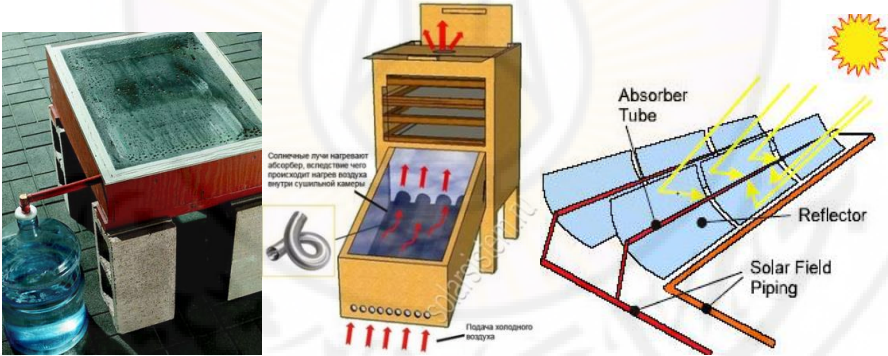




أنظمة التركيز الشمسي

وتوليد الكهرباء

(أنظمة التسخين الشمسي 2)



الدكتورة المهندسة: أمينة محمد فارس

أستاذ مساعد في قسم الميكانيك العام

1444 – 1443

2022 – 2021م



أنظمة التركيز الشمسي وتوليد الكهرباء



السنة الخامسة-قسم الميكانيك العام
شعبة الطاقات المتجددة



منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

أنظمة التركيز الشمسي

وتوليد الكهرباء

(أنظمة التسخين الشمسي 2)

الدكتورة المهندسة

أمينه محمد فارس

أستاذ مساعد في قسم الميكانيك العام

1443 – 1444
2021 – 2022م

جامعة دمشق



الفهرس

16.....	الفصل الأول
1.1.....	الدارات الهيدروليكية لأنظمة التدفئة التقليدية:
18	
18.....	1. نظام التدفئة الأرضية البسيط بدون تخزين حرارة الماء :
18.....	2. الدارات الهيدروليكية لأنظمة التدفئة التقليدية ذات مرجل يتحكم بالطاقة:
19.....	3. الدارات الهيدروليكية لأنظمة التدفئة التقليدية، المرجل ذو قدرة ثابتة:
21.....	1.2. القوانين العامة في الهيدروليك الشمسي:
22.....	1.2.1. الفصل بين الدارات (Decoupling of circuits)
24.....	1.3. تجهيزات الدوران الطبيعي في الأنظمة الشمسي:
24.....	1. أنظمة الدوران الطبيعية المفتوحة:
26.....	2- نظام DHW باستخدام نظام الدوران الطبيعي المغلق:
28.....	1.4. تجهيزات DHW ذات الدوران القسري في الأنظمة الشمسية:
28.....	1- أنظمة الدوران القسرية المفتوحة:
29.....	2- أنظمة الدوران القسرية المغلقة:
30.....	1.5. استراتيجيه التحكم بنظام التسخين الشمسي:
30.....	1.6. الأنظمة الشمسية المركبة (DHW + space heating)
32.....	1.6.1. الوصف العام لأجزاء النظام الشمسي المركب:
34.....	1.6.2. الدارات الهيدروليكية:
47.....	1.7. الدارات الهيدروليكية لأنظمة شمسية لأبنية متعددة العائلات:
47.....	1.7.1. المحطات الشمسية للأبنية المتعددة ذات نظام توزيع 4 أنابيب (4 pipe system):
49.....	1.7.2. نظام التوزيع الثنائي الأنابيب (2 pipe system)
51.....	1.8. شبكات التدفئة المناطقية المدعومة شمسياً:
54.....	1.9. تسخين المساح بالطاقة الشمسية:
57.....	1.9.1. حمل تدفئة حوض السباحة:
62.....	الفصل الثاني

64	2.1. مقدمة:
64	2.2. أنواع المجمعات المركزة للإشعاع الشمسي:
67	2.3. البارامترات المميزة:
67	2.3.1. مساحة الفتحة الشمسية (A_a)
67	2.3.2. زاوية القبول $2\theta_c$ (acceptance angle)
68	2.3.3. مساحة الماص/المستقبل (A_r)
68	2.3.4. معامل الإعتراض γ (Interceptance factor):
69	2.3.5. نسبة التركيز C:
73	2.3.6. درجة حرارة الماص الأعظمية:
75	2.4. تصنيف المركزات تبعاً للملاحقة الشمسية:
75	2.4.1. المركزات الشمسية الثابتة:
80	2.4.2. المركزات الشمسية الملاحقة للشمس على محور واحد:
84	2.4.3. المركزات الشمسية الملاحقة للشمس على محورين:
90	2.5. زوايا التتبع للمركزات الشمسية:
96	2.6. الأداء البصري للمجمعات المركزة:
98	2.6.1. التحليل البصري للمركزات الخطية ذات القطع المكافئ:
102	2.6.2. الخصائص البصرية للمركزات CPC :
109	2.6.3. الكفاءة البصرية:
113	2.6.5. المردود السنوي للاقط المركز:
115	2.7. الأداء الحراري للمجمعات المركزة للإشعاع:
129	2.7.1. التحليل الحراري لمركز شمسي حلقي قطعي (PRK):
132	2.8. التوجيه والطاقة الممتصة لمركزات CPC :
144	الفصل الثالث:
146	3.1. مقدمة :
146	3.1.1. طرق غير مباشرة للتحلية بالطاقة الشمسية:
147	3.1.2. الطرق المباشرة للتحلية بالطاقة الشمسية
147	3.2. مبدأ عمل التقطير الشمسي:

147.....	3.2.1. المقطر الصندوق:
150.....	3.3. الكفاءة الحرارية:
150.....	3.3.1. الكفاءة الحرارية اللحظية:
152.....	3.3.2. الكفاءة الحرارية الاجمالية:
153.....	3.4. انتقال الحرارة الأساسي في وحدة التقطير الشمسي:
154.....	3.4.1. انتقال الحرارة الخارجي:
154.....	3.4.2. انتقال الحرارة الداخلي:
159.....	3.4.3. معامل انتقال الحرارة الاجمالي:
164.....	3.4.4. ناتج التقطير:
167.....	3.5. النمذجة الحرارية Thermal Modelling
167.....	3.5.1. توازن الطاقة:
174.....	3.6. تأثير التصميم والبارامترات المناخية على أداء المقطر:
177.....	3.7. المقطرات الانتشارية:
178.....	3.7.1. التحليل الحراري للمقطر الانتشاري:
181.....	3.7.2. المقطرات الانتشارية ذات التأثيرات المتعددة:
183.....	3.7.3. مزايا المقطرات الانتشارية ذات التأثيرات المتعددة :
184.....	3.8. التناضح العكسي باستخدام الطاقة الشمسية
184.....	3.8.1. تعريف التناضح العكسي:
184.....	3.8.2. مفهوم التناضح العكسي:
185.....	3.8.3. مقارنة بين التناضح الطبيعي و التناضح العكسي
185.....	3.8.4. تقنية التناضح العكسي:
187.....	3.8.5. مزايا التناضح العكسي الإقتصادية:
187.....	3.8.6. الاختيار الجيد للغشاء:
189.....	3.9. المحطة الحرارية الشمسية
191.....	الفصل الرابع.....
193.....	4.1. الهدف من التجفيف
194.....	4.2. طرق التجفيف:
195.....	4.2.1. الطرق الرئيسية في التجفيف :
196.....	4.2.2. أنواع أنظمة التجفيف:

198.....	4.3. تجهيزات التجفيف:
198.....	4.3.1. المجففات الصينية المجففة:
199.....	4.3.2. مجففات رف الشفط (الفاكيوم) غير المباشرة:
199.....	4.3.3. مجففات الأنفاق المستمرة:
201.....	4.3.4. المجففات الدوّارة:
202.....	4.3.5. البراميل المجففة:
203.....	4.3.6. المجففات البخاخة:
204.....	4.3.7. تجفيف المحاصيل والحبوب:
204.....	4.4. التجفيف الشمسي للأغذية:
206.....	4.4.1. أسس التجفيف الشمسي للمحاصيل الزراعية:
208.....	4.4.2. أنواع المجففات الشمسية:
219.....	4.5. بارامترات هامة للتجفيف
219.....	4.6. الدراسة الفيزيائية للتجفيف:
225.....	4.6.1. مراحل التجفيف:
229.....	الفصل الخامس
231.....	5.1. البرك الشمسية:
231.....	5.1.1. مبدأ عمل البرك الشمسية:
232.....	5.1.2. أنواع البرك الشمسية:
235.....	5.1.3. الفكرة الأساسية للبركة الشمسية:
237.....	5.1.4. تطبيقات البرك الشمسية:
240.....	5.1.5. ميزات وسلبيات البرك الشمسية:
242.....	5.1.6. تحليل أداء تخزين الحرارة:
245.....	5.2. المدخنة الشمسية
245.....	5.2.1. المقدمة:
245.....	5.2.2. العناصر الأساسية للمدخنة الشمسية:
248.....	5.2.3. المبدأ الأساسي لعمل المدخنة الشمسية:
248.....	5.2.4. تقنية المدخنة الشمسية:

250.....	5.2.5. توازن الطاقة في المجمع:
252.....	5.2.6. مزايا ومساوئ المداخل الشمسية:
253.....	5.2.7. أنواع المداخل الشمسية:
266.....	الرموز والمصطلحات





المقدمة:

تعد الطاقة أحد أكبر التحديات التي تواجه البشرية في القرن الواحد والعشرين. وبدايةً من الثورة الصناعية في القرن الثامن عشر، كان الوقود الأحفوري، مثل الفحم والنفط والغاز الطبيعي، هي مصادر الطاقة الأساسية لكل شيء حيوي للمجتمع البشري: بدءاً من المحركات البخارية حتى محركات الديزل والاحتراق الداخلي، ومن الكهرباء حتى تدفئة وتبريد المباني، ومن الطهي وتسخين الماء والإضاءة حتى الأجهزة الكهربائية والإلكترونية المختلفة، هذا إلى جانب معظم وسائل النقل، ولكن مصادر الوقود الأحفوري التي تُعد صورة مخزنة عبر مئات الملايين من السنين من الطاقة الشمسية باتت تنفذ بسرعةٍ بسبب الاستخدام الزائد. علاوة على ذلك، أدى حرق تلك المصادر إلى الإضرار بالبيئة في كوكب الأرض، ومازال هذا يحدث حتى الآن.

أصبحت أزمة الطاقة من أهم المشاكل التي يواجهها العالم حالياً بسبب الزيادة الكبيرة والمستمرة في استهلاك الطاقة الذي يقابله احتياطي محدد من موارد الطاقة التقليدية فضلاً عن ارتفاع كبير في أسعار الوقود والمشاكل البيئية التي تسببها مصادر الطاقة التقليدية لذا عمد الباحثون إلى التفكير بتطوير مصادر جديدة وبديلة لها وتوجهت الأنظار إلى الطاقات المتجددة وعلى رأسها الطاقة الشمسية وبدأت البحوث والدراسات لمواجهة حقيقة نضوب الوقود التقليدي واستبداله بطاقة متجددة غير ناضبة وغير ملوثة للبيئة.

تعرف الطاقات المتجددة أنها تلك الطاقات التي تتولد بصورة طبيعية ومستدامة وتتميز أنها غير ناضبة ومتوفرة في الطبيعة بصورة غير محدودة و أحياناً محدودة ولكنها متجددة باستمرار، فضلاً على أنها نظيفة لا ينتج عن استخدامها أي تلوث بيئي، وتشمل هذه المصادر، الطاقة الشمسية التي تُعد المصدر الرئيس للطاقة على سطح الأرض وكذلك طاقة الرياح وطاقة المد والجزر الناتجة عن قوى التجاذب ما بين الأرض والقمر والشمس وطاقة الأمواج وطاقة التدرج الحراري في مياه المحيطات وطاقة الحرارة الجوفية وطاقة المساقط المائية، ويُصنف العلماء الطاقة الناتجة من حرق الفضلات الزراعية والمنزلية ضمن الطاقات المتجددة. وقد أدرك الإنسان أهمية مصادر الطاقات المتجددة وعلى رأسها الطاقة الشمسية.

استفاد الإنسان منذ القدم من طاقة الإشعاع الشمسي مباشرة في تطبيقات عديدة كتجفيف المحاصيل الزراعية وتدفئة المنازل، كما استخدمها في مجالات أخرى وردت في كتب العلوم التاريخية، فقد أحرق أرخميدس الأسطول الحربي الروماني في حرب عام 212 ق.م عن طريق تركيز الإشعاع الشمسي على سفن الأعداء بواسطة المئات من الدروع المعدنية. وفي العصر البابلي كانت نساء الكهنة يستعملن آنية ذهبية مصقولة كالمرايا لتركيز الإشعاع الشمسي للحصول على النار. كما قام العديد من العلماء أمثال لافوازييه باستخدام الطاقة الشمسية في صهر المعادن وطهي الطعام وتوليد بخار الماء وتقطير الماء وتسخين الهواء. لقد حاول الإنسان منذ فترة بعيدة الاستفادة من الطاقة الشمسية واستغلالها ولكن بقدر قليل ومحدود، ومع التطور الكبير في التقنية والتقدم العلمي الذي وصل إليه الإنسان فُتحت آفاقاً علمية جديدة في ميدان استغلال الطاقة الشمسية.

تعتمد كمية الطاقة الشمسية الساقطة في مكان ما على عوامل كثيرة منها الموقع الجغرافي وتحديد الوقت خلال النهار وفصول السنة ودرجة شفافية أو نقاوة الحالة الطبيعية للهواء، وكذلك تعيين التغير في درجات الحرارة والرطوبة بالإضافة إلى سرعة الرياح، وتعد هذه العوامل من العوامل الأساس المؤثرة في الطاقة الشمسية.

يمكن تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية وطاقة حرارية من خلال آليتي التحويل الكهروضوئي والتحويل الحراري للطاقة الشمسية، ويقصد بالتحويل الكهروضوئي تحويل الإشعاع الشمسي أو الضوئي مباشرة إلى طاقة كهربائية، أما التحويل الحراري فيتم باستخدام تجهيزات تقوم بتحويل الإشعاع الشمسي إلى حرارة ومن هذه التجهيزات المجمعات الشمسية، فإذا تعرض جسم داكن اللون ومعزول إلى الإشعاع الشمسي فإنه يمتص الإشعاع وترتفع درجة حرارته. يستفاد من هذه الحرارة في التدفئة والتبريد وتسخين المياه وتوليد البخار، كما تستخدم في تحلية المياه المالحة وتجفيف المحاصيل الزراعية و طهي الطعام، و في توليد الكهرباء وغيرها.

ورغم أن الطاقة الشمسية قد أخذت تتبوأ مكانة هامة ضمن البدائل المتعلقة بالطاقة المتجددة، إلا أن مدى الاستفادة منها يرتبط بوجود أشعة الشمس طيلة وقت الاستخدام

أسوة بالطاقة التقليدية، و هذا بالطبع لا يمكن لاحتجاب الشمس لفترات خلال اليوم وبسبب العوامل الجوية، كما أن الكمية المتوفرة أثناء النهار قد تفوق ما هو مطلوب أثناء تلك الفترة، وعليه يبدو أن المطلوب من تقنيات بعد تقنية وتطوير التحويل الكهربائي والحراري للطاقة الشمسية هو تقنية تخزين تلك الطاقة للاستفادة منها أثناء فترة غياب الإشعاع الشمسي. هناك عدة طرق لتخزين الطاقة الشمسية تشمل التخزين الحراري والكهربائي والميكانيكي والكيميائي.

تُعد أول خطوة في النجاح في استغلال الطاقة الشمسية هي الفهم الجيد لجوانبها العلمية، وقد بدأت بالكتاب الأول "أنظمة التسخين الشمسي" بشرح المبادئ الفيزيائية للإشعاع الشمسي والحديث عن مكونات النظام الشمسي و تصميمه، وأتابع في هذا الكتاب ما بدأته بالكتاب، ويتألف هذا الكتاب من خمس فصول ويلخص الفصل الأول نظام الهيدروليك والتحكم في الدارات الشمسية التي تؤمن التدفئة وتسخين المياه و تأمين المياه الساخنة للمسابح باستخدام اللواقط المسطحة الشمسية. يشرح الفصل الثاني المجمعات الشمسية المركزة للإشعاع الشمسي بكافة أنواعها: المركزات ذات حوض القطع المكافئ، والمركزات ذات القطع المكافئ والمركزات ذات جهاز الاستقبال المركزي المزود بالهليوستات، ومركز فريسنل، وكيفية حساب معامل الفقد الحراري الكلي من المجمع إلى الوسط المحيط وحساب الطاقة المفيدة والمردود البصري والحراري منها. ويتناول الفصل الثالث تحلية المياه بالطاقة الشمسية مع شرح مفصل عن أنواع المقطرات الشمسية والتحليل الحراري لكل منها وحساب ناتج عملية التقطير ومردود المقطر الشمسي. يتناول الفصل الرابع تجفيف المحاصيل الزراعية بالطرق التقليدية وبالطاقة الشمسية وشرح مفصل عن أنواع المجففات الشمسية ويقدم الفصل أيضاً دراسة فيزيائية عن عملية التجفيف الشمسي باستخدام المجمعات الشمسية الهوائية المسطحة لتسخين الهواء اللازم لعملية التجفيف. أما الفصل الخامس والأخير فيقدم شرح مفصل عن البرك الشمسية و استخداماتها في توليد الكهرباء وتحلية المياه، ويتناول الفصل أيضاً شرح مفصل عن المداخل الشمسية وأنواعها ودورها في توليد الكهرباء.

أقدم هذا الجهد المتواضع إلى الطلبة الأعزاء ليكون أحد الأسس في رفع المستوى العلمي لهم لمواكبة التقدم العلمي والصناعي العالمي. و أود أن أتقدم بالشكر الجزيل لكل من يقوم بقراءة الكتاب ويقدم لي تصويماً عما جاء فيه لأن الإنسان ينقصه الكثير مهما تقدم بالعلم، كما جاء في كتابه العزيز " وما أوتيتم من العلم إلا قليلاً " صدق الله العظيم. أود أن أشكر الفنانة المبدعة فاطمة ميّا لتقديم المساعدة في تعديل أشكال البحث الأول بما يتلائم مع شروط الطباعة بالأبيض والأسود، وشكر خاص لابنتي المهندسة تمارا لمساعدتها القيمة في تنسيق الكتاب. أهدي هذا الكتاب لأسرتي الصغيرة وأصدقائي الأعزاء وأخوتي الأكارم.

د. أمينة محمد فارس

2202-2021



الفصل الأول

الهيدروليك والتحكم في الدرات الشمسية

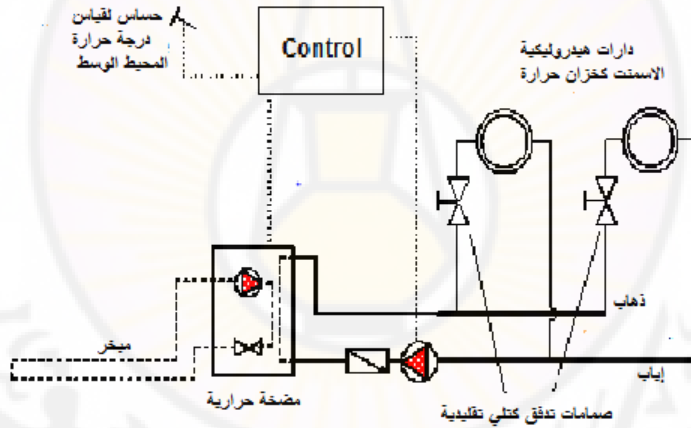


الهيدروليك والتحكم

1.1. الدارات الهيدروليكية لأنظمة التدفئة التقليدية:

1. نظام التدفئة الأرضية البسيط بدون تخزين حرارة الماء :

يتألف نظام التدفئة التقليدي البسيط (نظام تدفئة أرضية) المبين في الشكل (1.1.1) من مبخر ومضخة حرارية (heat pump) لتأمين مصدر الطاقة اللازم لنظام التدفئة، و هذه الدارة لا تحوي خزائناً لتخزين الحرارة بل تتم التغذية مباشرة إلى مكان استهلاك الحرارة وإنَّ الإسمنت المحيط بتجهيزات التدفئة الأرضية هو الذي يخزن الحرارة. تحوي الدارة نظام تحكم لتأمين درجات الحرارة المطلوبة وتشغيل المضخة عند اللزوم.



الشكل (1.1.1) المكونات الهيدروليكية لأنظمة التدفئة التقليدية، نظام التدفئة الأرضية البسيط بدون خزان حرارة

2. الدارات الهيدروليكية لأنظمة التدفئة التقليدية ذات مرجل يتحكم بالطاقة:

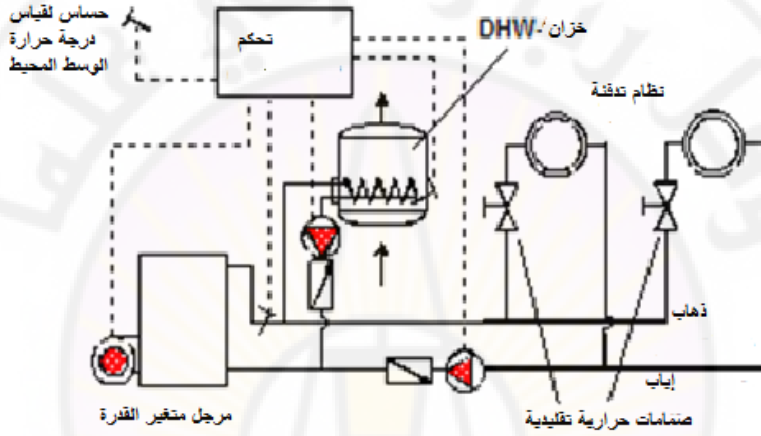
يتألف نظام التدفئة التقليدي المبين في الشكل (1.1.2) من مرجل متغير القدرة لتأمين مصدر الطاقة اللازم لنظام التدفئة ولتأمين مياه الاستخدام الساخنة، وهذه الدارة تحوي خزائناً فقط لتخزين المياه الساخنة للاستخدامات المحلية، أما بالنسبة للتدفئة فتتم مباشرة من المرجل المتغير القدرة إلى مكان استهلاك الحرارة. تحوي الدارة نظام تحكم لتأمين درجات الحرارة المطلوبة وتشغيل المضخات عند اللزوم.

و يمكن أن تكون المراحل في الشكل (1.1.2):

-أنظمة تدفئة مناطقية.

-مراحل متغيرة القدرة : (غاز ، نفط ، وقود حيوي % 25 - 100).

-مضخات حرارية (heat pump) متغيرة السرعة.



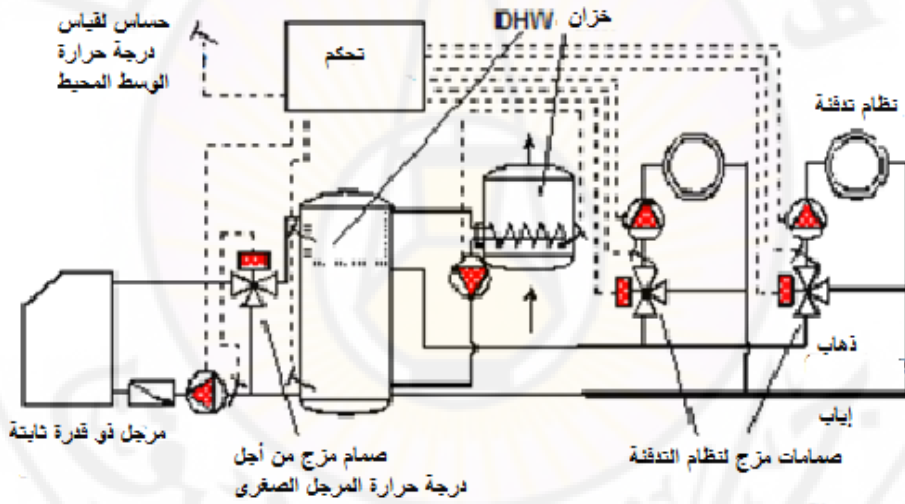
الشكل (1.1.2) النظام الهيدروليكي لأنظمة التدفئة التقليدية مع مرجل متغير القدرة

3. الدارات الهيدروليكية لأنظمة التدفئة التقليدية، المرجل ذو قدرة ثابتة:

يتألف نظام التدفئة التقليدي المبين في الشكل (1.1.3) من مرجل ثابت القدرة لتأمين مصدر الطاقة اللازم لنظام التدفئة ولتأمين مياه الاستخدام الساخنة، و هذه الدارة تحوي خزان تخزين رئيسياً لتخزين الحرارة القادمة من المرجل، وجود الخزان في الدارة يؤمن استقرار حراري لنظام التدفئة و للمياه الساخنة للاستخدامات المحلية، حيث يُترك منطقة في أعلى خزان التخزين يعادل حجمها كمية المياه الساخنة اللازمة للاستهلاك لأن درجة الحرارة المطلوبة للمياه الساخنة تكون أعلى من المطلوبة لنظام التدفئة. و لتأمين التدفئة يؤخذ الخط الذاهب إلى نظام التدفئة من الخزان في المنطقة الواقعة مباشرة تحت المنطقة المخصصة للمياه الساخنة في خزان التخزين، أما الخط العائد من نظام التدفئة فيعود إلى أسفل الخزان ليتم تسخينه ثانية من المرجل. يوجد في الدارة أيضاً خزان صغير لمياه

الاستخدام المحلية DHW يوضع في مكان الاستهلاك، حيث تسخن المياه في هذا الخزان عن طريق مبادل حراري يوضع في القسم السفلي من الخزان حاملاً معه حرارة المياه الساخنة من خزان التخزين الرئيسي. يتم تأمين الحرارة عن طريق مرجل ثابت القدرة. تحوي الدارة نظام تحكم لتأمين درجات الحرارة المطلوبة و تشغيل المضخات عند اللزوم. يمكن أن يكون الحراق في الشكل (1.1.3) بقدرة ثابتة مثل :

- مرجل ذي وقود صلب .
- مرجل ذي طاقة واحدة (غاز ، نفط ، وقود حيوي)
- مضخات حرارية (heat pump) ذات سرعة واحدة .



الشكل (1.1.3) النظام الهيدروليكي لأنظمة التدفئة التقليدية مع مرجل ثابت القدرة

يمكن حساب درجة حرارة الماء الخارج من المرجل بالمعادلة (1.1.1):

$$\dot{Q}_{Boiler} = \dot{M}_{H.sys} \cdot C_{P_{H.sys}} \cdot (T_{B,out} - T_{B,in}) \Rightarrow$$

$$T_{B,out} = T_{B,in} + \frac{\dot{Q}_{Boiler}}{\dot{M}_{H.sys} \cdot C_{P_{H.sys}}} \quad (1.1.1)$$

حيث:

$\dot{M}_{H.sys}$ [Kg/S] التدفق الكتلي من المائع الناقل للحرارة في النظام.

$C_{P,H,sys}$ [J/Kgk] السعة الحرارية النوعية للمائع الناقل للحرارة .

وظيفة خزان الحرارة :

- فصل التدفق الكتلي بين المرجل و نظام التدفئة .
- فصل درجة حرارة مخرج المرجل و درجة الحرارة الأمامية لنظام التدفئة .
- الحجم الساخن النوعي في أعلى جزء من الخزان من أجل ماء الاستخدام المحلي DHW .
- تعزيز زمن عمل المرجل (دوران أقل) .

مثال : احسب زمن عمل المرجل اللازم لتسخين الماء في الخزان إذا علمت أن:

$$V=0.2 \text{ m}^3 \quad * \text{ حجم الخزان}$$

$$\Delta T= 40 \text{ K} \quad * \text{ ارتفاع درجة الحرارة}$$

$$C_{P,H,sys.} = 1.16 \text{ [kWh/m}^3 \cdot \text{K]} \quad * \text{ السعة الحرارية النوعية للماء}$$

$$\dot{Q}_{boiler} = 10 \text{ kw} \quad * \text{ استطاعة تسخين المرجل}$$

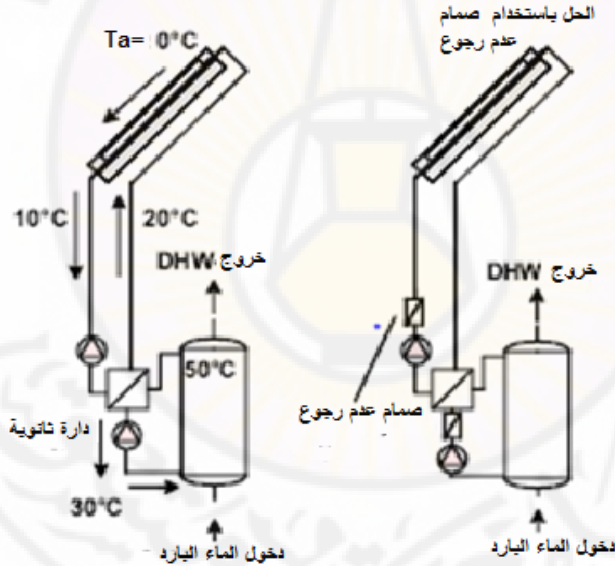
الحل:

$$t = (V \cdot \Delta T \cdot C_{pHsys}) / \dot{Q}_{boiler} = 0.9h \quad \text{الزمن اللازم للتسخين:}$$

1.2. القوانين العامة في الهيدروليكا الشمسي:

- يجب أن يحقق التصميم الهيدروليكي للنظام الشمسي العديد من المهام :
- يتم توزيع أكبر قدر ممكن من الريح الشمسي في الخزانات (أو في مكان تصريف الحرارة) بدون ضياع في الطاقة.
 - يجب أن تكون الضياعات الحرارية أقل ما يمكن .
 - يجب أن يوزع كل الحرارة المطلوبة إلى أماكن تصريف الحرارة (تدفئة المكان و المياه الساخنة المنزلية) .

- يجب أن يكون حجم التخزين الاحتياطي كافياً ليتم تسخينه بالسخان الإضافي ليؤمن زمن تشغيل كافياً (هذا الحجم يكون صغيراً من أجل حرّاقات الغاز وكبيراً من أجل حرّاقات الخشب).
- يجب أن تكون التكاليف الاستثمارية منخفضة .
- يتطلب مكاناً صغيراً .
- سهولة و وثوقية في التركيب (كلما كان أبسط كان أفضل).
- يمنع الدوران المحلي الطبيعي ليلاً، أنظر الشكل (1.2.1)، عن طريق المجمع الشمسي باستعمال صمامات عدم رجوع أو صمامات مغناطيسية تغلق عند انخفاض الطاقة.

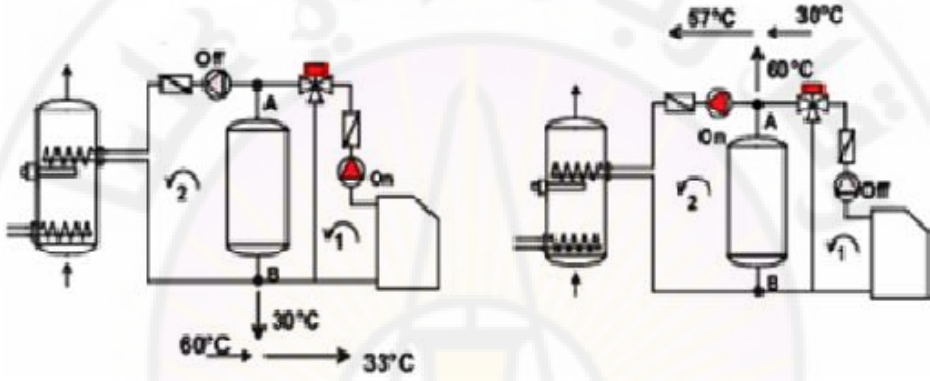


الشكل (1.2.1) تجنب التبريد الليلي للخرزان الحراري الطبيعي عبر المجمع الشمسي باستخدام صمامات أحادية الاتجاه (أو عدم الرجوع) (أو الصمامات المغناطيسية التي تغلق عند انخفاض الطاقة).

1.2.1. الفصل بين الدارات (Decoupling of circuits)

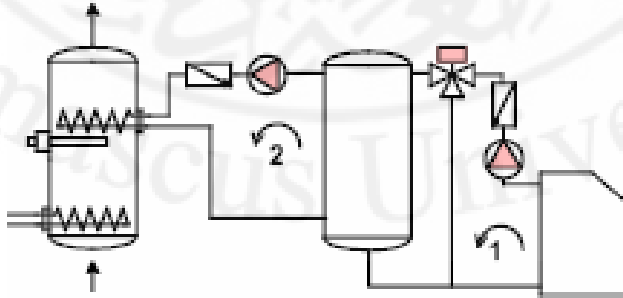
يحصل غالباً هذا في الدارات الهيدروليكية، عندما تصبح الأنابيب ساخنة و لا يوجد جريان. و هذا يمكن أن يحدث بسببين:

- الدوران الداخلي في الأنبوب من الخزان الساخن.
- دوران الماء في الدارة غير مباشر بواسطة مضخة في دارة أخرى. يحصل هذا إذا كانت الدارات المختلفة غير منفصلة هيدروليكياً و تستطيع المضخة لإحدى الدارات دفع التدفق الكتلي في الأنبوب الآخر، وحتى عندما لا تعمل المضخة في الدارة الأخرى، أنظر الشكل (1.2.2).



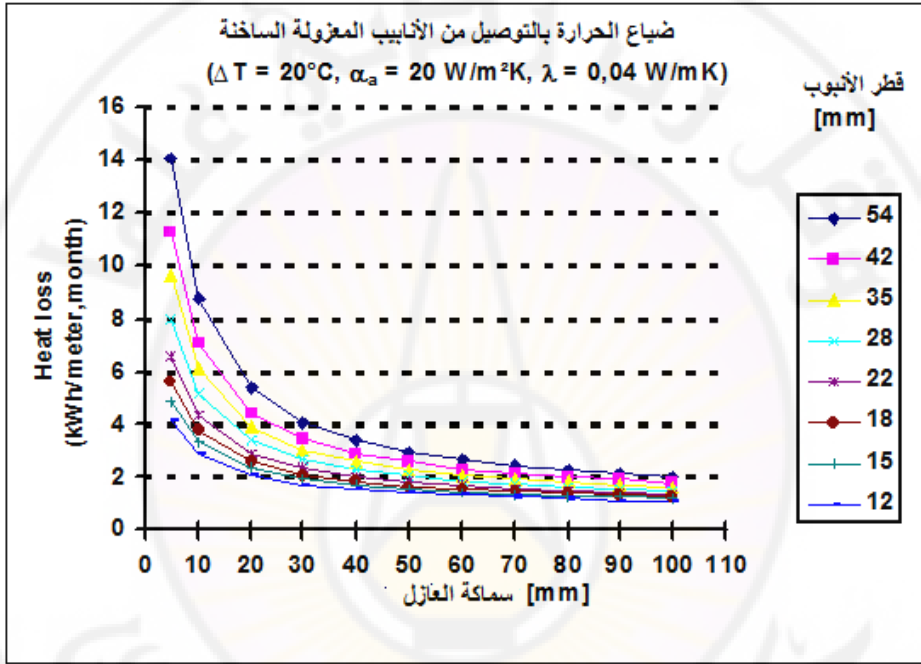
الشكل (1.2.2) نظام سيئ: الدارتان غير مفصولتين، تشغيل إحدى الدارات يسبب تدفق السوائل غير المرغوب فيها في الدارة الأخرى

يبين الشكل (1.2.3) الحل للمشكلة المبينة بالشكل السابق: تفصل الدارات الهيدروليكية لتجنب تسخين الأنابيب غير المرغوبة عن طريق تدوير الماء الساخن. يجب تجنب تسخين مثل هذه الأنابيب بدون عمل الذي يسبب ضياعات حرارية.



الشكل (1.2.3) فصل الدارات الهيدروليكية يمنع التدفقات الحرارية غير المرغوب فيها

لتوضيح تأثير مقدار هذه الضياعات أنظر الشكل (1.2.4) الذي يعطي الضياعات الحرارية الشهرية لمثل هذه الأنابيب الساخنة حيث تكون هذه الأنابيب معزولة بسماعات عزل مختلفة عند درجة حرارة 20°C أعلى من درجة حرارة الوسط المحيط .



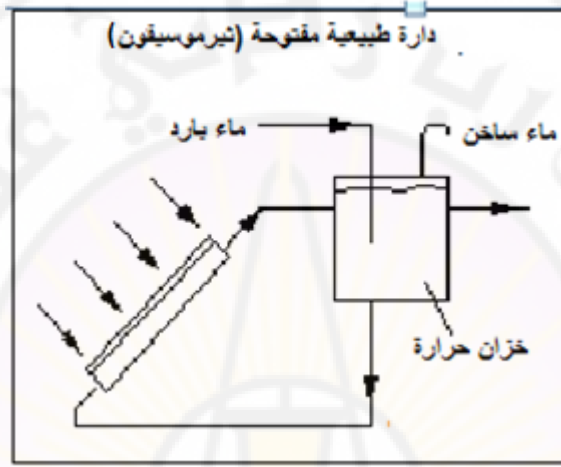
الشكل (1.2.4) ضياع الحرارة للأنابيب ذات سماكة العزل المختلفة مع ارتفاع درجة الحرارة 20°C مقارنة بالبيئة المحيطة

3.1 تجهيزات الدوران الطبيعي في الأنظمة الشمسية:

1. أنظمة الدوران الطبيعية المفتوحة:

يبين الشكل (1.3.1) نظام دوران طبيعي مفتوح، تعتمد أنظمة الدوران هذه على المجمع و التدفق في الأنبوب الذهاب و الراجع ويكون الخزان مفتوحاً تحت الضغط الجوي. السبب الرئيسي لهذا الدوران الطبيعي هو تناقص كثافة السائل بزيادة درجة الحرارة. مثال على ذلك، كثافة الماء عند الدرجة 20°C هي 998 kg/m^3 و عند

الدرجة $80 [^{\circ}\text{C}]$ فقط 972 kg/m^3 . هذه الاختلافات في الكثافة بين السائل الساخن في المجمع و السائل البارد في الخزان و أنبوب تدفق المجمع يحقق الدوران ضمن النظام بشرط أن يتوضع الخزان ذو الوسيط الأبرد فوق المجمع الشمسي.



الشكل (1.3.1) نظام تسخين شمسي لمياه الاستخدام المحلي طبيعي مفتوح

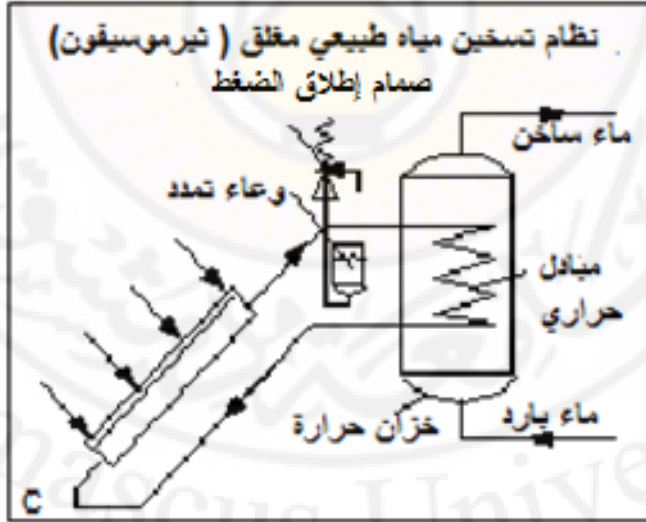
و يعارض القوى الدافعة لهذه الاختلافات في الكثافة هبوط الضغط الناتج عن مقاومة الأنابيب. يكون رفع الضغط و هبوطه الناتج عن التدفق نفسه مستقرًا. و هذا يؤدي إلى تدفق كميات كبيرة من السوائل. إذا ازدادت شدة الإشعاع الشمسي، ازدادت درجة حرارة مخرج المجمع الشمسي أيضاً، و بالتالي يزداد فرق درجات الحرارة بين الخزان و المجمع، و يزداد التدفق الكتلي، و ينتقل معه مقدار إضافي من ناقل الحرارة إلى الخزان و يتحرر ضمن وسيط التخزين. و نتيجة لذلك تنخفض درجة الحرارة في المجمع مرة أخرى. لذلك التحكم بهذا النظام يكون ذاتياً لأنه في شكله الأساسي يمكن أن يعمل بدون حساسات و تجهيزات تحكم.

يستخدم نظام الدوران الطبيعي المفتوح نفس السائل الذي يتدفق ضمن المجمع و يمر مباشرة إلى المستهلك. و بما أنه لا يوجد بشكل عام مخاوف من الصقيع في البلدان

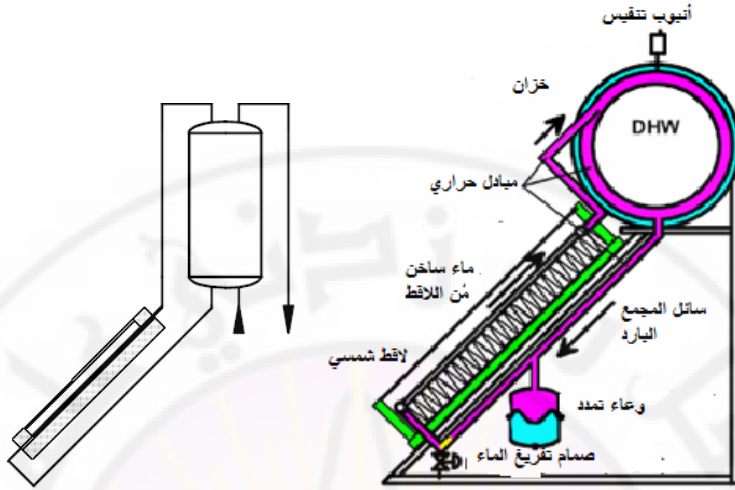
الدافئة نوعاً ما، فإنه لا يتجمد المائع الناقل للحرارة داخل دائرة المجمع الشمسي. و يجب أن تكون دائرة المجمع مقاومة للتآكل وذلك باستعمال ماء الشرب ليتدفق خلالها.

2-نظام DHW باستخدام نظام الدوران الطبيعي المغلق:

يبين الشكل (1.3.2) نظام دوران طبيعي مغلق. لكي نمنع التجمد و التآكل، يمكن إغلاق دائرة المجمع في أنظمة الدوران الطبيعية و ذلك بوضع مبادل حرارة بين دائرة الوسيط الناقل للحرارة في المجمع و بين دائرة سائل التخزين في الخزان الرئيسي. و بما أن الدارة معزولة عن البيئة المحيطة، فهي تكون تحت ضغط عظيم عادةً. يجب وضع وعاء تمدد و صمام تحكم بالضغط داخل الدارة الرئيسية لكي تعمل هذه الدارة بأمان. إذا استعملت مثل هذه الأنظمة في مناطق فيها مخاطر من حدوث التجمد، فيجب استخدام ناقل حرارة مقاوم للتجمد و يتم حماية الخزان و الأنابيب الناقلة للماء الساخن و البارد من الصقيع.



الشكل (1.3.2) نظام تسخين شمسي لمياه الاستخدام المحلي طبيعي مغلق



الشكل (1.3.3) أنظمة تسخين شمسية للمياه ذات دوران حملي طبيعي مغلق

تبنى معظم تجهيزات DHW الحرارية الشمسية وفق أنظمة الدوران الطبيعية المغلقة. يبين الشكل (1.3.3) نظاماً مشابهاً مؤلفاً من هيكل معدني يحمل المجموع الشمسي و خزان الماء (ذو محور أفقي أو شاقولي) وكل الأجزاء الضرورية. وهو مصنع مسبقاً و يمكن تركيبه بسهولة على سطح البناء. حيث يدخل إلى داخل البناء أنابيب الماء الساخن و البارد فقط. كما أنه لا يحتاج النظام للكهرباء لعدم الحاجة للمضخة أو التحكم. يصمم الخزان على الغالب على شكل فراغ حلقي يحيط بوعاء يحتوي الماء المنزلي الساخن و مائع المجموع يطوف في الفراغ الحلقي المحيط بهذا الوعاء .

السيئة الوحيدة لدارات الدوران الحملي الطبيعي، أن دارة المجموع لا يمكن إيقافها عندما يصل ماء الخزان إلى درجة حرارته العظمى. و إذا بقيت الشمس في حالة سطوع فإن درجة حرارة ماء الخزان سترتفع حتى يبدأ بالغليان. يتواصل الغليان طالما أن الشمس مشرقة وبالتالي يجب تثبيت صمام للتحكم بالضغط ليحرر البخار في دارة الماء. و الحل البسيط الوحيد لهذه المشكلة، هو استعمال مجمعات رخيصة ذات درجة ركود منخفضة (يعني مجمعات بسطوح غير انتقائية). يبين الجدول (1.3.1) أقطار الأنابيب وسماكة العازل لنظام تسخين شمسي طبيعي مغلق (ثيرموسيفون).

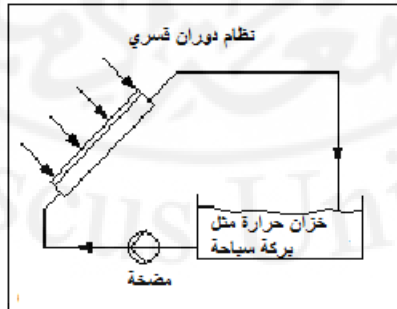
الجدول (1.3.1) أقطار الأنابيب و سماكة العازل لنظام تسخين شمسي طبيعي مغلق (ثيرموسيفون)

مساحة الفتحة الشمسية لصف اللواقط الشمسية m ²	قطر الأنبوب الخارجي Mm	سماكة الأنبوب mm	سماكة طبقة واحدة من العازل mm
1 ≤ and < 2	15 ± 1	1	20 ± 2
2 ≤ and < 6	18 ± 1	1,5	30 ± 2
6 ≤ and < 10	22 ± 1	1,5	39 ± 2

1.4. تجهيزات DHW ذات الدوران القسري في الأنظمة الشمسية:

1- أنظمة الدوران القسرية المفتوحة:

يبين الشكل (1.4.1) نظام دوران قسري مفتوح و يستخدم عندما تكون أماكن استهلاك الحرارة (الخزان الحراري، برك السباحة، .. إلخ) لا يمكن تثبيتها في مكان أعلى من مستوى المجمعات الشمسية، تتم عملية الدوران لنقل الحرارة بإدخال المضخة إلى الدارة. إنَّ ميزة تركيب المجمعات وأماكن استهلاك الحرارة منفصلة عن بعضها البعض لها أهميتها في تسخين برك السباحة المكشوفة حيث توزع المجمعات الشمسية على السطوح أو المواقع المكشوفة فوق أماكن استهلاك الحرارة.

