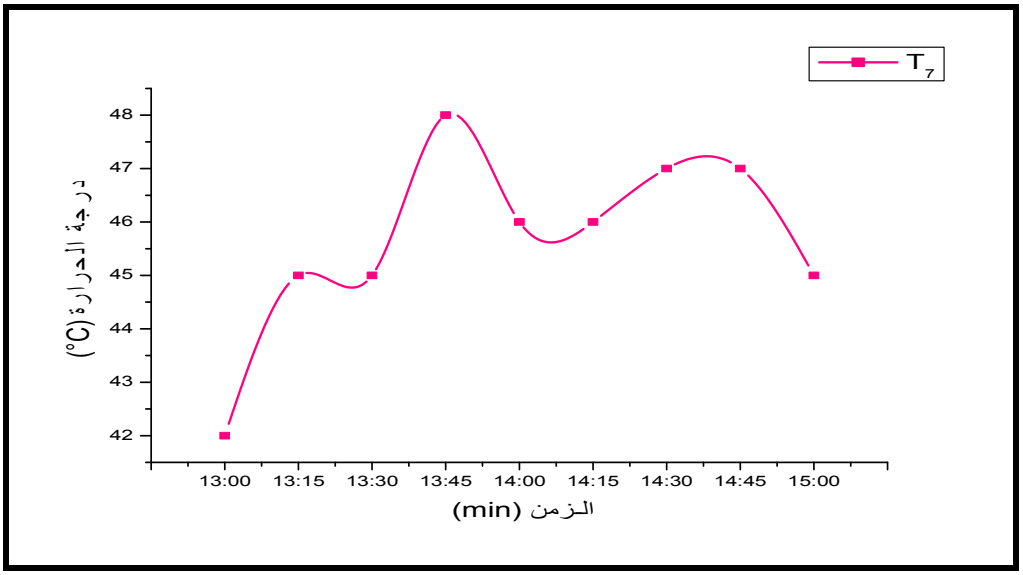
❖ في الشكل (III ـ 11) تكون درجة حرارة $T_5 > T_6$ في القسم العلوي للغرفة عند أول 15 دقيقة من التجربة، وذلك راجع لعدم انتظام توزيع الحرارة في أعلى القسم السفلي وتسربها إلى القسم العلوي بهذا الشكل.

عند الساعة 13:15تصبح درجة الحرارة $T_5=T_6$ و تستمر في التساوي إلى نهاية التجربة، نتيجة انتظام توزيع الحرارة في أعلى القسم السفلي لان كثافة الهواء الساخن اقل من الهواء البارد، وانتقالها بالحمل القسري والطبيعي عبر الثقوب الموزعة بانتظام على سطح اللوح الفاصل بينهما.



الشكل (III - 11): منحنى تغير درجة حرارة القسم العلوي من الغرفة بدلالة الزمن.

❖ نلاحظ في الشكل (III - 12) أن $T_7 < (T_5، T_6)$ وهذا بفضل التبادل الحراري بين الهواء الساخن والمنتج الرطب (النعناع) حيث الحرارة المعطاة إلى المادة من الهواء الساخن تستخدم لتبخير الماء من المادة و بتالي تنقص حرارة الهواء وترتفع رطوبته.



الشكل (III - 12): منحنى تغير درجة حرارة مخرج الغرفة بدلالة الزمن.

❖ الشكل (III - 13) يظهر العينة (النعناع) التي كان وزنها قبل التجربة 30 g وبعد الانتهاء كان وزنها 15g مما يعني أن العينة فقدت نسبة 50 % من وزنها.

الشكل (III - 13): العينة قبل و بعد عملية التجفيف.