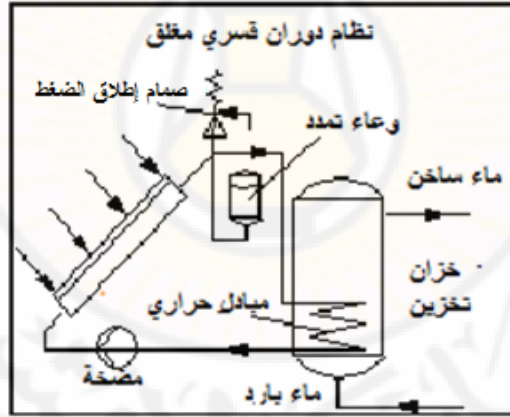


الشكل (1.4.1) نظام تسخين شمسي للمياه قسري مفتوح

إذا انخفضت حرارة المائع في المجمعات الشمسية تحت درجة الحرارة في أنابيب دارة المجمع الشمسي، فإن اتجاه الدوران ربما ينعكس خلال الليل في حال كانت المضخة متوقفة. في هذه الحالة يندفع السائل البارد للأسفل من المجمع ويدفع المائع الساخن من الخزان وناقل الحرارة على التوالي. و يمكن منع ذلك مثلاً بتركيب صمام عدم رجوع على أنبوب التدفق الراجع من المجمع .

2-أنظمة الدوران القسرية المغلقة:

يبين الشكل (1.4.2) نظاماً لتسخين المياه شمسياً قسرياً و مغلقاً لأنه في أنظمة الدوران القسرية المفتوحة يكون عادة وسيط التدفق خلال دارة المجمع هو الماء العادي. لذلك فإن هذه الأنظمة معرضة لنفس مخاطر التجمد و التآكل كأنظمة الدوران الطبيعية المفتوحة. لتجنب التجمد يتم إحكام الدارة القسرية و استخدام مائع مقاوم للتجمد ضمنها.



الشكل(1.4.2) نظام تسخين شمسي للمياه قسري مغلق

مفهوم أنظمة الدوران القسرية المغلقة هو الحل الأكثر استخداماً عملياً في أغلب البلدان الباردة. إذا كان الخزان مثبتاً داخل الأبنية فإن المجمع الشمسي يثبت عادةً على السطح، حيث تنتقل الحرارة بشكل طبيعي من دارة المجمع الشمسي إلى الخزان الحراري في القبو، بشكل مشابه لأنظمة الدوران الطبيعية المغلقة، و يتطلب ذلك وجود وعاء التمدد

وصمام تحكم بالضغط. بالإضافة لذلك، يجب تثبيت صمام عدم رجوع كما في نظام الدوران القسري المفتوح.

1.5. استراتيجية التحكم بنظام التسخين الشمسي:

للتحكم في عمل نظام التسخين الشمسي، أي متى يجب أن تدور المضخة لتدوير الوسيط الناقل للحرارة بين خزان التخزين و صفوف المجمعات الشمسية، يستخدم حساسين لقياس درجة حرارة على الأقل:

- الأول في المجمع (قرب مخرج المجمع (T_{col})).
- الثاني في الخزان (قرب المخرج إلى المجمع).

-إذا كانت درجة حرارة مخرج المجمع أكبر من درجة حرارة أسفل الخزان بحوالي:
[°C] (5-10) فيعطى أمر دوران المضخة من نظام التحكم.

-If $T_{col} > (T_{store} + 5 - 10[°C]) \Rightarrow \text{Start}$

-أما إذا كانت درجة حرارة مخرج المجمع أكبر من درجة حرارة أسفل الخزان بحوالي:
(2-3 °C) فقط فيعطى أمر توقف المضخة من نظام التحكم وذلك لتجنب تبريد المجمعات الشمسية بماء الخزان ولتجنب صرف الكهرباء لتدوير المضخة.

-If $T_{col} > (T_{store} + 2 - 3[°C]) \Rightarrow \text{Stop}$

1.6. الأنظمة الشمسية المركبة (DHW + space heating)

يغذي النظام الشمسي المركب (Solar Combisystems) كلاً من نظامي التدفئة وتسخين مياه الاستخدام المحلي (DHW)، حيث يتألف من المجمعات الشمسية و أوعية التخزين و مبادلات حرارية و مجموعة المضخة (الصمامات و حساسات الحرارة و مقياس الضغط و وعاء التمدد و صمام الأمان) و نظام التحكم، و كذلك يتضمن نظام توزيع الحرارة. الخزانات الحرارية هي أحد العناصر الأساسية في الأنظمة المركبة. يظهر الشكل (1.6.1) مبدأ النظام الشمسي المركب مع استعمال الماء كوسيط تخزين. و فيما

يلي يتم تقديم بعض سمات التصميم لوصلات الأنابيب لمختلف الخزانات الحرارية و مصادر الاستهلاك و هي موصوفة لتظهر تعقيد مثل هذه الأنظمة.



الشكل (1.6.1) مناطق لتخزين الماء الساخن لنظام التسخين الشمسي المركب

و يغذى من الأسفل بمياه التغذية الرئيسية الباردة. يُخصص ثلث الخزان السفلي ليسخن عن طريق المجمعات الشمسية لأن المياه الساخنة تقل كثافتها و بالتالي تنتقل إلى الأعلى بالتناقل و بذلك يتم المحافظة على مياه الخزان بالأسفل باردة نوعاً ما لكي تعمل المجمعات الشمسية بكفاءة أعلى، و يخصص النصف العلوي من الخزان للتسخين الإضافي من المرجل لكي يتم تأمين درجة الحرارة المناسبة لدارة التدفئة و للمياه الساخنة، و يتم سحب المياه الساخنة DHW من أعلى الخزان، أما نظام التدفئة فتتم تغذيته من المنطقة الواقعة تحت المنطقة المخصصة لـ DHW، أما الخط العائد من نظام التدفئة فيتم وصله في الثلث السفلي من الخزان تحت الخط العائد من المجمعات الشمسية لكي تتم إعادة تسخينه من المجمعات الشمسية، و إذا تطلب تسخيناً إضافياً فيتم تسخينه من السخان الإضافي.

1.6.1. الوصف العام لأجزاء النظام الشمسي المركب:

1. المجمع الشمسي (Solar Collector) :

يجب أن يبقى مدخل المجمع الشمسي بارداً دائماً قدر الإمكان، لكي يبقى مردوده مرتفعاً قدر الإمكان، لذلك يثبت أنبوب التوصيل إلى المجمع الشمسي من الأسفل. و يتغير ارتفاع دخول الأنابيب العائد من المجمع الشمسي إلى الخزان مع اختلاف التطبيقات. يكون هذا المدخل من أجل التطبيقات ذات التدفق المرتفع (ارتفاع درجة الحرارة الأعظمي في المجمع الشمسي حوالي 10°C) في الجزء السفلي من الخزان لكي يسخن الخزان ببطء من الأسفل إلى الأعلى. و يكون المدخل دائماً من أجل التصاميم ذات التدفق المنخفض (ارتفاع درجة الحرارة الأعظمي في المجمع الشمسي حوالي 40°C)، في الأعلى عند درجة حرارة مساوية لدرجة حرارة مخرج المجمع الشمسي، و هذا يُعالج بأجهزة التطبيق الحراري .

2. المسخنات الإضافية (Auxiliary heater) :

- يجب أن يكون دخول الأنابيب القادم من السخان الإضافي على الجزء العلوي من الخزان. يجب أن يُراعى فيه عدة جوانب لتحديد مكان نفاذ هذا الأنبوب:
- يجب بقاء كمية كافية من الماء الساخن في الخزان ليلبي احتياجات مركز استهلاك الحرارة. و تعطى ذروة الاستهلاك الحراري للطاقة لحاجة عائلة واحدة أو اثنتين لـ DHW (بما فيها الكمية اللازمة للحمام)، لذلك يمكن حساب الحجم من استطاعة السخان الإضافي. بالإضافة لذلك ربما يتم تقديم الحرارة من السخان الإضافي إلى نظام التدفئة بالإضافة إلى نظام DHW، و لذلك يجب أن يكون مخرج هذا الأنبوب تحت مخرج أنبوب الـ DHW ومخرج أنبوب التدفئة.
 - يحتاج السخان الإضافي إلى زمن تشغيل أصغري، و لذلك يجب أن يسمح حجم السخان الإضافي بين فتحة الدخول والخروج بزمن التشغيل الأصغري هذا.
 - يجب أن يكون مخرج السخان الإضافي مرتفعاً قدر الإمكان لكي يترك حجماً كبيراً قدر الإمكان للمجمع الشمسي.

3. المياه الساخنة المنزلية (DHW):

يحتاج مخرج المياه الساخنة المنزلية DHW إلى أعلى درجة حرارة من النظام المركب 60°C ، لذلك يوضع عند قمة الخزان. أما أنبوب الماء العذب التعويضي (أو الماء من المبادل الحراري لإنتاج DHW) فهو الجزء الأبرد، و لذلك يوضع في الأسفل. يجب أن يبقى الحجم بين مخرج نظام التدفئة و مخرج نظام DHW كبيراً كفاية لضمان تأمين الكمية المطلوبة من DHW (يعني حوالي 200L عند الدرجة 40°C من أجل الحمام).

4. نظام التدفئة (Heating system):

يتراوح مجال درجات حرارة نظام التدفئة بين درجة حرارة الماء العذب ودرجة حرارة DHW. لذلك تتوضع المنطقة المخصصة للتدفئة في وسط الخزان، و تكون هي المصدر الرئيسي لاستهلاك الحرارة خلال فصل التدفئة، و لذلك يبقى هذا الحجم كبيراً نسبياً. يوجد العديد من المكونات الأخرى إلى جانب الخزان و يجب أن تكون مصممة بشكل صحيح. وقد طرأت مؤخراً بعض التطورات الحديثة على الدارات التي تكون مساحة مجمعاتها الشمسية أكبر من $(8-12\text{m}^2)$ من أجل أن يكون تركيبها أسرع و تصميم المجمع يكون ملائماً لمقاومة الركود و المضخات أكثر كفاءة.

5. ضبط الأنظمة الشمسية المركبة: Control of a solar combisystems:

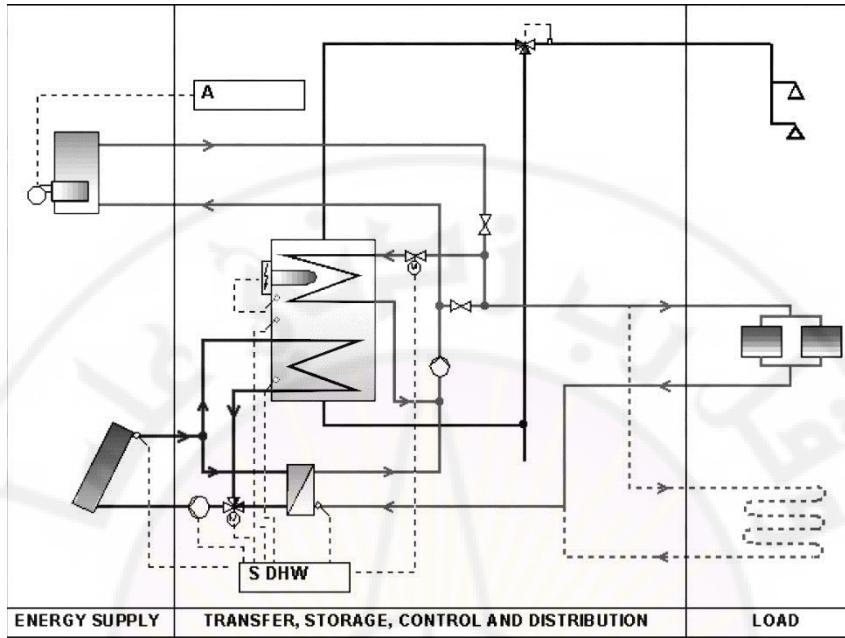
- يجب أن تكون درجة الحرارة العظمى المطلوبة من السخان الإضافي منخفضة قدر الإمكان (حسب حاجة المستهلك) لتقليل استهلاك الوقود الأحفوري.
- يجب أن تكون درجة الحرارة العظمى المطلوبة لخزان مياه الاستخدام المنزلية $\text{DHW} > 65^{\circ}\text{C}$.
- إذا كان خزان مياه الاستخدام المنزلي DHW أكبر من 400L : يجب أن تكون درجة حرارة كامل الخزان ليوم واحد أعلى من 60°C (من شروط legionella المثالية).

- يجب أن تكون درجة حرارة خزان التسخين الشمسي $> 95[^\circ\text{C}]$ (لتجنب الغليان).
- يجب أن تعمل المجمعات الشمسية بنظام التدفق المنخفض عند استخدام أجهزة التطبيق الحراري في خزانات التطبيق الحراري (حوالي 15 L/h.m^2 تبعاً لمساحة المجمع الشمسي).
- يفضل نظام التدفق المرتفع عندما تستخدم المبادلات الحرارية الشمسية الداخلية بدون أجهزة التطبيق الحراري (حوالي 50 L/h.m^2 ، تبعاً لمساحة المجمع).
- في حال وجود خزانين في النظام : يُحدد التحكم أيّ خزان سيعبأ أولاً من المجمع الشمسي، والطريقة الأفضل للتعبئة:
 - فترة عدم التدفئة: يعبأ خزان DHW أولاً.
 - فترة التدفئة: يعبأ الخزان ذو درجة الحرارة الأدنى.

1.6.2 الدارات الهيدروليكية الشمسية:

1.6.2.1 الأنظمة الشمسية المركبة الصغيرة:

يظهر الشكل (1.6.2) مثلاً عن الأنظمة الشمسية المركبة الصغيرة. هذا النظام مستمد من النظام القياسي لتأمين الماء المنزلي الساخن، لكن ستكون مساحة المجمعات أكبر لتأمين جزء من متطلبات التدفئة المركزية الموجودة قبل تركيب النظام الشمسي. يتم الوصل بين نظام التدفئة القديم والنظام الشمسي الجديد عن طريق مبادل حراري خارجي يتضمن خطأ راجعاً إلى دارة التدفئة المركزية. الخزّان في النظام الشمسي معد فقط لتحضير DHW، عن طريق مبادلين حراريين مغموسين: أحدهما شمسي في أسفل الخزان، و الآخر من السخان الإضافي في أعلى الخزان. يقوم الصمام الثلاثي بتوجيه المائع المضاد للتجمد القادم من المجمع إما إلى المبادل الحراري لـ DHW ، أو إلى المبادل الحراري الخارجي للتدفئة المركزية.



الشكل (1.6.2) مثال عن الدارات الهيدروليكية الصغيرة

- يمكن أن يقدم سخّان كهربائي مغموس حرارة إضافية للماء الساخن في الصيف ممّا يسمح بإمكانية إيقاف مرجل دائرة التدفئة المركزية.

- استراتيجية التحكم بالدائرة (Control strategy):

لا يقوم جهاز التحكم بإدارة الجزء المساعد للنظام. تعمل المضخة في دائرة المجمع الشمسي طالما أن درجة الحرارة عند مخرج المجمع أعلى إما من درجة حرارة الخط الراجع من دائرة التدفئة المركزية أو من درجة الحرارة أسفل الخزان. يعمل الصمام الثلاثي على إيصال الطاقة الشمسية إلى دائرة التدفئة المركزية، و هذا يتم عندما تكون درجة الحرارة عند مخرج المجمع أقل من درجة الحرارة في أسفل الخزان، أو عندما يصبح الخزان ساخناً كفاية (درجة الحرارة عند قمة الخزان أعلى من درجة الحرارة المحددة). عندما تصبح درجة حرارة الماء الساخن المنزلي منخفضة جداً، تُقدّم حرارة إضافية من المرجل إلى الخزان عن طريق صمام ثنائي.

- سمات نوعية للدارة (Specific aspects):

نظراً لعدم وجود تخزين في المكان المدفأ، فإن الريح الشمسي سيزيد من التغيرات في درجة الحرارة الداخلية التي يتحملها القاطنون. يلعب البناء نفسه في هذه الحالة دوراً قليلاً أو كبيراً في تخزين الحرارة في الفراغ، لذلك سيعمل النظام بشكل أفضل عندما يعمل وفق نظام انبعاث الحرارة باستطاعة عالية (مثل التدفئة الأرضية).

1.6.2.1. نظام التدفئة الأرضية كخزان:

(Floor heating system as storage)

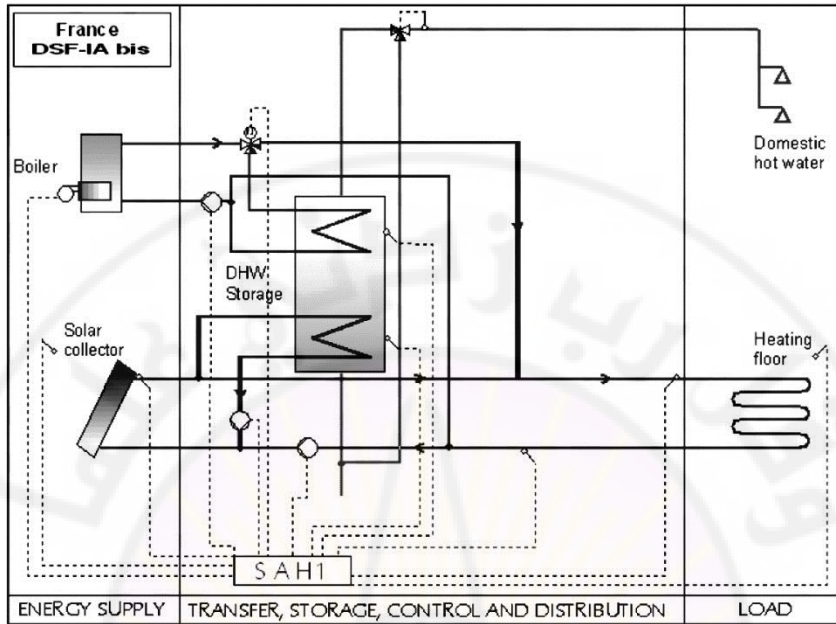
يوضح الشكل (1.6.3) النظام الفرنسي المركب، وهو تصور متقن لمفهوم التدفئة الأرضية بالطاقة الشمسية المباشرة حيث يستفاد من كتلة البناء كخزان حراري بدلاً من خزان الماء، و يصمم هذا النظام من أجل مساحة مجمعات صغيرة نسبياً.

- فلسفة إدارة الحرارة بالدارة:

تستخدم الدارة الشمسية لإعداد المياه الساخنة المنزلية DHW ودارة التدفئة باستخدام التدفئة الأرضية DSF: إذا كانت درجة الحرارة عند مخرج المجمع الشمسي أعلى من درجة الحرارة أسفل الخزان، ستبدأ المضخة في الدارة الشمسية DHW بالعمل، و يمكن أن تعمل المضخة الشمسية الثانية في دارة التدفئة الأرضية، حالما تلاحظ حاجة التدفئة من قبل جهاز التحكم. إذا ستعمل المضخة بشكل فعلي عندما تصل درجة الحرارة الساخنة في المجمع الشمسي إلى مستوى محدد مبرمج من قبل جهاز التحكم. إذا لم تكن هي الحالة، فإن دارة المرجل الإضافي ستعمل بدلاً منها . يمكن أن تعمل دارات DHW و DSF الشمسية حالاً إذا كان الإشعاع الشمسي مرتفعاً كفاية، و هي تعتمد أيضاً على درجة DHW في الخزان و درجة حرارة المدخل لـ DSF .

- خصوصية النظام الشمسي:

يمكن أن تؤخذ الطاقة الإضافية للتدفئة الأرضية من المرجل بالإضافة إلى الطاقة القادمة من المجمع الشمسي لكن ليس بشكل متواقت، و يبقى التحدي في استراتيجية التحكم هو تحسين الإنتاج الشمسي إلى أفضل مستوى يحقق راحة المستخدم.



الشكل (1.6.3) نظام تدفئة أرضية مركب (نظام فرنسي)

-تحضير مياه الاستخدام الساخنة DHW :

يسخن الماء في الجزء السفلي من الخزان عن طريق الدارة الشمسية وتستخدم الطاقة الإضافية للوصول إلى درجة الحرارة المحددة لـ DHW من قبل النظام الإضافي (المرجل) في أعلى منطقة من الخزان. تضبط درجة حرارة خزان الماء المنزلي (أعلى الخزان) بواسطة ثيرموستات عليا و دنيا مربوطة مباشرة، و عندما ترتفع إشارة الثرموستات، تكون درجة حرارة المرجل ملائمة لدرجة حرارة مستخدم الـ DHW .

-مصدر الطاقة المساعد في الدارة:

يُستعمل الغاز عادة كطاقة مساعدة، و يمكن أيضاً أن يستعمل النفط و مرجل الخشب و أنظمة مساعدة أخرى.

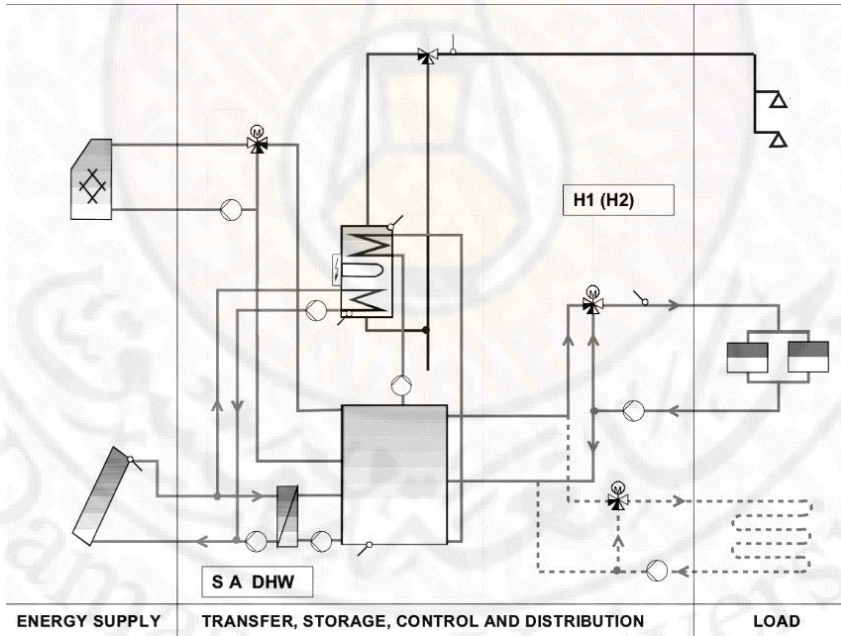
1.6.2.3. نظام الخزائين (خزان DHW وخزان التدفئة) :

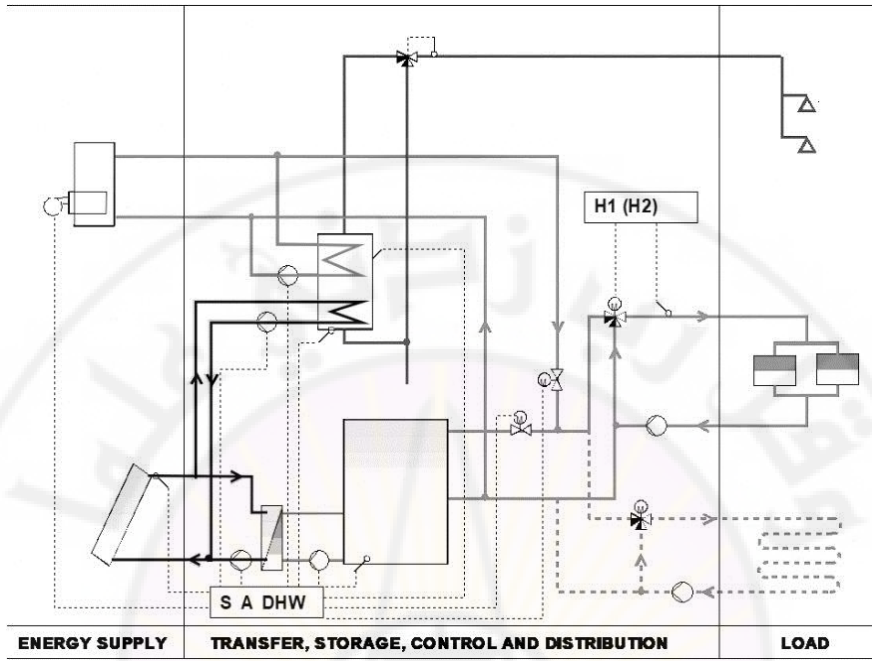
يوضح الشكل (1.6.4) نظام دائرة تدفئة شمسية مركباً نموذجياً أولاً، حيث أضيف التسخين الشمسي إلى نظام التدفئة، و يوجد في الدارة خزانان منفصلان الأول خزان DHW و الآخر خزان للتدفئة.

إن النظام غير محدد بمساحة مجمع شمسي أو حجوم خزانات تخزين.

- المزايا الرئيسية للدارة:

يمثل هذا النظام مجموعة من الأنظمة المختلفة. يمكن تغيير كل البارامترات الهندسية، و يمكن استعمال المبادلات الحرارية الداخلية و الخارجية أو أجهزة التطبيق حسب رؤية المصمم.





الشكل (1.6.4) نظام تسخين شمسي مركب بخزانين مع مرجل ثابت القدرة (في الأعلى) ومرجل متغير القدرة (في الأسفل)

يمكن استعمال نوعين من المراجل المساعدة، مراجل ذات طاقة متغيرة أو ثابتة. في الحالة الأولى يمكن أن يتصل المرجل مباشرة بدارة الانبعاث الحراري (التدفئة الأرضية)، و في الحالة الثانية يستخدم خزان التدفئة كخزان مؤقت (buffer tank) للمرجل .

-فلسفة إدارة الحرارة بالدارة:

يُوزَّع المجمع الشمسي الحرارة في الشتاء إلى الخزان الأبرد، و في الصيف، تعطى الأولوية إلى خزان DHW، و الذي يسخن إلى درجة الحرارة الأعظمية المسموحة، و من ثم يسخن خزان التدفئة إذا كان مطلوباً.

إذا استعمل مرجل مساعد متغير القدرة، توزع الحرارة مباشرة من المرجل إلى دارة التدفئة طالما أن درجة الحرارة عند أعلى خزان التخزين هي أقل من الحرارة المطلوبة لدارة التدفئة، خلافاً لذلك يتم إيقاف تشغيل المرجل وتغذى الحرارة مباشرة من خزان التدفئة.

-السمات النوعية للدارة:

يمنع التسخين الزائد عن طريق استخدام وعاء تمدد كبير .

-تأثير مصدر الطاقة المساعد على تصميم النظام وأبعاده:

يعدّل المخطط الهيدروليكي إذا استخدم مرجل ذو وقود صلب كمصدر طاقة مساعد كالتالي: توزع الحرارة المنتجة من قبل المرجل دائماً إلى خزان التدفئة من أجل فصل المرجل عن تدفق كتلة الحمل الحراري و لضمان زمن عمل كافٍ للمرجل، و تؤمن الطاقة الحرارية المساعدة اللازمة لخزان DHW من خزان التدفئة، و السخان الكهربائي الإضافي يستخدم في الصيف حتى يمكن إيقاف عمل المرجل.

1.6.2.4. نظام خزان في الخزان (Tank in Tank System):

يوضح الشكل (1.6.5) واحداً من الأنظمة التخزينية الأولية في السوق المنتجة من قبل شركة سويسرية (Jenni 1993). يسمح خزان DHW بشكله المميز بالتسخين المسبق لمياه الاستخدام الساخنة المنزلية DHW في أسفل الخزان والتسخين اللاحق بحجم معين في الجزء العلوي من الخزان حيث يُبنى هذا الخزان ضمن خزان التدفئة، و تكون مساحة المجمع و حجم الخزان غير محددة في هذا النظام.

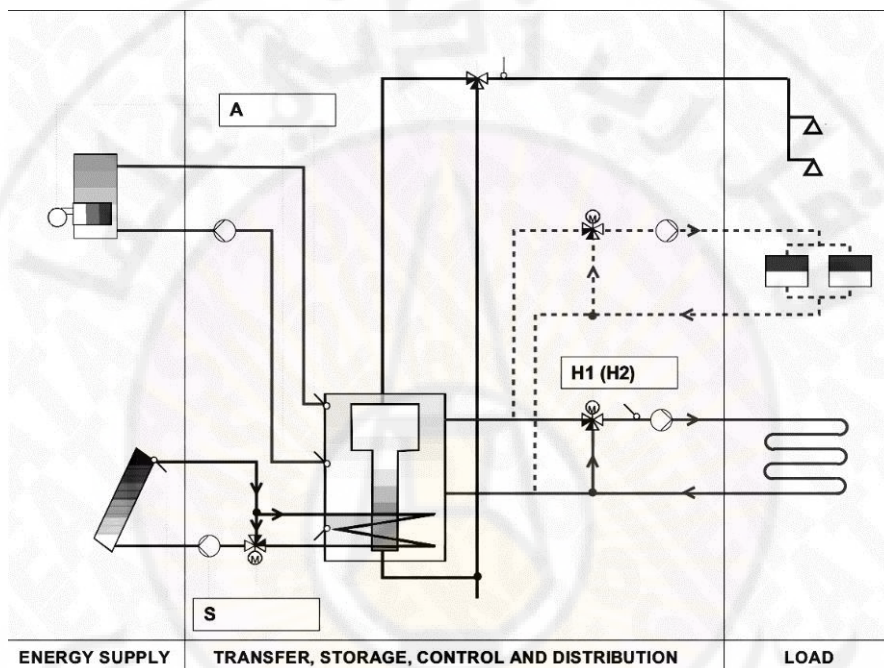
-فلسفة إدارة الحرارة في الدارة:

تكون المضخة في الدارة الشمسية تحت سيطرة وحدة تحكم تفاضلية بسيطة، و يتم التحكم في تسخين الجزء العلوي من الخزان بواسطة منظم حرارة بدرجة حرارة معيارية 55 [°C].

-السمات النوعية للدارة :

يؤدي استعمال بعض العناصر الضعيفة مثل المضخات أو الصمامات إلى تصميم نظام بسيط، مما يؤدي إلى تناقص مخاطر الفشل. و لكي يُمنع التسخين المفرط، يتم تبريد أسفل الخزان من خلال مساحة المجمع بعد غياب الشمس (التبريد ليلاً).

-تأثير مصادر الطاقة المساعدة على تصميم النظام وأبعاده:
يمكن أن يستخدم هذا النظام إما مع مرجل مساعد متغير الطاقة (الغاز أو الوقود)
أو مع مرجل ذي طاقة ثابتة.



الشكل (1.6.5) نظام تسخين شمسي مركب خزان ضمن خزان (سويسري)

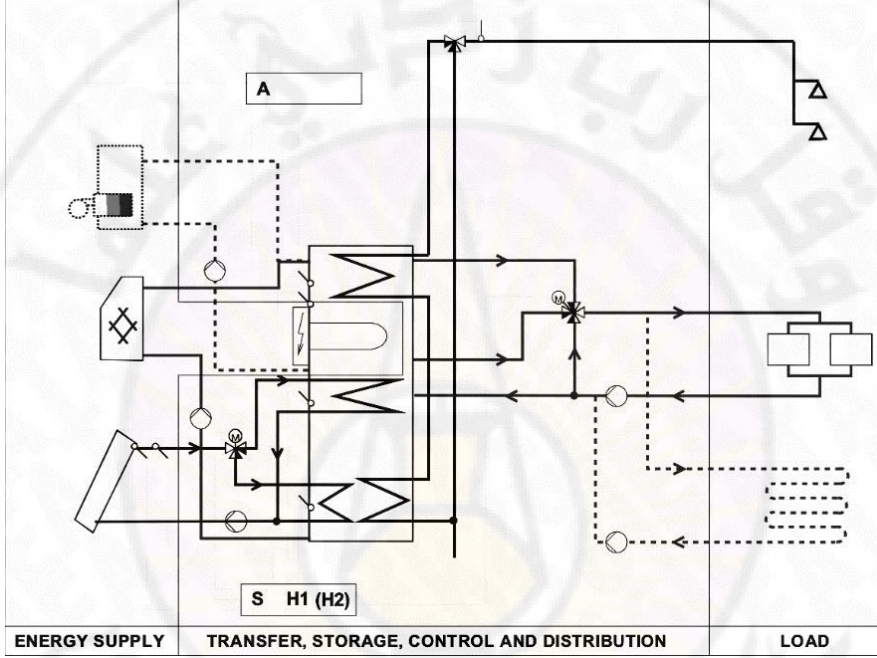
1.6.2.5. خزان التدفئة مع مبادل حراري جانبي من أجل DHW ومرجل مساعد

خارجي:

-المزايا الرئيسية للدائرة:

جُهِز الخزان في هذا النظام بمبادل حراري على شكل وشيعة غاطسة أفقية مزعنة لتحضير DHW و مبادلين في وسط وأسفل الخزان من أجل الدارة الشمسية لزيادة التطبيق الحراري في خزان التخزين كما هو مبين في الشكل (1.6.6). كما يوجد سخان كهربائي يعمل عند الحاجة و يسخن الثلث العلوي من الخزان. الاستعمال اختياري إما لمرجل

الخشب أو حراق وقود حيوي، و هو شائع جداً في مثل هذه الأنظمة. يستخدم المبادل الحراري الاختياري هذا عادةً في السويد من أجل تحضير DHW، كما أن استخدام خزان تطبيق حراري يحسن الأداء الحراري للنظام.



الشكل (1.6.6) خزان تدفئة الفراغ مع مبادل حراري حملي جانبي لـ DHW و مرجل خارجي مساعد

-فلسفة إدارة الحرارة في الدارة :

تكون مضخة دارة المجمع في البداية تحت سيطرة درجة حرارة السطح الماص، و من ثم تضبط سرعة هذه المضخة بواسطة الفرق في درجات الحرارة: بين مخرج المجمع و دارة الشحن المختارة عند مستويين لدرجة الحرارة في وعاء التخزين: مستوى الحساس العلوي لـ DHW، و مستوى الحساس السفلي للتدفئة المركزية. تتصل دارة التدفئة المركزية بالخزان عن طريق صمام رباعي، و هكذا توزع الحرارة من المستوى السفلي للخزان.

يكون السخان الكهربائي تحت سيطرة ثيرموستات منفصلاً، لكنه يقلل تلقائياً من قبل وحدة التحكم بالدارة الشمسية عندما تعمل المضخة الشمسية.

-السمات النوعية للدارة:

يمنع حدوث التسخين المفرط باستعمال وعاء تمدد كبير، وبالمحافظة على ضغط مرتفع في دارة المجمع. بناءً على طريقة تحضير DHW لا توجد مخاطر من وجود legionella .

-تأثير مصدر الطاقة الإضافية على تصميم النظام وأبعاده :

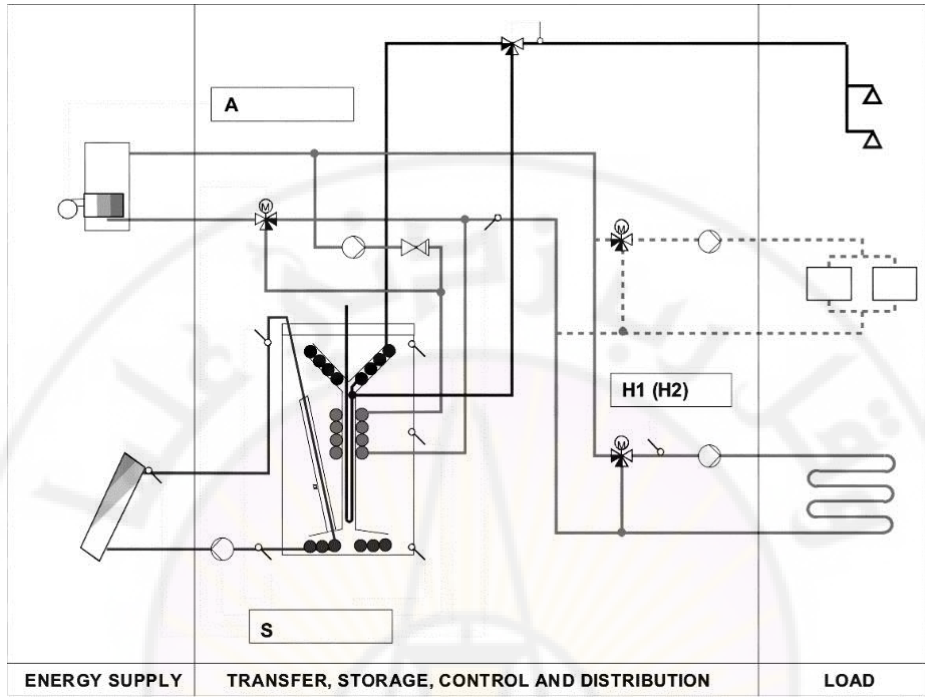
تتوضع وصلة المخرج بالتوافق مع نوع المرجل المساعد المستخدم إما في أسفل الخزان (مرجل الخشب) أو في الوسط في حال وجود مرجل وقود حيوي (pellet burner). يسخن كامل الخزان في الحالة الأولى عندما يستعمل المرجل، و في الحالة الثانية يسخن فقط الجزء العلوي.

1.6.2.6 الخزان الجوي ذو المبادلات الحرارية الثلاث:

(Atmospheric Tank with Three Heat Exchangers)

-المزايا الرئيسية للدارة:

إن قلب خزان التخزين هذا هو ثلاث مبادلات حرارية ذات أنابيب تطبق حرارية تقوم بعملية الشحن والتفريغ بدون أي مضخات كما هو مبين في الشكل (1.6.7). يتم تسخين المياه المنزلية مباشرة أثناء مرورها عبر المبادل الحراري العلوي. يضمن هذا الجودة الصحية للخزانات كبيرة الحجم. يبني الخزان بشكل يكون معرضاً للضغط الجوي و يتكون من مادة البوليبروبيلين طويلة الأمد و التي تمنع مشاكل التآكل، و مادة العزل مصنوعة من رغوة البولي بروبيلين و تتوافق مع المتطلبات البيئية، و فيما يتعلق بالتدفئة المركزية، يعمل هذا النظام كنظام تدفئة مسبقة .



الشكل (1.6.7) نظام تسخين شمسي مركب بخزان جوي وثلاثة مبادلات حرارية

-فلسفة إدارة الحرارة في الدارة:

يعمل هذا النظام بثلاثة أنظمة مختلفة :

النموذج الصيفي 1 : وضع الضخ المتقطع أو الفاصل (يتم تشغيل المضخة على فترات لتحقيق مستوى درجة حرارة قابلة للاستخدام) عندما تكون درجة حرارة المجمع أعلى من درجة الحرارة عند أسفل خزان التخزين.

النموذج الصيفي 2 : وضع الضخ الدائم عندما تكون درجة حرارة المجمع أعلى من درجة الحرارة المرغوبة في الجزء العلوي من الخزان (على سبيل المثال 60°C).

النموذج الشتوي : وضع الضخ الدائم عندما تكون درجة الحرارة في المجمع أعلى من درجة الحرارة في أسفل الخزان.

قد يتم التغيير تلقائياً (أوتوماتيكياً) بين النموذج الصيفي و الشتوي بوضع حساس في دائرة التدفئة.

-السمات النوعية للدائرة:

يتوضع المبادل الحراري الشمسي في الجزء السفلي من الخزان و يقوم بالشحن عبر جهاز تطبيق ذي منفذين: يسمح المخرج السفلي بالتسخين المسبق لحجم الخزان السفلي، و يعمل المخرج العلوي للاستخدام الفوري لحجم الخزان المسخن بالطاقة الشمسية. يجب فحص محتوى الماء في خزان (Buffer) كل 2-3 سنوات. و بسبب المبادل الحراري الفوري لإنتاج DHW فلا يوجد خطر من Legionella. هذا النظام سهل التركيب بسبب الخزان الخفيف للغاية.

-تأثير مصدر الطاقة الإضافي على تصميم النظام والأبعاد:

النظام غير مناسب للمراجل التي تستخدم الخشب كوقود لأن حجم خزان (Buffer) المؤقت صغير، و يتم تقديم أجهزة التسخين الكهربائية بشكل اختياري.

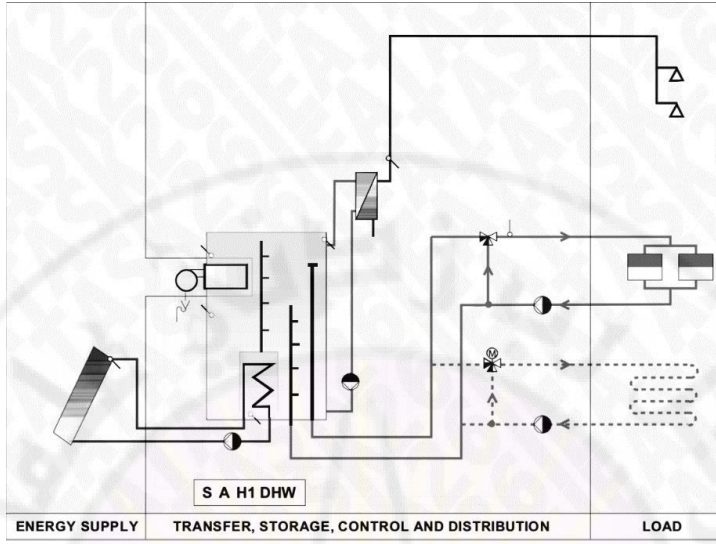
1.6.2.7. جهازا تطبيق في خزان التدفئة مع مبادل حراري خارجي جانبي لـ

DHW

-المزايا الرئيسية للدائرة:

أنشئ هذا النظام كوحدة مدمجة، حيث يتم دمج جميع المكونات (حرّاق الغاز المتكاثف الإضافي و مبادل حراري ذو صفيحة مسطحة لتحضير DHW مع مضخته الأساسية)، كما هو مبين في الشكل (1.6.8) و لذلك يتناقص زمن التركيب بسبب تناقص عدد القطع المطلوب وصلها.

يعمل خزان تخزين الطاقة الشمسية كمدير طاقة محسن لجميع أنواع الطاقة الواردة (الطاقة الشمسية و حرّاق الغاز) و الطاقة الخارجة (الماء المنزلي الساخن و التدفئة المركزية).



الشكل (1.6.8) نظام تسخين شمسي مركب مع وحدة تطبيق وحراق مدمج ومبادل حراري خارجي لإنتاج DHW

-فلسفة إدارة الحرارة في الدارة:

يتم التحكم في سرعة مضخة الدارة الشمسية للوصول إلى درجة حرارة التحميل المثلى في خزان التخزين و معدل التدفق الأدنى في المجمع للحصول على نقل جيد للحرارة. يتم ضبط درجة حرارة DHW على درجة حرارة نقطة الضبط المختارة عن طريق التحكم بسرعة المضخة المتوضعة في الدارة الأساسية للمبادل الحراري.

يتم ضبط الحرارة الموزعة إلى دارة التدفئة عن طريق مضخة ذات معدل تدفق متغير تحت التحكم الذاتي في موضع تهوية المشعات (لتوفير طاقة المضخة و التأكد من عدم وجود ضوضاء في صمامات الرادياتير).

يمكن تعديل طاقة حراق الغاز بين (5 - 20 KW)، اعتماداً على درجة الحرارة في الخزان و درجة الحرارة المطلوبة في دارة التدفئة (محسوبة بدرجة الحرارة الخارجية و درجة حرارة الغرفة و الزمن).

-السمات النوعية للدارة:

يتم إدخال الطاقة الشمسية في الخزان بواسطة مبادل حراري داخلي منخفض التدفق بالتعاون مع أنابيب تطبيقية (تقنية التدفق المنخفض)، و يجب فحص النظام مرة في السنة بسبب مرجل غاز التكثيف و حرقه.

1.7. الدارات الهيدروليكية لأنظمة شمسية لأبنية متعددة العائلات:

1.7.1. المحطات الشمسية للأبنية المتعددة ذات نظام توزيع 4 أنابيب (4

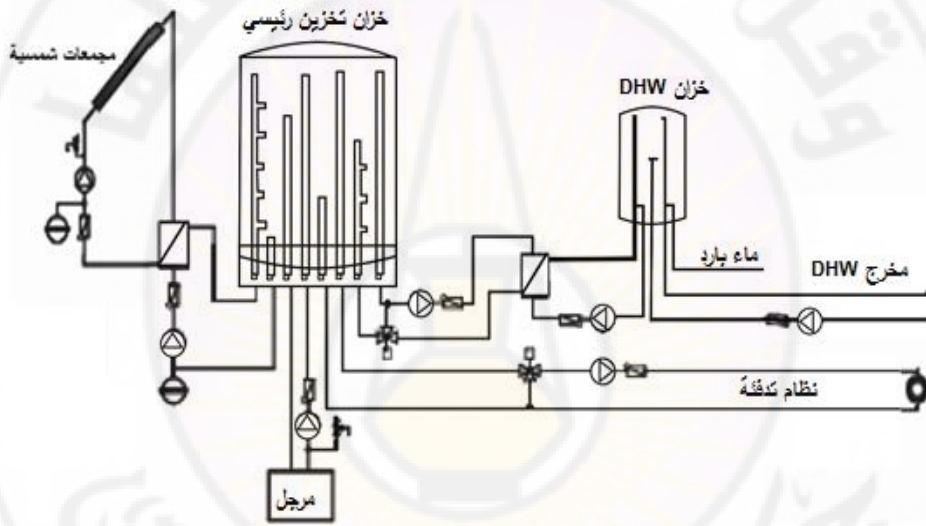
: (pipe system)

يعتمد هذا النظام على التصميم الهيدروليكي الأوروبي التقليدي للأبنية متعددة العائلات كما هو مبين في الشكل (1.7.1). يحوي النظام دارة المجمعات الشمسية الأساسية، و يتم تأمين الحرارة الناتجة من دارة المجمعات الشمسية إلى خزان التخزين الرئيسي عن طريق مبادل حراري خارجي، و الدارة الواصلة بين الخزان الرئيسي و المبادل الحراري الخارجي تسمى الدارة الثانوية، و يكون الماء الخارج من المبادل الحراري الخارجي موصولاً بوحدة تطبق حراري ضمن الخزان بحيث يتم خروج الماء الساخن من الطبقة المقابلة لدرجة حرارته في الخزان، أما الماء العائد من الخزان إلى المبادل الحراري فيتم خروجه من أسفل الخزان ليضمن أفضل تبادل حراري. يحوي النظام أيضاً خزناً للماء المنزلي الساخن بحيث يكون هذا الخزان متصلاً مع الخزان الرئيسي بمبادل حراري خارجي أيضاً، يأتي الماء من الخزان الرئيسي إلى المبادل الحراري من أعلى نقطة بالخزان ليضمن ماء بدرجات حرارة عالية لتوزع بعدها إلى خزان الماء الساخن و يعود الماء الأبرد من أسفل خزان DHW إلى المبادل الحراري الخارجي ليسخن من جديد. توصل دارة التدفئة إلى الخزان الرئيسي عن طريق أنبوب تطبق يأخذ المياه الساخنة المناسبة للتدفئة من الخزان بحيث يكون المأخذ أخفض من مأخذ DHW، و الماء العائد من دارة التدفئة يعود للخزان الرئيسي من أسفل الخزان، و يتم تأمين التسخين الإضافي للخزان الرئيسي عن طريق مرجل موصول معه عن طريق أنبوب تطبق حراري. يوجد في النظام أربعة أنابيب، اثنان منها للتدفئة ذهاب و إياب، و اثنان للمياه الساخنة، بحيث

تُوزَّع مياه التدفئة و الماء المنزلي الساخن عن طريق دائرة التوزيع إلى الشقق. و لتجنب نمو Legionella في نظام توليد الماء المنزلي الساخن يجب الحفاظ على درجة حرارة عالية، كما أن درجة حرارة الخط الراجع يجب ألا تقل عن 55°C . و هذا يقود إلى ضياعات حرارية كبيرة من النظام .

-فلسفة إدارة الحرارة:

1-الدائرة الشمسية :



الشكل (1.7.1) نظام تسخين شمسي مركب لأبنية متعددة العائلات مع نظام توزيع 4 أنابيب

تعمل مضخة دائرة المجمع الرئيسية في حال كانت درجة الحرارة عند مخرج المجمع أعلى من درجة الحرارة في أسفل الخزان، و تقلع مضخة الدارة الثانوية فقط عندما تكون درجة الحرارة عند مدخل المبادل الحراري أعلى من درجة الحرارة عند أسفل الخزان. كلا المضختين تتوقف عن العمل عندما تهبط درجة الحرارة عند مدخل المبادل الحراري إلى ما دون درجة الحرارة عند أسفل الخزان. تعمل المحطة الشمسية وفق مبدأ التدفق المنخفض .

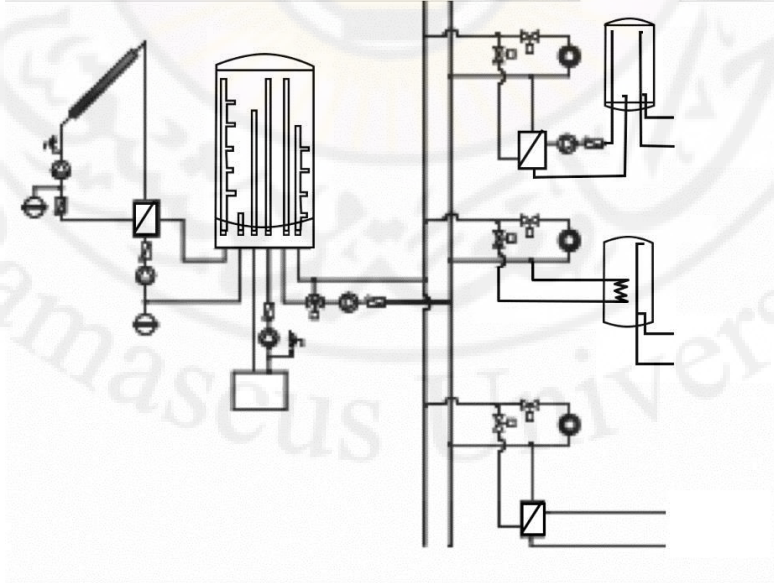
2-المرجل المساعد في الدارة:

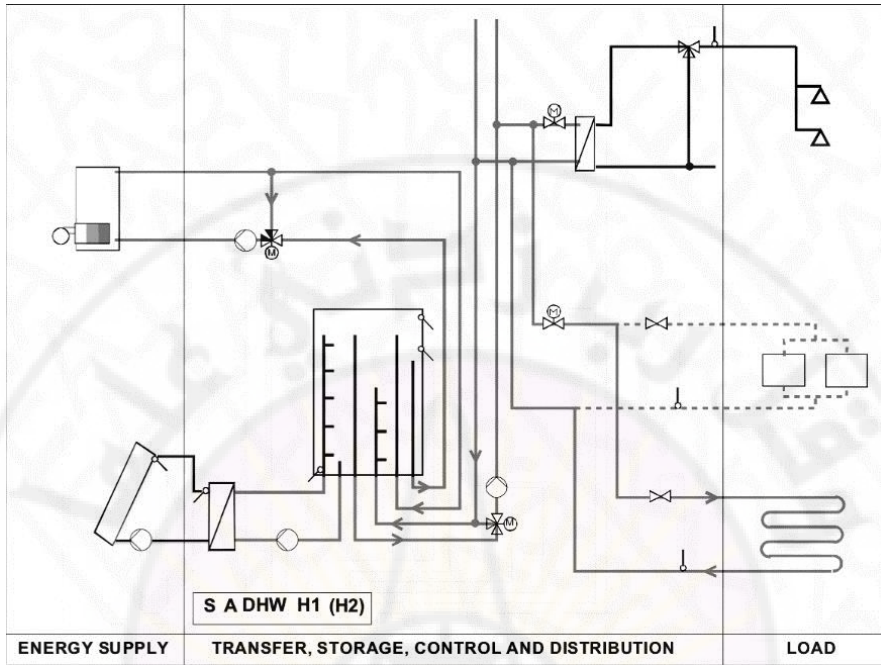
إذا كانت العائدات الشمسية غير كافية بشكل كبير، تبدأ عملية التدفئة باستخدام الغاز الحيوي اعتماداً على درجة الحرارة والاحتياجات. في حال هبطت الحرارة تحت هذه القيمة، فإن المرجل سيعمل و يسخن الخزان الاحتياطي إلى القيمة الوسطية 70°C . يتم اختيار حجم الخزان الاحتياطي المطلوب لتحضير الماء المنزلي الساخن بالتوافق مع حاجة الاستهلاك و مع أنابيب المرجل المتوفرة و الزمن المتاح لإعداد الماء المنزلي الساخن.

1.7.2. نظام التوزيع الثنائي الأنبوب (2 pipe system)

-المزايا الرئيسية للدارة:

يُعتمد هذا النظام لتجهيز المنازل المتجاورة أو البيوت العائلية المتعددة. لتشغيل النظام بأفضل طريقة ممكنة، يلزم أن تكون التدفئة بدرجة حرارة منخفضة (تدفئة جدارية أو أرضية). تزود البيوت أو الشقق بخزان التخزين المركزي عبر شبكة تدفئة مركزية و بمستوى درجة حرارة عالية حوالي $65[^{\circ}\text{C}]$.





الشكل (1.7.2) نظام تسخين شمسي مركب بنظام توزيع ثنائي الأنبوب لأبنية متعددة العائلات

لتحضير الماء الساخن تستخدم ذات الشبكة الخاصة بالتدفئة المركزية لتحضير الماء المنزلي الساخن عن طريق المبادلات الحرارية المتحكم بها غير المركزية. يمكن قياس حرارة DHW و SH التي يتم توصيلها إلى كل شقة بمقياس حرارة واحد.

مواصفات النظام هنا تشبه النظام الموصوف في الدارة السابقة في الفقرة (1.7.1) ولكن التوزيع من الخزان الرئيسي إلى الشقق يتم بأنبوبين فقط: واحد ساخن ذاهب و الثاني بارد عائد من الشقق بعد تغذيتها بالتدفئة و الماء الساخن، كما هو موضح بالشكل (1.7.2)

-التدفئة المركزية في الدارة:

تتحقق التدفئة المركزية عن طريق نموذج المبادل الحراري المضغوط لكل شقة. حيث تكون درجة حرارة التوزيع لهذا المبادل الحراري ثابتة وهي 65°C . تتم تلبية حاجة التدفئة المركزية والماء المنزلي الساخن في هذا المبادل الحراري، و اعتماداً على درجة

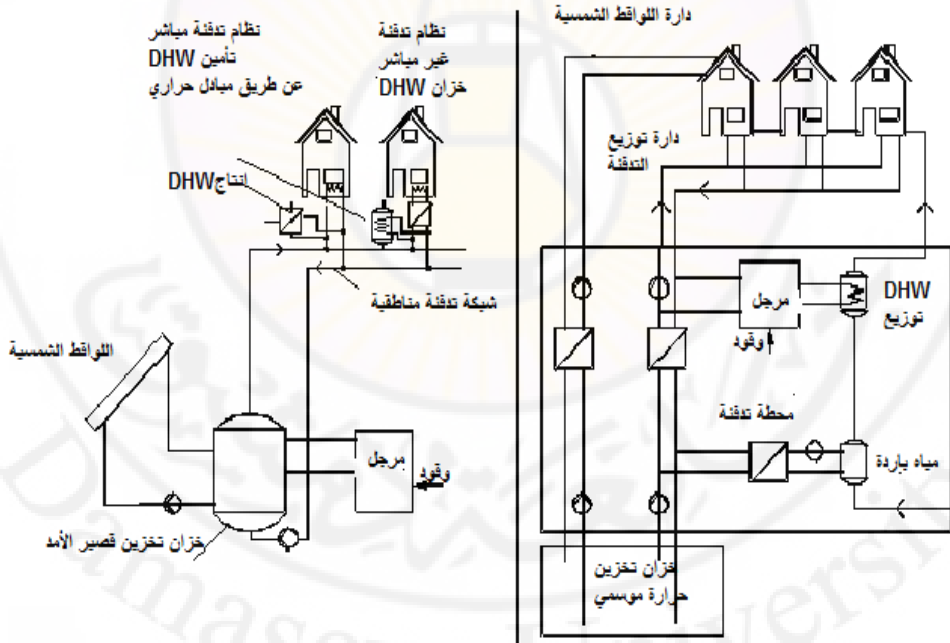
الحرارة المحيطة يتم تزويد الحرارة إلى الغرف بشكل منظم عن طريق مضخة اعتماداً على هبوط الضغط في الشبكة.

-تحضير مياه الاستخدام الساخنة DHW:

يحضر الماء المنزلي الساخن من نفس أنبوب الماء الساخن الذاهب لتأمين التدفئة، و يمكن تغذية القاطنين بالماء الساخن إما عن طريق مبادل حراري خارجي أو داخلي إلى خزان خاص لتجميع المياه الساخنة، أو مباشرة عن طريق مبادل حراري خارجي.

1.8. شبكات التدفئة المناطقية المدعومة شمسياً:

(Solar supported district heating networks)



الشكل (1.8.1) : أنظمة التدفئة المناطقية المدعومة بالطاقة الشمسية: نظام ثنائي الأنابيب مع نظام تسخين ماء ساخن لامركزي (يسار) ونظام أربعة أنابيب مزود بخزان حرارة طويل الأجل (يمين)

يمكن بالمقارنة مع الأنظمة التي تزود الأبنية المفردة بالحرارة عن طريق أنظمة شمسية مفردة، أن يجتمع عدد من المستفيدين من الحرارة الشمسية و يستفيدون من هذه الحرارة عن طريق محطة شمسية واحدة. يدعى هذا النظام في هذه الحالة بشبكات تدفئة مناطقية مدعومة شمسياً.

تستخدم التدفئة المناطقية في العديد من دول العالم المتحضرة مثل واشنطن و نيويورك و موسكو و طوكيو و استوكهولم.... إلخ حيث يتطلب الأمر توفير مصدر واحد للطاقة لتأمين هذه التدفئة أو يمكن البحث عن مصادر رخيصة و متوفرة كالاتماد على الطاقات المتجددة. و لتأمين الدعم الشمسي لهذه المحطات يجب النظر في التكاليف المادية لهذه التجهيزات، و يمكن أن تتخذ إجراءات عديدة لتحسين العزل الحراري تكون عموماً أقل كلفةً من تقديم الحرارة عن طريق الدعم الشمسي للتدفئة المناطقية. من أجل تحسين النظام بأكمله تقنياً واقتصادياً، يجب دراسة تخفيض الطاقة المطلوبة للتدفئة المركزية في المباني المعنية (الأبنية موضع السؤال يعني إجراءات العزل) قبل تركيب تجهيزات أنظمة الدعم الشمسي مع أنظمة التدفئة المناطقية. إن درجات حرارة التدفق الذاهب والعائد المنخفضة بشكل خاص لشبكة توزيع الحرارة لها تأثير إيجابي للغاية، (على سبيل المثال 40/80 درجة مئوية).

عادةً ما يتم التمييز بين أنظمة تدفئة المناطق المدعومة بالطاقة الشمسية على أنها أنظمة تدفئة محلية مدعومة بالطاقة الشمسية بدون تخزين حرارة طويل المدى كما في الشكل (1.8.1). تنتقل الحرارة من المجمعات المركبة قرب الخزان الحراري إلى الخزان المركزي عن طريق الأنابيب والمبادل الحراري، الذي يتطلب أيضاً شبكة توزيع ماء ساخن لكي تُوزع الحرارة من مركز التدفئة إلى الأسر الخاصة، و يمكن أن يميّز هنا شبكات الأنابيب الثنائية والرباعية التي وردت أعلاه.

تستخدم الشبكة ذات الأنبوبين لتسخين الماء الساخن المنزلي اللامركزي - و يتم ذلك عبر شبكة التدفئة إما مع خزانات المياه الساخنة المحلية أو المبادلات الحرارية المنزلية للمياه الساخنة في المنازل الفردية كما في الشكل (1.8.1 على اليسار)؛ في الشبكات الأصغر، يتم دمج السخان بشكل مباشر، في حين يتم توصيله عبر مبادل حراري في

الشبكات الأكبر. من أجل الحفاظ على الضياعات الحرارية منخفضة في شبكات درجات الحرارة المنخفضة، يتم تسخين خزان الماء الساخن المنزلي خلال فترات زمنية محددة، على سبيل المثال أثناء الليل و في وقت أعلى إشعاع شمسي مع زيادة درجات حرارة التدفق الذاهبة والعائدة من الشبكة. في مثل هذه الشبكات ذات الأنابيب، لا يلزم استخدام خط أنابيب تدوير الماء الساخن المنزلي الذي يؤدي عادةً إلى خسائر حرارية و تدمير الطبقات. بالإضافة إلى ذلك، فإن خطر الإصابة بـ *Legionella* بسبب كميات المياه الساخنة المنزلية الصغيرة يكون منخفضاً.

يتم توزيع تدفئة المكان والماء الساخن المنزلي في شبكة الأنابيب الأربعة بشكل منفصل. ميزة هذا التوزيع المنفصل للتدفئة و المياه الساخنة المنزلية (شبكة من أربعة أنابيب كما في الشكل (1.8.1 على اليمين))، هي الاستخدام الأفضل لخزان الحرارة و النظام الشمسي، حيث لا يزال الماء الساخن المنزلي مسخناً مسبقاً، حتى في درجات حرارة تخزين منخفضة.

يمكن تحقيق وفر شمسي بدون تخزين طويل الأمد حوالي (20 - 10%) تقريباً لأنظمة تدفئة مناطقية مدعومة عن طريق حقول مجمعات شمسية كبيرة تزود المنازل بشكل رئيسي. و يرجع ذلك إلى حقيقة أن حقول المجمعات الموصى به كبير و لتفادي الركود في الصيف بسبب صعوبة معالجة تشكل البخار، لذلك يصمم النظام من أجل الحمل الصيفي كما يبينه الشكل (1.8.1).

يمكن تحقيق أعلى وفر جزئي باستعمال تخزين موسمي طويل الأمد، حيث يمكن تخزين الناتج الصيفي فيها، إذا تم تركيب المجمعات بشكل رئيسي على سطوح البنايات لتوفير المكان، أقصى وفر جزئي يمكن تحقيقه (60 - 50%) في هذه الأيام في عدد من الأماكن في وسط وشمال أوروبا وفق أنظمة التحكم بالحرارة الخاصة بهم حسب مساحات السطوح المتوفرة حالياً والتخزين الحراري طويل الأمد، إذا تم تطبيق إجراءات معززة لعزل الحرارة فيزداد التوفير الجزئي.

يمكن أن تستعمل مجمعات مستوية ذات كفاءة عالية من أجل أنظمة تدفئة مناطقية مدعومة شمسياً وتكون الكفاءة البصرية لهذه المجمعات تقريباً 80% و معامل ضياع

حراري حتى $3 \text{ W/(m}^2 \text{ K)}$. يمكن أن توصل هذه المجمعات على التسلسل أو على التوازي حسب ضخامة المجمع ($< 10 \text{ m}^2$) بفقد ضغط منخفض لتصبح حقول المجمعات كبيرة. لمثل هذه الأنواع من المجمعات و من أجل أنظمة الماء المنزلي الساخن ذات التغطية الشمسية الجزئية (يعني الأنظمة بدون تخزين حراري طويل الأمد) تؤخذ مساحة المجمع حوالي ($0.9 - 1.2 \text{ m}^2$) لكل شخص و حجم التخزين حوالي ($40 - 60 \text{ L}$) لكل متر مربع من مساحة المجمع. أما في حالة الأنظمة ذات التخزين الطويل الأمد فيجب أن يكون حجم الخزان ($2-3 \text{ m}^3$) لكل متر مربع من مساحة المجمع. يجب أن تكون مساحة المجمع ذاته بين $[0.4-0.7 \text{ m}^2]$ لكل GJ من الحاجة السنوية للتزويد الحراري. يمكن أن تحقق الأنظمة ذات التغطية الشمسية الجزئية للتدفئة وللماء الساخن المنزلي ربحاً حرارياً صالحاً للاستخدام عند مخرج الخزان حوالي $1370 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{a}$ (أو $250-380 \text{ kWh/m}^2 \cdot \text{a}$). إذا استخدم فقط نظام التدفئة المناطقية المدعومة شمسياً لدعم التزود بالماء المنزلي الساخن، فإن الناتج النوعي سيكون أعلى أما ضياعات التخزين فستكون أقل في هذه الحالة .

المكونات الهيدروليكية لأنظمة التدفئة المناطقية المدعومة شمسياً مماثلة لتلك المستخدمة في الأبنية المتعددة العائلات. الفرق الأساسي هو باستعمال جهاز تمدد أصغر للتشغيل العادي فقط، حيث لا يحصل ركود في التشغيل العادي. في حال انقطاع الكهرباء يتم نفخ زيادة الحجم عن طريق إنتاج البخار بواسطة صمام الأمان و يتم تجميعها في حاوية مفتوحة، و عندما تعود الكهرباء فإنّ مائع المجمع يُضخ من جديد في دائرة المجمع.

1.9. تسخين المسابح بالطاقة الشمسية:

(Solar assisted swimming pools)

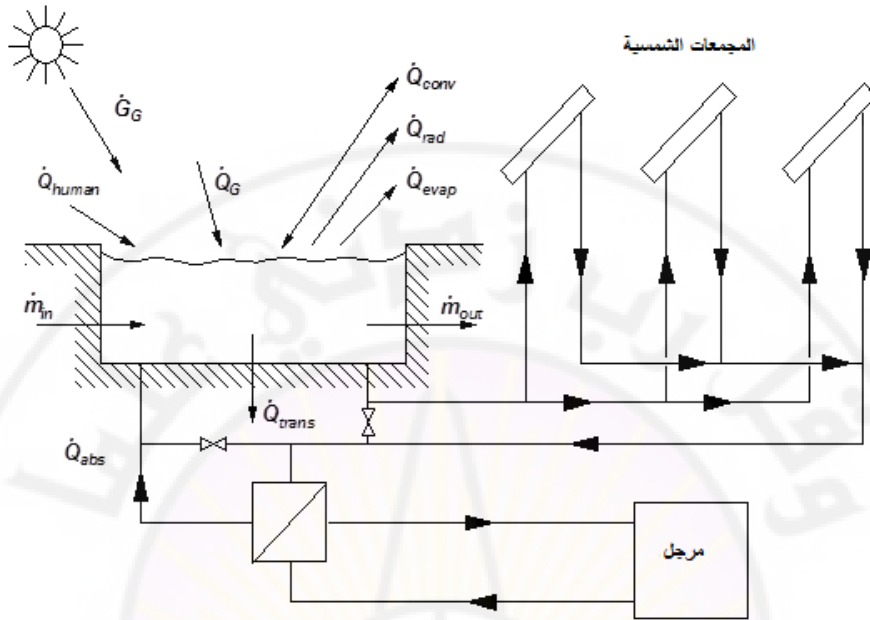
يُعد تسخين مياه المسابح المكشوفة بالطاقة الشمسية من أفضل الطرق لاستعمال الطاقة الشمسية، حيث إن توقيت الحاجة للحرارة و توفر الإشعاع الشمسي مترابطان تقريباً. بالإضافة لذلك، فإنه لا يطلب خزان حراري خارجي لأنّ بركة السباحة المكشوفة المملوءة بالماء تلعب دور الخزان. يسخن الماء فقط في برك السباحة إلى درجة حرارة

منخفضة (الحد الأعظمي حوالي $[24-32]^{\circ}\text{C}$). إنَّ استعمال سطوح امتصاصية رخيصة أو بسيطة تُثَبَّت على سقف المسبح المكشوف أو في الفراغ المجاور ينتج طاقة عالية المردود.

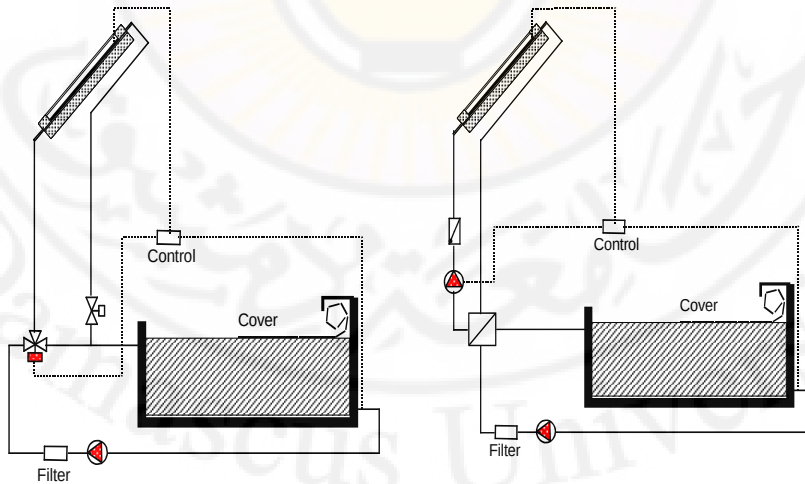
يظهر الشكل (1.9.1) والشكل (1.9.2) المخطط الهيدروليكي والتدفق للمسابح المدفأة بالطاقة الشمسية. من الضروري إضافة مصدر تسخين إضافي لوسيط النقل الحراري التقليدي. يتألف الريح الشمسي للمسابح المكشوفة من الطاقة المتحررة داخل المسبح عن طريق السطوح الماصة Q_{abs} ، و يؤثر الريح الشمسي عن طريق الإشعاع على المسبح مع الحرارة الصادرة عن الأشخاص Q_{humanh} . تتضمن الضياعات المرافقة الضياعات الحرارية الحملية Q_{conv} و ضياعات الإشعاع Q_{rad} و ضياعات التبخر من الماء Q_{evap} بالإضافة إلى ضياعات النقل الحراري ضمن الأرض Q_{trans} . يُفقد أيضاً مقدار صغير من الحرارة أثناء تدفق ماء للتعويض أبرد من الماء الموجود في الحوض بسبب دوران الماء (m_{in} and m_{out}).

تكون الضياعات الحرارية بالحمل والإشعاع ($Q_{conv} + Q_{rad}$) تابعة بشكل تقريبي خطياً للفرق بين درجة حرارة الماء في المسبح و درجة حرارة الهواء. إذا كانت درجة حرارة المحيط أعلى من درجة حرارة المسبح ينعكس التدفق الحراري بالحمل حيث يمتص ماء المسبح حرارة المحيط نتيجة الانتقال الحراري بالحمل. تعتمد الضياعات الحرارية الناتجة عن التبخر، و التي تعد الأعلى، على مساحة المسبح و سرعة الرياح و الرطوبة الجوية و الفرق بين درجة حرارة الماء و درجة حرارة المحيط. ضياعات الانتقال بالتوصيل إلى الأرض قليلة و هي حوالي 3 % من الضياع الكلي .

يعتمد الريح الشمسي المضاف إلى الريح الممتص من قبل المسبح على مساحة المسبح و درجة الامتصاصية للماء في المسبح و أرضية المسبح. تتغير درجة امتصاصية الماء من اللون الأبيض إلى اللون الأزرق الفاتح إلى اللون الأزرق الداكن حسب لون أرضية المسبح والجدران، كما تتناقص أيضاً مع ازدياد عمق الماء. يمكن توليد طاقة إضافية اعتماداً على السباحين، و تكون الاستطاعة الحرارية المولدة لكل شخص بين (400 - 100W) .



الشكل (1.9.1) المخطط الهيدروليكي لنظام تسخين المسابح بالطاقة الشمسية



الشكل (1.9.2) تصميم وتدفق الطاقة لنظام التدفئة الشمسية لحوض سباحة مكشوف

عندما تتجاوز الطاقة المطلوبة هذه القيمة فإنه يتم تأمينها عن طريق السطوح الماصة الشمسية (Active system) أو مصادر الوقود التقليدية (مثال: الغاز الطبيعي) أو نواقل الطاقة المتجددة مثل الوقود الحيوي.

يطلب حوالي (1620MJ - 540) لكل متر مربع من مساحة المسبح، و يجب أن تكون مساحة السطح الماص بين (70% - 50) من مساحة المسبح لتحقيق زيادة رئيسية في درجة الحرارة من (6 - 3 °C)، اعتماداً على غطاء المسبح.

1.9.1. حمل تدفئة حوض السباحة:

رأينا أعلاه أنَّ الضياعات الحرارية في بعض أنظمة أحواض السباحة تُعوَّض من أنظمة اللواقط الشمسية، ومن جهة أخرى يمكن تقليل الضياعات الحرارية باستخدام غطاء بلاستيكي على سطح الحوض عندما لا يكون مستخدماً للسباحة. يعمل الغطاء البلاستيكي على إمرار الإشعاع الشمسي عبره إلى الحوض و يُخَفِّض بشكل كبير ضياعات التبخير. تصنع بعض أغطية المسابح من قطع بلاستيكية مشابهة لتلك المستخدمة في التغليف لتعمل كعازل يخفض من ضياعات الحمل و ضياعات التبخير. تستعمل بعض أنظمة المسابح الأغطية والمجمعات معاً. إذا تم استخدام أغطية بلاستيكية فيجب أن تصنع من مواد تتحمل الأشعة فوق البنفسجية UV وإلا فإنها لن تصمد إلا لأشهر قليلة. تتناقص الضياعات الحرارية بالإشعاع والحمل بمقدار هام في حال تم تغطية المسبح ليلاً. إن تغطية المسبح لمدة عشر ساعات بمواد امتصاصية نموذجية ينقص ضياعات التبخر بمقدار 30% و ضياعات الإشعاع و الحمل بمقدار 16%.

لتحديد الحجم الملائم لنظام اللاقط الفعال (active solar collector) لمسبح أو لتقدير ارتفاع درجة حرارة المياه بسبب غطاء الحوض، يجب معرفة الضياعات الحرارية الشهرية من الحوض.

ورد أعلاه أنَّ درجة حرارة الحوض يجب أن تكون في مجال قريب (24-32°) حتى يكون قابلاً للاستخدام. و بما أن الحوض يمتلك كتلة كبيرة فإن درجة حرارته لا تتغير بسرعة. يكفي في الحقيقة توازن الطاقة الشهري لتقدير درجة حرارة الحوض بدون مصدر

مساعد للطاقة أو فيما إذا كانت الطاقة المساعدة ضرورية للحفاظ على درجة الحرارة المرغوبة.

تنتقل الضياعات الحرارية من سطح الحوض عن طريق الإشعاع إلى السماء. تعطي المعادلة (1.9.1) تقديراً لدرجة حرارة السماء الصافية T_{sky} وذلك لكل ساعة.

$$T_{sky} = T_a [0.711 + 0.0056T_{dp} + 0.000073T_{dp}^2 + 0.013 \cos(15t)]^{1/4} \quad (1.9.1)$$

حيث:

تقدر كل من T_{sky} و T_a بـ [K] ،

T_{dp} : درجة حرارة نقطة الندى وتقدر بـ [°C] تغطي البيانات التجريبية مجال درجة حرارة نقطة الندى من (-20 [°C]) وحتى 30 [°C]. يكون مجال الفرق بين درجات حرارة السماء والهواء من 5 [°C] في المناخ الحار و الرطب إلى 30 [°C] في المناخ البارد والجاف.

قام Wei et al بقياس الإشعاع القادم من الغطاء (البلاستيكي الشفاف) وكشف الحوض و استنتج أن سطح الحوض يعمل كجسم مطلق السواد من أجل ضياعات الإشعاع عند درجة حرارة الحوض و لا يتغير ذلك حتى لو استخدمنا الغطاء البلاستيكي ذا الفقاعات. لذلك يمكن استخدام المعادلة (1.9.2) مع عامل انبعاثية مقداره 1 للحوض لتقدير الضياعات الحرارية بالإشعاع من سطح الحوض.

$$Q_r = \varepsilon A \sigma (T_p^4 - T_{sky}^4) \quad (1.9.2)$$

كذلك اقترح Wei et al استخدام معادلة بعدية من أجل حساب ضياعات التبخير من الحوض المكشوف (1.9.3) و كذلك من أجل الضياعات الحرارية بالحمل لحوض مكشوف و آخر مغطى مقدرة بالـ W / m^2 :

$$q_e = P_a \left(35V + 43(T_p - T_a)^{\frac{1}{3}} \right) (\omega_p - \omega_a) \quad (1.9.3)$$

حيث:

V : سرعة الرياح بالـ m / s بالقرب من الحوض.

P_a : ضغط الهواء [kpa].

ω_p : نسبة رطوبة الإشباع عند درجة حرارة الحوض.

ω_a : نسبة رطوبة الهواء عند درجة حرارة الحوض.

تحدد ضياعات الحمل بالنسبة لضياعات التبخير بالعلاقة (1.9.4):

$$q_c = q_e \times 0.0006 \frac{T_p - T_a}{\omega_p - \omega_a} \quad (1.9.4)$$

غالباً ما تكون سرعة الهواء V بالقرب من سطح الحوض مجهولة. اقترح Wei et al إمكانية استخدام خمس إلى عشر القيمة المقاسة لسرعة الرياح في الموقع المحدد مع الأخذ بعين الاعتبار المصدات حول الحوض.

لا تُمتص جميع الأشعة الشمسية الساقطة على الحوض، فاقترح Francey and Golding (1981) أنه لحوض مكشوف مع عمق وسطي 2m، يمكن تقدير نفاذية سطح الحوض بـ 92 % و أن معامل امتصاص الحوض هو 60%.

مثال:

لدينا حوض مساحته $72[m^2]$ في منطقة Georgia. حدّد الطاقة اللازمة للحفاظ على درجة حرارة ثابتة لمياه الحوض مقدارها $25[^\circ C]$ في شهر نيسان. علماً أن للحوض غطاءً يوضع لمدة 12 ساعة كل ليلة.

الحل:

وجد حسب الموقع المدروس أن المتوسط الشهري لدرجة حرارة الوسط المحيط لشهر نيسان هو $16[^\circ C]$ ($289 K$) وشدة الإشعاع الشمسي الأفقي $\bar{H} = 19.1[MJ / m^2]$ و $\bar{K}_T = 0.53$.

إن قيمة الإشعاع الشمسي الممتص لحوض مكشوف هي جداء مساحة الحوض بالإشعاع الشمسي الساقط بنفاذية السطح (0.92) بامتصاصية الحوض بعدد أيام شهر نيسان. سنستخدم هنا القيمة الدنيا لامتناسية الحوض 0.6:

$$Q_{Solar} = 72 \times 19.1 \times 10^6 \times 0.92 \times 0.6 \times 30 = 23 [GJ]$$

إذا كان المتوسط الشهري للرطوبة النسبية يساوي 70%، يتم من المخطط البساكومتري تحديد درجة حرارة نقطة الندى بـ $10 [^{\circ}C]$ ودرجة الحرارة الرطبة $12 [^{\circ}C]$ ، كذلك إن كان المتوسط الشهري لنسبة الرطوبة هو 0.008 ونسبة رطوبة الإشباع عند درجة حرارة $25 [^{\circ}C]$ هي 0.020 . يمكن تحديد درجة حرارة السماء الصافية من المعادلة (1.9.1) ومع إهمال الحد الجيبي:

$$T_{sky} = T_a [0.711 + 0.0056T_{dp} + 0.000073T_{dp}^2 + 0.013 \cos(15t)]^{1/4}$$

$$T_{sky} = (16 + 273)[0.711 + 0.0056(10) + 0.000073(10*10)]^{1/4} = 271K$$

إن المتوسط الشهري لدرجة حرارة السماء يكون:

$$\bar{T}_{sky} = (1 - \bar{K}_T) \times T_{sky} + \bar{K}_T \times (273 + \bar{T}_a) = (1 - 0.53) \times 271 + 0.53 \times (273 + 16) = 281K$$

ستجرى الحسابات مبدئياً على افتراض أن الحوض دائماً مكشوف، و تعطى الضياعات الحرارية بالإشعاع عن طريق المعادلة (1.9.2):

$$Q_r = \varepsilon A \sigma (T_p^4 - T_{sky}^4)$$

$$Q_r = 72 \times 5.67 \times 10^{-8} (298^4 - 281^4) \times 2.59 \times 10^6 = 18GJ$$

حيث يمثل الحد 2.59×10^6 عدد الثواني في شهر نيسان من تحويل الواحدات للجول. و تعطى ضياعات التبخير من العلاقة (1.9.3):

$$Q_e = A_p P_a \left(35V + 43(T_p - T_a)^{\frac{1}{3}} \right) (\omega_p - \omega_a)$$

$$Q_e = 72 \times 101.3 \times \left[35 \times 3 + 43(298 - 289)^{\frac{1}{3}} \right] \times$$

$$(0.02 - 0.008) \times 2.59 \times 10^6 = 44[GJ]$$

و تعطى ضياعات الحمل من العلاقة (1.9.4):

$$Q_c = Q_e \times 0.0006 \frac{T_p - T_a}{\omega_p - \omega_a}$$

$$Q_c = 44 \times 0.0006 \left(\frac{298 - 289}{0.02 - 0.008} \right) = 21 [GJ]$$

يصبح الحمل الكلي إذا بقي الحوض مكشوفاً طوال الشهر:

$$L = 18 + 44 + 21 - 23 = 60 [GJ]$$

و إذا بقي الحوض مغطى لمنتصف الوقت بغطاء رقيق، فإن ضياعات التبخير هي الوحيدة التي سوف تتأثر و يصبح الحمل الشهري:

$$L = 18 + 0.5 \times 44 + 21 - 23 = 38 [GJ]$$

وإذا استخدم الغطاء ذو الفقاعات، فإن ضياعات التبخير ستتناقص و تنخفض الضياعات بالحمل بشكل كبير و يصبح الحمل الشهري:

$$L = 18 + 0.5 \times (44 + 21) - 23 = 27.5 [GJ]$$

يمكن حساب استطاعة المبادل الحراري الإضافي الذي يعمل على الوقود الأحفوري المطلوب لتسخين المسبح في حال غياب الإشعاع الشمسي، يجب أن تقابل استطاعة هذا المبادل الحراري الضياعات من المسبح التي تم ذكرها وطريقة حسابها سابقاً.

$$\text{استطاعة المبادل الحراري} = \frac{4180 [J / kg.^{\circ}C] \times 5 [^{\circ}C] \times V [Liter]}{3600 \times 24} = [W]$$

حيث:

-V: حجم المسبح.

-الرقم 5 هو فرق درجات الحرارة المطلوب.

مثال: إذا كان طول المسبح 30m وعرضه 10m ومتوسط عمقه 2m، يكون حجم المسبح:

$$30 * 10 * 2 = 600 [m^3]$$

يتم تحويل الحجم إلى لتر = $600 * 10^3$.

$$\text{استطاعة المبادل} = \frac{4180 [J / kg.^{\circ}C] \times 5 [^{\circ}C] \times 600 \times 10^3 [Liter]}{3600 \times 24} = 145 [kW]$$



الفصل الثاني

المواقط الشمسية المركزة للإشعاع الشمسي



اللواقط الشمسية المركزة للإشعاع الشمسي

2.1. مقدمة:

رأينا في اللواقط المسطحة أنه يمكننا تسخين الناقل الحراري إلى درجة حرارة أعظمية حوالي $100 [^{\circ}\text{C}]$. بالنسبة للعديد من التطبيقات الصناعية التي تتطلب درجات حرارة تشغيل أكبر من $300 [^{\circ}\text{C}]$ ، فإنه يجب أن نقوم بتركيز الأشعة الشمسية على سطح المستقبل ذي المساحة الصغيرة بالمقارنة مع فتحة دخول الإشعاع الشمسي، يتم ذلك عن طريق تداخل جهاز بصري بين مصدر الإشعاع و سطح امتصاص الطاقة. و يمكن زيادة درجات حرارة توصيل الطاقة عن طريق تقليل المساحة التي يحدث منها ضياع الحرارة، سيكون للسطح الماص الصغير ضياع في الحرارة أقل مقارنة باللواقط المسطحة في نفس درجة حرارة السطح الماص، مما يؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة التي نحصل على الطاقة عندها، و إن إجراء ذلك التخفيض في الضياعات يجعل من الممكن تسخين السائل في المجمع لدرجات حرارة أعلى وبمردود جيد.

لتجنب الخلط بين المصطلحات، سيتم تطبيق كلمة مجمع على النظام الكلي، بما في ذلك المستقبل والمركز. المستقبل هو ذلك العنصر من النظام حيث يتم امتصاص الإشعاع و تحويله إلى شكل آخر من أشكال الطاقة؛ و يشمل الماص و الأغشية المرتبطة به والعزل. المركز، أو النظام البصري، و هو جزء المجمع الذي يوجه الإشعاع إلى المستقبل. فتحة المركز هي الفتحة التي يدخل من خلالها الإشعاع الشمسي إلى المركز.

2.2. أنواع المجمعات المركزة للإشعاع الشمسي:

المجمع الشمسي المركز هو جهاز يركّز الإشعاع الشمسي الوارد على سطح أكبر (مساحة الفتحة الشمسية A_a) على سطح أصغر (مساحة المستقبل A_r). تُستخدم مكونات الانعكاس أو الانكسار المناسبة لزيادة كثافة تدفق الإشعاع على سطح

الامتصاص (المستقبل) مقارنةً بـ FPC (المجمعات الشمسية المسطحة) لتحقيق تركيز أعلى. لتحقيق أقصى تركيز، من الضروري تتبع حركة الإشعاع الشمسي (الحركة الافتراضية للشمس) من خلال دائرة تتبع إلكترونية.

المزايا الرئيسية للمركز:

(1) يزيد من شدة الطاقة الشمسية (الإشعاع المباشر) من خلال تركيز الطاقة الشمسية المتاحة على سطح كبير A_a (مساحة الفتحة الشمسية)، على سطح أصغر A_r (مساحة المستقبل).

(2) نظراً للتركيز على مساحة أصغر، يتم تقليل منطقة ضياع الحرارة على النحو المذكور سابقاً. علاوة على ذلك، فإن الكتلة الحرارية تكون أصغر بكثير من كتلة اللاقط المسطح FPC، و بالتالي فإن التأثيرات العابرة تكون صغيرة.

(3) درجة حرارة التوزيع عالية جداً.

(4) إنه يُقلل من التكلفة عن طريق استبدال جهاز استقبال باهظ الثمن (منطقة زجاجية كبيرة) بسطح عاكس أو منكسر أقل تكلفة.

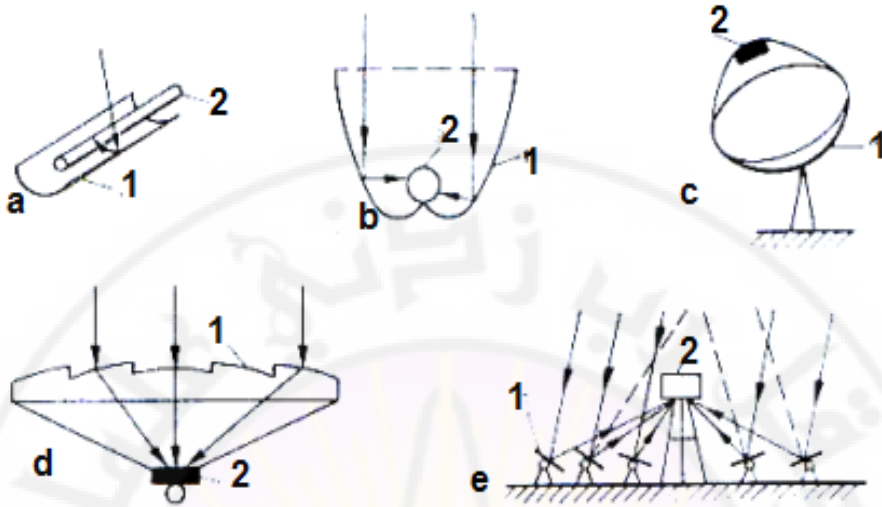
ومع ذلك، فإن المركز الشمسي هو نظام بصري. و رموز الضياع البصرية مهمة. علاوة على ذلك، إنه يعمل فقط على الإشعاع الشمسي المباشر مما يؤدي إلى فقدان الإشعاع المنتشر. المفاهيم الأساسية لـ FPCs قابلة للتطبيق أيضاً على أنظمة تركيز الطاقة الشمسية. عند دراسة الأداء الحراري للمركبات ينشأ عدد من التعقيدات نتيجة لما يلي:

(1) التدفق غير الموحد على (الماص / المستقبل).

(2) اختلافات واسعة في شكل ودرجة الحرارة وسلوك ضياع الحرارة من الماص.

(3) الاعتبارات البصرية في ظروف توازن الطاقة.

تزداد تكلفة النظام أيضاً مع زيادة المتطلبات البصرية عالية الدقة لزيادة تركيز المجموع. بالإضافة إلى تعقيد النظام، يتم زيادة تكلفة الصيانة أيضاً.



الشكل (2.2.1)، a. اللاقط ذو القطع المكافئ parabola، b- اللاقط المركز ذو القطع المكافئ الحوضي (CPC)، c- اللاقط الصحنى، d- لاقط مع عدسة فريزل، e- حقل المرايا الدوارة ذات المستقبل المركزي: 1- العاكس، 2- مستقبل الأشعة

يستخدم العديد من أنواع المراكز حيث يمكن أن تكون أسطوانية للتركيز على "خط" و تسمى اللواقط المركزة الخطية، أو دائرية للتركيز على "نقطة" و تسمى اللواقط المركزة النقطية. يمكن أن تكون أجهزة الاستقبال مقعرة أو مسطحة أو محدبة، و يقوم المستقبل بامتصاص قسم من الإشعاع المنعكس عن العواكس. يتألف المركز من قسمين :
1- السطح العاكس Reflector ، 2- السطح الماص/المستقبل Receiver . يوضح الشكل (2.2.1) أمثلة لأنواع من المراكز.

تعاني المراكز الشمسية من مشكلتين:

1- أخطاء بالتصنيع.

2- وجود الحاجة إلى نظام ملاحقة تتدرج من الأبسط إلى الأبعد.

و لذلك تصنف اللواقط المركزة للإشعاع الشمسي حسب أنماط ملاحقتها لقرص الشمس:

- المركّزات الشمسية الثابتة.

- المركّزات الشمسية الملاحقة للشمس على محور واحد.

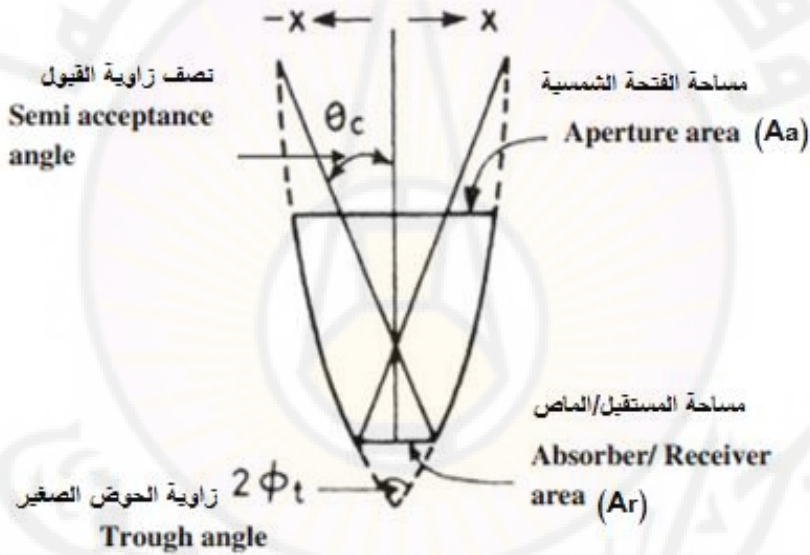
- المركّزات الشمسية الملاحقة للشمس على محورين.

2.3. البارامترات المميزة:

فيما يلي تعريفات للمصطلحات العديدة التي تميز مجمعات الطاقة الشمسية المركّزة.

2.3.1. مساحة الفتحة الشمسية (A_a)

هي المنطقة الواقعة على مقدمة المركّز الشمسي التي تقبل الإشعاع الشمسي المباشر الوارد كما هو موضح في الشكل (2.3.1).

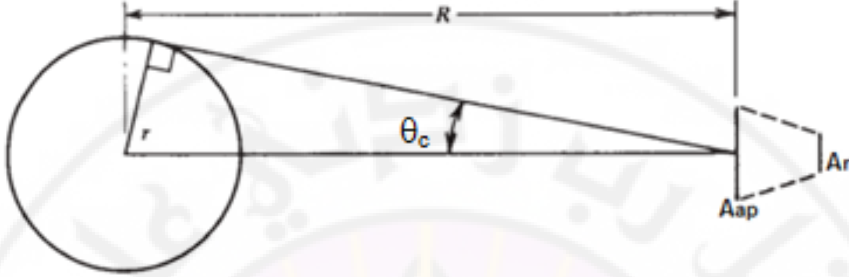


الشكل (2.3.1) شكل توضيحي للبارامترات المميزة

2.3.2. زاوية القبول $2\theta_c$ (acceptance angle)

هي الزاوية الفراغية التي تصل بها الأشعة الشمسية إلى الأرض أو الزاوية المحصورة بعين الناظر الموجود على الأرض كما في الشكل (2.3.2)، وهي الزاوية التي تغطي نصف المنطقة الزاوية ضمن الإشعاع الذي يتم استقباله بمستقبل المركز. يُستقبل الإشعاع بواسطة الزاوية $2\theta_c$ ، بسبب أنّ الإشعاع الوارد ضمن هذه الزاوية يصل للمستقبل بعد

اجتياز الفتحة الشمسية. تصف هذه الزاوية الحقل الزاوي ضمن الإشعاع الممكن جمعه بالمستقبل بدون ملاحقة المركز للإشعاع الشمسي.