3 - 8 الخاتمة :

لقد تم التعرف في هذا الفصل على كيفية صنع غرفة مجفف شمسي و تجهيز التركيب التجريبي، حيث مرت التجربة في ظروف جوية ملائمة خصوصا من ناحية درجة الحرارة، مما يعني أن درجة حرارة الهواء الداخل إلى اللاقط مناسبة للحصول حرارة مرتفعة عند الخروج من اللاقط. في القسم السفلي من الغرفة يظهر اختلاف توزيع الحرارة بينما القسم العلوي سرعان ما انتظم التوزيع، فعلى الرغم من صغر حجم القسم السفلي للغرفة إلا أن توزيع درجات الحرارة فيه استغرق ساعة كاملة ليتوزع بانتظام على عكس القسم العلوي الذي انتظم التوزيع داخله خلال 15 دقيقة.

الخاتمة العامة

الخاتمة العامة

في هذا العمل التجريبي استخدمنا مجفف شمسي من النوع غير المباشر(اللاقط الشمسي) يعمل بالحمل القسري، لذا قمنا بصنع غرفة المجفف باستعمال علبة ذات أبعاد خارجية 52.5 × 46 × 34 سم، ثمّ إحاطتها من كل الجهات بألواح بوليستيران (عازل حراري) سمكها 2 سم مغلفة بالألمنيوم، مع ثقب مدخل للهواء الساخن في أسفل الغرفة قطره 1.5 سم و مخرج في الأعلى قطره 4.5 سم. اللاقط الشمسي المستعمل مصنوع من صندوق خشبي أبعاده 35×25.5×8 سم معزول من كل الجهات بالبوليستيران المغلف بالألمنيوم يوجد بداخله صفيحة معدنية مصبوغة باللون الأسود غير اللامع مثبت عليه أنبوب نحاسي مصبوغ بالأسود لمرور الهواء الذي يتم تسخينه، ويغطى سقف الصندوق بزجاج ذو سمك 3 مم.

بهدف تحسين توزيع درجات الحرارة داخل غرفة المجفف الشمسي فصلت إلى جزأين بلوح من البوليستيران أحدثنا به ثمانية ثقوب قطر كل ثقب 2 سم موزعة بانتظام على سطح اللوح، و يتم تغليفه بالألمنيوم بالتالي يصبح للغرفة جزأين، سفلي ارتفاعه 8 سم و جزء علوي ارتفاعه 37.5 سم.

يتم تركيب جميع أجزاء المجفف الشمسي (الغرفة، اللاقط...)، نثبت المزدوجات الحرارية في مناطق محددة من الغرفة، و نضع المادة المراد تجفيفها على شباك في الجزء العلوي من الغرفة، ثم نسجل درجات الحرارة المتحصل عليها تجريبيا.

أظهرت النتائج ما يلي :

- درجة حرارة الجو أحد العوامل المهمة للحصول على نتائج جيدة.
- يرفع اللاقط درجة حرارة الهواء الداخل إلى الغرفة.
- توزيع درجة الحرارة في القسم السفلي للغرفة استغرق وقت طويلا للانتظام رغم صغر أبعاده.
- في فترة وجيزة انتظم توزيع الحرارة في الجزء العلوي رغم كبر حجمه مقارنة مع الجزء السفلي.
- درجة حرارة المخرج تنخفض بشكل طفيف مقارنة بالقسم العلوي بسبب رطوبة المنتج.
- المادة المجففة فقدت % 50 من وزنها.

تقودنا النتائج إلى أن اللوح الفاصل ساهم في تحسين توزيع درجة الحرارة بشكل جيد داخل غرفة المجفف الشمسي.

وفي الأخير نقترح زيادة عدد الثقوب الموزعة على سطح اللوح الفاصل مع إمكانية تغيير أقطارها، و خفض مستوى ارتفاع اللوح لأجل الحصول على نتائج أفضل.

المراجع

- **المراجع العربية :**

[1] م. حمد الفارس، الطاقة الشمسية، مجلة العلوم و التقنية، الجزء الأول، العدد 34، ISSN 1017 3056 ربيع آخر 1416ه / سبتمبر 1995 م.

[2] اسعد رحمن سعيد الحلفي، تجفيف الذرة الصفراء بالطاقة الشمسية، قسم علوم الأغذية والتقانات الأحيائية كلية الزراعة ـ جامعة البصرة ـ العراق، asaadrehman@yahoo.com.