الشكل (2.3.2) مخطط للشمس بدرجة T_s عند المسافة R من مركز ذي فتحة شمسية A_{ap} ومساحة المستقبل A_r ، اعتماداً على (Rabl (1976a)،

تحتسب نصف زاوية القبول من العلاقة:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{r}{R} \right) = \left(\frac{1.39 \times 10^9 / 2}{1.495 \times 10^{11}} \right) = 0.266^\circ \approx 0.27^\circ$$

حيث :

r هو نصف قطر الشمس: $2r = 1.39 \times 10^9$

R هو المسافة بين مركزي الشمس والأرض: $R = 1.495 \times 10^{11}$

$2\theta_c = 0.53^\circ$ or $(32')$ فتكون نصف زاوية القبول: $\theta_c = 0.27^\circ$ or $(16')$.

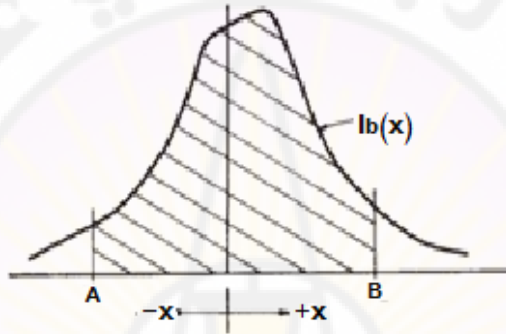
2.3.3. مساحة الماص/المستقبل (A_r)

هي المساحة الكلية التي تستقبل الإشعاع الشمسي المباشر المركز. توفر هذه المنطقة الطاقة الحرارية المفيدة للنظام.

2.3.4. معامل الاعتراض γ (Interceptance factor):

هو جزء من الإشعاع المباشر المنعكس من المرآة على سطح (الامتصاص /المستقبل). و يوضح أنه لا تصل كامل الأشعة الشمسية الواردة على السطح العاكس

إلى المستقبل. تعتمد قيمة عامل الاعتراض على حجم السطح الماص، عملياً يجب أن يكون أكبر من 0.9. يكون معامل الاعتراض للإشعاع العمودي الوارد على الفتحة واحداً. إن قيمة γ لها تأثير كبير على مردود اللواقط المركزة للأشعة الشمسية (على سبيل المثال: المرآة والعدسة) بالإضافة إلى ذلك فإن جودة اللاقط تتعلق بدقة التصنيع والتوجيه، لذلك فإن تجهيزات التحكم تكون ضرورية للتحكم باللاقط و تصحيح موقعه عبر تجهيزات ملاحقة الأشعة الشمسية.



الشكل (2.3.3) مثال على توزيع تدفق الإشعاع في مستوى البؤرة في مجمعات التركيز الخطية. المستقبل يمتد من A-B

هذا المفهوم مفيد بشكل خاص في وصف مركبات التصوير. يوضح الشكل (2.3.3) مثالاً للصورة التي تكونت في المستوى البؤري لمركز خطي إذا امتد المستقبل من A إلى B ، فيعطى عامل الاعتراض بالعلاقة:

$$\gamma = \frac{\int_A^B I_b(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} I_b(x) dx} \quad (2.3.1)$$

2.3.5. نسبة التركيز C:

التعريف الأكثر شيوعاً لنسبة التركيز، تركيز المساحة: هي نسبة مساحة الفتحة الشمسية A_a (Aperture) إلى مساحة المستقبل A_r ، بفرض أن طاقة الأشعة الشمسية تصل للمستقبل دون أي ضياع في الطاقة وتعطى بالمعادلة:

$$C = A_a / A_r \quad (2.3.2)$$

تحتوي هذه النسبة على الحد الأعلى الذي يعتمد على ما إذا كان التركيز عبارة عن مركز تركيزاً ثلاثي الأبعاد (دائري) مثل قطعي أو مركز ثنائي البعد (خطي) مثل مركز مكافئ أسطواني. يستند التطور التالي لنسبة التركيز العظمى إلى القانون الثاني للديناميكا الحرارية المطبقة على التبادل الحراري الإشعاعي بين الشمس والمستقبل. يتم النظر في المركز الدائري بمساحة فتحة A_a و مساحة المستقبل A_r و مشاهدة الشمس دائرة نصف قطرها r من المسافة R ، كما هو مبين في الشكل (2.3.2). كما مر سابقاً، فإن نصف الزاوية الموضحة بالشمس هي θ_c والتي هي نصف زاوية القبول من أجل التركيز الأعظمي (يتم إظهار المستقبل خارج الفتحة للتوضيح).

تختلف قيمة C من الواحد للمجمعات المسطحة (FPC) إلى قيم أكبر من أجل المجمعات المركزة للإشعاع.

يمكن تحقيق الحد الأقصى لنسبة التركيز الممكنة بأخذ مركزاً دائرياً (ثلاثي الأبعاد) تقع فتحة و منطقة الاستقبال على مسافة R من مركز الشمس. إن الشمس لا يمكن اعتبارها مصدراً نقطياً ولكن كرة نصف قطرها r ، لذلك المراقب الواقف على الأرض يرى الشمس بنصف زاوية القبول. يتم اعتبار الشمس جسماً أسود، درجة حرارته T_s و المستقبل أيضاً جسم أسود درجة حرارته T_r . إذا كان المركز مثالياً، فإن الإشعاع الصادر من الشمس على الفتحة (و بالتالي على المستقبل أيضاً) هو جزء الإشعاع المنبعث من الشمس والذي يتم اعتراضه بواسطة الفتحة. على الرغم من أن الشمس ليست جسماً أسود فيكون مقدار الطاقة الشمسية المنبعثة من الشمس معطى بالعلاقة:

$$Q_s = (4\pi r^2) \sigma T_s^4 \quad (2.3.3)$$

حيث:

T_s [K] درجة حرارة الشمس.

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4$ ثابت ستيفان بولتزمان.

r نصف قطر الشمس [km].

يعترض السطح العاكس جزءاً من هذا الإشعاع، ويعطى هذا الجزء بالنسبة التالية:

$$F_{s-r} = A_a / 4\pi R^2 \quad (2.3.4)$$

بالتالي تكون الطاقة المنبعثة من الشمس و التي يتم تلقيها من قبل المركز معطاة بالعلاقة التالية:

$$Q_{s-r} = A_a \frac{4\pi r^2}{4\pi R^2} \sigma T_s^4 = A_a \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^4 \quad (2.3.5)$$

حيث:

Q_{s-r} الإستطاعة المكتسبة من قبل المركز و المنبعثة من الشمس [W].

$4\pi r^2$ هي مساحة السطح الخارجي لكرة الشمس التي نصف قطرها (r) .

R [km] المسافة بين مركز الشمس و فتحة المستقبل للمركز .

باعتبار سطح (الماص/ المستقبل) جسماً أسود فإنه سيعطي طاقة حرارية بالإشعاع، سيصل إلى الشمس جزء فقط من هذا الإشعاع مقداره $A_r T_r^4$ ، و يعطى هذا الجزء بالعلاقة:

$$Q_{r-s} = A_r F_{r-s} \sigma T_r^4 \quad (2.3.6)$$

حيث:

A_r هو مساحة المستقبل.

F_{r-s} هي جزء الإشعاع الذي سوف يصل من المركز إلى الشمس، بما أن أكبر قيمة للمعامل F_{r-s} هي الواحد، في هذه الشروط المثالية تكون أعلى درجة حرارة للسطح الماص مساوية لدرجة حرارة الشمس $T_{sun} = T_r$. و تبعاً للقانون الثاني في

الترموديناميك يكون هذا صحيحاً فقط عندما: $Q_{r-s} = Q_{s-r}$

نحصل من المعادلتين السابقتين على:

$$A_r F_{r-s} \sigma T_r^4 = A_a \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^4 \Rightarrow C = \frac{A_a}{A_r} = \frac{R^2}{r^2} F_{r-s} \quad (2.3.7)$$

فتكون نسبة التركيز الأعظمية النظرية بالنسبة للمركزات الثلاثية الأبعاد (المركزات النقطية):

$$C_{\max} = \frac{1}{\sin^2(\theta_c)} \quad (2.3.8)$$

بإجراء نفس التحليل للمركزات الخطية ذات القطع المكافئ تكون نسبة التركيز الأعظمية النظرية:

$$C_{\max} = \left(\frac{A_{qp}}{A_r} \right)_{Linear, \max} = \frac{1}{\sin \theta_c} \quad (2.3.9)$$

تكون نسبة التركيز الأعظمية $C_{\max}$ لمركز مثالي ذي دوران متناظر مع مستقبل دائري لأشعة الشمس و نظام ملاحقة على محورين (على سبيل المثال المرآة ذات القطع المكافئ):

$$C_{\max} = 1 / \sin^2 (16') = 46747$$

نطبق للمركزات الخطية ذات نظام ملاحقة على محور واحد، على سبيل المثال المرايا الأسطوانية ذات القطع المكافئ العلاقة:

$$C_{\max} = 1 / \sin (16') = 216$$

تتراوح قيمة نسبة التركيز C للمركزات الخطية بين 20 و 100. وبالتالي يمكن استنتاج أن نسبة التركيز العظمى من أجل المركزات ذات نظام الملاحقة الثنائي تكون أعلى. على أي حال: يُطلب من أجل زيادة نسبة التركيز أن تكون الدقة عالية لآلية الملاحقة والتصنيع الدقيق للمجمع لأن θ_c تكون صغيرة جداً. وتكون نسبة التركيز الأعظمية للاقط حلقي قطعي حقيقي:

$$C_{\max} = \sin \theta_c \cos(0.27^\circ + \theta_c) / \sin(0.27^\circ + \delta / 2) - 1 \quad (2.3.10)$$

حيث:

δ هي خطأ زاوية المركز.

لمركز شمسي ذي قطع مكافئ حوضي CPC ثابت، تعتمد نصف زاوية القبول على حركة الشمس في السماء. تتعلق زاوية القبول لمركز شمسي CPC الذي يملك محور دوران (N-S) شمال-جنوب و المائل عن الأفق بمجال الساعات مثلاً: من أجل 6 h من تجميع الطاقة المفيدة من الشمس، $2\theta_c = 90^\circ$ ، لأن الشمس تقطع 15° كل ساعة. في هذه الحالة تكون :

$$C_{\max} = \frac{1}{\sin(45)} = 1.41$$

2.3.6. درجة حرارة الماص الأعظمية:

عندما تكون قيمة نسبة التركيز الأعظمية $C_{\max} = 46050$ ينبغي أن تصل درجة الحرارة الأعظمية النظرية لمستقبل الأشعة المثالي إلى القيمة T_s وهي درجة حرارة الشمس التي تساوي $5777[^\circ\text{C}]$ ، لكن القيم التي يتم الحصول عليها فعلياً لكل من C ودرجة حرارة الماص هي في الواقع أقل بكثير. كما رأينا، فإن نسبة التركيز C للاقط الشمسي المركز تتعلق بنوع المركز و بدقة التصنيع و التوجيه.

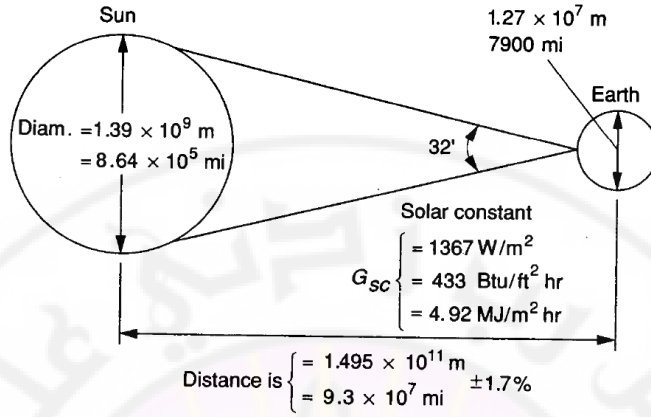
تحتسب درجة حرارة الماص الأعظمية $T_{a,\max}$ مقدرة بالكلفن بالاعتماد على معادلة توازن الطاقة لأجل الماص و بإهمال الفقد الحراري كما يلي:

$$T_{a,\max} = T_s (C / C_{\max})^{1/4} \quad (2.3.11)$$

تتعلق درجة حرارة الماص T_{abs} الحقيقية بفقدان الطاقة عن طريق انعكاس الأشعة و انتقال الحرارة بالحمل. و قد تمّ استخدام المراكز الخطية في مجال درجات الحرارة المتوسطة التي تتراوح بين $300-500[^\circ\text{C}]$ ، و يمكن أن تصل نظرياً حتى $1000[^\circ\text{C}]$. أما المراكز النقطية فقد تم استخدامها في مجال درجات الحرارة العالية و التي تتراوح ما بين $500-3000[^\circ\text{C}]$.

مثال 2.3.1:

خمن مقدار الطاقة المنبعثة من الشمس و مقدار الطاقة التي تصل للأرض و الثابت الشمسي من أجل درجة حرارة الشمس 5777 K بالاعتماد على الشكل (2.3.4) المبين عليه قطر الشمس و الأرض و المسافة الوسطية بين الشمس و الأرض. إذا كانت المسافة بين الشمس و كوكب الزهرة 0.71 ضعف المسافة بين الشمس و الأرض فخمن الثابت الشمسي لكوكب الزهرة.



الشكل (2.3.4) العلاقة بين الأرض والشمس

الحل:

يعطى مقدار الطاقة المنبعثة من الشمس Q_s بالعلاقة:

$$Q_s / A_s = \sigma T_s^4 = 5.67 \times 10^{-8} * (5777)^4 = 63.15 [MW / m^2]$$

$$Q_s = 63.15 * 4\pi * \left(1.39 * \frac{10^9}{2}\right)^2 = 3.82 * 10^{20} [MW]$$

يحسب الثابت الشمسي من المعادلة (2.3.5):

$$\frac{Q_{s-r}}{A_a} = \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^4 = \frac{(1.39 * 10^9 / 2)^2}{(1.496 * 10^{11})^2} * 5.67 * 10^{-8} (5777)^4 = 1363 [W / m^2]$$

إن مساحة الأرض المعرضة لأشعة الشمس هي: $\pi d^2 / 4$ و لذلك فإن مقدار الطاقة المستلمة في الأرض هي:

$$\frac{\pi (1.27 * 10^7)^2}{4} * 1.363 [kW / m^2] = 1.73 * 10^{14} [kW]$$

المسافة الوسطية بين فينوس والشمس هي:

$$1.496 * 10^{11} * 0.71 = 1.062 * 10^{11} [m]$$

لذلك يكون الثابت الشمسي لفينوس هو:

$$\frac{Q_{s-r}}{A_d} = \frac{r^2}{R^2} \sigma T_s^4 = \frac{(1.39 * 10^9 / 2)^2}{(1.062 * 10^{11})^2} \times 5.67 \times 10^{-8} (5777)^4 = 2705 [W / m^2]$$

كلما ارتفعت درجة الحرارة التي يتم بها توزيع الطاقة، يجب أن تكون نسبة التركيز أعلى و يجب أن تكون البصريات أكثر دقة لكل من المركز و نظام التوجيه.

2.4. تصنيف المركّزات تبعاً للملاحقة الشمسية:

تؤمن المركّزات الشمسية التي تلاحق الشمس درجات حرارة توزيع عالية بسبب وجود جهاز تتبع دقيق و سطح ناعم؛ و لذلك فهي غالية الثمن.

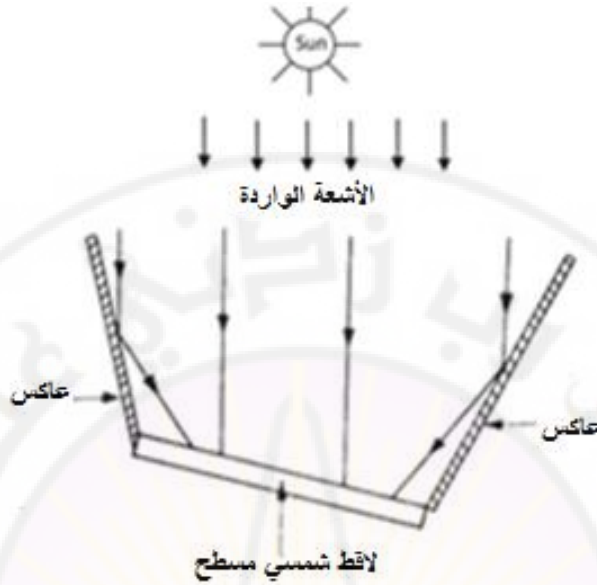
2.4.1. المركّزات الشمسية الثابتة:

تم تصميم مركّزات غير مكلفة بدون وجود جهاز تتبع للشمس للعمليات التي تحتاج درجات حرارة متوسطة. و تناقش بعض هذه المركّزات باختصار على النحو التالي:

(1) مستقبل مسطح مع مرآة داعمة:

يوضح الشكل (2.4.1) جهاز استقبال FPC تقليدي مع عاكسات مستوية عند الحواف لعكس إشعاع إضافي في جهاز (الماص / المستقبل). وتسمى المرايا المسطحة أيضاً "المرايا الداعمة". نسبة تركيز هذا المركز منخفضة نسبياً، لكنها أعلى من النسبة التقليدية لـ FPC. و تبلغ أقصى قيمة لنسبة تركيز في هذه المجمعات أقل من 4.

تصبح مرايا الدعم أقل فاعلية بسبب زيادة زاوية الورود الشمسي، و يمكن استخدام مرايا معززة على الجوانب الأربعة لمجمع واحد. تبدأ المرآة في الواقع في إلقاء ظلال على الماص من أجل زاوية ورود الإشعاع الشمسي أكبر من نصف زاوية المرايا الداعمة، و يمكن استخدام مرايا داعمة على وجهين فقط في حالة وجود مجموعة من المجمعات المسطحة.



الشكل (2.4.1) لاقط مسطح مع مرايا معززة مسطحة

يمكن زيادة الكفاءة الحرارية لنظام المجمع المسطح المدعم بالمرايا العاكسة عدة مرات خلال العام مع تغيير في زاوية المرايا المسطحة. تتمثل ميزة هذا النظام في استخدام الإشعاع المنتشر بالإضافة إلى الإشعاع المباشر. ستكون درجة الحرارة التي يمكن بلوغها والكفاءة الحرارية للمجمع، في هذه الحالة، أكبر بالمقارنة مع تلك الخاصة بـ FPC مع نفس مساحة المجمع.

(2) المركز الشمسي المكافئ المركب (CPC)

Compound Parabolic Concentrator

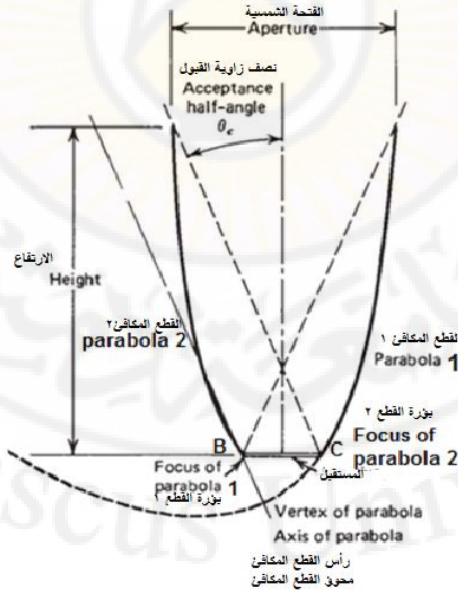
يتألف المركز ذو القطع المكافئ المركب من عاكسين جانبيين بشكل قطع مكافئ و من سطح أو مستقبل أشعة ذي شكل أسطواني (الماص). ويمكن الوصول إلى نسبة تركيز C ذات قيمة نظرية تصل إلى 15 باستخدام هذا المركز، لكن عملياً تصل قيمتها الأعظمية فقط إلى 12. لا يمتص هذا اللاقط فقط الإشعاع المباشر (مثل اللاقط المركز

العادي) بل يمتص قسماً من الإشعاع المبعثر أيضاً. يظهر الشكل (2.4.2) تخطيطاً للمركز CPC الكامل و غير الكامل.

يتوضع الماص المسطح في هذا النوع من المراكز بين النقاط المحرقة للجانبين ذوي القطع المكافئ. يقاس ارتفاع CPC بين الماص والحافة العليا للعواكس الجانبية.

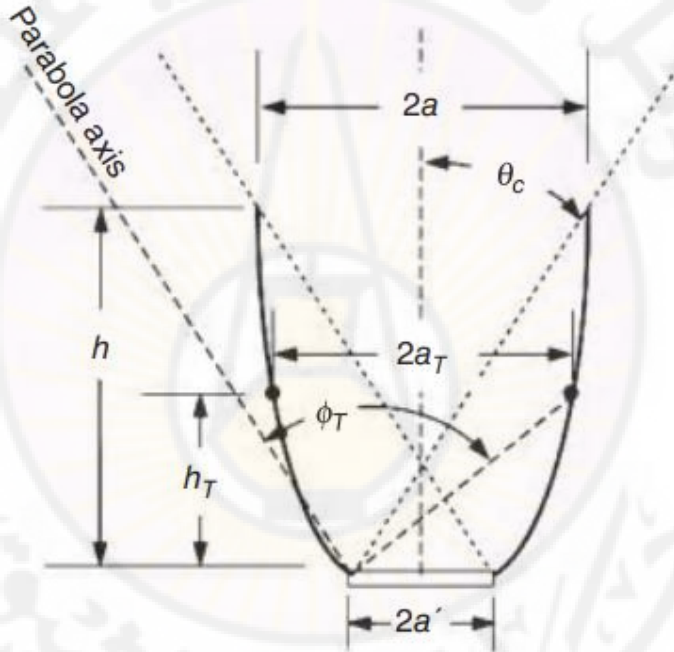
يمتد كل قطع مكافئ حتى سطحه بالتوازي مع محور CPC. نصف زاوية القبول θ_c هي الزاوية المحصورة بين محور CPC و الخط الذي يربط بؤرة التركيز و أحد القطع المكافئة مع الحافة المعاكسة للفتحة. إذا كان العاكس مثالياً، فإن أي إشعاع يدخل الفتحة بزوايا ما بين $\pm \theta_c$ سينعكس على المستقبل عند قاعدة المركز من خلال انعكاس عاكسات القطع المكافئ.

لا يتعرض انعكاس حزمة الإشعاع الواردة في المنطقة الوسطى للفتحة إلى أي انعكاس، في حين أن ذلك الواقع بالقرب من الحواف يخضع لواحد أو أكثر من الانعكاسات. تعتمد أعداد الانعكاسات على: (a) زاوية الورود، (b) ارتفاع المجمع، و (c) نسبة التركيز.



الشكل (2.4.2a) مقطع عرضي تخطيطي لمركز قطع مكافئ متماثل كامل

لتقليل التكلفة المادية للمجمع و الحجم، يمكن اقتطاع ارتفاع CPC بمقدار النصف من أسفل دون أي تغيير كبير في نسبة التركيز كما هو مبين في الشكل (2.4.2b)، و يمكن استخدام أشكال المستقبل مثل الزعانف و الأنابيب الدائرية لتحسين الأداء البصري و الحراري. من مزايا هذا النوع من المركّزات CPC أنه يمكن استخدامه في وضع عدم الملاحقة للشمس بنسب تركيز تبلغ حوالي 6 ويمكن أن يلاحق قرص الشمس ولكن بشكل بسيط ، ومن خصائصه أن نسبة التركيز له منخفضة .

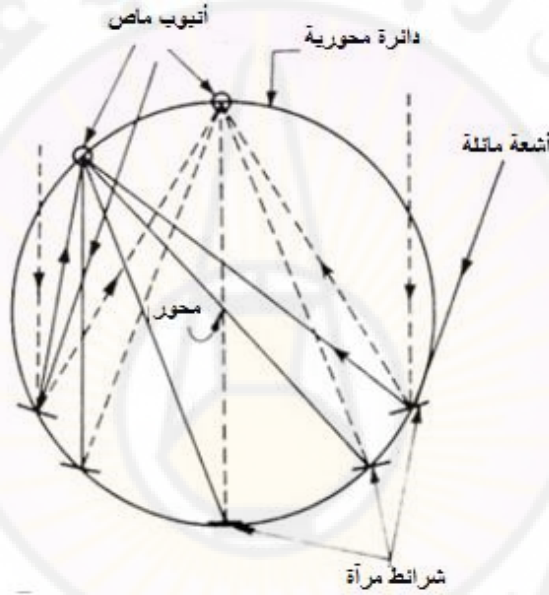


الشكل (2.4.2b) مقطع عرضي تخطيطي لمركز قطع مكافئ متماثل مقطوع

(3) المركز الشمسي ذو المرآة الثابتة (FMSC)

يتكون المركز الشمسي ذو المرآة الثابتة من (i) مرآة ثابتة و (ii) نظام مستقبل تعقب كما هو موضح في الشكل (2.4.3). و تتكون المرآة الثابتة من شرائط (strips) مسطحة طويلة ضيقة مرتبة على أسطوانة دائرية مرجعية من دائرة نصف قطرها R .

عرض شريط المرآة متوافق مع قطر أنبوب (الماص/المستقبل). يتم ضبط زاوية كل عنصر بطريقة تجعل المسافة البؤرية للصف ضعف نصف قطر الأسطوانة المرجعية. تنتج الصفوف خطأ بؤرياً ضيقاً، يقع على نفس المسار الدائري مع الحركة النهارية للشمس. و يمكن تتبع الخط البؤري بسهولة بواسطة أنبوب الاستقبال القابل للحركة. يتم تصنيع أنبوب للدوران حول مركز انحناء وحدة العاكس. و بالتالي، فإن الجزء الحساس من النظام يشتمل على مرآيا ثابتة صلبة.



الشكل (2.4.3) مقطع لمجمع شمسي مركز للإشعاع ذي مرآة ثابتة

يكون عرض الصورة نفس العرض المتوقع لعنصر المرآة في (الماص/المستقبل) بشكل مثالي. و بالتالي، فإن نسبة التركيز هي تقريباً نفس عدد عناصر المرآة. تؤدي شرائط المرآة إلى التظليل بزوايا ارتفاع الشمس المرتفعة جداً أو المنخفضة جداً بالنسبة للفتحة الشمسية الثابتة والمقعرة. ومع ذلك، يمكن تصميم المرآيا بشكل مناسب لفقدان 10% فقط من إجمالي الطاقة المفقودة على مدار عام. و قد أظهرت أنواع المركبات الشمسية ذات المرآة الثابتة كفاءة حرارية شاملة في حدود (40 - 50%).

2.4.2. المراكز الشمسية الملاحقة للشمس على محور واحد:

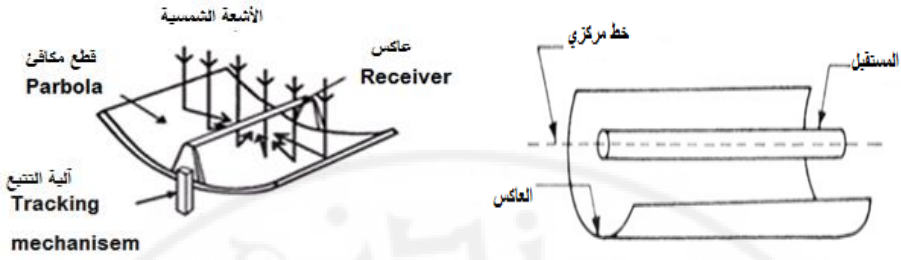
تقوم الأنظمة البصرية الخطية (الأسطوانية) بتركيز حزمة الإشعاع للمستقبل إذا كانت الشمس في المستوى المركزي للمركز الذي يتضمن المستوى المحرقى و خط ذروة العاكس، و يتم ذلك من خلال تدوير البصريات حول محور دوران خاص، يمكن أن يكون محور الدوران هذا موجهاً باتجاه شمال - جنوب أو باتجاه شرق-غرب، أو يكون موازياً لمحور الأرض، و في هذه الحالة تكون سرعة دوران البصريات $15^\circ/h$. وهناك اختلافات هامة في كل من نوعية حزمة الإشعاع الواردة ونوعية الخيال الذي يمكن الحصول عليه من طرق التوجيه الثلاثة المذكورة .

يجب أن تمتلك الأنظمة القدرة على ضبط موقع المجمع من لحظة التوقف عن العمل عند نهاية اليوم إلى وقت التشغيل في صباح اليوم التالي، و القدرة على الضبط عند وجود الغيوم المنقطعة، إضافة للقدرة على ضبط المجمع لأفضل موقع لمقاومة الرياح القوية بدون أن يتعطل.

1-المركز الشمسي الأسطواني ذو القطع المكافئ (CPSC):

يشتمل المركز الشمسي الأسطواني ذو القطع المكافئ (لاقط مركز خطي) على عاكس مكافئ أسطواني و جهاز استقبال أنبوب معدني في المستوى البؤري كما هو موضح في الشكل (2.4.4) تتم تغطية جهاز الاستقبال الأسود بواسطة المركز، ويتم تدويره حول محور واحد لتتبع الشمس. يتم تسخين مائع نقل الحرارة أثناء تدفقه عبر أنبوب الامتصاص.

استخدمت هذه المراكز الشمسية لسنوات عديدة. و يمكن استخدام قطر الفتحة الشمسية و زاوية الحافة و حجم و شكل (الماص/المستقبل) لتحديد نسبة التركيز. قد يكون أنبوب الماص مصنوعاً من الفولاذ الطري (منخفض الكربون) أو النحاس و هو الأفضل نظراً لموصلية الحرارة العالية. و يكون مغلفاً بطلاء أسود مقاوم للحرارة، و يمكن طلاء أنبوب الماص بطلاء انتقائي لتحسين الأداء، و يتم استخدام سوائل نقل الحرارة المختلفة اعتماداً على متطلبات درجة الحرارة.



الشكل (2.4.4) المركز الشمسي ذو القطع المكافئ الأسطواني

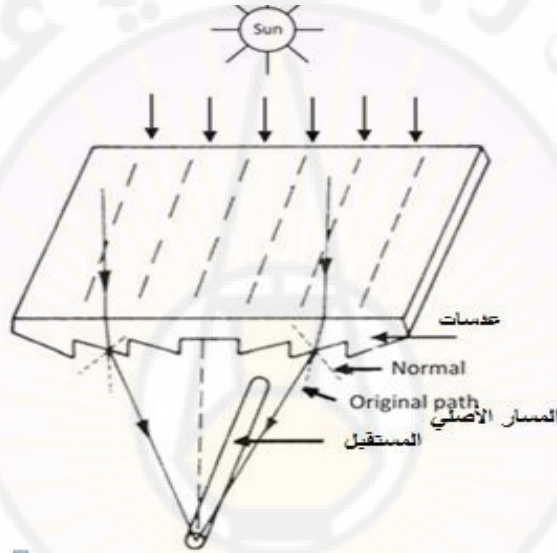
قد تكون العاكسات مصنوعة من ألواح الألمنيوم المؤكسد أو مايلر المنيوم أو من الفولاذ المصقول أو الزجاج الفضي المنحني. نظراً لأنه يصعب ثني الزجاج الكبير جداً، يتم استخدام شرائط (strips) المرآة في بعض الحالات، و يثبت الجزء العاكس على هيكل خفيف الوزن. تتراوح نسبة التركيز الشمسي لأسطوانة الماص من (30-5).

الضياعات الرئيسية في الطاقة الحرارية من (وحدة التركيز/المستقبل) عند ورود الاشعاع العمودي، هي الضياعات التي تحدث أثناء الانعكاس من السطح العاكس. هناك ضياع بالحمل الحراري من (الماص/ المستقبل) إلى المناطق المحيطة. تبذل الجهود لاستخدام مواد عالية الانعكاس للحد من الضياعات، و تستخدم الأشرطة الملونة في أنبوب الماص لنقل حرارة كبيرة من الماص إلى سائل العمل. و لتقليل الضياعات الحرارية تتم إحاطة (الماص/المستقبل) بأنبوب زجاجي لتخفيف الضياع حيث لا يسمح الزجاج للأشعة تحت الحمراء الطويلة بالمرور بل يعكسها ويسمح فقط للأشعة المرئية القصيرة الموجة باختراقه.

يستقبل المركز الشمسي الإشعاع المباشر، و في هذا النوع من المراكز أي القطعي المكافئ الخطي من الصعب وصول أشعة الشمس لكل السطح العاكس بشكل جيد على مدى ساعات النهار، لذلك كان لابد من وجود نظام ملاحقة للشمس، و يكون هذا النظام وفق محور (اتجاه) واحد مما يجعل اللاقط مواجهاً دوماً للشمس وينعكس أكبر مقدار من الأشعة على المحرق.

قد يكون اتجاه القطع المكافئ الأسطوانى الخطي في أي من الاتجاهات الثلاثة، أي (1) الشرق -الغرب (2) الشمال إلى الجنوب، أو (3) قطبياً. أول اتجاهين لديهما أعلى ضياعات جيب التمام لزواوية الورود. يعترض الاتجاه القطبي المزيد من الإشعاع المباشر لكل وحدة مساحة مقارنة مع الأوضاع الأخرى. و بالتالي، فإنه يعطي أداء أفضل.

(2) عدسة فريسنل الخطية / العاكس:

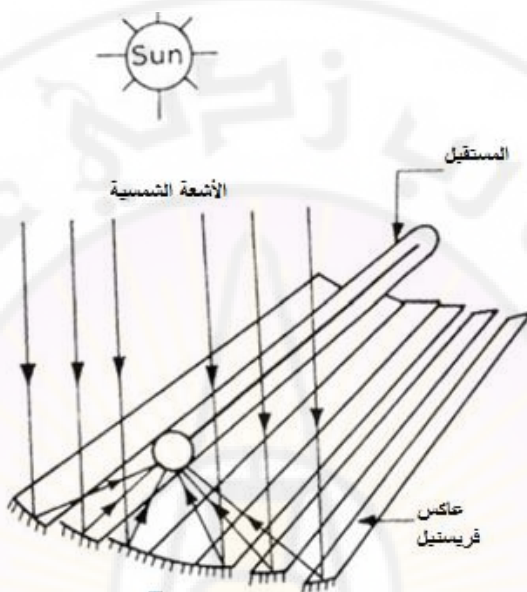


الشكل (2.4.5) مقطع في مركز عدسة فريسنل الخطية

يتكون المركز الشمسي لعدسة فريسنل الخطية، كما هو مبين في الشكل (2.4.5)، من أخاديد grooves خطية على سطح مادة الانكسار. يتم اختيار زوايا الأخدود بالإشارة إلى طول موجة ورود الإشعاع المباشر بحيث تعمل العدسة كوحدة من أجل الضوء، و التي تَرْدُ بشكل عمودي.

يمكن استخدام كل من الزجاج و البلاستيك كمادة عاكسة لتصنيع عدسات فريسنل. نادراً ما يستخدم الزجاج لأنه يصعب تشكيله، كما أنه يحتوي على توتر سطحي كبير، و

من ناحية أخرى، فإنّ العدسات البلاستيكية اقتصادية، و صب البلاستيك يدوم لوقت ملموس. يتم تشكيل عدسات فريسnel بلاستيكية ذات 20 أخدوداً / مم.



الشكل (2.4.6) مقطع في عاكسات فريسnel

يمكن تركيب عدسة Fresnel بإحدى الطرق التالية:

(a) الأخاديد التي تواجه الشمس: في هذه الحالة، تمنع الأجزاء عديمة الفائدة من الأخاديد من نقل جزء من الإشعاع المباشر من الدخول إلى المركز (المحرق focus). وفقاً لقانون Snell، ينحرف الضوء المنكسر بعيداً عن الوضع الطبيعي عند الانتقال من الوسط الأكثر كثافة إلى الوسط الأقل كثافة. علاوة على ذلك، فإن الغبار المتراكم في هذه الأخاديد يؤدي إلى إضعاف الأداء.

(b) الأخاديد المواجهة للأسفل: في هذه الحالة، يحدث خسارة انعكاس عالية على السطح وانحراف كبير خارج المحور من المركز الشمسي، و تسبب خسائر الانعكاس انخفاض الكفاءة الحرارية، و تؤدي الانحرافات الكبيرة خارج المحور إلى انخفاض نسبة

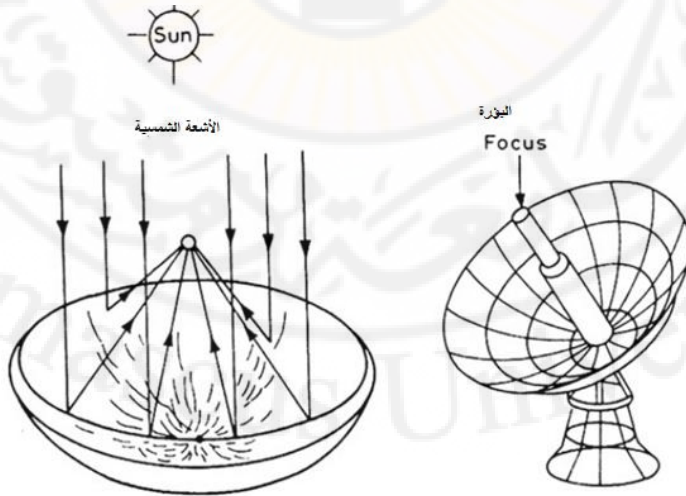
التركيز. يختلف البعد البؤري للعدسة بشكل سريع مع تغير زاوية الورد. يحتاج النظام البصري إلى تتبع مسار الشمس للحصول على أداء أفضل.

2.4.3. المركبات الشمسية الملاحقة للشمس على محاورين:

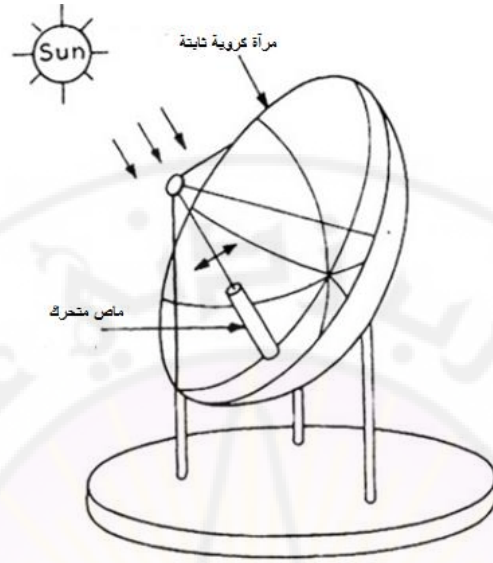
يجب توجيه العواكس ذات السطوح الدورانية بحيث يقع محرق و ذروة العاكس و الشمس على نفس الخط، و بذلك يجب أن يكون المركز قابلاً للحركة حول محورين اثنين أفقي و شاقولي، أو حول محورين: أحدهما موازٍ لمحور دوران الأرض، و الآخر عمودي عليه. و بإمكان أنظمة التوجيه أن تقوم بعمليات ضبط مستمرة أو شبه مستمرة لتعويض التغير في الوضع الساعي للشمس، و يمكن ضبط بعض المجمعات المركزة الخطية ذات نسب التركيز المنخفضة في وضعيات متقطعة أسبوعياً أو شهرياً أو فصلياً و يتم ضبط أنظمة التوجيه المستمرة يدوياً أو آلياً.

(1) المركز الشمسي للطبق ذي القطع المكافئ (PDSC)

يدور القطع المكافئ في المركز الشمسي للطبق ذي القطع المكافئ (PDSC) حول المحور البصري كما هو موضح في الشكل (2.4.7) و (2.4.8). في هذه الحالة ، يتم تحقيق نسبة تركيز أعلى.



الشكل (2.4.7) المركز الشمسي للطبق ذي القطع المكافئ (PDSC)

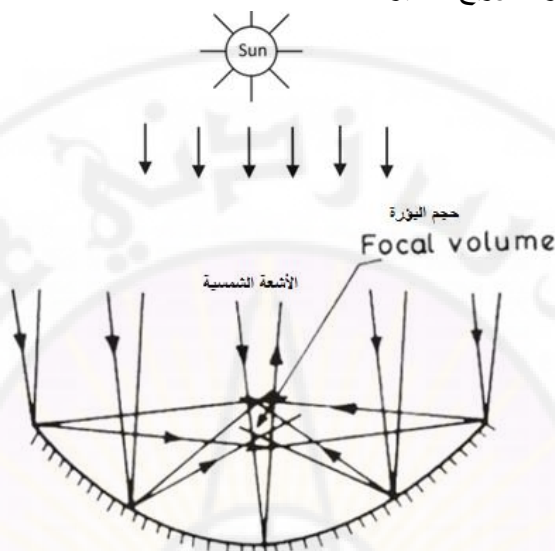


الشكل (2.4.8) عرض تخطيطي لمركز شمسي ذي قطع مكافئ (PDSC)

بالنظر إلى الشمس كمصدر نقطة للضوء، يتم تركيز الإشعاع المباشر عند نقطة في القطع المكافئ بسبب الانحناء المركب. ومع ذلك، يتم إنتاج صورة بسبب المادة الزاوية المحددة للشمس. علاوة على ذلك، قد لا يكون السطح قطعاً مكافئاً تماماً. فيؤدي هذا إلى تكبير الصورة بسبب سوء توجيه شعاع الضوء المباشر، وذلك بسبب وجود عناصر سطحية غير متجانسة. تنتقل الأشعة من المنطقة الوسطى من القطع المكافئ لمسافة أقصر للوصول إلى المحرق، بينما تنتقل الأشعة من الحواف لمسافة أكبر. ينتج انتشار الصورة، و بالتالي، يتم تشكيل صورة ثلاثية الأبعاد للشمس على شكل إهليلجي كما هو مبين في الشكل (2.4.9).

تعتبر الضياعات الحرارية الناتجة عن القطع المكافئ إشعاعية بالدرجة الأولى. يمكن تقليلها عن طريق تقليل مساحة فتحة السطح الماص، ومع ذلك، ينتج عن هذا عامل اعتراض intercept أصغر. عامل الاعتراض الأمثل هو حوالي 0.95 - 0.98. يجب أن يكون هناك حجم امتصاص كبير لتحقيق عامل الاعتراض الأمثل للشعاع. تعتبر الكفاءة الحرارية العالية للمجمع والطاقة الحرارية العالية الجودة من ميزات هذا النوع من

المركزات الشمسية. يمكن استخدام هذه الأجهزة كمصادر لمجموعة متنوعة من الأغراض بسبب درجات حرارة التوزيع الكبيرة.

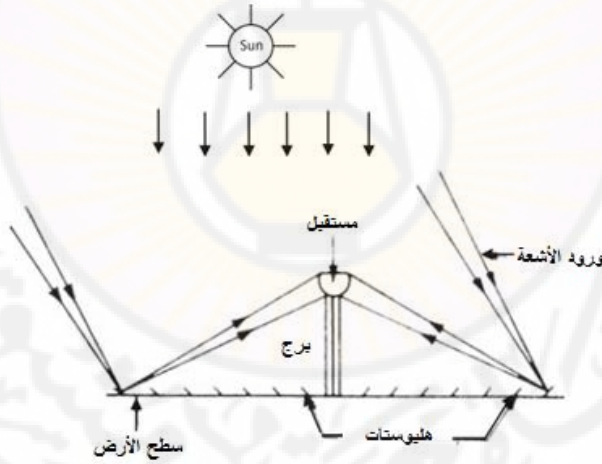


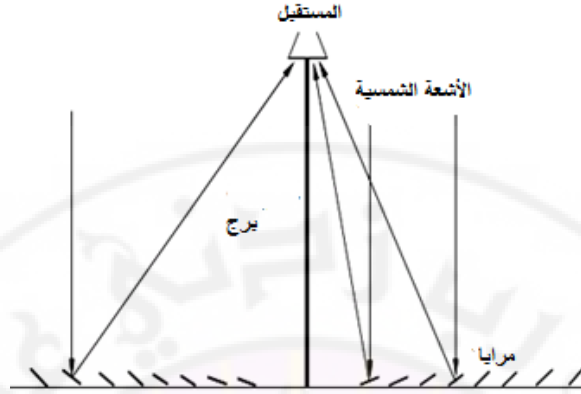
الشكل (2.4.9) شكل توضيحي لتشكيل صورة إهليلجية في شكل قطع مكافئ

(2) مستقبل البرج المركزي (CTR)

يتكون مستقبل برج مركزي (CTR) من (a) مستقبل ثابت مركزي و (b) هليوستات heliostats كما هو مبين في الشكل (2.4.10)، و يتكون الهليوستات من مجموعة كبيرة من المرايا المثبتة على إطار داعم، والتي تعكس حزمة الإشعاع نحو المستقبل، و يمكن استخدام هذا الإطار لتتبع الشمس وفقاً للمتطلبات. يتم تثبيت الهليوستات في الفراغ المفتوح، يعملون معاً وكأنهم قطع مكافئ مخفف. يُركّز الإشعاع المباشر على جهاز استقبال مركزي ثابت، و يمكن تحقيق نسب التركيز لهذه المركزات: $C \leq 3000$. يتم استخراج الطاقة الممتصة من قبل المستقبل، يتم توزيعها عند درجة حرارة أعلى و ضغط مناسب لتشغيل التوربينات لتوليد الطاقة.

تتمثل ميزة هذا النظام، في أنه لا توجد حاجة إلى حَمَل وسيط نقل الحرارة إلى مسافات كبيرة. و نتيجة لذلك، يتم تقليل ضياع الحرارة بشكل كبير للقضاء على الحاجة إلى العزل. و مع ذلك، يظهر العديد من المشاكل الأخرى في النظام. أغلبية هذه المشاكل بسبب المستقبل و الهليوستات. و هناك حاجة إلى عدد كبير من الهليوستات لتركيز حزمة الإشعاع، يتطلب هذا الأمر مساحة حرة كبيرة. قد يتم توفير الهليوستات مع ترتيب تتبع مناسب، و قد يتم ترتيبها بحيث يتم تجنب التظليل الذاتي لتحقيق تركيز مقبول. بالإضافة إلى التكلفة العالية، هناك مشكلة أخرى و هي تنظيف المرايا. علاوة على ذلك، يجب أن يكون ترتيب الهليوستات قوياً بما يكفي لمواجهة الظروف الجوية القاسية، و يجب أن يكون (المستقبل/الماص) قادراً على اعتراض الإشعاع المباشر المركز بفاعلية لامتصاص الحرارة و نقل هذه الطاقة إلى وسيط نقل الحرارة مع المحافظة على الحد الأدنى من ضياع الحرارة.



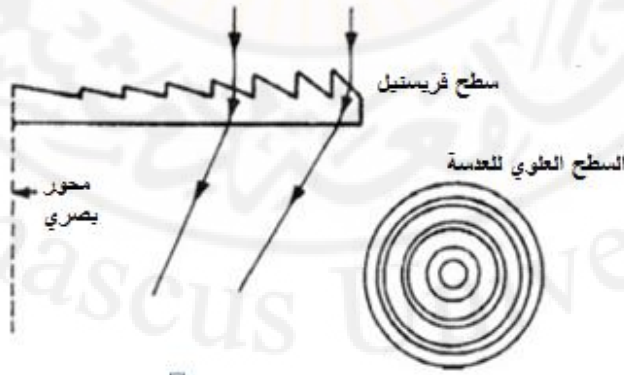


الشكل (2.4.10) عرض تخطيطي لنظام استقبال هليوستات مركزي

تم اقتراح العديد من التصميمات للسطح المستقبل، و تم اقتراح سوائل لنقل الحرارة، مثل البخار والمعادن السائلة. تنشأ بعض المشاكل بسبب الانعكاس وضياع الانتقال و كذلك الضغط الحراري في السطح المستقبل.

(3) عدسة فريسنل الدائرية (CFL)

لا تستخدم العدسات عادة في تطبيقات الطاقة الشمسية بسبب كلفتها العالية و وزنها. ومع ذلك، فهي تستخدم لمتطلبات درجات الحرارة العالية (الفرن الشمسي). يوضح الشكل (2.4.11) مبدأ عدسة فريسنل.



الشكل (2.4.11) رسم تخطيطي لعدسة فريسنل الدائرية

تعاذل بصرياً عدسة فريسنل تقريباً العدسة الرقيقة، و تقسم عدسة فريسنل إلى عدد من المناطق. تباعد المناطق في أعشار قليلة من الملليمتر، و يمكن أن تكون المساحة قليلة أيضاً بضعة سنتيمترات. يوجد داخل كل منطقة فتحة، و يتم ضبط ميل سطح العدسة بحيث يشبه سلوكها البصري سلوك العدسة الكروية التقليدية التي لها نفس البعد البؤري. لا يحتاج محور الدارة أن يكون منحنياً، و مع ذلك، يجب أن يكون لديه ميل صحيح حتى ينكسر الضوء إلى المحرق، و يكون هذا بسبب سطح الماص الكبير بالمقارنة مع عرض منطقة فريسنل على العدسة. اقترح مينيل Meinel معادلة لإمالة الواجهة كتابع لمساحة الفتحة الشمسية والبعد المحرق.

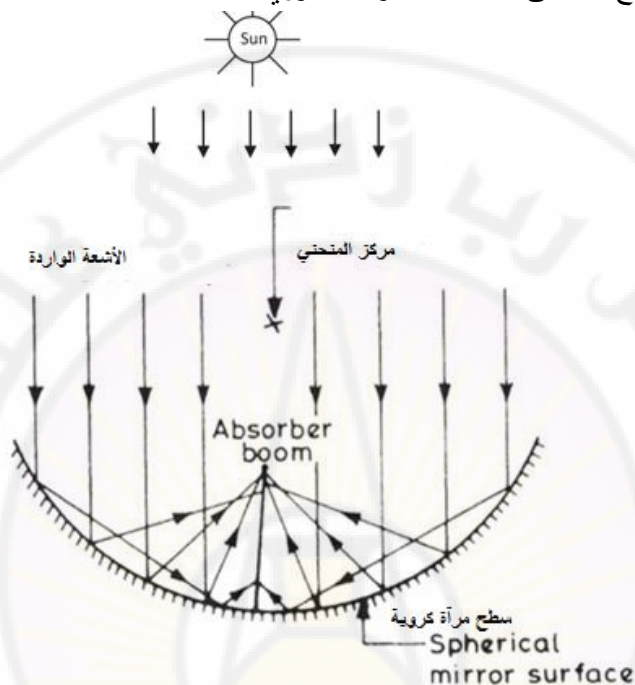
توفر عدسة Fresnel الدائرية نسبة تركيز جيدة جداً. بالنسبة للعدسة البلاستيكية الدقيقة، فإن تركيز السطوع عالٍ ويصل إلى 2000. ومن ثم، تستخدم عادة هذه المركبات مع الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون وأرسينيد الغاليوم gallium arsenide من أجل التدفق العالي. يجب أن تلاحق العدسة الشمس في تطبيقات الخلايا الشمسية.

(4) مرآة نصف كروية

يوضح الشكل (2.4.12) مقطعاً لمركز مرآة نصف كروية طورها ستوارد. لها مرآة ثابتة و مركز من نوع المستقبل. المكونات الرئيسية لهذا المركز هي: (a) مرآة نصف كروية ثابتة و (b) جهاز امتصاص خطي للتتبع و (c) هيكل داعم.

ينتج نصف الكرة الأرضية صورة بصرية شديدة الانحراف، و مع ذلك، فإن جميع الأشعة التي تدخل إلى نصف الكرة الأرضية بعد الانعكاس تعبر الخط المحوري عند نقطة ما بين البؤرة و سطح المرآة بسبب تناظر الضوء، و لذلك يدور جهاز الامتصاص حول مركز انحناء نصف الكرة الأرضية لاعتراض جميع الأشعة المنعكسة. يجب تحريك (الماص/المستقبل) بالمحور، والذي يتماشى دائماً مع الأشعة الشمسية التي تمر عبر مركز الكرة. يتطلب هذا تتبعاً على محورين. على الرغم من أنه يمكن ضبط هذه الحركة بعدة طرق، و تتمثل إحدى أبسط الطرق في استخدام حامل استوائي، حيث يتم تحريك جهاز (الامتصاص/المستقبل) حول محور قطبي بسرعة زاوية ثابتة تبلغ $[15^\circ/h]$

خلال النهار. و تجدر الإشارة إلى أن هذا النوع من المركبات يعطي تركيزاً أقل من التركيز في القطع المكافئ بسبب الانحراف الكروي.



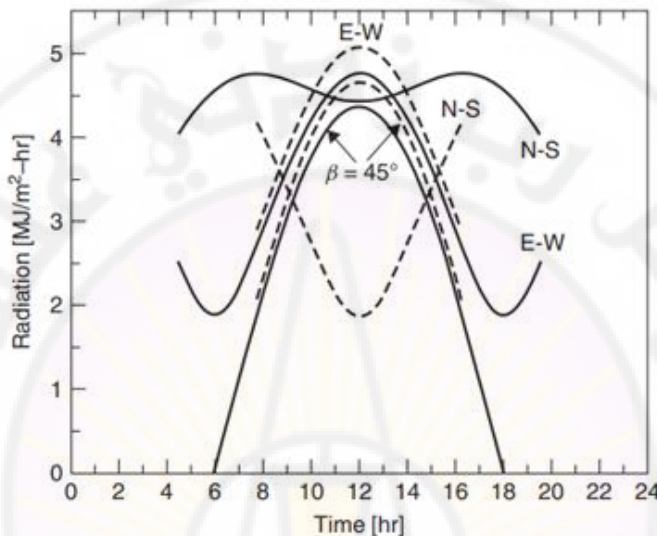
الشكل (2.4.12) مقطع لمركز مرآة نصف كروية

2.5. زوايا التتبع للمركبات الشمسية:

تقوم بعض المركبات الشمسية "بتتبع" الشمس من خلال التحرك بطرق محددة لتقليل زاوية ورود إشعاع الشمس المباشر على أسطحها و بالتالي تعظيم الإشعاع المباشر الوارد. هناك حاجة إلى زوايا الورد و زوايا سمت السطح للمجمعات الشمسية. ستكون العلاقات في هذا القسم مفيدة في حسابات الإشعاع لهذه الأسطح المتحركة.

كما رأينا أعلاه يتم تصنيف أنظمة التتبع، إذ يمكن أن يكون الدوران حول محور واحد (يمكن أن يكون له أي اتجاه ولكن في الممارسة العملية يكون عادةً أفقياً بين الشرق

والغرب أو أفقياً بين الشمال والجنوب أو رأسياً أو موازياً لمحور الأرض) أو يمكن أن يكون حول محورين.



الشكل (2.5.1) الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي لـ $\phi = 45^\circ$ على مجمّع ثابت عند $\beta = 45^\circ$. في مجمعات التتبع أحادية المحور من الشمال إلى الجنوب (N-S) و الشرق-غرب (E-W). المنحنيات الثلاثة المنقطة مخصصة للانقلاب الشتوي والمنحنيات المستمرة الثلاثة مخصصة للانقلاب الصيفي.

مجموعة المعادلات التالية (باستثناء المعادلات (2.5.4)) هي للأسطح التي تدور على محاور موازية للأسطح. يوضح الشكل (2.5.1) الإشعاع خارج الغلاف الجوي على سطح ثابت ذي ميل يساوي خط العرض و أيضاً على الأسطح التي تتتبع الشمس حول محور أفقي من الشمال إلى الجنوب أو من الشرق إلى الغرب عند خط عرض 45° في الانقلاب الصيفي و الشتوي (المنحنيات المنقطة هي للانقلاب الشتوي أما المنحنيات المستمرة فهي للانقلاب الصيفي). من الواضح أن التتبع يمكن أن يغير بشكل كبير التوزيع الزمني لإشعاع الحزمة الوارد. لا يؤدي التتبع دائماً إلى زيادة إشعاع الحزمة؛ قارن الإشعاع الشمسي في وقت الانقلاب الشتوي على سطح التتبع من الشمال إلى الجنوب

بالإشعاع الشمسي على السطح ثابت. من الناحية العملية، ستكون الاختلافات أقل مما هو موضح في الشكل بسبب الغيوم والانتقال في الغلاف الجوي.

1- يدور السطح (مستوي الفتحة الشمسية) حول محور الشرق - الغرب الأفقي مع ضبط يومي واحد بحيث يكون الإشعاع الشمسي الوارد على مستوي الفتحة عمودياً عند الظهر الشمسي، يكون الضبط مرة واحدة باليوم بتغيير زاوية ميلان مستوي الفتحة β من يوم إلى يوم و تحسب كما يلي: عند الظهر الشمسي تكون الزاوية الساعية صفراً $\omega=0^\circ$ وزاوية الورود $\theta=0^\circ$ وزاوية سمت السطح الموجه نحو الجنوب تماماً $\gamma=0^\circ$ يمكن كتابة معادلة زاوية الورود على سطح مائل كما يلي:

$$\cos \theta = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta$$

$$\cos 0 = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta$$

$$1 = \cos(\phi - \beta) \cos \delta + \sin(\phi - \beta) \sin \delta$$

حيث:

δ : زاوية الانحراف عن الظهر الشمسي والتي تتبع فقط لـ n رقم اليوم بالسنة.

ϕ : زاوية خط العرض الجغرافي.

β : زاوية ميل السطح عن السطح الأفقي.

$$\sin^2 x + \cos^2 x = 1 \quad \text{بأخذ العلاقة الرياضية:}$$

يمكن تطبيق هذا القانون على هذه العلاقة:

$$\cos(\phi - \beta) \cos \delta + \sin(\phi - \beta) \sin \delta = 1$$

إذا كان $\beta = (\phi - \delta) \Leftarrow (\phi - \beta) = \delta$ وبالتالي من أجل هذا السطح ونوع التتبع

تكون β تابعة لكل من ϕ و δ أي: $\beta = f(\phi, \delta)$ ، وتكتب معادلة زاوية الورود

بالمعادلة (2.5.1a):

$$\cos \theta = \cos^2 \delta \cdot \cos \omega + \sin^2 \delta \quad (2.5.1a)$$

و سيتم ضبط ميل هذا السطح لكل يوم تبعاً للمعادلة (2.5.1b):

$$\beta = |\phi - \delta| \quad (2.5.1b)$$

تكون زاوية سمت السطح γ ليوم 0° أو 180° اعتماداً على زاوية خط العرض الجغرافي وزاوية الانحراف:

$$\gamma = \begin{cases} 0^\circ & \text{if } \phi - \delta > 0 \\ 180^\circ & \text{if } \phi - \delta \leq 0 \end{cases} \quad (2.5.1c)$$

2- أما عندما يدور السطح حول محور الشرق- الغرب الأفقي وبطلب تعديلاً مستمراً لجعل زاوية الورود أصغر، حيث تكون زاوية الورود $\theta = 0^\circ$ عند الظهر الشمسي فقط وفي باقي الأوقات أصغر، و بما أن مستوي الفتحة يدور حول محور شرق-غرب فاللافت يجب أن يكون موجهاً نحو الجنوب تماماً، و تكتب زاوية الورود بالعلاقة:

$$\cos \theta = (1 - \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega)^{1/2} \quad (2.5.2a)$$

تعطى زاوية الميل بالعلاقة:

$$\tan \beta = \tan \theta_z |\cos \gamma_s| \quad (2.5.2b)$$

γ_s : زاوية سمت الشمس

زاوية سمت السطح γ ستكون لهذا النوع من التوجيه بين 0° و 180° إذا كانت قيمة زاوية سمت الشمس γ_s تمر عبر المجال $(\pm 90^\circ)$. لأي من نصفي الكرة الأرضية:

$$\gamma = \begin{cases} 0^\circ & \text{if } |\gamma_s| < 90^\circ \\ 180^\circ & \text{if } |\gamma_s| \geq 90^\circ \end{cases} \quad (2.5.2c)$$

3- بالنسبة للمستوي الذي يدور حول محور أفقي شمال-جنوب مع ضبط مستمر لتقليل زاوية الورود:

$$\cos \theta = (\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega)^{1/2} \quad (2.5.3a)$$

يُعطى الميل بالعلاقة:

$$\tan \beta = \tan \theta_z |\cos(\gamma - \gamma_s)| \quad (2.5.3b)$$

γ_s : زاوية سمت الشمس

زاوية سمت السطح γ ستكون (90°) أو (-90°) اعتماداً على زاوية سمت الشمس γ_s :

$$\gamma = \begin{cases} 90^\circ & \text{if } \gamma_s > 0 \\ -90^\circ & \text{if } \gamma_s \leq 0 \end{cases} \quad (2.5.3c)$$

4- إذا كان المستوي ذا ميل ثابت و يدور حول محور عمودي، يتم تقليل زاوية الورود عندما تكون زاوية سمت السطح مساوية لزاوية سمت الشمس، من المعادلة التالية:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \cos (\gamma_s - \gamma)$$

تكون زاوية الورود في هذه الحالة:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cos \beta + \sin \theta_z \sin \beta \quad (2.5.4a)$$

و يكون الميل ثابتاً و بالتالي:

$$\beta = \text{constant} \quad (2.5.4b)$$

و تكون زاوية سمت السطح:

$$\gamma = \gamma_s \quad (2.5.4c)$$

5- بالنسبة لسطح يدور حول محور شمال - جنوب موازٍ لمحور الأرض مع تعديل مستمر لتقليل θ زاوية الورود:

$$\cos \theta = \cos \delta \quad (2.5.5a)$$

يتغير الميل باستمرار و يكون:

$$\tan \beta = \tan \phi / \cos \gamma \quad (2.5.5b)$$

و زاوية سمت السطح تكون:

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\sin \theta_z \sin \gamma_s}{\cos \theta' \cdot \sin \phi} + 180 C_1 C_2 \quad (2.5.5c)$$

حيث: C_1, C_2 ثوابت

$$\cos \theta' = \cos \theta_z \cos \phi + \sin \theta_z \sin \phi \cos \gamma_s \quad (2.5.5d)$$

$$C_1 = \begin{cases} 0 & \text{if } \left(\tan^{-1} \frac{\sin \theta_z \sin \gamma_s}{\cos \theta' \cdot \sin \phi} \right) \gamma \geq 0_s \\ +1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2.5.5e)$$

$$C_2 = \begin{cases} +1 & \text{if } \gamma_s \geq 0 \\ -1 & \text{if } \gamma_s < 0 \end{cases} \quad (2.5.5f)$$

6- لسطح يتتبع حركة الشمس باستمرار حول محورين لتقليل زاوية الورود:

$$\cos \theta = 1 \quad (2.5.6a)$$

$$\beta = \theta_z \quad (2.5.6b)$$

$$\gamma = \gamma_s \quad (2.5.6c)$$

مثال (2.5.1):

احسب زاوية ورود حزمة الإشعاع الشمسي، و ميل السطح، و زاوية سمت السطح لسطح عند المعطيات التالية:

$$\phi = 40^\circ, \delta = 21^\circ, \omega = 30^\circ (2:00PM) -1$$

2- $\phi = 40^\circ, \delta = 21^\circ, \omega = 100^\circ$ إذا تم تدويرها بشكل مستمر حول محور الشرق - الغرب لتقليل θ .

الحل:

1- استخدم المعادلة (2.5.2) من أجل سطح يتحرك بهذه الطريقة. نحسب أولاً زاوية الورود:

$$\theta = \cos^{-1} (1 - \cos^2 21 \cdot \sin^2 30)^{1/2} = 27.8^\circ$$

نحسب ثانياً θ_z من المعادلة التالية :

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta$$

$$\theta_z = \cos^{-1} (\cos 40 \cos 21 \cos 30 + \sin 40 \sin 21) = 31.8^\circ$$

نحتاج الآن زاوية سمت الشمس γ_s التي يمكن إيجادها من المعادلة التالية:

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right|$$

$$\gamma_s = \text{sign}(30) \left[\cos^{-1} \left(\frac{\cos 31.8 \sin 40 - \sin 21}{\sin 31.8 \cos 40} \right) \right] = 62.3^\circ$$

ثم من المعادلة (2.5.2b):

$$\tan \beta = \tan \theta_z |\cos \gamma_s| \Rightarrow \beta = \tan^{-1} \left[\tan \theta_z |\cos \gamma_s| \right]$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\tan 31.8 |\cos (62.3)| \right) = 16.1^\circ$$

من المعادلة (2.5.2c) مع : $\gamma_s < 90 \Rightarrow \gamma = 0$

2-الإجراءات هنا نفس الطلب الأول :

$$\theta = \cos^{-1} \left(1 - \cos^2 21 \cdot \sin^2 100 \right)^{1/2} = 66.8^\circ$$

$$\theta_z = \cos^{-1} (\cos 40 \cos 21 \cos 100 + \sin 40 \sin 21) = 83.9^\circ$$

$$\gamma_s = \cos^{-1} \left[\text{sign}(100) \left(\frac{\cos 83.9 \sin 40 - \sin 21}{\sin 83.9 \cos 40} \right) \right] = 112.4^\circ$$

يكون الميل :

$$\beta = \tan^{-1} \left(\tan 83.9 |\cos (112.4)| \right) = 74.3^\circ$$

و بما أن $|\gamma_s| > 90$ ، فإن γ ستكون 180° .

2.6. الأداء البصري للمجمعات المركزة:

تتمتع المجمعات المركزة للإشعاع بخصائص بصرية تختلف اختلافاً كبيراً مع اختلاف تصميم الجهاز. يمكن تطبيق المفاهيم العامة التالية على جميع المركبات، على الرغم من أن الطرق التي تطبق بها تختلف باختلاف المكونات. يمكن كتابة معادلة S الإشعاع الشمسي الممتص لكل وحدة مساحة من الفتحة A_a غير المظلة للاقط المركز كما يلي:

$$S = I_b \rho(\gamma \tau \alpha)_n K_{\gamma \tau \alpha} \quad (2.6.1)$$

حيث:

I_b شدة الإشعاع الشمسي المباشر على فتحة اللاقط وتقدر بـ W/m^2 ،

ρ معامل الانعكاس للاقط (المرآة)،

τ معامل نفاذية الغطاء الشفاف، عندما لا يوجد غطاء شفاف تكون $\tau=1$

α معامل امتصاص السطح الماص.

γ معامل الاعتراض للاقط المركز.

المصطلحات في هذه المعادلة لها مضمون مختلف عن تلك الخاصة بمجمعات الألواح المسطحة، و تعتمد معالجتها على هندسة المجمع.

يشمل الإشعاع الوارد الفعال الذي تم قياسه على مستوى الفتحة I_b الإشعاع المباشر فقط لجميع المركبات باستثناء المركبات ذات التركيز المنخفض (أي، ربما 10 أو أقل). بالنسبة للأنظمة ذات نسبة التركيز المنخفضة، سينعكس جزء من الإشعاع المنتشر على المستقبل، مع اعتماد الكمية على زاوية قبول المركز.

عموماً ρ هو الانعكاس المرآوي للمركز. العوامل الثلاثة التالية γ ، τ ، و α تابعة لزاوية ورود الإشعاع على الفتحة الشمسية، و قد تم سابقاً التعريف بعامل الاعتراض وكيفية حسابه. يمكن النظر في تأثير زاوية الورد على هذه الخصائص بشكل منفرد أو يمكن دمجها على النحو الوارد في المعادلة (2.6.1) في معدل زاوية الورد $k_{\gamma\tau\alpha}$.

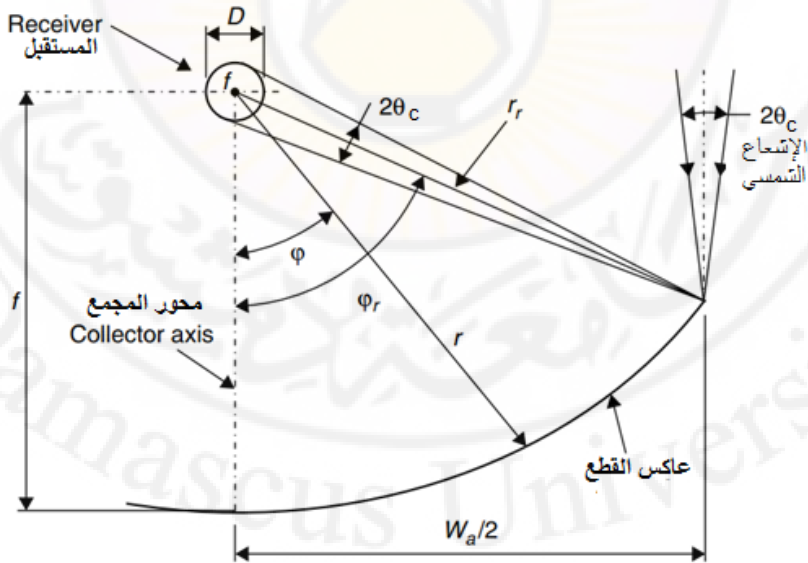
الهدف من استخدام أنظمة التركيز هو تقليل ضياع الحرارة من الماص عن طريق تقليل مساحته. تم بناء معظم مجمعات التصوير (imaging collectors) مع مستقبلات كبيرة بما يكفي لاعتراض جزء كبير من الإشعاع المنعكس ولكن ليس كبيراً بما يكفي لاعتراض هامش الصور المنخفضة الكثافة.

هنا τ هو معامل نفاذية أي نظام غطاء موضوع على المستقبل. قد يكون حسابه صعباً لأن زوايا ورود الإشعاع من العاكس على الغلاف قد تكون غير محددة. قد يكون من الصعب تحديد معامل امتصاصية الماص α للإشعاع الشمسي المنعكس للسبب نفسه الذي يحدث عند τ .

يمكن استخدام معدل زاوية الورود $K_{\gamma\alpha}$ لحساب الانحرافات عن المعدل الطبيعي لزاوية ورود الإشعاع الشمسي على الفتحة. يُطلب أن تكون معدلات الورود ثنائية المحور بالنسبة للأنظمة الأسطوانية، مع علاج منفصل للمستويات الطولية والعرضية. سنتناول التحليل البصري لأنواع عديدة من المراكز الشمسية:

2.6.1. التحليل البصري للمراكز الخطية ذات القطع المكافئ:

يبين الشكل (2.6.1) مقطعاً عرضياً للمركز الشمسي الخطي ذي القطع المكافئ، حيث يظهر على الشكل عوامل متعددة هامة. يصنع الإشعاع الوارد على العاكس عند حافة المجمع (حيث r_r نصف قطر المرآة يكون أعظمياً) زاوية φ_r مع الخط المركزي للمجمع و تُدعى زاوية الحافة. زاوية الحافة (Rim Angle): هي الزاوية بين مركز الإشعاع المنعكس من حافة العاكس إلى المحرق و محور المركز، رمزها φ_r و هي مبينة في الشكل (2.6.1).



الشكل (2.6.1) مقطع عرضي للمركز الخطي القطعي مع مستقبل دائري

تُعطى معادلة القطع المكافئ فيما يتعلق بنظام الإحداثيات بالشكل:

$$y^2 = 4fx \quad (2.6.3)$$

حيث:

f : البعد المحرق للقطع المكافئ [m].

بالنسبة للعواكس المركبة بشكل عالي الدقة فإن قطر أنبوب المستقبل D التصميمي الذي يضمن استقبال كل الأشعة المنعكسة من العاكس يحسب من العلاقة التالية، أنظر الشكل (2.6.1):

$$D = 2r_r \times \sin \theta_c \quad (2.6.4)$$

يعطى قطر العاكس ذي القطع المكافئ بالعلاقة:

$$r = \frac{2f}{1 + \cos \varphi} \quad (2.6.5)$$

φ : الزاوية بين محور المركز و الإشعاع المنعكس على المحرق، و تتغير من الصفر حتى φ_r .

r تزداد من f حتى r_r و يزداد حجم الصورة النظري من $2f \sin(\theta_c)$ حتى $2r_r \sin(\theta_c) / \cos(\varphi_r + \theta_c)$. لذلك هناك صورة تنتشر على مستوى عادي إلى محور القطع المكافئ.

بالتالي يصبح نصف قطر الحافة عند زاوية الحافة φ_r باستخدام المعادلة (2.6.5):

$$r_r = \frac{2f}{1 + \cos \varphi_r} \quad (2.6.6)$$

بارامتر آخر هام متعلق بزاوية الحافة هو عرض فتحة العاكس W_a ، يمكن أن تتم ملاحظة ذلك من خلال الشكل (2.6.1) و من علم المثلثات البسيط العلاقة:

$$W_a = 2r_r \times \sin \varphi_r \quad (2.6.7)$$

بتعويض r_r من العلاقة (2.6.6) في العلاقة (2.6.7) نحصل على:

$$W_a = \frac{4f \times \sin \varphi_r}{1 + \cos \varphi_r} \quad (2.6.8)$$

و بالتالي نحصل على:

$$W_a = 4f \times \tan \frac{\varphi_r}{2} \quad (2.6.9)$$

تعتمد نصف زاوية القبول θ_c المستخدمة في المعادلة (2.6.4) على دقة آلية الملاحظة و عدم الانتظام في سطح العاكس. كلما كان هذان العاملان صغيرين تكون θ_c أقرب إلى زاوية قرص الشمس، و بالتالي هذا يؤدي إلى صورة أصغر و نسبة تركيز أعلى، لذلك يعتمد عرض الصورة على مقدار هاتين الكميتين. تم افتراض المجمع مثالياً في الشكل (2.6.2) و يبين الشكل أنَّ الإشعاع الشمسي المباشر يصل إلى المجمع بزاوية $2\theta_c$ و يغادر عند نفس الزاوية. على أي حال في المجمع العملي، بسبب وجود الأخطاء يجب أن تزيد الزاوية $2\theta_c$ لتتضمن هذه الأخطاء. يمكن أن تنشأ المشاكل أيضاً بسبب أخطاء في توضع المستقبل بالنسبة للعاكس، و التي تنتج عن الانحراف و التوسع و إزاحة الصورة، و كل هذا محسوب بمعامل الاعتراض. تُعطى نسبة التركيز من أجل المستقبل الأنوبي بالعلاقة:

$$C = \frac{W_a}{\pi D} \quad (2.6.10)$$

باستبدال W_a ، D بمعادلاتهما (2.6.4)، (2.6.8) على التوالي نحصل على:

$$C = \frac{\sin(\varphi_r)}{\pi \sin(\theta_c)} \quad (2.6.11)$$

يتم الحصول على أعلى نسبة تركيز عند $\varphi_r = 90^\circ$, $\sin(\varphi_r) = 1$ و لذلك باستبدال $\sin(\varphi_r) = 1$ في المعادلة (2.6.11) يتم الحصول على القيمة العظمى التالية:

$$C_{\max} = \frac{1}{\pi \sin(\theta_c)} \quad (2.6.12)$$

الفرق بين هذه المعادلة و المعادلة (2.3.8) أنَّ هذه المعادلة تُطبق بشكل عملي على المركز الخطي القطعي بمستقبل دائري بينما المعادلة (2.3.8) تُطبق في الحالة المثالية. لذلك باستخدام نفس نصف زاوية القبول للشمس (16') من أجل نظام ملاحقة أحادي المحور نحصل على:

$$C_{\max} = 1/\pi \sin(16') = 67.5^\circ$$

مقدار زاوية الحافة في الواقع، يُحدّد المادة المطلوبة من أجل تصنيع سطح القطع. يُعطى طول منحنى سطح العاكس بالعلاقة:

$$S = \frac{H_p}{2} \left[\sec\left(\frac{\phi_r}{2}\right) \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right) + \ln\left(\sec\left(\frac{\phi_r}{2}\right) + \tan\left(\frac{\phi_r}{2}\right)\right) \right] \quad (2.6.13)$$

حيث :

$$\sec(x) = \frac{1}{\cos(x)} \text{ و يسمى الجيب القطعي،}$$

$$H_p [m] = \text{عرض المستقيم من القطع المكافئ.}$$

ملاحظة: إنَّ مساحة سطح المجمع تقل كلما نقصت زاوية الحافة، وهكذا تكون الميزة من استخدام زوايا حافة صغيرة بسبب صغر الخسارة في الكفاءة البصرية، لكن التوفير في كلفة مادة العاكس تكون كبيرة.

مثال 2.6.1:

لمركز شمسي خطي قطعي بزاوية حافة 70° وعرض فتحة العاكس [m] 5.6 و قطر المستقبل [mm] 50. المطلوب: احسب ما يلي: 1- البعد المحرقي 2- نسبة التركيز 3- نصف قطر الحافة 4- طول سطح القطع.

الحل:

من المعادلة (2.6.9):

$$W_a = 4f \times \tan \frac{\phi_r}{2}$$

بالتالي:

$$f = \frac{W_a}{4 \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right)} = \frac{5.6}{4 \tan(35)} = 2[m]$$

تكون نسبة التركيز من المعادلة (2.6.10):

$$C = \frac{W_a}{\pi D} = \frac{5.6}{\pi * 0.05} = 35.7$$

يُعطى نصف قطر الحافة بالمعادلة (2.6.6):

$$r_r = \frac{2f}{1 + \cos \varphi_r} = \frac{2 * 2}{1 + \cos(70)} = 2.98[m]$$

عرض مستقيم القطع المكافئ: $H_p = W_a$ عند $\varphi_r = 90^\circ$ ، $f = 2[m]$ من المعادلة (2.6.9):

$$H_p = W_a = 4f \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) = 4 * 2 * \tan(45) = 8[m]$$

أخيراً نحصل على طول القطع من المعادلة (2.6.13):

$$S = \frac{H_p}{2} \left[\sec\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) + \ln\left(\sec\left(\frac{\varphi_r}{2}\right) + \tan\left(\frac{\varphi_r}{2}\right)\right) \right]$$

$$S = \frac{8}{2} \left\{ \sec(35) \tan(35) + \ln(\sec(35) + \tan(35)) \right\} = 6.03[m]$$

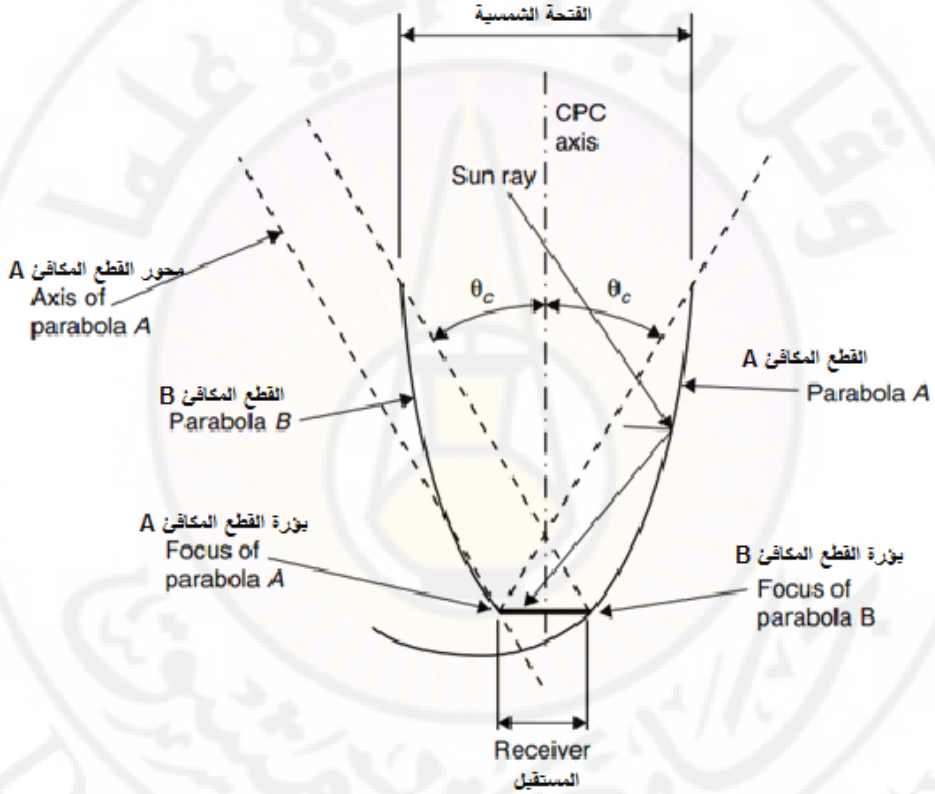
2.6.2. الخصائص البصرية للمركزات CPC :

يكون لمركزات النوع المبين في الشكل (2.4.2) نسب تركيز مساحة تابعة لنصف زاوية القبول θ_c ، و تكون العلاقة بالنسبة لنظام ثنائي البعد مثالي:

$$C = \frac{1}{\sin \theta_c} \quad (2.6.14)$$

مجمع CPC المثالي في هذا السياق هو الذي يحتوي على قطع مكافئة بدون أخطاء. لمركز CPC مثالي تبلغ نصف زاوية قبول فيه $\theta_c = 23.5^\circ$ تكون نسبة التركيز له $C = 2.51$ ، مركز آخر CPC مثالي نصف زاوية قبول فيه $\theta_c = 11.75^\circ$ تكون نسبة التركيز له $C = 4.91$.

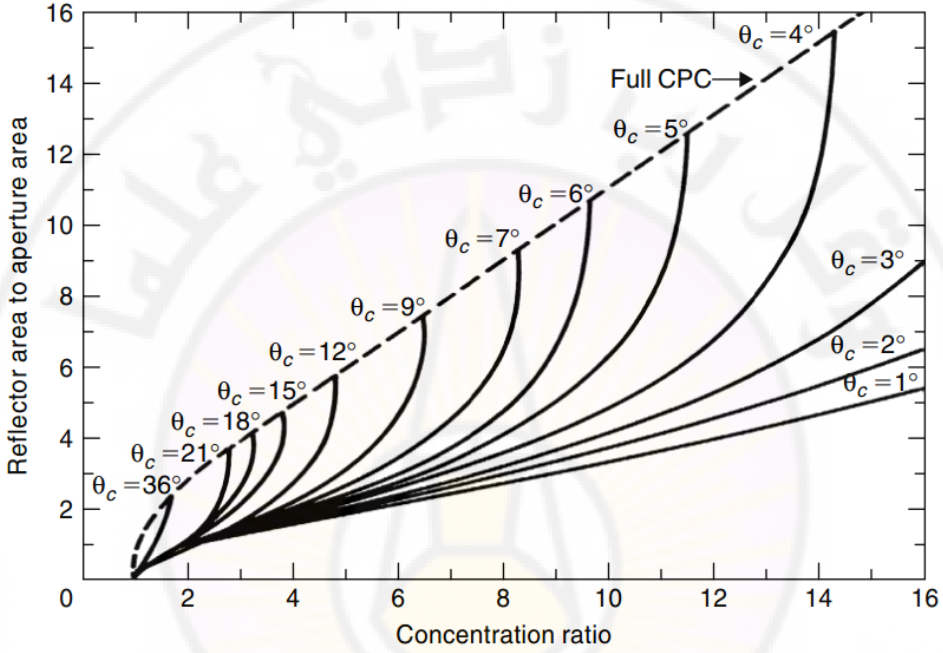
تكون الأسطح في نقاط النهاية العليا من القطع المكافئة في مجمع (CPC) موازية للمحور المركزي للمركز المتناظر. و بالتالي، تسهم الأطراف العليا للعاكسات قليلاً في وصول الإشعاع إلى الماص، و يمكن اقتطاع قسم من (CPC) لتقليل ارتفاعها من h إلى h' ليتم التوفير في كلفة السطح العاكس، و ذلك سيكون تأثيره قليلاً جداً على أداء المجمع.



الشكل (2.6.2) CPC مقطوع تكون نسبة الارتفاع- الفتحة حوالي نصف CPC الكامل

يوضح الشكل (2.6.2) (CPC) المقطوع. يؤثر الاقتطاع المحدود على زاوية القبول قليلاً، و لكنه يغير نسبة الارتفاع إلى الفتحة، و نسبة التركيز، و متوسط عدد

الانعكاسات التي خضع لها الإشعاع قبل أن يصل إلى السطح الماص. يتم عرض تأثيرات الاقتطاع (CPC) المثالية في الأشكال من (2.6.3) إلى (2.6.5).

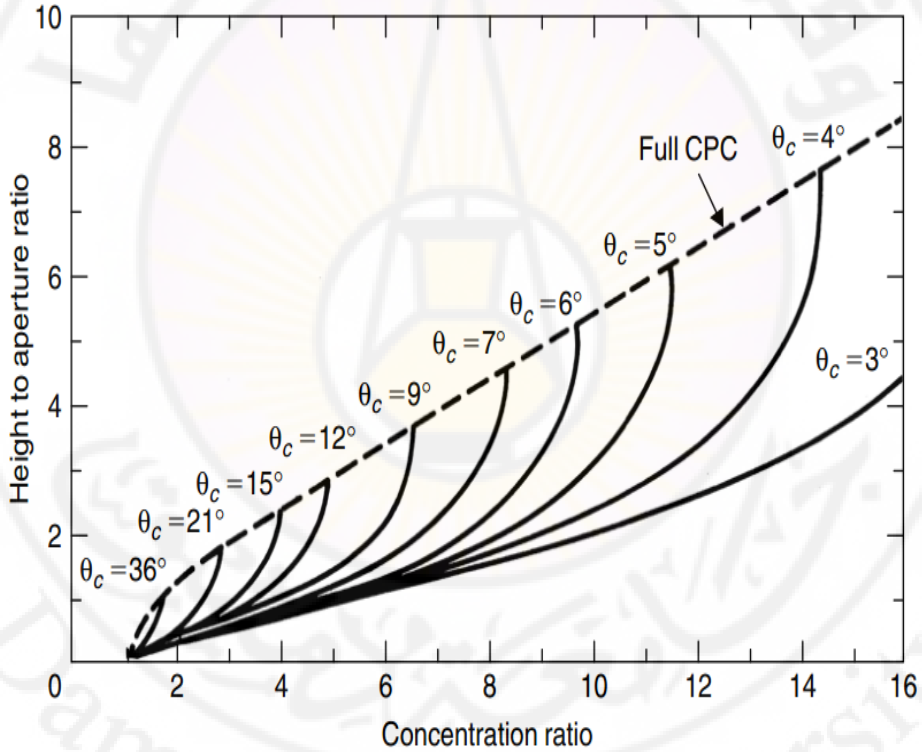


الشكل (2.6.3) نسبة الارتفاع للفتحة من أجل CPC مقطوع وكامل كتابع لـ C و θ_c

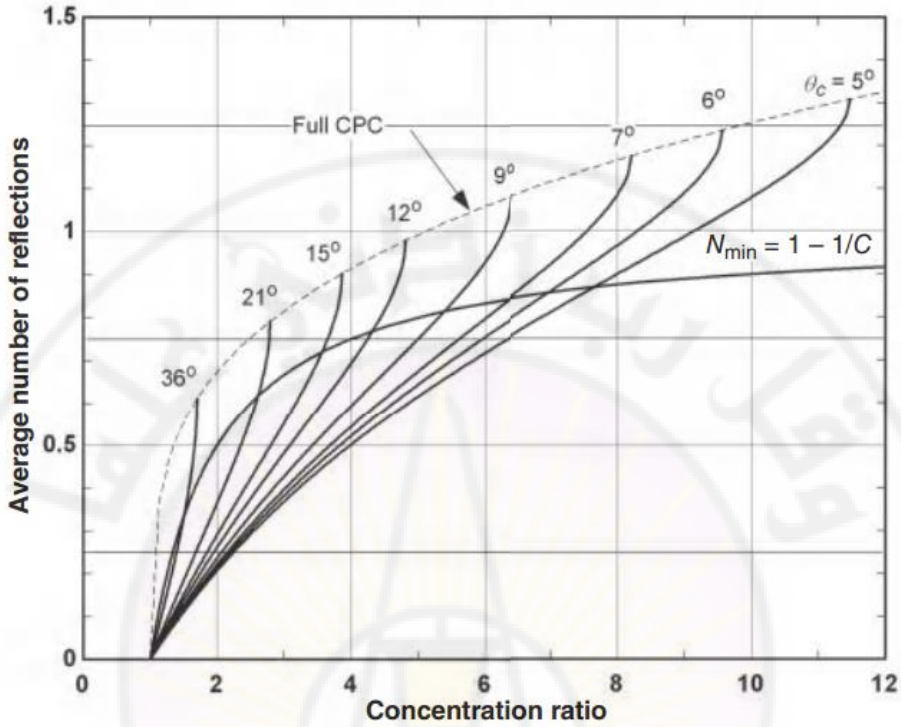
يوضح الشكل (2.6.3) نسبة الارتفاع إلى الفتحة، و يبين الشكل (2.6.4) نسبة مساحة العاكس إلى مساحة الفتحة، و يوضح الشكل (2.6.5) متوسط عدد الانعكاسات التي يمر بها الإشعاع الذي يدخل الفتحة قبل أن يصل إلى الماص. إذا كان الاقتطاع بحيث يكون متوسط عدد الانعكاسات أقل من منحنى (N) دقيقة، فهذا يعني أن متوسط العدد لا يقل عن $(1-1/C)$.

يمكن توضيح استخدام هذا القطع على النحو التالي: يتمتع (CPC) الكامل المثالي بنصف زاوية قبول تبلغ 12° . من الشكل (2.6.3) تبلغ نسبة الارتفاع إلى الفتحة 2.8

ونسبة التركيز 4.8، و من الشكل (2.6.4)، تبلغ مساحة العاكس المطلوبة 5.6 أضعاف الفتحة. متوسط عدد الانعكاسات التي خضع لها الإشعاع قبل الوصول إلى سطح الامتصاص هو 0.97 من الشكل (2.6.5). إذا تم اقتطاع (CPC) بحيث تكون نسبة الارتفاع إلى الفتحة 1.4، من الشكل (2.6.3) تنخفض نسبة التركيز إلى 4.2. ثم من الشكل (2.6.4)، تبلغ مساحة العاكس - مساحة فتحة 3.0، و من الشكل (2.6.5)، سيكون متوسط عدد الانعكاسات $(1 - 1/4.2 = 0.76)$.



الشكل (2.6.4) نسبة مساحة العاكس إلى مساحة الفتحة من أجل CPC مقطوع وكامل



الشكل (2.6.5) متوسط عدد الانعكاسات التي يتعرض لها الإشعاع داخل زاوية القبول التي تصل إلى سطح الامتصاص لـCPC الكامل والمقطع

من الصعب أحياناً قراءة الأشكال من (2.6.3) إلى (2.6.5) بالدقة المطلوبة، و قد تم استخدام المعادلات التالية لإنشاء هذه المخططات. المعادلات من (2.6.15) إلى (2.6.17) (CPC) الكامل و من (2.6.18) إلى (2.6.21) (CPC) المقطوع (مع الدليل T). متوسط عدد الانعكاسات لـ (CPC) الكامل أو المقطوع تبينها المعادلة (2.6.22):

$$f = a'(1 + \sin \theta_c) \quad (2.6.15)$$

$$a = \frac{a'}{\sin \theta_c} \quad (2.6.16)$$

$$h = \frac{f \cdot \cos \theta_c}{\sin^2 \theta_c} \quad (2.6.17)$$

$$a_T = \frac{f \cdot \sin(\phi_T - \theta_c)}{\sin^2(\phi_T / 2)} \quad (2.6.18)$$

$$h_T = \frac{f \cdot \cos(\phi_T - \theta_c)}{\sin^2(\phi_T / 2)} \quad (2.6.19)$$

$$C = \frac{a_T}{a'} \quad \text{or for a full CPC} \quad C = \frac{a}{a'} = \frac{1}{\sin \theta_c} \quad (2.6.20)$$

$$\frac{A_{RT}}{2a_T} = \frac{f}{2} \left[\frac{\cos(\phi / 2)}{\sin^2(\phi / 2)} + \ln \cot\left(\frac{\phi}{4}\right) \right]_{\theta_s + \pi/2}^{\phi_T} \quad (2.6.21)$$

$$n_i = \max \left[C \frac{A_{RT}}{4a_T} - \frac{x^2 - \cos^2 \theta}{2(1 + \sin \theta)}, 1 - \frac{1}{C} \right] \quad (2.6.22a)$$

$$x = \left(\frac{1 + \sin \theta}{\cos} \right) \left[-\sin \theta + \left(1 + \frac{h_T}{h} \cot^2 \theta \right)^{1/2} \right] \quad (2.6.22b)$$

حيث:

A_{RT} : هي مساحة العاكس لكل وحدة عمق (depth) لـ CPC المقطوع
(إذا كان $\phi_T = 2\theta_c$ فتكون $A_{RT} = A_R$)

n_i : هو متوسط عدد الانعكاسات، و باقي المتغيرات بينها الشكل (2.6.4).

مثال 2.6.2:

سيتم تصميم CPC بنسبة تركيز 2.0. قم بإعداد مخططات لـ θ_c و ϕ و A_{RT} و h_T و n_i كنسبة الارتفاع المقطوع إلى ارتفاع CPC الكامل.

الحل:

من أجل إعداد المخططات، نحتاج إلى حل معادلات CPC من (2.6.15) إلى (2.6.22) لأنه من الصعب قراءة الرسوم البيانية بدقة كافية.

أي من المخططات الثلاث يجب أن نستخدم؟ من الواضح أن CPC الكامل بزاوية قبول تبلغ حوالي 30° أو CPC المقطوع بزاوية قبول أصغر ستفي بمتطلبات المسألة.

من المعادلة (2.6.20)، يحتوي CPC الكامل و نسبة التركيز $C = 2$ على $\theta_c = \sin^{-1}(1/2) = 30^\circ$.