[3] المهندسة يسرى يوسف الوزة، تحسين أداء التجفيف الشمسي للمنتجات الزراعية (التبغ السوري)، رسالة ماجستير، جامعة تشرين، سوريا، صفحة 35 ، 1427ه / 2006 م.

[4] اسعد رحمن سعيد الحلفي و غياث حميد مجيد، الأداء الحراري للمجفف الشمسي و تأثيره في بعض الصفات الهندسية للتجفيف، مجلة البصرة للعلوم الزراعية، المجلد 20، العدد 2، 2007 م.

[5] اسعد رحمن سعيد الحلفي، تصميم و تصنيع و اختبار مجفف شمسي شبه مختلط لتجفيف التمر، مجلة البصرة لأبحاث نخلة التمر، المجلد 6، العدد 1، 2007 م.

[6] غياث حميد مجيد و اسعد رحمن سعيد الحلفي، تصميم مجفف شمسي مزود بمنظومتي الراجع و التسخين و اختباره في تجفيف الأسماك و اللحوم، مجلة أبحاث البصرة (العلميات)، العدد 33، الجزء الثالث، ISSN-1817-2695، 20 - 30 ايلول 2007 م.

[7] اسعد رحمن سعيد الحلفي و غياث حميد مجيد، تأثير طرائق التجفيف في الصفات النوعية لبعض الفواكه و الخضر، مجلة البصرة للعلوم الزراعية، المجلد 20، العدد 2، 2008 م.

[8] مختار العاتي، المساهمة في تحسين مجفف شمسي للمحاصيل الزراعية، رسالة ماجستير، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، الجزائر، صفحة 1، (2011) م.

[9] أ. د نصر أبو فول، التجميد و التجفيف، مركز العمل التنموي/ معا، الطبعة الأولى، غزة – 2009 م.

[10] د. اسعد رحمن سعيد الحلفي، التجفيف، قسم علوم الأغذية ـ كلية الزراعة ـ جامعة البصرة، المحاضرة الثامنة، 29 / 01 / 2018 م.

[11] صفوان سيف الدين و حمدي جبقجي، الصناعات الغذائية، مجلة العلوم و التقنية، الجزء الأول ، العدد 37، رجب 1429 ه / يوليو 2008 م.

[14] طارق إسماعيل كاخيا، الكيمياء الصناعية الجزء الأول تكنولوجيا الصناعات الكيميائية اللاعضوية، علم الكيمياء، الصفحة 22.

[15] أ. د محمد سليم علي اشتية و رنا ماجد جاموس، التجفيف الشمسي للفواكه و الخضراوات : خبرات من فلسطين، مركز أبحاث التنوع الحيوي و البيئة (بيرك)، تل، نابلس، فلسطين، ص. ب. 696 نابلس فلسطين، 2010 م.

[19] س. زبيري و ل. منصر، دراسة تجريبية لمجفف شمسي، ليسانس أكاديمي، جامعة الشهيد حمة لخضر- الوادي، الجزائر، 2015/2014.

[22] أ. د. م/ رأفت عبد العزيز شميس و اللواء/ رؤوف حسن فرج، بيتك غيطك و مصنعك، المركز القومي لبحوث الإسكان و البناء، معهد التدريب و الدراسات الحضرية.

[25] ي. طريلي، ف. قريشة، "تجفيف المحاصيل الزراعية بإستغلال الطاقة الشمسية"، مذكرة ليسانس أكاديمي، جامعة حمه لخضر- الوادي، الجزائر، 2013.

[29] ا الحلفي و ص الشطي و ع عاتي جعفر، تصميم و تصنيع مجفف للأسماك بالطاقة الشمسية تحت التفريغ ودراسة كفاءته، مجلة أبحاث البصرة، الرقم التسلسلي 2695- 1817 -ISSN، 2013/2012 م.