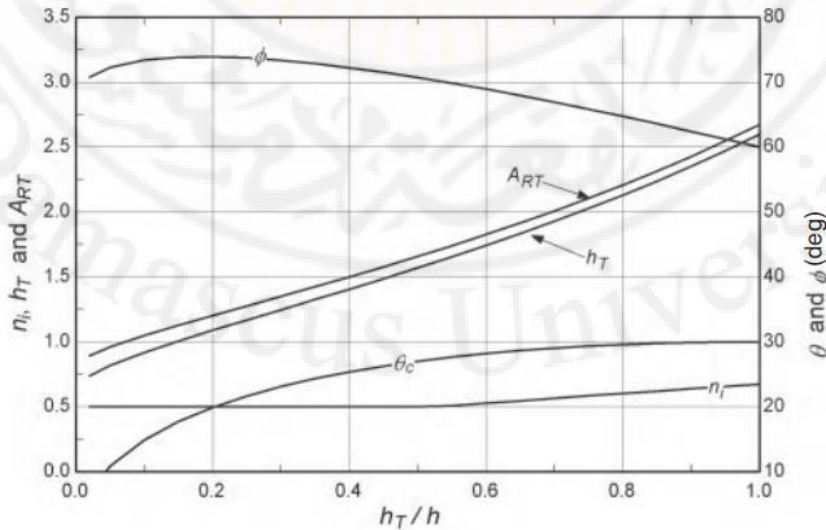
سنفترض أن مساحة الماص تساوي الواحد بحيث يكون من المعادلة (2.6.15) البعد المحرقى $f = (1 + \sin \theta_c) = 1.5$. مساحة الفتحة $a = 2$ من المعادلة (2.6.16) و الارتفاع $h = 2.60$ من المعادلة (2.6.17).

بالنسبة إلى CPC الكامل، فإن الزاوية ϕ تساوي الزاوية $2\theta_c$ بحيث يكون من المعادلة (2.6.21) $A_R = 2.67$ ، و متوسط عدد الانعكاسات من المعادلة (2.6.22) هو 0.67.

بالنسبة إلى CPC المقطوع، على سبيل المثال، قيمة h / h_T معروفة، نحتاج إلى حلها في نفس الوقت لكل من θ_c و ϕ و f و h و h_T من المعادلات (2.6.15) و (2.6.17) و (2.6.18) و (2.6.19).

برنامج حل المعادلات الجبرية هو EESy. مع $h / h_T = 0.5$ ، نجد $\theta_c = 27.02$ ، $h_T = 1.57$ و $h = 3.14$ ، $f = 0.727$ ، $\phi = 70.73$

ثم تكون مساحة المستقبل المقطوع $A_{RT} = 1.66$ و يبلغ متوسط عدد الانعكاسات 0.5. عند اختيار مجال من القيم h / h_T من 0 إلى 1، يمكن إنشاء المخطط التالي:



2.6.3. الكفاءة البصرية:

تُعرّف الكفاءة البصرية على أنها نسبة الطاقة الممتصة بالمستقبل إلى الطاقة الواردة على فتحة المجمع.

تعتمد الكفاءة البصرية على الخصائص البصرية للمواد المحتواة و على هندسة المجمع و العيوب المختلفة الناشئة من تصنيع المجمع. و لدينا المعادلة التالية:

$$\eta_0 = \rho \tau \alpha \gamma \left[(1 - A_f \tan(\theta)) \cos(\theta) \right] \quad (2.6.23)$$

حيث:

ρ : انعكاسية المرآة. τ : نفاذية الغلاف الزجاجي. α : امتصاصية المستقبل. γ : معامل الاعتراض.

A_f : معامل هندسي. θ : زاوية الورود.

تُحدّد هندسة المجمع المعامل الهندسي A_f و الذي هو مقياس النقص الفعلي في مساحة الفتحة بسبب تأثيرات الورود غير الناضجة متضمنة الانسداد و الظل و ضياع الإشعاع المنعكس من المرآة إلى ماوراء نهاية المستقبل. خلال التشغيل غير العمودي للمركز الشمسي الخطي القطعي، فإنّ بعض الأشعة المنعكسة من قرب نهاية المركز المقابل للشمس لا يمكن أن تصل للمستقبل، و هذا يدعى تأثير النهاية (end effect). مقدار الضياع في مساحة الفتحة مبين في الشكل (2.6.6) و يعطى بالمعادلة التالية:

$$A_e = f W_a \tan(\theta) \left[1 + \frac{W_a^2}{48 f^2} \right] \quad (2.6.24)$$

تنتهي المجمعات من هذا النوع عادة بصفائح عاتمة لتحول دون التركيز غير المُراد بعيداً عن المستقبل. هذه الصفائح تؤدي إلى سد أو تظليل جزء من العاكس، و التي في الواقع تُقلّل من مساحة الفتحة.

من أجل الصفيحة الممتدة من حافة إلى حافة، تكون المساحة المفقودة مبينة في الشكل (2.6.6) و معطاة بالعلاقة التالية (2.6.25):

$$A_b = \frac{2}{3} W_a h_p \tan(\theta) \quad (2.6.25)$$

حيث:

h_p : ارتفاع القطع.

يجب ملاحظة أن المصطلح $\tan(\theta)$ المبين في المعادلتين (2.6.24)، (2.6.25) هو نفسه المبين في المعادلة (2.6.23) و لا يجب أن يُستخدم مرتين. لذلك لإيجاد الضياع الكلي في مساحة الفتحة A_l ، تُضاف المساحتان A_e A_b معاً دون تضمين المصطلح $\tan(\theta)$ (Jeter, 1983).

$$A_l = \frac{2}{3} W_a h_p + f W_a \left[1 + \frac{W_a^2}{48 f^2} \right] \quad (2.6.26)$$



$$A_f = \frac{\text{المساحة المظلمة}}{\text{مساحة الفتحة الكلية}}$$

الشكل (2.6.6) المساحة المظلمة من السطح العاكس

أخيراً **المعامل الهندسي** هو نسبة المساحة المفقودة (الضائعة) إلى مساحة الفتحة، و تكون العلاقة:

$$A_f = \frac{A_l}{A_a} \quad (2.6.27)$$

البارامتر الأكثر تعقيداً الموجود في تحديد الكفاءة البصرية للمركز الشمسي الخطي القطعي هو معامل الاعتراض. و هذا يُعرّف على أنه نسبة الطاقة المحصورة في المستقبل إلى الطاقة المنعكسة بواسطة أداة التركيز (أي القطع المكافئ). تعتمد قيمة معامل الاعتراض على حجم المستقبل و على أخطاء زاوية السطح للمرآة القطعية و الإشعاع الشمسي المنتشر.

تُقسم الأخطاء المتعلقة بالسطح القطعي إلى نوعين: أخطاء عشوائية و أخطاء غير عشوائية.

الأخطاء العشوائية: تكون مطابقة للتغيرات الظاهرة في عرض الشمس، و تأثيرات التبعثر المُسببة بأخطاء الميل العشوائي (تنشأه القطع بسبب حمل الرياح)، و تأثيرات التبعثر المرتبطة بالسطح العاكس.

الأخطاء غير العشوائية: تنشأ عند تصنيع أو تشغيل المجمع، و هذه تكون مطابقة لعيوب مقطع العاكس، و الأخطاء غير المنتظمة (misalignment errors)، و أخطاء موقع (توضع) المستقبل.

الأخطاء العشوائية مُعدّلة إحصائياً، بتحديد الانحراف القياسي لتوزيع الطاقة المنعكسة الكلية، عند الورود الناظمي. و تعطى بالعلاقة التالية:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_{sun}^2 + 4\sigma_{slope}^2 + \sigma_{mirror}^2} \quad (2.6.28)$$

تُحدّد الأخطاء غير العشوائية من معرفة خطأ الزاوية غير المنتظمة β (misalignment angle error) و التي هي الزاوية بين الإشعاع المنعكس من مركز الشمس و الناظم على مستوي فتحة العاكس)، و إزاحة المستقبل عن محرق القطع (d_r). بما أنّ أخطاء مقطع العاكس و التوضع الخاطئ للمستقبل على طول المحور Y بشكل أساسي لهما نفس التأثير، فإنّه يُستخدَم بارامتر واحد لحساب الاثنين معاً.

يمكن أن تُربط الأخطاء العشوائية و الأخطاء غير العشوائية بالبارامترات الهندسية للمجمع و نسبة التركيز C و قطر المستقبل D لإنتاج بارامترات الخطأ الكلي (Universal error parameters) لكل هندسات المجمع، والعلامة الطباعية كالنجمة تُستخدم لتمييز هذه البارامترات عن البارامترات المعروفة سابقاً. باستخدام بارامترات الخطأ الشامل، تصبح صيغة معامل الاعتراض ممكنة بالشكل التالي:

$$\gamma = \frac{1 + \cos(\varphi_r)}{2 \sin(\varphi_r)} \int_0^{\varphi_r} \text{Erf} \left\{ \frac{\sin(\varphi_r) [1 + \cos(\varphi)] [1 - 2d^* \sin(\varphi)] - \pi \beta^* [1 + \cos(\varphi_r)]}{\sqrt{2\pi\sigma^*} [1 + \cos(\varphi_r)]} \right\} \\ - \text{Erf} \left\{ - \frac{\sin(\varphi_r) [1 + \cos(\varphi)] [1 + 2d^* \sin(\varphi)] + \pi \beta^* [1 + \cos(\varphi_r)]}{\sqrt{2\pi\sigma^*} [1 + \cos(\varphi_r)]} \right\} \times \frac{d\varphi}{[1 + \cos(\varphi)]} \quad (2.6.29)$$

حيث:

d^* : بارامتر الخطأ غير العشوائي الشامل بسبب خطأ في توضع المستقبل و أخطاء مقطع العاكس.

$$d^* = \frac{d_r}{D}$$

β^* : بارامتر الخطأ غير العشوائي الشامل بسبب أخطاء الزاوية. $\beta^* = \beta C$

σ^* : بارامتر الخطأ العشوائي الشامل $\sigma^* = \sigma C$

C: نسبة تركيز المجمع $C = A_a / A_r$

D: القطر الخارجي لأنبوب المستقبل [m]

d_r : إزاحة المستقبل عن المحرق [m]

β : خطأ الزاوية غير المنتظمة [degrees].

مثال 2.6.3:

لمركز شمسي خطي قطعي بمساحة فتحة كلية $50 \text{ [m}^2\text{]}$ ، عرض الفتحة 2.5 [m] و زاوية الحافة 90° ، خمن المعامل الهندسي و المساحة الحقيقية الضائعة عند زاوية ورود تساوي 60° .

الحل:

عند $\varphi_r = 90^\circ$ يكون: ارتفاع القطع $f = h_p$ لذلك يكون من المعادلة (2.6.9):

$$W_a = 4f \times \tan \frac{\varphi_r}{2}$$
$$h_p = f = \frac{W_a}{4 \tan \left(\frac{\varphi_r}{2} \right)} = \frac{2.5}{4 \tan(45)} = 0.625 \text{ [m]}$$

و من المعادلة (2.6.26):

$$A_l = \frac{2}{3} W_a h_p + f W_a \left[1 + \frac{W_a^2}{48 f^2} \right]$$
$$= \frac{2}{3} * 2.5 * 0.625 + 0.625 * 2.5 \left[1 + \frac{2.5^2}{48 (0.625)^2} \right] = 3.125 \text{ [m}^2\text{]}$$

وتكون المساحة الضائعة عند زاوية ورود 60° هي:

$$Area \text{ lost} = A_l \tan(60) = 3.125 * \tan(60) = 5.41 \text{ [m}^2\text{]}$$

و نحصل على المعامل الهندسي من المعادلة (2.6.27):

$$A_f = \frac{A_l}{A_a} = \frac{3.125}{50} = 0.0625$$

2.6.5. المردود السنوي للاقط المركز:

يمكن أن تطبق المعادلة التالية بشكل عام من أجل حساب كل من ربح الطاقة الأعظمي الممكن سنوياً و مدة الاستفادة الممكنة سنوياً للاقط المركز كما يلي:

$$Q_{j,max} = AF_R \eta_o (b_1 + b_2 I_{cr} + b_3 I_{cr}^2) \dots [GJ / a] \quad (2.6.30)$$

$$t_{j,max} = -277,8(b_2 + 2b_3 I_{kr}) \quad [h/a] \quad (2.6.31)$$

حيث:

A: السطح الماص للاقط ويقدر بـ m^2

F_R : معامل إزالة الحرارة للاقط،

η_o : المردود الضوئي (البصري) للاقط،

I_{cr} شدة الأشعة الشمسية الحدية و تقدر $[kW/m^2]$ (و هو المستوى الأدنى من

الإشعاع الشمسي ليبقى سطح المجمع عند درجة حرارة دخول السائل العامل)،

b_1, b_2, b_3 ثوابت تجريبية متعلقة بنوع اللاقط و ϕ درجة خط العرض الجغرافي و I_{bn} هو

شدة الإشعاع المباشر الوارد بشكل عمودي على المساحة.

تعطى هذه الثوابت على سبيل المثال من أجل اللاقط الشمسي ذي المركزات الخطية

التي توجه باتجاه شرق غرب عبر تدوير الفتحة حول محورها الأفقي، بالمعادلات التالية:

$$b_1 = -0.098 + 11.944 I_{bn} - 0.657 I_{bn}^2 \quad (2.6.32)$$

$$b_2 = -0.599 - 30.363 I_{bn} - 17.788 I_{bn}^2 \quad (2.6.33)$$

$$b_3 = 1.093 + 17.606 I_{bn} - 17.29 I_{bn}^2 \quad (2.6.34)$$

تعطى الثوابت من أجل اللاقط الشمسي ذي المركزات الخطية التي توجه باتجاه

شمال - جنوب بواسطة التدوير حول المحور الأفقي بالمعادلات التالية:

$$b_1 = 0.64 + 11.981 I_{bn} + (-2.365 + 7.979 I_{bn}) \phi + (2.38 - 12.409 I_{bn}) \phi^2 \dots (2.6.35)$$

$$b_2 = -6.021 - 19.086 I_{bn} + (-4.592 + 20.298 I_{bn}) \phi + (10.57 - 22.978 I_{bn}) \phi^2 \dots (2.6.36)$$

$$b_3 = 6.44 + 5.219 I_{bn} + (6.986 - 30.5 I_{bn}) \phi + (-14.095 + 40.089 I_{bn}) \phi^2 \dots (2.6.37)$$

حيث ϕ بالراديان و I_{bn} بـ $[kW/m^2]$.

تعطى الثوابت من أجل اللاقط الشمسي ذي المراكز الخطية التي توجه بواسطة التدوير حول المحور القطبي (أي بجعل المستقبل يدور حول محور يوازي المحور القطبي للأرض و تكون سرعة الدوران تعادل $(15/h^\circ)$ بالمعادلات التالية:

$$b_1 = -0.075 + 14.432I_{bn} - 0.592I_{bn}^2 \quad (2.6.38)$$

$$b_2 = -0.78 - 35.67I_{bn} + 24.52I_{bn}^2 \quad (2.6.39)$$

$$b_3 = 1.373 + 19.604I_{bn} - 23.965I_{bn}^2 \quad (2.6.40)$$

تعطى الثوابت من أجل اللاقط الشمسي ذي المراكز النقطية التي توجه بواسطة تدوير الفتحة حول محورين بالمعادلات التالية:

$$b_1 = -0.147 + 16.084I_{bn} - 0.792I_{bn}^2 \quad (2.6.41)$$

$$b_2 = -0.886 - 37.659I_{bn} + 26.983I_{bn}^2 \quad (2.6.42)$$

$$b_3 = 1.7 + 18.883I_{bn} - 24.887I_{bn}^2 \quad (2.6.43)$$

$$I_{bn} = 1.37\bar{K}_T - 0.34[kW / m^2] \quad (2.6.44)$$

حيث:

$\bar{K}_T$ متوسط القيمة الشهرية لدليل الوضوح (Clearness index) من أجل المكان المحدد.

2.7. الأداء الحراري للمجمعات المركزة للإشعاع:

يتبع حساب الأداء الحراري للمجمعات المركزة للإشعاع الشمسي نفس الخطوط العريضة العامة، كما هو الحال بالنسبة للمجمعات الشمسية المسطحة. يجب تقدير الإشعاع الممتص لكل وحدة مساحة في الفتحة الشمسية S من الإشعاع الشمسي و الخصائص البصرية للمركز و المستقبل.

يجب تقدير الضياعات الحرارية الناتجة عن المستقبل، من خلال معامل الضياع الحراري U_L الذي يعتمد على مساحة المستقبل. يمكن حساب التدرجات الحرارية على

طول المستقبل، من حيث المبدأ، من خلال عامل إزالة الحرارة F_R للسماح باستخدام درجات حرارة دخول السائل في حسابات توازن الطاقة. إذاً يجب بدايةً بتقدير U_L و F_R . لا يتم تلخيص طرق حساب الضياعات الحرارية من المستقبلات بسهولة كما هو الحال في المجمعات المسطحة، لأن الأشكال والتصميمات متغيرة على نطاق واسع، ودرجات الحرارة أعلى، و تأثيرات الحافة أكثر أهمية، و قد تكون شروط التوصيل عالية جداً، و قد تتفاقم المشكلات بسبب عدم انتظام تدفق الإشعاع على المستقبلات مما قد يؤدي إلى تدرجات حرارية كبيرة عبر السطح الماص للطاقة، و من الصعب تقديم طريقة عامة واحدة لتقدير الضياعات الحرارية، و في النهاية يجب تحليل هندسة كل مستقبل كحالة خاصة.

طبيعة الضياعات الحرارية لمستقبلات مجمعات التركيز هي نفسها بالنسبة للمجمعات المسطحة، و قد يكون للمستقبلات أغشية شفافة للإشعاع الشمسي. إذا كان الأمر كذلك، فإن الضياعات الخارجية من الماص عن طريق الحمل الحراري و الإشعاع إلى الوسط المحيط يتم تعديلها بالمقابل، و يمكن استخدام معادلات مشابهة لمعادلات المجمعات المسطحة لتقدير حجمها. كما هو الحال مع المجمعات المسطحة، يمكن تقدير الضياعات على أنها مستقلة عن شدة الإشعاع الوارد (على الرغم من أن هذا قد لا يكون صحيحاً تماماً إذا كان الغطاء الشفاف يمتص الإشعاع الشمسي المحسوس). على أي حال، يمكن أيضاً تعريف جداء معامل الامتصاصية بالنفذية الفعال لأنظمة التركيز. علاوة على ذلك، مع أنظمة التركيز، يكون تدفق الإشعاع في جهاز الاستقبال بشكل عام بحيث يمكن استخدام المواد ذات الامتصاص المنخفض للغاية للإشعاع الشمسي فقط دون حدوث تلف حراري للغطاء. تحدث ضياعات التوصيل من خلال الهيكل الداعم و من خلال العزل على أجزاء من المستقبل لا تتعرض للإشعاع.

عموماً يشبه التحليل الحراري للمجمعات المركزة تحليل المجمعات المسطحة. على الرغم من أن ذلك ليس ضرورياً، إلا أنه من المناسب اشتقاق تعبيرات مناسبة لعامل كفاءة المجمع F' ، و معامل الضياع U_L ، و عامل إزالة الحرارة للمجمع F_R . يمكن حساب الكسب المفيد للمجمع بمعرفة F_R و U_L من تعبير مشابه للمجمعات المسطحة. يتمثل

أحد الاختلافات المهمة بين مجمع التركيز و المجمع المسطح في درجات الحرارة العالية التي تصادف في مجمع التركيز. يعني ارتفاع درجات الحرارة أنَّ الإشعاع الحراري مهم، ممَّا يؤدي إلى اعتماد معامل الضياع على درجة الحرارة.

و كمثال على حساب الضياعات الحرارية و معامل الضياع U_L ، اعتبر أنَّ أنبوباً ماصاً أسطوانياً غير مغطى يُستخدم كمستقبل مع مركز خطي. افترض أنَّه لا يوجد تدرج حراري حول أنبوب المستقبل. يحسب الضياع الحراري و معامل الضياع الحراري الكلي مع الأخذ في الاعتبار الضياع بالحمل و الإشعاع من السطح و التوصيل من خلال هيكل الدعم كما يلي:

$$\begin{aligned}\frac{Q_{loss}}{A_r} &= h_w (T_r - T_a) + \varepsilon \sigma (T_r^4 - T_{sky}^4) + U_{cond} (T_r - T_a) \\ &= (h_w + h_r + U_{cond}) (T_r - T_a) \\ &= U_L (T_r - T_a)\end{aligned}\quad (2.7.1a)$$

$$U_L = h_w + h_r + h_c \quad (2.7.1b)$$

يمكن حساب معامل الإشعاع الخطي من المعادلة:

$$h_r = \frac{\varepsilon \sigma (T_r^4 - T_{sky}^4)}{(T_r - T_a)} \quad (2.7.2)$$

إذا كانت القيمة المفردة لـ U_L غير مقبولة بسبب التدرجات الكبيرة لدرجة الحرارة في اتجاه التدفق، فيمكن اعتبار المجمع مقسماً إلى مقاطع لكل منها U_L ثابت. لتقدير h_w للأسطوانات: عندما يحدث الحمل الحر و القسري في وقت واحد أوصى (McAdams 1954) بحساب القيمتين، و القيمة الأكبر تستخدم في العمليات الحسابية. و بالتالي، يبدو أنَّ الحد الأدنى للقيمة حوالي $5 \text{ [W/m}^2\text{]}$ تحدث في مجمعات الطاقة الشمسية في ظل ظروف الهواء الثابت. بالنسبة لظروف الحمل القسري على المباني، يمكن التعبير عن نتائج (Mitchell 1976) كما في المعادلة (2.7.3) :

$$h_w = \frac{8.6V^{0.6}}{L^{0.4}} \quad (2.7.3)$$

يمكن التعبير عن معامل انتقال الحرارة [W/m².K] لمجمعات (flush-mounted) كما في المعادلة (2.7.4):

$$h_w = \max \left[5, \frac{8.6V^{0.6}}{L^{0.4}} \right] \quad (2.7.4)$$

حيث:

V : سرعة الرياح [m/s]،

L : الجذر التكعيبي لحجم المنزل بالأمتار.

عندما تكون سرعة الرياح 5[m/s] (و هو قريب من متوسط سرعة الرياح في العالم) و الطول المميز 8m، فإنه ينتج من المعادلة (2.7.4) أن معامل انتقال الحرارة يكون $h_w=10[W/m^2.K]$.

يجب أن يستند تقدير الضياعات من التوصيل إلى معرفة تفاصيل البناء أو القياسات لمجمع معين.

قد يتم تزويد المركبات الخطية بمصاص أسطواني محاط بأغطية أنبوبية شفافة. بالنسبة لطول المجمع L، يتم نقل الحرارة من المستقبل عند T_r إلى داخل الغطاء عند T_{ci} عبر الغطاء إلى T_{co} ثم إلى المناطق المحيطة عند T_a و T_{sky} بواسطة المعادلة:

$$Q_{loss} = \frac{2\pi k_{eff} L}{\ln(D_{ci} / D_r)} (T_r - T_{ci}) + \frac{\pi D_r L \cdot \sigma (T_r^4 - T_{ci}^4)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} \left(\frac{D_r}{D_{ci}} \right)} \quad (2.7.5)$$

$$Q_{loss} = \frac{2\pi k_c L (T_{ci} - T_{co})}{\ln(D_{co} / D_{ci})} \quad (2.7.6)$$

$$Q_{loss} = \pi D_{co} L h_w (T_{co} - T_a) + \epsilon_c \pi D_{co} L \cdot \sigma (T_{co}^4 - T_{sky}^4) \quad (2.7.7)$$

حيث يمثل الحرف r المستقبل والدليلين C_o, C_i يمثلان الغطاء الشفاف من الداخل والخارج. التوصيل الحراري من الغلاف هو k_c و k_{eff} هو التوصيل الفعال للحمل بين المستقبل و الغطاء و يعطى بالمعادلة (2.7.8):

$$\frac{k_{eff}}{k} = \max \left[1, 0.386 \left(\frac{Pr \times Ra^*}{0.861 + Pr} \right)^{1/4} \right] \quad (2.7.8)$$

حيث:

$$Ra^* = \frac{[\ln(D_o / D_i)]^4}{L^3 (D_i^{-3/5} + D_o^{-3/5})^5} \quad (2.7.9)$$

و يُحدد كل من عدد راييلي و براندل من المعادلات (2.7.10) و (2.7.11). الطول المميز L هو المسافة بين الأسطوانتين الداخلية والخارجية. مدى صلاحية هذا الارتباط هو $Ra^* \leq 10^7$. عندما يكون $Ra^* \leq 100$ فإنه ينتج من المعادلة (2.7.8) أن $k_{eff} = k$ ، ممّا يشير إلى أن الحمل الحر يتم قمعه، و نقل الحرارة يتم عن طريق التوصيل.

$$Ra = \frac{g \beta' \Delta T L^3}{\nu \alpha} \quad (2.7.10)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} \quad (2.7.11)$$

حيث:

L : تباعد اللوح $[m]$ ،

g : الجاذبية الأرضية $[m/s^2]$

β' : معامل التمدد الحجمي (للغاز المثالي $\beta' = 1/T [1/K]$)

ΔT : فرق درجات الحرارة بين الألواح $[K]$

ν : اللزوجة الحركية $[m^2/s]$ ،

α الانتشارية الحرارية $[m^2/s]$.

إذا تم إخلاء الفراغ بحيث يتم التخلص من الضياع بالحمل، يمكن أن يكون k_{eff} صفراً عند ضغوط منخفضة جداً. يحسب معامل الحمل الرياحي h_w بحيث نحصل من المعادلة (2.7.15) على h_w بعد معرفة عدد نوسلت من المعادلة (2.7.13) اعتماداً على عدد رينولدز من المعادلة (2.7.14):

$$Nu = \begin{cases} 0.40 + 0.54 Re^{0.52} & \text{for } 0.1 < Re < 1000 \\ 0.30 Re^{0.6} & \text{for } 1000 < Re < 50000 \end{cases} \quad (2.7.12)$$

$$Nu = \begin{cases} 0.40 + 0.54 Re^{0.52} & \text{for } 0.1 < Re < 1000 \\ 0.30 Re^{0.6} & \text{for } 1000 < Re < 50000 \end{cases} \quad (2.7.13)$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.7.14)$$

$$Nu = \frac{h_w D_{co}}{k} \quad (2.7.15)$$

الإجراءات المستخدمة في حل المعادلات من (2.7.5) إلى (2.7.7) باليد لتقدير T_{co} (الذي سيكون أقرب بكثير إلى T_a من T_r)، و حساب Q_{loss} من المعادلة (2.7.7)، واستبدال هذه الكميات في المعادلة (2.7.6) للعثور على قيمة T_{ci} . يتم استخدام المعادلة (2.7.5) للتحقق من التخمين المبدئي لـ T_{co} من خلال مقارنة Q_{loss} من المعادلة (2.7.7) مع تلك المحسوبة من المعادلة (2.7.5).

قد يكون من الضروري حساب الإشعاع الشمسي الممتص من قبل الغطاء. إذا كان الأمر كذلك، فيمكن إضافة الطاقة الممتصة إلى الجانب الأيسر من المعادلة (2.7.7)، و التي تفترض أن جميع الطاقة تمتص من خارج الغطاء. المبادئ متطابقة مع تلك المبينة في حسابات مجمع الألواح المسطحة. إذا كان هناك فقد كبير للحرارة من خلال الدعامات إلى البيئة المحيطة، فيمكن تضمين معادلة ضياع حراري مناسبة من النموذج $\Delta T = (UA)_{supp} Q_{supp}$ مع المعادلات من (2.7.5) إلى (2.7.7). إذا ضياع الحرارة الكلي يكون مجموع Q_{supp} و Q_{loss} .

مثال 2.7.1:

احسب معامل الضياع U_L لمستقبل أسطواني 60mm في $200[^\circ\text{C}]$. معامل الانبعاث للسطح الماص 0.31. تمت تغطية الماص بغطاء أنبوبي زجاجي يبلغ قطره 90 mm وقطره 4mm. يتم إخلاء الهواء في المسافة بين الماص والغطاء. سرعة الرياح 5 m/sec و درجات حرارة السماء و الهواء 2°C و 10°C ، على التوالي.

الحل:

يمكن حل المعادلات التي تصف الضياعات من خلال برامج مختلفة لحل المعادلات. يُوضَّح هنا حساباً تكرارياً باليد. بالنسبة إلى التخمين الأول، افترض أنَّ درجة حرارة الغطاء هي 290K. لتقدير معامل نقل حرارة الرياح، من الضروري إيجاد عدد رينولدز Reynolds من المعادلة (2.7.14) لدرجة حرارة الهواء التي تكون متوسط درجة حرارة الغطاء و درجة حرارة الوسط المحيط ، أو 286.5 K :

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{1.232 \times 5 \times 0.090}{1.794 \times 10^{-5}} = 30.900$$

يتم إيجاد معامل نقل حرارة الرياح من المعادلة (2.7.15):

$$Nu = \frac{h_w D_{co}}{k} = 0.30(30900)^{0.6} = 148$$

$$h_w = 148 \frac{0.2046}{0.090} = 40.5 [W / m^2 \cdot ^\circ\text{C}]$$

استبدال h_w في المعادلة (2.7.7) بطول 1m يؤمن التخمين الأولي للضياع الحراري:

$$Q_{loss} = \pi D_{co} L h_w (T_{co} - T_a) + \epsilon_c \pi D_{co} L \cdot \sigma (T_{co}^4 - T_{sky}^4)$$

$$Q_{loss} = \pi \times 0.090 \times 1 \left[40.5 \times (290 - 283) + 0.88 \times 5.67 \times 10^{-8} (290^4 - 275^4) \right]$$

$$= 99.5 [W]$$

يتم إيجاد درجة حرارة الغطاء الداخلي من المعادلة (2.7.6):

$$T_{ci} = T_{co} + \frac{Q_{loss} \times \ln(D_{co} / D_{ci})}{2\pi k_c L} =$$

$$T_{ci} = 290 + \frac{99.5 \times \ln(0.090 / 0.082)}{2 \times \pi \times 1.4 \times 1} = 291.1[K]$$

تستخدم المعادلة (2.7.5) لإيجاد ضياع الحرارة الذي يتم مقارنته مع ضياع الحرارة الأصلي. إذا لم يكونا متساويين، فمن الضروري إجراء تخمين آخر لدرجة حرارة الغطاء الخارجي. نجد من المعادلة (2.7.5):

$$Q_{loss} = \frac{\pi D_r L \sigma (T_r^4 - T_{ci}^4)}{\frac{1}{\epsilon_r} + \frac{1 - \epsilon_c}{\epsilon_c} \left(\frac{D_r}{D_{ci}} \right)} =$$

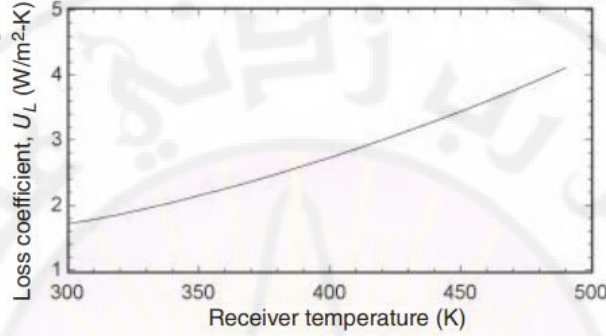
$$\frac{\pi \times 0.06 \times 1 \times 5.67 \times 10^{-8} (473^4 - 291.5^4)}{\frac{1}{0.31} + \frac{1 - 0.88}{0.88} \left(\frac{0.060}{0.082} \right)} = 137.8[W]$$

نظرًا لأن 137.8 لا تساوي 99.5 (الفرق هو + 38.3)، كان تخميننا الأولي لدرجة حرارة الغطاء الخارجي منخفضاً جداً. يوجد خطأ ثانٍ في درجة حرارة الغلاف الخارجي البالغة 295k الخطأ (-27.8W). الاستقراء الخطي لإيجاد درجة الحرارة حيث الخطأ صفر ينتج درجة حرارة غطاء تبلغ 292.9k. مع درجة حرارة الغطاء الجديدة هذه، يكون الضياع المحسوب من المعادلتين (2.7.5) و (2.7.7) متطابقاً تقريباً و يساوي 136.7[W]. تم إيجاد معامل الضياع (استناداً إلى مساحة المستقبل) من التعريف المعطى بالمعادلة (2.7.1) كما يلي:

$$\frac{Q_{loss}}{A_r} = U_L (T_r - T_a) \Rightarrow U_L = \frac{Q_{loss}}{A_r (T_r - T_a)}$$

$$U_L = \frac{136.7}{\pi \times 0.06 \times 1 \times (473.0 - 283.0)} = 3.82 [W / m^2 \cdot ^\circ C]$$

يُظهر الشكل التالي التباين الكبير لمعامل الضياع مع درجة حرارة المستقبل. يجب تقسيم المجمع الذي له تغير كبير في درجة الحرارة في اتجاه التدفق إلى عدد من الأقسام الصغيرة.



يفترض في المثال (2.7.1) أنه تم إخلاء الحلقات. إذا لم يتم إخلاء هذه المساحة، فيجب تضمين نقل الحرارة عبر الغاز. يمكن استخدام المعادلتين (2.7.8) و (2.7.16) لتقدير انتقال حرارة الغاز و الذي يمكن أن يكون كبيراً للغاية. على سبيل المثال، إذا كان الهواء عند ضغط 100 باسكال موجوداً في حلقات المجمع، فإن معامل الضياع في درجة حرارة مساحة المستقبل 473k هو $6.68 \text{ [W/m}^2.\text{k]}$.

$$\frac{k_{eff}}{k} = \left[1 + \frac{(2-a)(9C_p/C_v - 5)\lambda}{a(C_p/C_v + 1)\ln(D_o/D_i)} \left(\frac{1}{D_o} + \frac{1}{D_i} \right) \right]^{-1} \quad (2.7.16)$$

حيث:

λ : هو المسار الحر المتوسط لجزيئات الغاز المعطاة بواسطة بالمعادلة (2.7.17):

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2\pi P\delta^2}} \quad (2.7.17)$$

حيث:

k : هو ثابت بولتزمان ($1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$),

P : هو الضغط في الباسكال،

δ : القطر الجزيئي للغاز الحلقي ($3.5 \cdot 10^{-10}$ m للهواء و $2.4 \cdot 10^{-10}$ m للهيدروجين)،

البارامتر a هو معامل إقامة (accommodation factor)، عندما يكون مساوياً لـ 1 يوفر حداً أعلى للنقل الحراري الجزيئي الحر، تكون نسبة درجات الحرارة المحددة قريبة من 1.4 لكل من الهواء والهيدروجين.

بعد ذلك، ضع في اعتبارك العوامل التي تمثل التدرج الحراري في اتجاه التدفق. يماثل ذلك التطور بالنسبة للمجمعات المسطحة، و لكن الأشكال الهندسية المختلفة تتطلب إجراءات معدلة. عند معالجة أنظمة التركيز الخطي باستخدام مستقبلات أسطوانية، يجب أن تتضمن مقاومة انتقال الحرارة من السطح الخارجي لأنبوب المستقبل إلى السائل الموجود في جدار الأنبوب، لأن تدفق الحرارة في نظام التركيز قد يكون مرتفعاً. يكون معامل نقل الحرارة الكلي (على أساس قطر أنبوب المستقبل الخارجي) بين الوسط المحيط والسائل:

$$U_o = \left(\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \frac{D_o \ln(D_o / D_i)}{2k} \right)^{-1} \quad (2.7.18)$$

حيث:

D_o و D_i : أقطار الأنبوب الداخلي و الخارجي،

h_{fi} : هو معامل انتقال الحرارة بالحمل بين السائل و السطح الداخلي للأنبوب المستقبل،

k : هي الموصلية الحرارية لمادة الأنبوب.

يعبر عن ربح الطاقة المفيد لكل وحدة من طول المجمع q'_u بدرجة حرارة المستقبل المحلي T_r و الإشعاع الشمسي الممتص S لكل وحدة من مساحة الفتحة يكون:

$$q'_u = \frac{A_a S}{L} - \frac{A_r U_L}{L} (T_r - T_a) \quad (2.7.19)$$

حيث:

A_a : هي المساحة غير المظللة من فتحة المركز،

A_r : تُعبر عن مساحة المستقبل ($\pi D_o L$) للماص الأسطواني)، في مصطلحات انتقال السائل عند درجة حرارة السائل T_f :

$$q'_u = \frac{(A_r / L)(T_r - T_f)}{\frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \left(\frac{D_o}{2k} \ln \frac{D_o}{D_i} \right)} \quad (2.7.20)$$

إذا تم إلغاء T_r من المعادلتين (2.7.19) و (2.7.20) نحصل على المعادلة (2.7.21):

$$q'_u = F' \frac{A_a}{L} \left[S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_f - T_a) \right] \quad (2.7.21)$$

يعطى معامل كفاءة اللاقط F' بالمعادلة (2.7.22):

$$F' = \frac{1/U_L}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_o}{h_{fi} D_i} + \left(\frac{D_o}{2k} \ln \frac{D_o}{D_i} \right)} \quad (2.7.22)$$

$$F' = \frac{1/U_L}{1/U_o} = \frac{U_o}{U_L} \quad (2.7.23)$$

حيث:

$1/U_L$: المقاومة الحرارية لانتقال الحرارة من السائل داخل الأنبوب للوسط المحيط .

$$U_L = U_{top} + U_{Bottom} + U_{edg} \quad (2.7.24)$$

تتضمن المقاومة الحرارية $1/U_L$ المقاومة الحرارية لانتقال الحرارة من أنبوب المستقبل إلى الوسط المحيط و المقاومة الحرارية بالحمل داخل الأنبوب و المقاومة الحرارية بالتوصيل في مادة الأنبوب.

تعطى مساحة المستقبل بالعلاقة: $A_r = \pi D_o . L$

و تعطى مساحة الفتحة في حال إهمال التظليل بالعلاقة : $A_a = w . L$

أما في حال كان التظليل مهماً و لم يذكر صراحةً أنه مهمل فتكون مساحة الفتحة:

$$A_a = (W - D_g).L$$

حيث :

L : طول الأنبوب، W : عرض الفتحة.

شكل المعادلات من (2.7.21) إلى (2.7.23) مطابق لشكل المعادلات من أجل المجمعات المسطحة.

يمكن التعبير عن الأداء الحراري للمركبات ذات القطع المكافئ الخطية بالمعادلة (2.7.25) - (2.7.28):

$$Q_u = [A_a S - A_r U_L (T_r - T_a)] \quad (2.7.25)$$

$$Q_u = A_a \left[S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_r - T_a) \right] = A_a \left[S - \frac{U_L}{C} (T_r - T_a) \right] \quad (2.7.26)$$

يمكن كتابة معادلة الطاقة المفيدة من اللاقط بشكل آخر حسب المعادلة (2.7.27):

$$Q_u = A_a . F' \left[S - \frac{U_L}{C} (T_{fm} - T_a) \right] \quad (2.7.27)$$

و

$$Q_u = F_R A_a \left[S - \frac{A_r}{A_a} U_L (T_i - T_a) \right] \quad (2.7.28)$$

حيث:

F' هو معامل كفاءة اللاقط.

F_R هو معامل إزالة الحرارة من اللاقط.

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_r U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_r U_L F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (2.7.29a)$$

بطريقة مماثلة لتلك الخاصة بالمجمعات المسطحة، يتم إعطاء عامل تدفق المجمع F''

كما يلي:

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{\dot{m} C_p}{A_r U_L F'} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_r U_L F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (2.7.29b)$$

يكون الاختلاف بين المستقبلات المغطاة و غير المغطاة في حسابات S و U_L .

مثال 2.7.2:

يحتوي المركز المكافئ الأسطواني بعرض 2.5 m وطول 10 m على إشعاع ممتص لكل وحدة مساحة من الفتحة الشمسية $[W/m^2]$ 430. المستقبل عبارة عن أسطوانة انبعائيتها 0.31 و يحيط بها غلاف أسطواني زجاجي مفرغ. يبلغ قطر الماص 60 mm، و قطر الغلاف الشفاف 90 mm و سماكته 4 mm. تم تصميم المجمّع لتسخين مائع يدخل الماص بدرجة حرارة $155.2[^\circ C]$ بمعدل تدفقه $0.0537[kg/sec]$. السعة الحرارية للسائل $C_p = 3.26 [kJ/kg^\circ C]$. معامل نقل الحرارة داخل الأنبوب هو $300 [W/m^2^\circ C]$ ومعامل الضياع الكلي هو $3.82 [W/m^2^\circ C]$ (من المثال 2.7.1). يصنع الأنبوب من الفولاذ المقاوم للصدأ، موصليته $k=16 [W/m^\circ C]$ وسماكة الجدار تبلغ 5[mm]. إذا كانت درجة حرارة الوسط المحيط $10[^\circ C]$ ، احسب الكسب المفيد ودرجة حرارة خروج حرارة السائل.

الحل:

يعتمد الحل على المعادلة (2.7.28)، و تكون مساحة المستقبل:

$$A_r = \pi DL = \pi \times 0.06 \times 10 = 1.88 m^2$$

مع الأخذ بعين الاعتبار تظليل الجزء المركزي من المجمع من قبل المستقبل:

$$A_a = (2.5 - 0.09) \times 10 = 24.1 m^2$$

لحساب F_R نحسب أولاً F' من أجل هذه الحالة تؤخذ المعادلة (2.7.22):

$$F' = \frac{1/3.82}{\frac{1}{3.82} + \frac{0.060}{300 \times 0.050} + \left(\frac{0.060}{2 \times 16} \ln \frac{0.060}{0.050} \right)} = 0.984$$

إذاً F_R تحسب من المعادلة (2.7.25) كما يلي:

$$\frac{\dot{m}C_p}{A_r U_L F'} = \frac{0.0537 \times 3260}{1.88 \times 3.82 \times 0.984} = 24.77$$

$$F'' = 24.77 [1 - \exp(-1/24.77)] = 0.980$$

$$F_R = F'' \times F' = 0.980 \times 0.984 = 0.964$$

يكون الريح المفيد من المعادلة (2.7.24):

$$Q_u = 24.1 \times 0.964 \left[430 - \frac{1.88 \times 3.82}{24.1} (200 - 10) \right] = 8675 [W]$$

ترتفع درجة حرارة السائل:

$$\Delta T = \frac{Q_u}{\dot{m}C_p} = \frac{8675}{0.0537 \times 3260} = 49.6 [^{\circ}C]$$

و درجة حرارة خروج السائل هي: $155.2 + 49.6 = 204.8 [^{\circ}C]$. ينخفض متوسط

درجة الحرارة من الخارج من المستقبل إلى السائل:

$$\begin{aligned} \bar{T}_{ro} - \bar{T}_f &= Q_u \left[\frac{1}{\pi D_{ri} L h_{fi}} + \frac{\ln(D_{ro} / D_{ri})}{2\pi k_{rec} L} \right] \\ &= 8675 \left[\frac{1}{\pi \times 0.05 \times 10 \times 300} + \frac{\ln(0.06 / 0.05)}{2\pi 16 \times 10} \right] = 20 [^{\circ}C] \end{aligned}$$

بحيث يكون متوسط درجة حرارة المستقبل $(155.2 + 204.8) / 2 = 200 [^{\circ}C]$ ،

و التي كانت القيمة المفترضة في المثال (2.7.1).

في ظل الظروف المعتادة، لن يكون متوسط درجة حرارة سطح المستقبل معروفاً وسيكون من الضروري حل معادلات المثالين (2.7.1) و (2.7.2) في نفس الوقت.

يمكن أن تنشأ مشكلات التحكم للمجمعات التي تكون طويلة جداً في اتجاه التدفق، و يمكن أن يصل طول مجمعات الحوض المكافئ إلى أكثر من 1000 m حتى يستغرق مائع نقل الحرارة نصف ساعة أو أكثر للتنتقل من المدخل إلى المخرج. إذا كانت الرغبة في الحفاظ على درجة حرارة مخرج ثابتة، فإن متغير التحكم الوحيد المتاح هو معدل تدفق

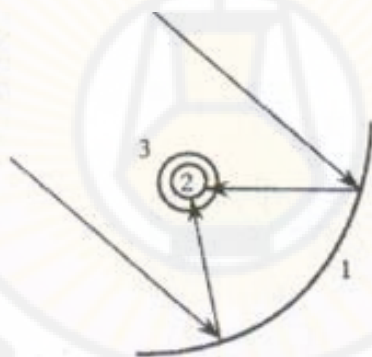
السائل، و سوف يستمر تعديل معدل التدفق في التأثير على درجة حرارة المخرج طوال مدة مرور السائل.

2.7.1. التحليل الحراري لمركز شمسي حلقي قطعي (PRK):

نفترض أنه من أجل لاقط حلقي قطعي (PRK) ومع أنبوب ماص ذي أنبوب زجاجي مغطى مفرغ الشكل (2.7.1) لدينا المعطيات التالية:

- إذا اعتُبر أن الأنبوب المحتوي على الماص مملئ فيمكن اعتبار تدرج درجة الحرارة في مجال الأنبوب المفرغ من الهواء مهملاً.

- معامل الانتقال الحراري الكلي U_L لللاقط يأخذ بعين الاعتبار الفقد الحراري الذي يحدث عبر نقل الحرارة بالحمل و بالإشعاع إلى الوسط المحيط بالإضافة إلى الفقد الحراري الذي ينتج بالناقلية الحرارية في العناصر الداعمة.



الشكل (2.7.1) يبين مخطط اللاقط المركز ذي القطع المكافئ (1) و أنبوب الإمتصاص (2) مع الأنبوب الزجاجي المحيط المفرغ (3)

- يتم إهمال نقل الحرارة الناتج عن طريق الحمل في الأنبوب الزجاجي المحيط المملئ و عند ذلك يكون معامل الانتقال الحراري الكلي لللاقط هو :

$$U_L = \left\{ A_a / \left[A_g (\alpha_w + \alpha_{s,g-u}) \right] + 1 / \alpha_{a-g} \right\}^{-1} \quad (2.7.30)$$

حيث:

α_w : معامل الانتقال الحراري بالحمل (من تأثير الرياح) و يقدر بـ (W/m^2K)

$\alpha_{s,g-u}$: معامل انتقال الحرارة بالإشعاع من خلال الأنبوب الزجاجي المحيط بالماص إلى الوسط المحيط و يقدر بـ (W/m^2K)

α_{a-g} : معامل الانتقال الحراري من أجل تبادل الأشعة بين الماص و الأنبوب الزجاجي المحيط و يقدر بـ (W/m^2K)

A_a : مساحة الأنبوب الماص و تقدر بـ $[m^2]$

A_g : مساحة الأنبوب الزجاجي المحيط بالماص و تقدر بـ $[m^2]$.

تحسب القيم α_{a-g} و $\alpha_{s,g-u}$ على الشكل التالي:

$$\alpha_{s,g-u} = \sigma \varepsilon_g (T_g^4 - T_a^4) / (T_g - T_a) \approx 4\sigma \varepsilon_g T_m^3 \quad (2.7.31)$$

$$T_m = 0.5(T_g + T_u)$$

حيث:

T_m : القيم المتوسطة لدرجات الحرارة من أجل نظام الأنبوب الزجاجي المحيط T_g و الوسط المحيط T_a و تقدر بالكلفن.

Q_{a-g} : التدفق الحراري الذي يغادر الماص إلى الأنبوب الزجاجي المحيط عبر الأشعة، و الذي يمكن حسابه من المعادلة التالية و يقدر بـ W :

$$Q_{a-g} = \sigma A_a (T_a^4 - T_g^4) / [1/\varepsilon_a + A_a/A_g (1/\varepsilon_g - 1)] \quad (2.7.32)$$

حيث:

T_a : درجة حرارة الماص $[K]$.

T_g : درجة حرارة الأنبوب الزجاجي المحيط $[K]$.

A_a : مساحة الماص $[m^2]$.

A_g : مساحة الأنبوب الزجاجي المحيط $[m^2]$.

ε_a : معامل الانبعاث للأنبوب الماص.

ε_g : معامل الانبعاث للأنبوب الزجاجي المحيط.

يعطى معامل الانتقال الحراري α_{a-g} (فقط بالإشعاع) بين الماص والأنبوب الزجاجي المحيط، بالمعادلة التالية:

$$\alpha_{a-g} = Q_{a-g} / [A_a (T_a - T_g)] \quad (2.7.33)$$

$$\alpha_{a-g} = \sigma A_a (T_a^2 + T_g^2) (T_a^2 - T_g^2) / [1/\epsilon_a + d_a / d_g (1/\epsilon_g - 1)] \quad (2.7.34)$$

حيث:

d_a و d_g هما قطرا الأنبوب الماص و الأنبوب الزجاجي المحيط [m].

$Q_{V,K}$: التدفق الحراري الضائع الكلي من اللاقط و يحسب بالعلاقة التالية:

$$Q_{V,k} = U_L A_a (T_a - T_u) \quad (2.7.35)$$

تكون قيم U_L للاقط المركز متعلقة بدرجة حرارة الماص بشكل كبير وذلك لأن درجة حرارة الماص العالية تلعب دوراً هاماً في الإنتقال الحراري عن طريق الإشعاع، وهذا التأثير تقل أهميته بشكل قليل في حالة اللواقط مع الماص المطلي بمادة انتقائية للإشعاعات الضوئية.

تطبق العلاقة التالية من أجل لاقط PRK مع الأنبوب الماص لحساب F' (بدون الأنبوب الزجاجي المحيط):

$$F' = [1 + U_L d_a / (d_i \alpha_i) + U_L d_a / (2\lambda) \ln(d_a / d_i)]^{-1} \quad (2.7.36)$$

حيث:

U_L : معامل الانتقال الحراري الكلي للاقط ويقدر بـ $W/m^2.K$.

d_i و d_a هما القطران الخارجي والداخلي للأنبوب الماص [m].

α_i معامل الانتقال الحراري الكلي بداخل الأنبوب و يقدر بـ $W/m^2.K$.

λ هي معامل التوصيل الحراري لمادة الأنبوب وتقدر بـ $W/m.K$.

نستطيع من المعادلات السابقة الحصول على الاستطاعة الحرارية المفيدة للاقط حلقي قطعي (PRK) مركز:

$$Q_u = F_R A_{ap} [I_b (\rho \gamma \tau \alpha_a)_0 K_o - (U_L / C) (T_{ein} - T_u)] \quad (2.7.37)$$

2.8. التوجيه والطاقة الممتصة لمركزات CPC :

ORIENTATION AND ABSORBED ENERGY FOR CPC COLLECTORS

تتمثل مزايا CPCs في أنها يمكن أن تعمل دون تتبع مستمر وتبقى تحقق بعض التركيز. ومع ذلك، يجب أن تكون موجهة بشكل صحيح لمتنص أكبر إشعاع تمتصه عند الحاجة إلى طاقة مفيدة. لتحديد العملية في أي وقت (و التي تعد خطوة لإيجاد أفضل اتجاه)، من الضروري حساب الإشعاع الممتص. و السؤال الحاسم بشكل خاص هو ما إذا كان سيتم امتصاص حزمة الإشعاع أم لا.

الاتجاه المنطقي لمثل هذا المجمع هو وضعه على طول المحور الأفقي بين الشرق والغرب، و يميل نحو خط الاستواء في نصف الكرة الأرضية الشمالي، و قابل للتعديل أكثر أو أقل حول هذا المحور. يتم ترتيب (CPC) بحيث تكون زاوية ورود الإشعاع الزائف أو المستعار pseudo لحزمة الإشعاع (إسقاط زاوية الورد على المستوي العمودي من الشمال إلى الجنوب) ضمن الحدود $\pm\theta_c$ خلال الأوقات التي يحتاج فيها إلى طاقة مفيدة. في الممارسة العملية، تعد التسويات ضرورية بين تواتر حركة المجمع ونسبة التركيز، مع ارتفاع النسب المرتبطة بزوايا القبول الصغيرة و المواقع المتكررة نسبياً....

لتقدير الإشعاع الذي يمتصه مستقبل (CPC)، من الضروري تحديد ما إذا كانت زاوية ورود حزمة الإشعاع المباشر تقع ضمن زاوية القبول θ_c ، ثم تقدير مساهمات حزمة الإشعاع المباشر و الإشعاع المنتشر بالإضافة إلى الإشعاع المنعكس على الأرض إذا كانت ضمن زاوية القبول. يمكن تقدير الإشعاع الممتص على أنه:

$$S = G_{b,CPC} \tau_{c,b} \tau_{CPC,b} \alpha_b + G_{d,CPC} \tau_{c,d} \tau_{CPC,d} \alpha_d + G_{g,CPC} \tau_{c,g} \tau_{CPC,g} \alpha_g \quad (2.8.1a)$$

$$G_{b,CPC} = FG_{bn} \cos \theta \quad (2.8.1b)$$

$$G_{d,CPC} = \begin{cases} \frac{G_d}{C} & \text{if } (\beta + \theta_s) < 90^\circ \\ \frac{G_d}{2} \left(\frac{1}{C} + \cos \beta \right) & \text{if } (\beta + \theta_s) > 90^\circ \end{cases} \quad (2.8.1c)$$

$$G_{g,CPC} = \begin{cases} 0 & \text{if } (\beta + \theta_s) < 90^\circ \\ \frac{G_d}{2} \left(\frac{1}{C} - \cos \beta \right) & \text{if } (\beta + \theta_s) > 90^\circ \end{cases} \quad (2.8.1d)$$

حيث:

الزاوية β : هي زاوية ميل فتحة اللاقط عن الأفق.

المصطلح الأول في المعادلة (2.8.1 a) هو مساهمة حزمة الإشعاع المباشر في S ، و الثاني هو مساهمة الإشعاع المنتشر، و الثالث هو مساهمة الإشعاع المنعكس من الأرض. في المصطلح الأول:

$G_{b,CPC}$: هو الإشعاع المباشر على الفتحة التي تقع ضمن زاوية القبول.

$\tau_{c,b}$: هو معامل نفاذية الإشعاع المباشر من أي غطاء يمكن وضعه فوق صف المركز.

α_b : معامل امتصاصية المستقبل للإشعاع المباشر.

العامل $\tau_{CPC,b}$ هو معامل نفاذية CPC التي تمثل ضياعات الانعكاس و هي تابعة لمتوسط عدد الانعكاسات.

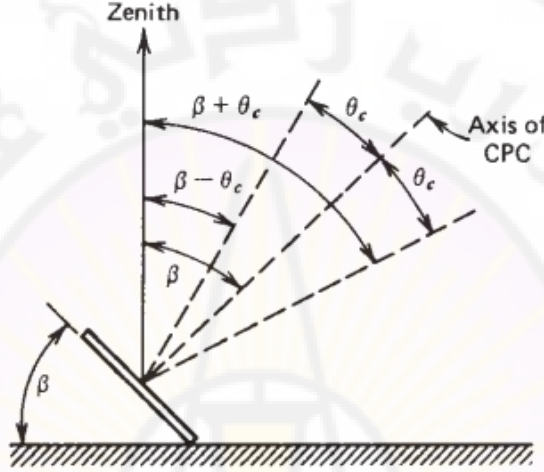
العوامل في مصطلحات الإشعاع المنتشر و المنعكس من الأرض تشبه تلك الخاصة بالإشعاع المباشر.

يكون الإشعاع المنعكس من الأرض فعالاً فقط إذا كان $\beta + \theta_c > 90^\circ$ أي أن المستقبل يرى الأرض. و تظهر الزوايا في الشكل (2.8.1). تحسب المعادلتان (2.8.1c) و (2.8.1d) مساهمة أو عدم وجود الإشعاع المنعكس من الأرض. يفترض هنا أن الإشعاع المنتشر يكون موحد الخواص isotropic.

يوضح الشكل (2.8.1) زاوية قبول (CPC) على متن مستوي عمودي من الشمال إلى الجنوب لـ (CPC) موجه على محور شرق -غرب. الزاويتان $\beta - \theta_c$ و $\beta + \theta_c$ هما الزاويتان من العمود في هذا المستوي إلى الحدين اللذين يصفان زاوية القبول. أظهر

ميتشل (1979) أنه يجب توفر الشرط التالي حتى يلتقط الإشعاع المباشر من قبل مركز ال CPC :

$$(\beta - \theta_c) \leq \tan^{-1}(\tan \theta_z \cos \gamma_s) \leq (\beta + \theta_c) \quad (2.8.2)$$



الشكل (2.8.1) إسقاط زاويتي الميل والقبول لمجمع CPC على المستوي N-S و محور CPC الموجه بالاتجاه E-W.

من المناسب إدخال تابع التحكم F في المعادلة (2.8.1b)، والذي يكون 1 إذا توفر الشرط في المعادلة (2.8.2) وكان 0 أو خلاف ذلك. إذا ورد الإشعاع المباشر على الفتحة داخل زاوية القبول، فسيتم إدراج $F=1$ و مصطلح الإشعاع المباشر في حساب S . من المحتمل أن يكون لمجمع CPC غطاء شفاف فوق مجموعة العاكسات. يعمل هذا الغطاء على حماية الأسطح العاكسة والماصة و تقليل الضياعات الحرارية من الماص، ثم يتم تقليل الإشعاع المباشر والمنتشر الذي يدخل بفعالية إلى CPC عن طريق معامل نفاذية الغطاء τ_c .

يمكن كتابة مردود اللاقط CPC من المعادلة (2.8.3):

$$\eta = \frac{Q_u}{A_a G_t} \quad (2.8.3)$$

حيث:

G_t : هو الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على الفتحة الشمسية.

تحسب الطاقة المفيدة من اللاقط CPC من المعادلة (2.8.4):

$$Q_u = F_R [A_a S - A_r U_L (T_i - T_a)] \quad (2.8.4)$$

وجد Rabl et al. (1980) أن الإشعاع الشمسي من اللاقط CPC G_{CPC} يمكن

تقريبه بشكل جيد بعلاقة مع نسبة التركيز C كما في المعادلة (2.8.5):

$$G_{CPC} = G_B + \frac{1}{C} G_D = (G_t - G_D) + \frac{1}{C} G_D = G_t - \left(1 - \frac{1}{C}\right) G_D \quad (2.8.5)$$

يمكن التعبير عن الإشعاع الشمسي الممتص S بالأخذ بعين الاعتبار معادلة G_{CPC} بالطريقة التالية:

$$S = G_{CPC} \tau_{cover} \tau_{CPC} \alpha_r = \left[G_t - \left(1 - \frac{1}{C}\right) G_D \right] \tau_{cover} \tau_{CPC} \alpha_r =$$

$$G_t \tau_{cover} \tau_{CPC} \alpha_r \left[1 - \left(1 - \frac{1}{C}\right) \frac{G_D}{G_t} \right] \quad (2.8.6)$$

أو:

$$S = G_t \tau_{cover} \tau_{CPC} \alpha_r \cdot \gamma \quad (2.8.7)$$

حيث:

τ_{cover} : معامل النفوذية للغطاء الزجاجي.

τ_{CPC} : معامل النفوذية الفعالة للاقط CPC.

α_r : معامل امتصاصية المستقبل.

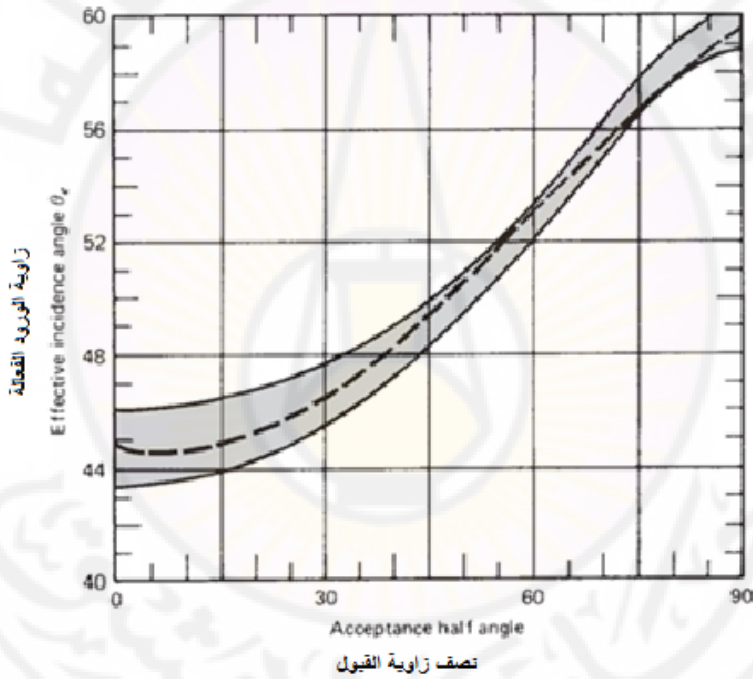
γ : معامل تصحيح الإشعاع المنتشر و يعطى بالمعادلة (2.8.8) ويحسب من

أجل ضياع الإشعاع المنتشر خارج زاوية قبول لاقط CPC مع نسبة التركيز C:

$$\gamma = 1 - \left(1 - \frac{1}{C}\right) \frac{G_D}{G_t} \quad (2.8.8)$$

تتراوح النسبة $\frac{G_D}{G_t}$ من 0.11 للأيام المشمسة جداً إلى 0.23 للأيام الضبابية.

يدخل جزء فقط من الإشعاع المنتشر الوارد بشكل فعال في المركز CPC، و هذا الجزء يكون تابعاً لزاوية القبول. يوضح الشكل (2.8.2) العلاقة بين متوسط زاوية ورود الإشعاع المنتشر الفعال من السماء و بين نصف زاوية القبول θ_c . ويستند هذا على افتراض أن الإشعاع المنتشر هو موحد الخواص.



الشكل (2.8.2) زاوية الورد المكافئة للإشعاع المنتشر الإيزوتروبي بالنسبة إلى (CPC) كتابع لنصف زاوية القبول.

تعتمد العلاقة على طبيعة نظام التغطية cover، و يوضح الشكل مجموعة من الحلول، بما في ذلك غطاء واحد و اثنان، ومؤشرات الانكسار من 1.34 إلى 1.526 و

KL لكل غطاء حتى 0.0524. تكون المعادلة من أجل زاوية ورود الفعالة θ_e (الخط المتقطع):

$$\theta_e = 44.86 - 0.0716\theta_c + 0.00512\theta_c^2 - 0.00002798\theta_c^3 \quad (2.8.9)$$

و بالتالي، بالنسبة إلى (CPC) مع $\theta_c = 20^\circ$ ، فإن متوسط زاوية ورود الإشعاع المنتشر الفعال هو 45° ، و معامل نفاذية الغطاء لهذا الإشعاع هو تلك الخاصة بالإشعاع المباشر عند 45° . بشكل عام، يتم توجيه (CPC) بحيث لا تنعكس أي إشعاعات من الأرض. إذا تمكن (CPC) من رؤية الأرض، فيمكن افتراض أن زاوية ورود الفعالة للإشعاع المنعكس من الأرض و الإشعاع المنتشر متساوية.

المصطلحات $\tau_{CPC,b}$ ، τ_{CPC} ، τ_{CPC} ، في المعادلة (2.8.1a) هي معاملات نفوذية CPC التي تمثل الانعكاس المرآوي specular للمركز ومتوسط عدد الانعكاسات. تعامل المصطلحات عادةً على النحو نفسه، ويتم تقدير قيمة مناسبة لتطبيقها على المصطلحات الثلاثة جميعها من خلال عدد الانعكاسات n_i من الشكل (2.6.5) والانعكاس ρ بواسطة المعادلة:

$$\tau_{CPC} = \rho^{n_i} \quad (2.8.10)$$

هنا يفترض أن آثار عكس النهايات ضئيلة أو أن النهايات عاكسة للغاية. تعتمد معاملات الامتصاصية α_b و α_d و α_g لسطح المستقبل على زوايا ورود الإشعاع على السطح، و تختلف زوايا ورود باختلاف زاوية ورود الإشعاع على فتحة CPC، وعدد الانعكاسات التي يتعرض لها الإشعاع، وشكل الأسطح العاكسة والمستقبلة. إذا كان متوسط عدد الانعكاسات صغيراً، كما سيكون لزوايا القبول الكبيرة، عند التقريب الأول يمكن أخذ معامل الامتصاصية كتلك المقابلة لزاوية ورود الإشعاع الفعال على فتحة (CPC)؛ و مع ذلك، فإن هذا سوف يؤدي عموماً إلى المبالغة في تقدير α .

مثال 2.8.1:

يتم تثبيت صف مجمعات CPC كامل غير مغطى على محور شرق - غرب أفقي و موجه بميل 25° على الأفق. خط العرض 35° شمالاً. زاوية القبول $2\theta_c = 24^\circ$. في 10AM: يوم 1 آب، كان الإشعاع المباشر $G_{bn} = 805 \text{ W / m}^2$. قدر الإشعاع المباشر الوارد على مجمع CPC لكل متر مربع من مساحة الفتحة.

الحل:

تكون الخطوة الأولى بأن يتم التحقق إذا كان معيار المعادلة (2.8.2) محققاً، يعني ذلك أن F تكون 0 أو 1. لهذا التاريخ فإن $n=213$ ، $\omega=-30^\circ$ ، و $\delta=17.9^\circ$. تحسب زاوية ورود الاشعاع الشمسي على سطح أفقي من المعادلة التالية فتكون:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta$$

$$\cos \theta_z = \cos 35 \cos 17.9 \cos(-30) + \sin 35 \sin 17.9 = 31.6^\circ$$

من المعادلة التالية نحسب زاوية سمت الشمس:

$$\gamma_s = \text{sign}(\omega) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos \theta_z \sin \phi - \sin \delta}{\sin \theta_z \cos \phi} \right) \right|$$

$$\gamma_s = (-1) \left| \cos^{-1} \left(\frac{\cos 31.6 \sin 35 - \sin 17.9}{\sin 31.6 \cos 35} \right) \right| = -65.2^\circ$$

لهذا اللاقط $\beta - \theta_c = 25 - 12 = 13^\circ$ و $\beta + \theta_c = 25 + 12 = 37^\circ$. من المعادلة (2.8.2): $\tan^{-1} [\tan 31.6 \cos(-65.2)] = 14.5^\circ$. بما أن 14.5° واقعة بين 13° و 37° ، إذاً الشرط محقق و $F=1$. يمكن الحصول على زاوية ورود الإشعاع المباشر على فتحة اللاقط من المعادلة التالية:

$$\cos \theta_z = \cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta$$

$$\cos \theta = \cos(35 - 25) \cos 17.9 \cos(-30) + \sin(35 - 25) \sin 17.9 = 0.865$$

يكون الإشعاع المباشر الفعال الوارد على فتحة CPC:

$$G_{CPC,b} = 1 \times 805 \times 0.865 = 700 [\text{W / m}^2]$$

مثال 2.8.2:

لنفس زمان ومكان المثال (2.8.1) يكون الإشعاع المنتشر على سطح أفقي $320\text{W}/\text{m}^2$. قُطع الـ CPC في المثال (2.8.1) وكانت نسبة التركيز له 4.5. معامل الانعكاسية لعاكس الـ CPC يكون 0.89 و معامل الامتصاصية للمستقبل يكون 0.94. قُدِّر الإشعاع الكلي الممتص من قبل المستقبل لكل وحدة مساحة من المستقبل إذا كان لصف مجمع CPC غطاء زجاجي له معامل التخامد $KL=0.0125$.

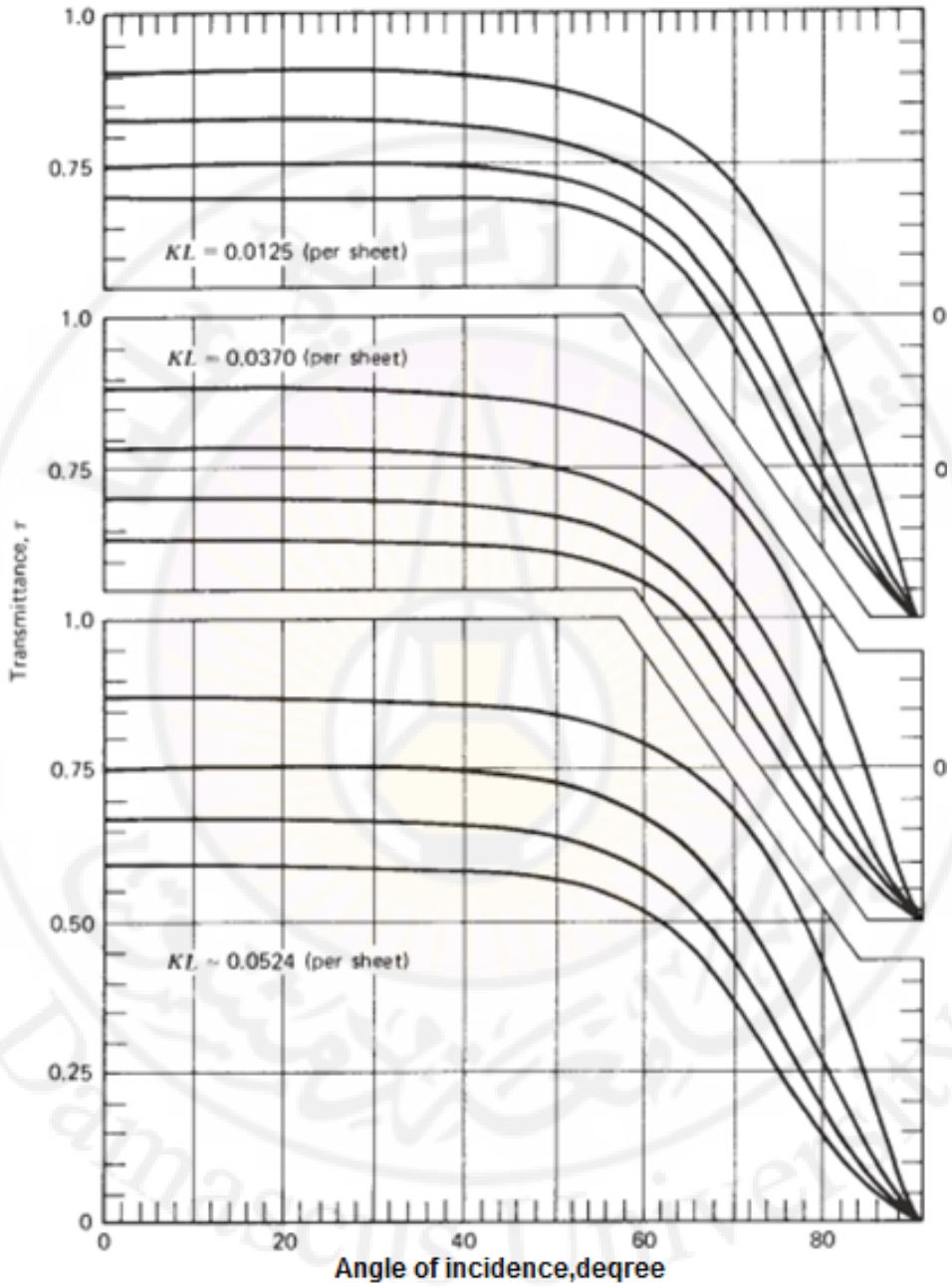
الحل:

من أجل الشرط $\beta + \theta_c = 25 + 12 = 37^\circ$ ، لذلك ليس هناك مساهمة من الإشعاع المنعكس من الأرض. تستخدم المعادلة (2.8.1c) لتقدير الإشعاع المنتشر الفعال:

$$G_{CPC,d} = \frac{320}{4.5} = 71 [\text{W} / \text{m}^2]$$

تكون زاوية ورود الإشعاع المباشر على الغطاء: $\cos^{-1}(0.865)$ ، أو $\theta = 30^\circ$ ، و نفوذية الغطاء من أجل هذا الإشعاع من الشكل (2.8.3) تكون 0.90، و متوسط زاوية الورد للإشعاع المنتشر من الشكل (2.8.2) تكون 45° . يُوجد من الشكل (2.8.3) أنَّ معامل النفوذية لهذا الإشعاع هو 0.89. متوسط عدد الانعكاسات 0.81 من الشكل (2.6.5). يكون الإشعاع الممتص من المستقبل لكل وحدة مساحة من المستقبل هو مساهمة مركبات الإشعاع المباشر و المنتشر في مضاعفة نسبة التركيز:

$$S = 4.5 \times 0.94 \times (700 \times 0.90 + 71 \times 0.89) 0.89^{0.81} = 2668 [\text{W} / \text{m}^2]$$



الشكل (2.8.3) النفاذية (مع مراعاة الامتصاص والانعكاس) من واحد واثنين وثلاثة وأربعة أغشية لثلاثة أنواع من الزجاج.

مثال 2.8.3:

ما الإشعاع المنتشر و المنعكس من الأرض على السطح المستقبل لمجمع CPC الكامل مع نصف زاوية القبول 18° و يميل بزاوية 80° نحو الجنوب عند خط عرض 35° ؟ إذا علمت أن الإشعاع الكلي على سطح أفقي يكون 530 W/m^2 ، و الإشعاع المنتشر 175 W/m^2 ، و معامل انعكاسية الأرض 0.7.

الحل:

يجب النظر في هذه الحالة في الإشعاع المنعكس على الأرض $\beta + \theta_c > 90^\circ$. باستخدام المعادلتين (2.8.1c) و (2.8.1d) مع استبدال C بـ $1/\sin\theta_c$ لـ CPC الكامل يمكن إيجاد:

$$G_{CPC,d} = \frac{175}{2} (\sin 18 + \cos 80) = 42.2 [W / m^2]$$

$$G_{CPC,g} = \frac{530 \times 0.7}{2} (\sin 18 - \cos 80) = 25.1 [W / m^2]$$

مثال 2.8.4:

لاقط CPC مساحة فتحته 4 m^2 ونسبة التركيز 1.7. أوجد كفاءة اللاقط اذا كان: الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على مستوى الفتحة $G_t = 850 [W / m^2]$ ، نسبة الإشعاع المنتشر إلى الإشعاع الكلي 0.12، و نفاذية الغطاء الزجاجي $\tau_c = 0.9$ و انعكاسية السطح العاكس $\rho = 0.9$ العدد الوسطي للانعكاسات 0.6 و تبلغ امتصاصية المستقبل $\alpha_r = 0.87$ ، و انبعاثية المستقبل 0.12، و انعكاسية المرآة 0.90، و معامل تصحيح الإشعاع المنتشر $\gamma = 0.95$ ، و معامل الضياع الحراري الإجمالي للمركز $U_L = 2.5 [W / m^2 \cdot ^\circ C]$ ، و درجة حرارة الماء الداخل للاقط $80 [^\circ C]$ معدل تدفق الماء 0.015 kg/s ، ودرجة حرارة الوسط المحيط $15 [^\circ C]$ ، و معامل كفاءة اللاقط 0.92.

الحل:

يجب حساب معامل تصحيح الإشعاع المنتشر γ من المعادلة (2.8.8):

$$\gamma = 1 - \left(1 - \frac{1}{C}\right) \frac{G_D}{G_t} = 1 - \left(1 - \frac{1}{1.7}\right) \times 0.12 = 0.95$$

نجد من الشكل (2.6.5) ومن أجل $C=1.7$ أن متوسط عدد الانعكاسات للاقط CPC الكامل هو $n=0.6$ ، لذلك نجد من المعادلة (2.8.10):

$$\tau_{CPC} = \rho^{ni} = 0.90^{0.6} = 0.94$$

يعطى الإشعاع الشمسي الممتص بالمعادلة (2.8.7):

$$S = G_t \tau_{cover} \tau_{CPC} \alpha_r \cdot \gamma =$$

$$850 \times 0.90 \times 0.94 \times 0.87 \times 0.95 = 594.3 [W / m^2]$$

لحساب معامل إزالة الحرارة F_R :

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp \left(- \frac{A_c U_L F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] =$$

$$= \frac{0.815 \times 4180}{4 \times 2.5} \left[1 - \exp \left(- \frac{4 \times 2.5 \times 0.92}{0.815 \times 4180} \right) \right] = 0.86$$

يمكن حساب مساحة المستقبل كما يلي:

$$A_r = \frac{A_a}{C} = \frac{4}{1.7} = 2.35 [m^2]$$

يمكن من المعادلة (2.8.4) حساب الطاقة المفيدة من اللاقط:

$$Q_u = F_R [A_a S - A_r U_L (T_i - T_a)] =$$

$$0.86 [4 \times 594.3 - 2.35 \times 2.5 (80 - 15)] = 1716 [W]$$

يحسب مَرُود اللاقط من المعادلة (2.8.3):

$$\eta = \frac{Q_u}{A_a G_t} = \frac{1716}{4 \times 850} = 0.504 \Rightarrow \eta = 50.4\%$$



الفصل الثالث

تحلية المياه بالطاقة الشمسية



تحلية المياه بالطاقة الشمسية

3.1. مقدمة :

شهدت الآونة الأخيرة تغيرات جذرية في تقنيات معالجة المياه و ذلك بسبب النقص الشديد الذي تعانيه كثير من دول العالم في المياه الصالحة للشرب أو نتيجة لتلوث مصادر المياه كما هو الحال في أكثر الدول الصناعية. و قد أدت هذه العوامل إلى البحث عن مصادر جديدة غير المصادر التقليدية و التي تحتاج بطبيعة الحال إلى تقنيات معالجة متقدمة بالإضافة إلى المعالجة التقليدية.

و لذلك لجأت كثير من الدول إلى تحلية مياه البحر و إلى تحلية بعض مصادر المياه الجوفية المالحة، و في سبيل ذلك يتم استخدام تقنيات باهظة التكاليف مثل تقنية التناضح العكسي، و استخدام الطاقة الشمسية في تحلية المياه، بالإضافة إلى العديد من العمليات الأخرى للتحلية.

مما لا شك فيه أن تحلية المياه بالطاقة الشمسية يعد من أقدم الطرق للحصول على مياه عذبة. و لقد ازدادت أهمية هذه الطريقة حالياً، نتيجة لتزايد تكلفة الطاقة، وخاصة بالنسبة للمناطق التي تتمتع بقوة طاقتها الشمسية، و تعاني في الوقت نفسه من ندرة مائها العذب. و من أهم الوسائل المستخدمة حالياً لتحلية المياه باستخدام الطاقة الشمسية ما يلي:

3.1.1 طرق غير مباشرة للتحلية بالطاقة الشمسية:

و تعتمد هذه الطرق على توفير الطاقة اللازمة لوحدات التحلية من الطاقة الشمسية التي يتم تحويلها إلى صور أخرى من الطاقة مثل الطاقة الحرارية أو الطاقة الكهربائية أو الميكانيكية، و يتم استخدام هذه الطاقة لتشغيل محطات التحلية، و يستمر باقي العمل كما هو مع مصدر الطاقة التقليدية.

و يُذكر من هذه الطرق طريقة التناضح العكسي، و تمثل هذه الطريقة اتجاهاً حديثاً، ذلك أنَّ الطاقة الشمسية يجب تحويلها إلى كهرباء أو طاقة ميكانيكية، و يتم ذلك باستخدام الخلايا الفوتوفولطية التي تولد الكهرباء اللازمة لتشغيل المضخات.

3.1.2. الطرق المباشرة للتحلية بالطاقة الشمسية:

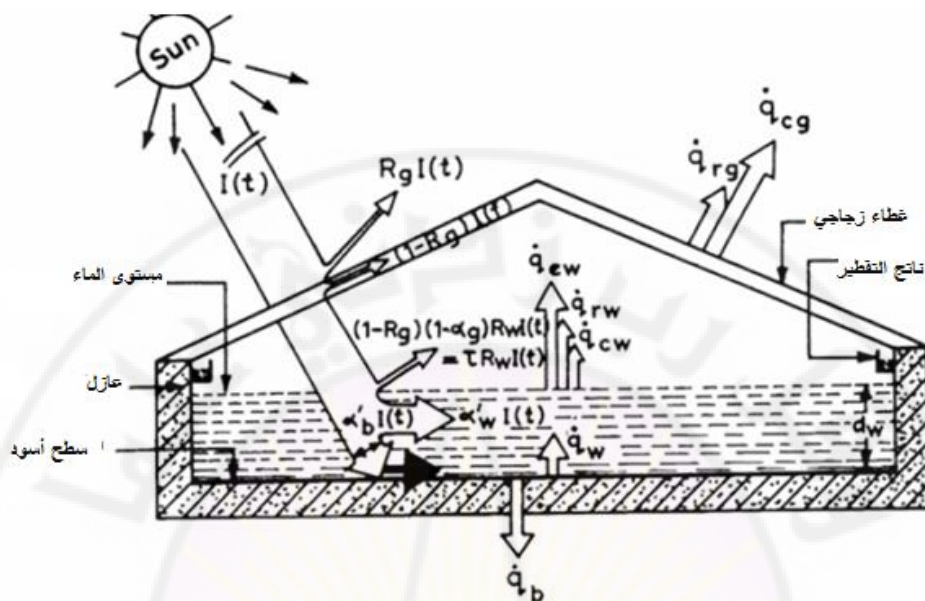
تستخدم أشعة الشمس في هذه الطرق كمصدر حراري لرفع درجة حرارة الماء و من ثم يتبخر الماء حيث يتم تكثيفه على أسطح باردة باستخدام المقطرات الشمسية . و تعتبر طريقة التقطير بالمقطر الصندوقي من أشهر الطرق في تحلية المياه بالطاقة الشمسية، لما تمتاز به هذه الطريقة من بساطة و سهولة في التصنيع . و كنتيجة طبيعية لهذا فقد تم في جميع أنحاء العالم تصنيع الكثير من المقطرات الصندوقية، التي تهدف إلى تحسين الإنتاجية للمقطر دون زيادة في التكاليف.

تستخدم طرق أخرى هامة في تحلية المياه بالطاقة الشمسية، نذكر منها استخدام ظاهرة الانتشار في المرتبة الثانية من حيث الأهمية. و هناك بالطبع طرق أخرى لاستخدام الطاقة الشمسية لتحلية المياه، و من بينها استخدام الحمل القسري و استخدام ترطيب الهواء ثم التكثيف .

3.2. مبدأ عمل التقطير الشمسي:

3.2.1. المقطر الصندوقي:

يوضح الشكل (3.2.1) مختلف ضياعات الطاقة في مكونات وحدة تقطير شمسي تقليدية مزدوجة الميل (مقطر صندوقي) passive solar distiller unit. فيها حوض محكم الإغلاق.



الشكل (3.2.1) مخطط سريان الطاقة في مقطر شمسي صندوقي تقليدي ثنائي الميل

يتم بناء الحوض ذي القاعدة المستطيلة، باستخدام:

- (1) الإسمنت إذا كانت التجهيزات كبيرة.
- (2) بلاستيك مقوى بالألياف (FRP) لتجهيزات أصغر.

هناك غطاء علوي من المواد الشفافة مثل الزجاج و البلاستيك ، إلخ. . يُطلَى الجزء الداخلي للحوض المستطيل باللون الأسود لكي يمتص الإشعاع الشمسي القصير الموجة بفعالية بعد نفوذه عبر الغطاء الشفاف. توجد قناة لجمع ناتج التقطير في الطرف الأسفل من الغطاء الشفاف. و فيما يلي مبدأ العمل لوحدة التقطير الشمسي ذات الميل (مقطر صندوقي).

ينفذ الإشعاع الشمسي القصير الموجة $[I(t)]$ من خلال الغطاء الشفاف إلى داخل وعاء التقطير الشمسي. ينعكس جزء من الإشعاع الشمسي النافذ $\tau_g [I(t)]$ و يكون $[R'_w I(t)]$ و يمتص جزء آخر من قبل كتلة الماء الموجودة في الحوض $[\alpha'_w I(t)]$. يصل الإشعاع الشمسي المتبقي إلى سطح الحوض الأسود حيث يتم امتصاصه و تسخين

السطح الماص الأسود. يتم نقل معظم الطاقة الحرارية من صفيحة الماص السوداء إلى كتلة الماء بالحمل، و يُفقد جزء صغير إلى الهواء المحيط من خلال العازل على الجزء السفلي للمقطر الشمسي، مع زيادة درجة حرارة الماء، و يتم نقل الحرارة من الماء إلى الغطاء الزجاجي عن طريق الإشعاع $(\dot{q}_{rw})$ و الحمل الحراري $(\dot{q}_{cw})$ ، و التبخر $(\dot{q}_{ew})$. يصل بخار الماء أولاً إلى الغلاف ثم يتكاثف على الغطاء الزجاجي الداخلي عن طريق إطلاق حرارة التكاثف على الغطاء الزجاجي. يفقد الغطاء الزجاجي الطاقة الحرارية من السطح العلوي إلى الهواء المحيط عن طريق الحمل الحراري و الإشعاع. تتسرب قطرات الماء المكثف على الغطاء الزجاجي من الطرف العلوي إلى الأطراف السفلية من الغطاء الزجاجي المائل بسبب الجاذبية و يتم تخزينها في حاويات. يظهر جزء من الإشعاع الشمسي القصير الموجة في الشكل (3.2.1) في مختلف مكونات وحدة التقطير. يمكن التعبير عن هذه الأجزاء رياضياً كما يلي: يعطى جزء من الإشعاع الشمسي القادم الممتص من قبل الغلاف الزجاجي على النحو التالي:

$$\alpha'_g = (1 - R_g) \alpha_g \quad (3.2.1a)$$

تعطى الأجزاء المنعكسة و الممتصة من الإشعاع الشمسي الوارد من قبل كتلة الماء بالمعادلات (3.2.1b) و (3.2.1c) على التوالي:

$$R'_w = (1 - R_g) (1 - \alpha_g) R_w \quad (3.2.1b)$$

$$\alpha'_w = (1 - R_g) (1 - \alpha_g) (1 - R_w) \alpha_w \quad (3.2.1c)$$

و تعطى أجزاء أخرى من الإشعاع الشمسي الواردة التي تمتصها بطانة الحوض وتضيع من خلال كتلة الماء و الغطاء الزجاجي بالمعادلة (3.2.1d):

$$\alpha'_b = (1 - R_g) (1 - \alpha_g) (1 - R_w) (1 - \alpha_w) \alpha_b \quad (3.2.1d)$$

3.3. الكفاءة الحرارية:

تعرف الكفاءة الحرارية لوحدة التقطير الشمسي بأنها نسبة الماء المقطر إلى الطاقة الشمسية الداخلة إلى المقطر. يمكن تصنيف هذه الكفاءة على النحو التالي:

3.3.1. الكفاءة الحرارية اللحظية:

(a) المقطر الشمسي الصندوقي السلبي (Passive solar still):

هي النسبة من معدل نقل الحرارة بسبب التبخر $(\dot{Q}_{ew} = \dot{M}_{ew} \times L)$ إلى معدل الإشعاع الشمسي الوارد على الغطاء الزجاجي. يتم تعريفها رياضياً بأنها:

$$\eta_i = \frac{\dot{Q}_{ew}}{I(t) \cdot A_s} = \frac{\dot{M}_{ew} \times L}{I(t) \cdot A_s} = \frac{h_{ew} (T_w - T_g) A_s}{I(t) \cdot A_s} = \frac{h_{ew} (T_w - T_g)}{I(t)} \quad (3.3.1a)$$

حيث:

A_s و L هما الحرارة الكامنة من التكاثف $[J/kg \text{ } ^\circ C]$ و مساحة المقطر الشمسي $[m^2]$ على التوالي. يعتمد معدل تقطير المياه $\dot{M}_{ew}$ على الفرق بين درجة حرارة المياه T_w و درجة حرارة الغلاف الزجاجي T_g أي: $(T_w - T_g)$ ، معامل كتلة التبخر $h_{ew} [W/m^2 \text{ } ^\circ C]$

(b) التقطير الشمسي الصندوقي الفعال (Active solar still):

يعتمد معدل إنتاج الماء المقطر على فرق درجة الحرارة بين الماء و الغطاء الزجاجي، أي: $(T_w - T_g)$. تتمثل إحدى الطرق لزيادة فرق درجة الحرارة بين الماء و الغطاء الزجاجي في زيادة درجة حرارة الماء عن طريق تغذية بعض الطاقة الحرارية الإضافية في حوض المقطر الشمسي، و يشار إلى وحدة التقطير الشمسي هذه بـ "المقطر الشمسي الفعال". يعطي الشكل (3.3.1) مثالاً عليها.

تقدم الطاقة الحرارية الخارجية من المجمعات الشمسية المسطحة التي تكون متكاملة مع حوض وحدة التقطير الشمسي في هذه الحالة، يمكن كتابة الكفاءة الحرارية اللحظية على النحو التالي:

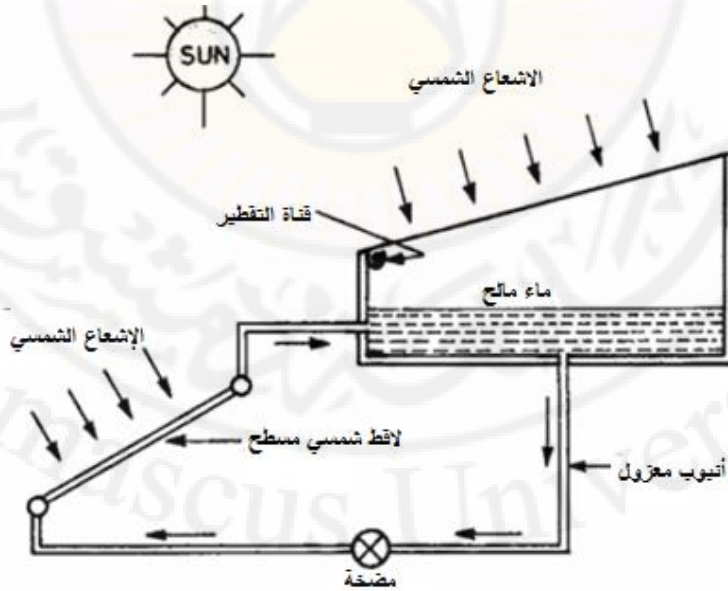
$$\eta_i = \frac{\dot{Q}_{ew}}{I(t)A_s} = \frac{\dot{M}_{ew} \times L}{I(t)A_s + NA_c I'(t)} = \frac{h_{ew}(T_w - T_g)A_s}{I(t)A_s + NA_c I'(t)} \quad (3.3.1b)$$

و تجدر الإشارة إلى أن درجة حرارة تشغيل الماء في حوض التقطير الشمسي الفعال تكون أعلى من درجة حرارة التشغيل في حالة المقطر الشمسي السلبي؛ وبالتالي، فإن الكفاءة الحرارية اللحظية للمقطر الشمسي الفعال ستظل أقل مقارنةً مع المقطر الشمسي السلبي، أي:

$$\eta_{i,active} < \eta_{i,passive} \quad (3.3.1c)$$

ملاحظة:

درجة حرارة التشغيل أو درجة حرارة العمل أو درجة الحرارة التشغيلية هي درجة الحرارة التي يعمل عندها جهاز ميكانيكي أو كهربائي. يعمل الجهاز بشكل فعال ضمن مجال محدد لدرجات الحرارة يختلف تبعاً لوظيفة الجهاز وسياق التطبيق، وتتراوح بين درجة حرارة التشغيل الدنيا ودرجة حرارة التشغيل الأعظمية (أو درجة حرارة التشغيل القصوى). (خارج هذا المجال من درجات حرارة التشغيل الآمن يمكن أن يتعطل الجهاز . درجة حرارة التشغيل هي إحدى عناصر هندسة الوثوقية.



الشكل (3.3.1) المقطر الشمسي الفعال

3.3.2. الكفاءة الحرارية الاجمالية:

يمكن التعبير رياضياً عن الكفاءة الحرارية الاجمالية للمقطر السلبي و الفعال كما يلي:

(a) المقطر الشمسي السلبي (Passive solar still):

$$\eta_{i, passive} = \frac{\sum \dot{M}_{ew} L}{A_s \int I(t) dt} \times 100 \quad (3.3.2a)$$

(b) التقطير الشمسي الفعال (Active solar still):

$$\eta_{i, active} = \frac{\sum \dot{M}_{ew} L}{\left[A_s \int I(t) dt + N A_c \int I'(t) dt \right]} \times 100 \quad (3.3.1b)$$

حيث:

N : عدد المجمعات الشمسية المربوطة على التسلسل أو على التفرع.
و تعطى الحرارة الكامنة من التبخر و التي تعتمد على درجة الحرارة كما يلي:
(1) إذا كانت درجة الحرارة $70^\circ\text{C} <$

$$L = 3.1615 \times 10^6 \left[1 - 7.616 \times 10^{-4} T \right] \quad (3.3.2a)$$

(2) إذا كانت درجة الحرارة $70^\circ\text{C} >$

$$L = 2.4935 \times 10^6 \left[1 - 9.4779 \times 10^{-4} T + 1.3132 \times 10^{-7} T^2 - 4.7974 \times 10^{-9} T^3 \right] \quad (3.3.2b)$$

كفاءة المقطر اليومية η_d فتعرّف بأنها إجمالي الحرارة المستخدمة يومياً في عملية التبخير إلى شدة الإشعاع الشمسي الساقط يومياً على سطح الغطاء، أي أن:

$$\eta_d = \frac{3600}{H_T} \int_0^{24} q_e \cdot dt \quad (3.3.3)$$

حيث t هي الزمن بالساعة مقاس من بدء التشغيل.

أما **الكفاءة الداخلية** η_{in} فهي نسبة كمية الحرارة المستفاد منها في عملية التبخير q_e إلى كمية الحرارة الممتصة يومياً من قبل الماء، أي أن:

$$\eta_{in} = \frac{q_e}{\alpha_w \tau_g I_T} \quad (3.3.4)$$

وتستخدم الكفاءة الداخلية كمقياس لانتقال الحرارة بالعمليات المختلفة داخل المقطر. لذلك ينبغي على المصمم العمل على رفع قيمة η_i لتحسين أداء المقطر وهذا يؤدي بالطبع إلى تحسين قيمة كل من η و η_d .

3.4. انتقال الحرارة الأساسي في وحدة التقطير الشمسي:

تصنف عملية نقل الحرارة الأساسية في وحدة التقطير الشمسي المبين في الشكل (3.2.1) كما يلي:

(a) الخارجي: يشمل نقل الحرارة الخارجي نقل الحرارة من الأسطح الخارجية للمقطر الشمسي إلى الهواء المحيط . و الآليات المشاركة في نقل الحرارة الخارجي هي التوصيل و الحمل الحراري و الإشعاع.