[30] غياث حميد مجيد و اسعد رحمن سعيد الحلفي، تصميم مجفف شمسي مزود بمنظومتي الراجع و التسخين و اختباره في تجفيف الأسماك و اللحوم، مجلة أبحاث البصرة (العلميات)، العدد 33، الجزء الثالث، ISSN-1817-2695، 20 - 30 ايلول 2007 م.

[34] يوسف جواد، صفاء عبد الغني، "جريان الموائع"، دبلوم فني تشغيل وسيطرة، معاهد التدريب النفطي، (2008).

[35] ص، الشطي، أ، الحلفي، ع، جعفر، " دراسة الصفات الحسية والفيزيائية لاسماك الكارب المجففة بمجفف يعمل بالطاقة الشمسية وتحت التفريغ المصنع محليا"، مجلة جامعة ذي قار للبحوث الزراعية، المجلد 3، الجزء الثالث، (2014).

- **المراجع الأجنبية :**

[12] Boussalia Amar, Contribution a L' etude de shchage solaire de produits agricoles locaux diplôme de magister, universite mentouri – constantine, algeria, 2010.

[13] Werner Wessi and Josef, Solar Drying, AEE INTEC, Austrian.

[16] A. Ali Al- jumaah and A. Mohamed Asiri and M. Fadil Alshehri and A. Mohamed Deash and F. Minajy Al-hamzi, Design And Construction Of A Solar Drying System For Food PRESERVATION, The Degree of Bachelor of Science (B.Sc.) in Mechanical Engineering Jazan University, 1434/1435

[17] Boukadoum née Boulemtafes Amel, Le séchag solair des produits agricoles, Recherche et Développement, E-mail: a_bulemtafes@cder.dz

[18] H, BEN CHEIKCH, M, OULD SIDI MED, Y, DRAOUI, " Conception et réalisation d'un séchoir solaire indirect opérant en mode convectif ", Mémoire d'ingénieur d'état en génie mécanique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algerie 2011.

[20] N. Bintiharmain, Development Of Solar Dryer System For Food Drying Purposes, the award of Bachelor of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang, Malaysia, June 2012.

[21] Ahmed BAHADJ, "Etude expérimentale de séchage solaire de la pomme de terre", Mémoire de Master academique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algerie, 2014.

[23] B. Dadda et S. Kherrour et L. Serir, Réalisation d'un séchoir solaire indirect, SMSTS'08, 2008.

[24] Boumediene Touati, "etude theorique et experimentale du sechage solaire des feuilles de la menthe verte (Mentha viridis)", Thése de doctorat, Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen, Algerie, 2008.

[26] Serm Janjai, A greenhouse type solar dryer for small-scale dried food industries: Development and Dissemination, Energy and Environment, Volume 3, Issue 3, ISSN 2076 – 2895, 2012.

[27] C.L. Hii and S.V. Jangam and S.P. Ong and A.S. Mujumdar, Solar Drying: Fundamentals Applicatio and Innovations, authors of individual chapter, 2012.

[28] UmeshToshniwal, S.R Karale, A review paper on Solar Dryer, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), Vol. 3, Issue 2, ISSN: 2248-9622, March -April 2013.

[31]Slimane Boughali," etude et optimisation du sechage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et desertiques", Thése de doctorat, Université Hadj Lakhdar Batna, Algerie, (2010).

[32] A. Charreau, R. Cavaille, "séchage théorie et pratique technique de l'ingénieur", génie des procédés, 2480-1;2480-23, (1991).

[33] A. Kahmane, A. Terea, N. Charahi, "etude d'un sechoire solaire", Mémoire de licence academique, Université Hamma Lakhdar d'el-oued, Algerie, (2017).

[36] C. BONAZZI, J.BIMBENET, "Séchage des produits alimentaires", le Centre français d'exploitation du droit de copie, F 3 000.

[37] M. Rivier, J. Méot, T. Ferré, M. Briard, "Le séchage des mangues", Quæ. CTA, France, (2009).

[38] the United States Agency for International Development (USAID),"drying fruits and vegetables with the chimney solar dryer ", FEED THE FUTURE, section 2, U.S.A, (2018).

[39] C. Brison, J. Perret, J. Canler, "Le séchage solaire des boues: etat actuel de l'art et retours d'expérience", cemagref, N°36, loyn, France.

[40] Er. R. K . Rajput," heat and mass transfer", S. chand, New delhi, India(2012).

[41] Khaled DJEBNOUN, " Etude théorique et expérimentale des performances d'un séchoir couplé à un capteur solaire plan à air", Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider – Biskra, Algerie, (2012).

[42] R. Miri, O. Mokrani , F. Siad, M. Belhamel, " Etude Expérimentale d'un Séchoir Solaire", Rev. Energ. Ren: Zones Arides(2002).

[43] G, Lewis, M, Randall, "Thermodynamics", Addition-Wesley Publishing Company, New-York, (1923).

[44] W, Scott, "Water relations of foods spoilage microorganisms, Advances in Food Research, 7, p.83-127, (1957).

[45] M. Loncin, "Les opérations unitaires du génie chimique", Edition Dunod, Paris, France, (1961).

[46] Yves JANNOT, "Thermique Solaire", edilivre, France, (Janvier 2007).

[47] http//Kayba.ahlamontada.net/t1658-topic, 8/05/2018, 11:10 h.

[48] https://www.wunderground.com

جدول يظهر جميع درجات الحرارة المتحصل عليها من التجربة

الزمن (min)	T (°C)	T_1 (°C)	T_2 (°C)	T_3 (°C)	T_4 (°C)	T_5 (°C)	T_6 (°C)	T_7 (°C)
13:00	34	42	102	50	49	42	43	42
13:15	36	45	107	49	52	45	45	45
13:30	38	47	108	50	51	47	47	45
13:45	39	47	108	54	55	51	51	48
14:00	40	45	107	50	50	49	49	46
14:15	39	45	106	50	50	49	49	46
14:30	40	44	104	52	52	48	48	47
14:45	39	44	101	52	52	50	50	47
15:00	40	44	95	49	49	46	46	45

الملخص:

في هذه المذكرة، تم دراسة توزيع درجات الحرارة في مجفف شمسي غير مباشر يعمل بالحمل القسري. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة التجريبية هو تحسين توزيع الحرارة في غرفة المجفف الشمسي، ولهذا قسمت الغرفة إلى جزأين بلوح من البوليستيران المغلف بالألمنيوم، يحوي ثمانية ثقوب قطر كل منها 2 سم، موزعة بانتظام. فحصلنا على جزء علوي و جزء سفلي.

أثبتت نتائج الدراسة، أن اللوح الفاصل ساعد على تحسين توزيع درجة الحرارة داخل المجفف الشمسي، حيث استغرق انتظام توزيع الحرارة في الجزء العلوي وهو الجزء الاهم مدة زمنية قصيرة رغم كبر حجمه مقارنة بالجزء السفلى الذي استغرق مدة اطول في توزيع الحرارة.

الكلمات المفتاحية: المجفف الشمسي، توزيع الحرارة، البوليستيران، الحمل القسري.

Résumé:

Dans cette mémoire, on a étudié la distribution de la température dans un séchoir solaire indirecte, fonctionnement en travail forcée. L'objectif principal de cette étude expérimentale est d'améliorer la distribution de la température dans une chambre de séchée solaire, et cela, on a devisé la chambre en deux parties par un panneau de polystyrène recouvert d'aluminium, contenant un de huit trous à diamètre 2 cm, distribué régulièrement. Nous avons eu la partie supérieure et inférieure.

Les résultats de l'étude ont démontré que le panneau du conseil d'administration a contribué à améliorer la distribution de la température à l'intérieur du séchoir solaire, où la régularité de la distribution de chaleur dans la partie supérieure, qui a pris une courte période et cette partie est la plus importante, malgré sa taille par rapport à la partie inférieure qui a la plus longue durée de la distribution de chaleur.

Mots clés: séchoir solaire, distribution de chaleur, polystyrène, travail forcée.