(b) الداخلي: يقع موضع نقل الحرارة بين السطح العلوي للماء و الغطاء الزجاجي تحت فئة النقل الحراري الداخلي. و تشمل آلية النقل الحراري الداخلي الحمل و التبخر و الإشعاع.

يعتمد نقل الحرارة التبخيري على نقل الحرارة بالحمل الحراري، و لكن نقل الحرارة الإشعاعي مستقل عن كل من نقل الحرارة الحلمي و التبخيري.

3.4.1. انتقال الحرارة الخارجي:

يتكون نقل الحرارة الخارجي من:

- (a) يتم نقل الحرارة من الغلاف الزجاجي الداخلي إلى الهواء المحيط بشكل رئيسي بسبب التوصيل و الحمل الحراري و الإشعاع،
(b) يتم نقل الحرارة من بطانة الحوض إلى الهواء المحيط من خلال العزل السفلي و الجانبي.

3.4.1.1. من الغطاء الزجاجي الداخلي للهواء المحيط:

يمكن في هذه الحالة إهمال نقل الحرارة بسبب التوصيل عبر الغطاء الزجاجي؛ و بالتالي، سيكون هناك نقل حراري بالحمل و الإشعاع فقط في $[W / m^2]$ من الغطاء الزجاجي الخارجي إلى الهواء المحيط، و الذي يمكن التعبير عنه:

$$\dot{q}_{ga} = h_2 (T_g - T_a) \quad (3.4.1)$$

حيث:

$$h_2 = 5.7 + 3.8V, \quad \text{where } 0 < V < 5m / s$$

3.4.1.2. من العازل السفلي للهواء المحيط:

يمكن التعبير عن معامل انتقال الحرارة الحلمي من العازل السفلي للهواء المحيط بما يلي:

$$h_b = 2.8 + 3V, \quad \text{where } 0 \leq V \leq 7m / s \quad (3.4.2)$$

يتم إهمال نقل الحرارة الإشعاعي في المعادلة أعلاه لأن الجزء السفلي للعزل يواجه سطح الأرض.

3.4.2. انتقال الحرارة الداخلي:

يغطي هذا القسم بالتفصيل عمليات نقل الحرارة الداخلي، والتي تشمل الإشعاع و الحمل الحراري و التبخر.

3.4.2.1. انتقال الحرارة بالإشعاع:

يعتبر سطح الماء و الغطاء الزجاجي بمثابة سطوح متوازية. يأخذ عامل شكل الإشعاع (radiation shape factor) الرقم (1)، و يتطلب هذا التقريب ميلاً صغيراً للغطاء الزجاجي لوحدة التقطير الشمسي. يعطى معدل نقل الحرارة الإشعاعي $(\dot{q}_{rw})$ من سطح الماء إلى الغطاء الزجاجي بالمعادلة:

$$(\dot{q}_{rw}) = \varepsilon_{eff} \sigma \left[(T_w + 273)^4 - (T_g + 273)^4 \right] \quad (3.4.3a)$$

أو:

$$(\dot{q}_{rw}) = h_{rw} (T_w - T_g) \quad (3.4.3b)$$

$$\varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right]^{-1} \quad (3.4.3c)$$

حيث:

$\varepsilon_g, \varepsilon_w$: إشعاعية سطح الماء و السطح السفلي للغطاء على التوالي.

h_{rw} : معامل انتقال الحرارة بالإشعاع من سطح الماء للغلاف الزجاجي و الذي يعبر

عنه بالمعادلة التالية:

$$h_{rw} = \varepsilon_{eff} \sigma \left[(T_w + 273)^2 + (T_g + 273)^2 \right] [T_w + T_g + 546] \quad (3.4.3c)$$

3.4.2.2. انتقال الحرارة بالحمل:

يحدث انتقال الحرارة الحمل بين سطح الماء و الهواء الرطب داخل المقطر الشمسي. يعتمد ذلك على الطفو، و تدفق الكثافة للهواء الرطب، و تدرج درجات الحرارة في طبقات الهواء المختلفة:

يمكن تحديد معدل نقل الحرارة من سطح الماء إلى الغطاء الزجاجي $(\dot{q}_{cw})$ في

$[W / m^2]$ عن طريق الحمل الحراري بالمعادلة:

$$(\dot{q}_{cw}) = h_{cw} (T_w - T_g) \quad (3.4.4a)$$

حيث :

h_{cw} : معامل انتقال الحرارة بالحمل، و يمكن أن يُحدد بالعلاقة التالية:

$$Nu = \frac{h_{cw} d_f}{K_f} = C (Gr.Pr)^n \Rightarrow h_{cw} = \frac{K_f}{d_f} C (Gr.Pr)^n \quad (3.4.4b)$$

يعتمد تعبير كراتشوف و براندل على الخصائص الفيزيائية للهواء الرطب.

K_f و d_f : هما التوصيل الحراري للماء في الحوض و البعد المميز للحوض في المقطر الشمسي (وهو متوسط الفراغ بين الغطاء الزجاجي و سطح الماء) على التوالي.
يجب استخدام التعبير التالي $\Delta T'$ في رقم كراتشوف :

$$\Delta T' = \left[\Delta T + \frac{(P_{w0} - P_{g0})(T_{w0} + 273)}{268.9 \times 10^3 - P_{w0}} \right] \quad (3.4.4c)$$

ينخفض عدد كراتشوف من أجل معدل درجة حرارة تشغيل طبيعية و لنقل $50 [^{\circ}\text{C}]$ و $\Delta T' = 17 [^{\circ}\text{C}]$ إلى:

$$Gr = 2.81 \times 10^7 d_f^3 \quad (3.4.4d)$$

يعتمد رقم Grashof كما هو مبين في المعادلة (3.4.4d) على متوسط الفراغ بين الغطاء الزجاجي و سطح الماء كما هو مبين في الجدول (3.4.1) لمدى نموذجي لدرجة حرارة التشغيل . يتم إعطاء قيم C و n لنطاقات مختلفة من رقم Grashof في الجدول (3.4.2).

حصل Dunkle من أجل مدى نموذجي لدرجة حرارة التشغيل و $d_f = 0.25m$ و $(C=0.075, \text{and } n=1/3)$ على العلاقة التالية لـ h_{cw} في (W / m^2) :

$$h_{cw} = 0.884 \left[T_w - T_g + \frac{(P_w - P_g)(T_w + 273)}{268.9 \times 10^3 - P_w} \right]^{1/3} \quad (3.4.4e)$$

حيث:

P_w و $P_g(\text{MPa})$: هما ضغط بخار الماء عند درجتي الحرارة T_w و T_g على التوالي.

ملاحظة: MPA هي ميغا باسكال و كل ميغا تعادل 10 بار

الجدول (3.4.1) قيمة عدد كراتشوف Gr من أجل قيم وسطى للفراغ بين الغطاء الزجاجي والماء d_f

d_f	Gr	C	n
0.15	0.948×10^5	0.21	1/4
0.20	2.248×10^5	0.21	1/4
0.25	4.39×10^5	0.075	1/3

الجدول (3.4.2) قيم الثوابت c, n من أجل قيم مختلفة لرقم كراتشوف

الحالة	C	N	Grashof number
I	1.00	0	$Gr < 10^3$
	0.21	1/4	$10^4 < Gr < 3.25 \times 10^5$
	0.075	1/3	$3.2 \times 10^4 < Gr < 10^7$
	0.07477	0.36	$2.5 \times 10^3 < Gr < 6 \times 10^4$
II	0.05238	0.36	$2.5 \times 10^5 < Gr < 10^7$
	0.05814	0.4	$2 \times 10^3 < Gr < 5 \times 10^4$
III	3.8	0.0	$5 \times 10^4 < Gr < 2 \times 10^5$
	0.04836	0.37	$2 \times 10^5 < Gr$
IV	0.3	1/4	$2.8 \times 10^3 < Gr < 2.1 \times 10^5$
	0.1255	1/3	$4.2 \times 10^5 < Gr < 4.2 \times 10^9$

3.4.2.3. انتقال الحرارة التبخيري:

يعطى معدل انتقال الحرارة لكل وحدة مساحة من سطح الماء إلى سطح الغطاء الزجاجي

كما يلي:

$$(\dot{q}_{ew}) = 0.0162 \times h_{ew} \times (P_w - P_g) \quad (3.4.5a)$$

أو:

$$(\dot{q}_{ew}) = h_{ew} \times (T_w - T_g) \quad (3.4.5b)$$

حيث:

$$h_{ew} = 16.273 \times 10^{-3} h_{cw} \times \left[\frac{P_w - P_g}{T_w - T_g} \right] \quad (3.4.5c)$$

تكون قيمة h_{ew} حسب Cooper قريبة من أعلى قيمة لـ $(T_w - T_g)$. بالإضافة إلى أنها تعطي قيمة حقيقية فقط من أجل القيم الموجبة لـ $(T_w - T_g)$. يمكن التعبير عن القيم P_w, P_g من أجل مجال درجة حرارة التشغيل من $10 - 90 [^{\circ}C]$ بما يلي:

$$P(T) = \exp \left(25.317 - \frac{5144}{T + 273} \right) \quad (3.4.5d)$$

يمكن الحصول على معامل انتقال الحرارة الداخلي الكلي عن طريق المعادلات (3.4.3c) و (3.4.4e) و (3.4.5c) و يعطى بالعلاقة:

$$h_1 = h_{rw} + h_{cw} + h_{ew} \quad (3.4.5e)$$

يعطى انتقال الحرارة الداخلي من سطح الماء إلى سطح الغلاف الزجاجي الداخلي بالعلاقة:

$$\dot{q}_{wg} = \dot{q}_{rw} + \dot{q}_{cw} + \dot{q}_{ew} = h_1 (T_w - T_g) \quad (3.4.5f)$$

3.4.2.4. انتقال الحرارة بالحمل الحراري من حوض المقطر:

يمكن تقدير معدل انتقال الحرارة بالحمل الحراري من بطانة الحوض (السطح الأسود) إلى الكتلة المائية بواسطة المعادلة:

$$\dot{q}_{bw} = h_{bw} (T_b - T_w) \quad (3.4.6a)$$

حيث يمكن تحديد معامل انتقال الحرارة بالحمل h_{bw} من الحوض (السطح الأسود) لكتلة الماء بالتعبير التالي:

$$Nu = \frac{h_{bw} X}{K_w} = C (Gr.Pr)^n \Rightarrow h_{bw} = \frac{K_w}{X} C (Gr.Pr)^n \quad (3.4.6b)$$

ملاحظة: X هي البعد المميز للسطح ويحسب بتقسيم مساحة السطح على محيطه (هنا السطح هو السطح الماص).

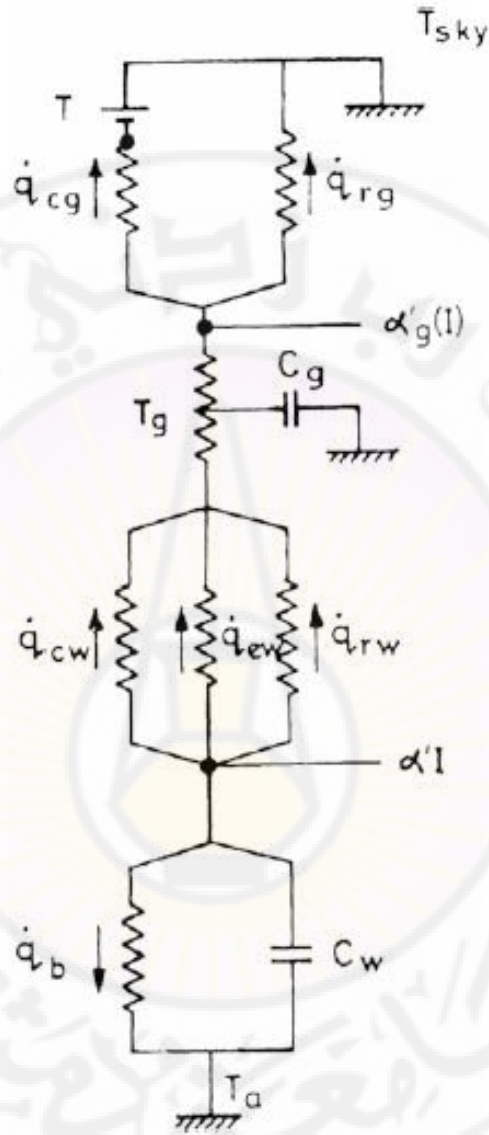
يكون $C = 0.54$ و $n = 0.25$ بالنسبة للسطح الساخن المتجه للأعلى. يمكن تحديد Gr و Pr عند متوسط درجة حرارة الماء في الحوض. ستكون القيم العددية لـ h_{bw} على أنها $(\geq 100 \text{ W} / \text{m}^2\text{°C})$

3.4.3. معامل انتقال الحرارة الإجمالي:

يوجد في الأساس معاملان لانتقال الحرارة الإجمالي: معامل الضياع العلوي الإجمالي و معامل الضياع السفلي الإجمالي، و الذي يمكن التعبير عنه باستخدام مخطط الدارة الحرارية المبين في الشكل (3.4.1).

3.4.3.1. معامل الضياع العلوي الإجمالي:

يمكن كتابة معامل الضياع العلوي الإجمالي (U_t) من سطح الماء إلى الهواء المحيط من خلال غطاء الزجاج المتكثف كما يلي:



الشكل (3.4.1) مخطط الدارة الحراري لوحدة التقطير الشمسية

$$(U_t) = (r_1 + r_2)^{-1} = \left[\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} \right]^{-1} \quad (3.4.7a)$$

يمكن إهمال معامل انتقال الحرارة بالتوصيل هنا. و من ثم يعطى معدل الضياع الحراري في الاتجاه الصاعد من نظام التقطير من خلال غطاء التكثيف بالعلاقة:

$$\dot{q}_t = U_t (T_w - T_a) \quad (3.4.7b)$$

3.4.3.2. معامل الضياع السفلي الإجمالي:

يمكن كتابة نقل الحرارة من أسفل الحوض إلى الهواء المحيط من خلال العزل السفلي $[W / m^2]$ باستخدام تعريف معامل نقل الحرارة بشكل عام على النحو التالي:

$$\dot{q}_{ba} = U'_b (T_b - T_a) \quad (3.4.7a)$$

حيث:

U'_b : معامل انتقال الحرارة السفلي في $[W / m^2 \cdot ^\circ C]$ و يعبر عنه بما يلي:

$$U'_b = (r_i + r_b)^{-1} = \left[\frac{L_i}{K_i} + \frac{1}{h_b} \right]^{-1} \quad (3.4.7b)$$

حيث:

K_i و L_i : هما السماكة و الموصلية الحرارية للعزل السفلي و الجانبي على التوالي. يمكن أن يكون معامل الحافة الكلي إذا تم اعتبار الضياعات الجانبية :

$$U'_e = U'_b \frac{A_{ss}}{A_s} \quad (3.4.7c)$$

و هكذا يكون معامل الضياع السفلي : $U'_{be} = U'_b + U'_e$. تكون $U'_e = 0$ من أجل عمق صغير للماء. علاوة على ذلك، يمكن كتابة نقل الحرارة السفلي الكلي من كتلة الماء إلى الهواء المحيط من خلال العزل السفلي في $[W / m^2]$:

$$\dot{q}_{b,(wa)} = U_b (T_w - T_a) \quad (3.4.8a)$$

حيث:

U_b : معامل نقل الحرارة السفلي الكلي في $[W / m^2 \cdot ^\circ C]$ و يعبر عنه بما يلي:

$$U_b = (r_{bw} + r_i + r_b)^{-1} = \left[\frac{1}{h_{bw}} + \frac{L_i}{K_i} + \frac{1}{h_b} \right]^{-1} \quad (3.4.8b)$$

3.4.3.3. معامل ضياع الحرارة الكلي:

يمكن كتابة معامل نقل الحرارة الكلي من الكتلة المائية إلى الهواء المحيط من خلال الزجاج و العزل السفلي باستخدام المعادلات (3.4.6a) و (3.4.8b) كما يلي:

$$U_L = U_t + U_b \quad (3.4.9)$$

مثال 3.4.1:

حدد معامل ضياع الحرارة السفلي الكلي U_b من مقطر شمسي يحتوي على عزل سماكته 5mm و $K_i = 0.04 [W / m.C]$ ، $L_i = 5mm = 0.005m$ ، $h_b = 5.7 [W / m^2.C]$ و $h_{bw} = 100 \text{ and } 1000 [W / m^2.C]$

الحل:

يتم إعطاء معامل الضياع السفلي الكلي من الماء إلى الهواء المحيط بالمعادلة (3.4.8b):

$$U_b = \left[\frac{1}{h_{bw}} + \frac{L_i}{K_i} + \frac{1}{h_b} \right]^{-1}$$

من أجل $h_{bw} = 100 [W / m^2.C]$ إذاً:

$$U_b = \left[\frac{1}{100} + \frac{0.005}{0.04} + \frac{1}{5.7} \right]^{-1} = 3.22 [W / m^2.C]$$

و بشكل مشابه يمكن إيجاد $U_b = 3.317$ من أجل $h_{bw} = 1000 [W / m^2.C]$.

مثال 3.4.2:

حدد معامل الضياع العلوي الإجمالي من سطح ماء درجة حرارته $20[^\circ C]$ إلى الهواء المحيط درجة حرارته $8.5[^\circ C]$ من خلال الغطاء الزجاجي بحيث تكون درجة

حرارة الغطاء الزجاجي $12[^\circ\text{C}]$ ، معطى في المسألة: $\varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{1}{\varepsilon_g} - 1 \right]^{-1}$ ،

$P_w = 2367.69 \text{ N / m}^2$, $P_g = 1447.18 \text{ N / m}^2$, $h_2 = 17.1 \text{ W / m}^2\text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon_g = \varepsilon_w = 0.9$

الحل:

يتم إعطاء معاملات نقل الحرارة الإشعاعي و الحمل الحراري و التبخيري من الماء إلى الزجاج بواسطة المعادلات (3.4.3c) و (3.4.4e) و (3.4.5c) على التوالي:

$$\varepsilon_{eff} = \left[\frac{1}{0.9} + \frac{1}{0.9} - 1 \right]^{-1} = 0.82$$

يكون معامل انتقال الحرارة الإشعاعي الآن:

$$h_{rw} = 0.82 \times 5.67 \times 10^{-8} \left[(20 + 273)^2 + (12 + 273)^2 \right] \times (20 + 12 + 546) = 4.49 \text{ W / m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

يُعطى معامل انتقال الكتلة الحملي بالعلاقة:

$$h_{cw} = 0.884 \left[(20 - 12) + \frac{(2367.69 - 1447.18)(293)}{268.9 \times 10^3 - 2367.69} \right]^{1/3} = 1.84 \text{ W / m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

يعطى معامل انتقال الحرارة بالتبخير بالعلاقة:

$$h_{ew} = 16.273 \times 10^{-3} \times 1.84 \left[\frac{920.5}{8} \right] = 3.445 \text{ W / m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

نحسب معامل انتقال الحرارة الداخلي الكلي:

$$h_1 = 3.445 + 1.84 + 4.49 = 9.775 \text{ W / m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_2 = 17.1 \text{ W / m}^2\text{ }^\circ\text{C} \quad \text{و يعطى معامل نقل الحرارة العلوي بالقيمة:}$$

يمكن أن يُحدد معامل انتقال الحرارة العلوي الكلي من سطح الماء إلى الهواء المحيط من

خلال الغلاف الزجاجي بالعلاقة:

$$U_t = \left[\frac{1}{17.1} + \frac{1}{9.775} \right]^{-1} = [0.058 + 0.102]^{-1} = 6.25 \text{ W / m}^2\text{ }^\circ\text{C}$$

3.4.4. ناتج التقطير:

يمكن كتابة ناتج التقطير الساعي لكل متر مربع من وحدة التقطير الشمسي:

$$\dot{m}_{ew} = \frac{\dot{q}_{ew}}{L} \times 3600 = \frac{h_{ew} (T_w - T_g)}{L} \times 3600 \quad (7.4.10a)$$

بعد معرفة ناتج التقطير الساعي ($\dot{m}_{ew}$) يمكن تحديد ناتج التقطير اليومي بعد جمع الناتج الساعي لكل اليوم:

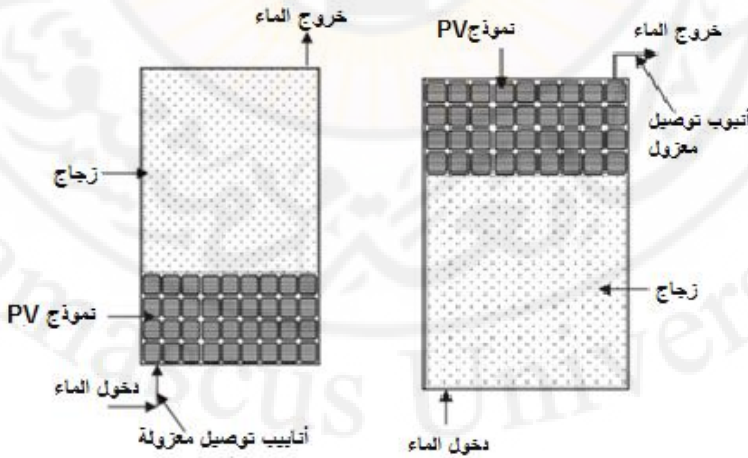
$$M_{ew} = \sum \dot{m}_{ew} \quad (7.4.10b)$$

كما ذكر سابقاً، يتناسب الناتج الساعي بشكل مباشر مع فرق درجة الحرارة بين الماء و الغطاء الزجاجي الداخلي (غطاء التكثيف).

يمكن زيادة درجة حرارة الكتلة المائية عن طريق توفير الطاقة الحرارية من مصدر الطاقة الحرارية الفعالة الخارجية. يشار إلى هذا المقطر الشمسي بأنه "المقطر الشمسي الفعال".

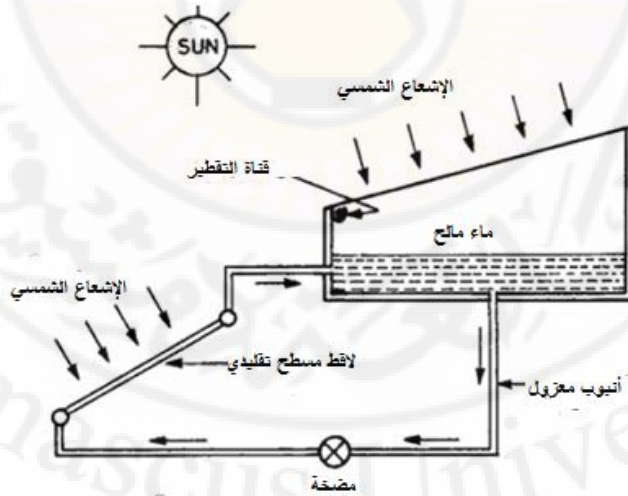
3.4.4.1. المقطر الشمسي الفعال Active Solar Still

(a) التقطير مع مجمع مسطح:



الشكل (3.4.2) مجمع مياه مسطح تقليدي PVT

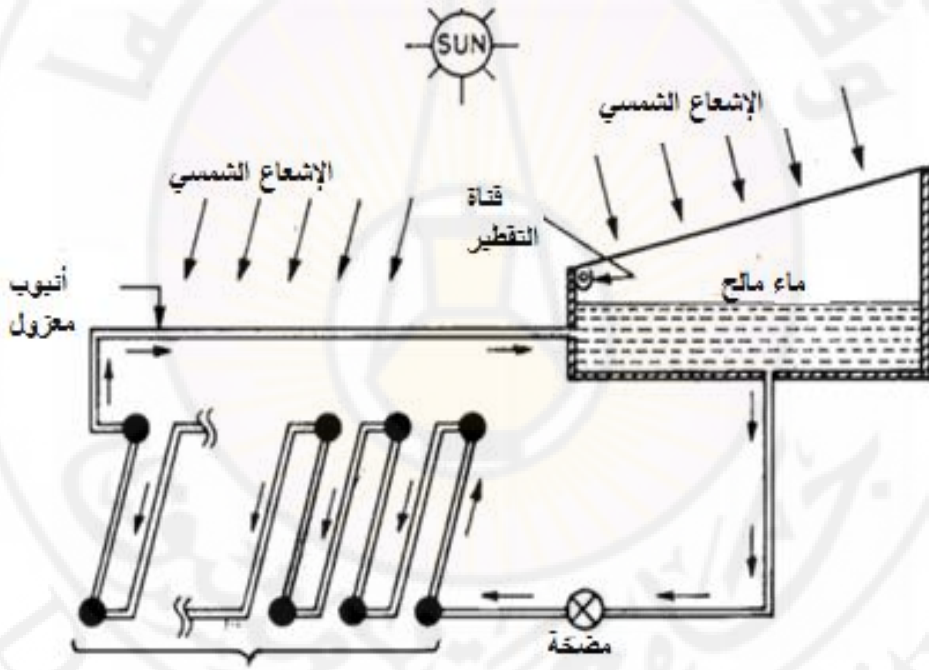
تتم إضافة الماء الساخن في هذه الحالة من المجمع المسطح إلى حوض المقطر الشمسي السلبي للحصول على درجة حرارة مياه أعلى. في هذه الحالة، يتم دمج المجمع المسطح مع حوض وحدة التقطير الشمسي. قد يكون المجمع إما مجمع مياه تقليدياً PVT كما هو موضح بالشكل (3.4.2). أو يكون من النوع المركز CPC-PVT. علاوةً على ذلك، يمكن أن يتم دمج المجمع إما مباشرةً أو من خلال مبادل حراري اعتماداً على نوع السائل المستخدم في الدارة المغلقة، كما هو موضح في الشكل (3.4.3)، و يتم دمج مجمع المياه PVT مع حوض المقطر الشمسي أحادي الميل. الأنابيب الموصولة معزولة تماماً بحيث لا يكون هناك فقدان للحرارة في الهواء المحيط أثناء تدوير المياه. يتم تسخين المياه في الحوض بالطاقة الشمسية من خلال غطاء الزجاج المائل كما هو موضح في مبدأ العمل. بالإضافة إلى ذلك، يتم تسخين الماء الموجود في الحوض بواسطة المجمع المسطح، يؤدي هذا إلى زيادة التبخر و المزيد من ناتج التقطير. يتم تنفيذ دوران المياه من خلال المجمع خلال ساعات شروق الشمس، و يتم إيقاف دوران المياه عند عدم وجود إشعاع شمسي لتجنب فقدان الحرارة.



الشكل (3.4.3) مخطط لمقطر شمسي فعال مع مجمع مسطح نوع PVT

تتكون لوحة المجمع كما هو مبين في الشكل (3.4.4) من عدد من المجمعات المتكاملة مع حوض المقطر الشمسي. يمكن زيادة درجة حرارة الماء في الحوض، وبالتالي الزيادة في ناتج التقطير. يعتمد العدد الأمثل للمجمعات من أجل ناتج التقطير الأعظمي على عدد من البارامترات كالتالي:

- (a) الكتلة المائية في الحوض.
- (b) معدل التدفق الكتلي في دارة المجمع .
- (c) الظروف المناخية.



الشكل (3.4.4) مخطط لمقطر شمسي مدمج مع لاقط شمسي مسطح

3.5. النمذجة الحرارية: Thermal Modelling

يجب أن نذكر هنا أن المقطر الشمسي السلبي لا يزال حالة خاصة من المقطر الشمسي الفعّال إذا كانت تغذية الطاقة الحرارية الخارجية هي صفر. و من ثمّ، سنناقش النمذجة الحرارية لوحدة التقطير الشمسي الفعّالة، و التي يمكن استخدامها أيضاً في المقطر الشمسي السلبي. علاوةً على ذلك، لوحظ أن معدل التكثيف في المقطر الشمسي الفعّال لا يزال أعلى بكثير من معدل فقدان الحرارة من غطاء التكثيف إلى الهواء المحيط، و تصبح درجة حرارة الغلاف الزجاجي أكبر بشكل ملحوظ في حالة وجود مقطر شمسي فعال. و بالتالي، فإنّ درجة حرارة الغلاف الزجاجي الداخلية أكبر من درجة حرارة الغلاف الخارجي للغطاء الزجاجي. يُفترض في النمذجة الحرارية واحدة من أهم الافتراضات وهي أن درجة حرارة غطاء التكثيف الداخلي والخارجي هي نفسها.

3.5.1. توازن الطاقة:

يُوضح الشكل (3.2.1) تدفق الحرارة في مكونات مختلفة من المقطر الشمسي السلبي ثنائي الميل و التي توجّه من الشرق إلى الغرب. التدفق هو نفسه بالنسبة إلى المقطر الشمسي أحادي الميل الذي يوجّه نحو الجنوب. و الفرق الوحيد هو معدل الإشعاع الشمسي الوارد في كل حالة.

يتم اتخاذ عدد من الفرضيات لكتابة معادلات توازن الطاقة في $[W / m^2]$ لمختلف مكونات المقطر الشمسي و منها:

- (1) يكون ميل غطاء التكايف الزجاجي صغيراً جداً.
- (2) السعة الحرارية لمختلف المكونات (غطاء زجاجي، سطح ماص أسود، و العزل الجانبي، و العزل السفلي) صغيرة جداً.
- (3) وحدة التقطير الشمسي الفعّال محكمة الإغلاق.

3.5.1.1. معادلة توازن الطاقة للغطاء الزجاجي:

يتلقى الغطاء الزجاجي الطاقة من الإشعاع الشمسي الممتص و من الماء الساخن في الحوض. ستتم موازنة هذه الطاقة بواسطة الطاقة المفقودة في الهواء عن طريق الإشعاع و الحمل في ظل ظروف الحالة المستقرة .

$$\alpha'_g I(t) + [\dot{q}_{rw} + \dot{q}_{cw} + \dot{q}_{ew}] = \dot{q}_{rg} + \dot{q}_{cg} \quad (3.5.1)$$

حيث:

$\alpha'_g I(t)$: الإشعاع الشمسي الممتص من قبل الزجاج.

3.5.1.2. معادلة توازن الطاقة لكتلة الماء:

يتلقى الماء الطاقة من الإشعاع الشمسي الممتص، و الطاقة الموصلة من بطانة الحوض، و الطاقة المفيدة من المصادر الخارجية (FPC ، PVT-FPC ، CPC- PVT). يتم توزيع الطاقة التي تستقبلها المياه في رفع درجة حرارة الماء و في الضياعات بسبب الإشعاع و الحمل الحراري و التبخر.

$$A_s [\alpha'_w I(t) + \dot{q}_b] + \dot{Q}_{u,N} = (MC)_w \frac{dT_w}{dt} + A_s [\dot{q}_{rw} + \dot{q}_{cw} + \dot{q}_{ew}] \quad (3.5.2)$$

حيث:

C : هي السعة الحرارية للماء.

M : هي كتلة الماء في المقطر.

$\dot{q}_b$: الحرارة المنقولة من السطح الماص الى كتلة الماء .

A_s مساحة المقطر.

$\alpha'_w I(t)$ الطاقة الشمسية الممتصة من قبل كتلة الماء.

$\dot{q}_{rw} + \dot{q}_{cw} + \dot{q}_{ew}$: كمية الحرارة المنقولة من الماء إلى غطاء المقطر الشفاف بالتبخر و الحمل و الإشعاع على التوالي.

$\frac{dT_w}{dt}$: تغير درجة حرارة الماء في المقطر مع الزمن.

$\dot{Q}_{u,N}$: الطاقة المفيدة لصف اللواقط المسطحة التقليدية.

يعطى التعبير $\dot{Q}_{u,N}$ كما يلي: $\dot{Q}_{u,N} = 0$ من أجل المقطر الشمسي السلبي.
حيث يعطى كل من $\dot{Q}_{u,N}$ للمجمع المسطح التقليدي، و PVT للمجمع المسطح و
المركز CPC-PVT كما يلي: لصف لواقط مسطحة تقليدية N مربوطة على التسلسل:

$$\dot{Q}_{u,N} = NA_c F_{RN} [(\alpha\tau) I(t) - U_L (T_{fi} - T_a)] \quad (3.5.3)$$

حيث:

A_c : مساحة اللاقط الواحد.

F_{RN} : معامل إزالة الحرارة لصف اللواقط N.

$(\alpha\tau)$: جداء نفوذية الغطاء الزجاجي الشفاف بامتصاصية السطح الماص.

$I(t)$: شدة الإشعاع الشمسي الوارد على اللاقط.

U_L : معامل انتقال الحرارة الكلي من اللاقط.

(T_{fi}, T_a) : درجة حرارة الوسط المحيط ودرجة حرارة دخول السائل إلى اللاقط على

التوالي.

لصف لواقط مسطحة نوع N-PVT مربوطة على التسلسل:

$$\dot{Q}_{u,N} = NA_c [(\alpha\tau)_{eff,N} I(t) - U_{L,N} (T_{fi} - T_a)] \quad (3.5.4)$$

لمجمع مفرد CPC-PVT :

$$\dot{Q}_{u1} = [\{AF_R (\alpha\tau)\}_1 I_b - \{AF_R (U_L)\}_1 (T_{fi} - T_a)] \quad (3.5.5)$$

علاوة على ذلك، هنا $(T_{fi} = T_w)$ بسبب إعادة تدوير المياه بين المقطر الشمسي و لوح
المجمع.

3.5.1.3 معادلة توازن الطاقة للحوض:

ينتقل قسم من الطاقة الممتصة من قبل الحوض إلى الماء، و يذهب القسم الباقي
ضياًعاً بالتوصيل من خلال الجوانب و الأسفل و تكتب معادلة توازن الطاقة للحوض
بالعلاقة:

$$\alpha'_b I(t) = \dot{q}_{bw} + [\dot{q}_{ba} + \dot{q}_{be} (A_{ss} / A_s)] \quad (3.5.6)$$

حيث:

$\alpha'_g, \alpha'_w, \alpha'_b$ تحدد في القسم (3.2).

التعابير المختلفة من أجل $\dot{q}$ نوقشت في القسم (4.3).

A_{ss} هي مساحة العازل على الجوانب، A_s مساحة المقطر.

عندما يكون عمق الماء قليلاً فإن $(A_{ss} / A_s) \approx 0$.

بتعويض قيم كل من $\dot{q}$ من القسم (3.4) من المعادلات (3.5.1)-(3.5.6) تصبح:

$$\alpha'_g I(t) + h_1 (T_w - T_g) = h_2 (T_g - T_a) \quad (3.5.7)$$

$$\dot{Q}_{u,N} + A_s [\alpha'_w I(t) + h_{bw} (T_b - T_w)] = (MC)_w \frac{dT_w}{dt} + A_s h_1 (T_w - T_g) \quad (3.5.8)$$

$$\alpha'_b I(t) = h_{bw} (T_b - T_w) + U'_b (T_b - T_a) \quad (3.5.9)$$

تؤخذ القيمة $(MC)_w$ لكتلة الماء لكل وحدة مساحة.

تصبح المعادلة (3.5.8) بعد إقصاء T_g و T_b من المعادلات (3.5.7) و (3.5.9)

من أجل المقطر الشمسي السلبي:

$$\frac{dT_w}{dt} + a T_w = f(t) \quad (3.5.10)$$

"a" ثابتة للفواصل الزمني Δt .

من أجل المقطر الشمسي السلبي فإن:

$$a = \frac{U_L}{(MC)_w}, \quad f(t) = \frac{(\alpha\tau)_{eff} I(t) + U_L T_a}{(MC)_w}$$

و

$$(\alpha\tau)_{eff} = \alpha'_w + \frac{h_{bw}}{h_{bw} + U'} \alpha'_b + \frac{h_1}{h_1 + h_2} \alpha'_g$$

$$U_L = U_b + U_t, \quad U_b = \frac{h_{bw} U'}{h_{bw} + U'}, \quad U_t = \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2},$$

يمكن الحصول على الحل التقريبي للمعادلة (3.5.10) من الشروط الحدية التالية:

- (1) الفاصل الزمني Δt ($0 < t < \Delta t$) صغير بشكل لا متناهي.
- (2) التابع $f(t)$ أي $f(t) = \bar{f}(\bar{t})$ ، و "a" ثابتة للفاصل الزمني Δt و h_1 يمكن حسابها من خلال إيجاد درجة حرارة الماء $T_w = T_{w0}$ و درجة حرارة غطاء الزجاج $T_g = T_{g0}$ عند $t = 0$. يمكن كتابة حل المعادلة (3.5.10) كما يلي:

$$T_w = \frac{\bar{f}(\bar{t})}{a} [1 - \exp(-a\Delta t)] + T_{w0} \exp(-a\Delta t) \quad (3.5.11)$$

حيث:

- T_{w0} : هي درجة حرارة ماء الحوض عند $t = 0$.
- $\bar{f}(\bar{t})$: هي القيمة المتوسطة لـ $f(t)$ للفاصل الزمني بين 0 و t.
- يمكن الحصول على Δt من المعادلة (3.5.11) كما يلي:

$$\Delta t = -\frac{1}{a} \ln \left[\frac{T_w - \frac{\bar{f}(\bar{t})}{a}}{T_{w0} - \frac{\bar{f}(\bar{t})}{a}} \right]$$

يُعطى متوسط درجة حرارة الماء $\bar{T}_w$ كما يلي:

$$\bar{T}_w = \frac{1}{t} \int_0^t T_w dt = \frac{\bar{f}(\bar{t})}{a} \left[1 - \frac{(1 - e^{-a\Delta t})}{a} \right] + T_{w0} \frac{(1 - e^{-a\Delta t})}{a} \quad (3.5.12)$$

يمكن الحصول على متوسط درجة حرارة الزجاج بعد تعويض متوسط درجة حرارة الماء، باستخدام المعادلة (3.5.7):

$$\bar{T}_g = \frac{\alpha'_g I(t) + h_1 \bar{T}_w + h_2 \bar{T}_a}{h_1 + h_2} \quad (3.5.13)$$

يتم تقدير الخصائص الفيزيائية الحرارية للمياه بعد معرفة درجة حرارة الماء (T_w) ودرجة حرارة الزجاج (T_g). علاوةً على ذلك، يمكن حساب معامل انتقال الحرارة (h_1) باستخدام الخصائص الفيزيائية الحرارية المقدرة. تكون درجة الحرارة التي يتم الحصول عليها لفواصل زمني معين بمثابة درجة الحرارة الأولية للفواصل الزمني التالي لحساب الخصائص الفيزيائية الحرارية ومعاملات نقل الحرارة. تعتمد دقة القيم المقدرة على الفترة الزمنية لفواصل زمني أصغر، تكون الدقة عالية. اتُخذ في الفصل الحالي عموماً الفترة الزمنية 1 ساعة.

ذُكر سابقاً أنه يتم الحصول على فقدان حرارة التبخر بالساعة و الناتج الساعي من المقطر الشمسي عن طريق اتباع التعابير التالية:

$$\dot{q}_{ew} = h_{ew} (T_w - T_g) \quad (3.5.14)$$

$$\dot{m}_{ew} = \frac{h_{ew} (T_w - T_g)}{L} \times 3600 [kg / m^2 h] \quad (3.5.15)$$

للفواصل الزمني التالي، سوف تكون قيم جديدة لـ $(MC)_w$ بعد طرح القيمة التي تبخرت في المرحلة الأولى:

$$(MC)_w - (\dot{m}_{ew} C) \quad (3.5.16)$$

ورد سابقاً أنه يتم الحصول على الكفاءة الحرارية اللحظية كما يلي:

$$\eta_i = \frac{\dot{q}_{ew}}{I(t)} = \frac{h_{ew} (T_w - T_g)}{I(t)} \quad (3.5.17a)$$

بالاعتماد على المعادلة (3.5.13) تصبح المعادلة أعلاه:

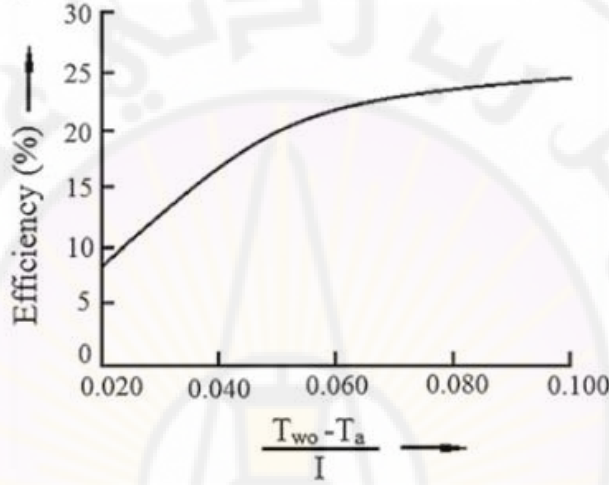
$$\eta_i = \frac{h_{ew} h_2 (\bar{T}_w - \bar{T}_a)}{(h_1 + h_2) I(t)} - \frac{h_{ew} \alpha'_g (\bar{T}_w - \bar{T}_a)}{h_1 + h_2} \quad (3.5.17b)$$

يمكن إهمال الحد الثاني من المعادلة لأن α'_g صغيرة جداً فتصبح بالشكل التالي:

$$\eta_i = \frac{h_{ew} h_2 (\bar{T}_w - \bar{T}_a)}{(h_1 + h_2) I(t)} \quad (3.5.17c)$$

يمكن إعادة كتابة المعادلة السابقة بتعويض قيمة $\bar{T}_w$ من المعادلة (3.5.12) كما يلي :

$$\eta_i = \frac{h_{ew} h_2}{(h_1 + h_2) U_L} \times \left[(\alpha \tau)_{eff} (1 - e^{-a \Delta t}) + U_L \frac{(T_{w0} - T_a)}{I(t)} e^{-a \Delta t} \right] \quad (3.5.18)$$



الشكل (3.5.1) المنحني المميز لمقطر شمسي أحادي الميل

يبين الشكل (3.5.1) التغير في η_i مع $(T_{w0} - T_a) / I(t)$. الانحدار في الشكل (3.5.1) موجب في المعادلة (3.5.18). و السبب في هذا الاختلاف هو أنه في حالة المقطر الشمسي، ينتج عن أعلى ضياع من الغطاء الزجاجي للمقطر إلى الهواء المحيط إنتاجية أعلى (و بالتالي كفاءة أعلى)، بينما بالنسبة للواقط المسطحة التقليدية FPC، عندما يكون الضياع أقل من الأعلى ينتج كفاءة أعلى. يرجع السلوك غير الخطي للشكل (3.5.1) إلى اعتماد درجة حرارة عالية على معامل نقل الحرارة التبخيري h_{ew} .

مثال 3.5.1:

حدد مقدار الوقت الذي يستغرقه Δt لدرجة حرارة الماء في الحوض المراد تسخينه إلى $40 [^{\circ}\text{C}]$ من قيمة أولية قدرها $20 [^{\circ}\text{C}]$ مع مراعاة التعليمات التالية:
 $I(t) = 900 \text{ W} / \text{m}^2$, $T_a = 8.5^{\circ}\text{C}$, $U_L = 9.48 \text{ W} / \text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ $(\alpha\tau)_{\text{eff}} = 0.65$
 كمية المياه في الحوض $10 [\text{kg}]$.

الحل:

يمكن الحصول على Δt كما يلي:

$$\Delta t = -\frac{1}{a} \ln \left[\frac{T_w - \frac{\bar{f}(\bar{t})}{a}}{T_{w0} - \frac{\bar{f}(\bar{t})}{a}} \right]$$

حيث:

$$a = \frac{U_L}{MC} = \frac{9.48}{41900} = 2.26 \times 10^{-4}$$

$$\bar{f}(\bar{t}) = \frac{0.65 \times 900 + 9.48 \times 8.5}{41900} = 0.0159$$

و بالتالي يتم الحصول على Δt :

$$\Delta t = -\frac{1}{2.26 \times 10^{-4}} \ln \left[\frac{40 - \frac{0.0159}{2.26 \times 10^{-4}}}{20 - \frac{0.0159}{2.26 \times 10^{-4}}} \right] = 2239 \text{ s} = 37 \text{ min}.$$

3.6. تأثير التصميم والبارامترات المناخية على أداء المقطر:

يعتمد الإنتاج الساعي من وحدة التقطير الشمسي على فرق درجة الحرارة بين سطح التبخير (الماء) و التكاثف. يمكن للمرء أن يرى من المعادلة (3.4.10a)، أنه كلما زادت قيمة $(T_w - T_g)$ كلما ارتفع الناتج.

1-تأثير سرعة الرياح:

تخلق الرياح المتدفقة فوق غطاء التكاثر الخارجي معدلاً أسرع لفقدان الحرارة. يُقلل هذا من درجة حرارة غطاء التكاثر و بالتالي يزيد $(T_w - T_g)$ للحصول على ناتج أعلى. تكون سرعة الرياح القصوى النموذجية $(5m/s)$ ، لا يتأثر العائد كثيراً بعده.

2-تأثير درجة حرارة الهواء المحيط:

مع ارتفاع درجة حرارة الهواء المحيط، هناك انخفاض معدل فقدان الحرارة بسبب صغر $(T_w - T_g)$ ، و بالتالي تزداد درجة حرارة غطاء تكثيف الزجاج . هذا يُقلل $(T_w - T_g)$ و بالتالي الناتج الساعي.

3-تأثير الإشعاع الشمسي:

الإشعاع الشمسي هو واحد من المعايير الحساسة في التقطير الشمسي، و هو بارامتر الإدخال الهام، و الذي يُحدد الناتج من المقطر الشمسي. ومع زيادة شدة الطاقة الشمسية يزيد الناتج أيضاً إلى أن يصبح معدل الحرارة المنبعثة الى غطاء التكاثر الداخلي بسبب التكاثر، يساوي معدل إطلاق الحرارة من السطح الخارجي لسطح التكاثر إلى الهواء المحيط عند عمق مياه معين. بعد مستوى معين من الإشعاع الشمسي، إذا أصبح معدل الحرارة المنبعثة إلى غطاء التكاثر الداخلي نتيجة للتكاثر أكبر من معدل إطلاق الحرارة من السطح الخارجي لسطح التكاثر إلى الهواء المحيط، عندها يبدأ الناتج في التناقص.

4-تأثير الضياع من الأسفل:

يلعب عمق الماء دوراً مهماً من حيث سماكة العزل، والذي يحدد معامل نقل الحرارة السفلي الإجمالي (U_b) المعادلة (3.4.8b). عندما يكون عمق المياه منخفضاً، تكون درجة حرارة الماء أعلى بشكل ملحوظ و بالتالي يحدث ضياع حرارة سفلي بسبب قيم أكبر $(T_w - T_a)$ ، يسبب هذا انخفاض الناتج. و مع ذلك، لم يكن هناك أي تأثير كبير لهذا في الدراسات التي أجريت على عمق أكبر من قبل العديد من الباحثين.

5- تأثير غطاء التكاثف المزدوج الزجاجي:

كما ذكر في القسم (3.4) (المعادلة 3.4.7a)، يجب أن يكون ضياع الحرارة من الأعلى في وحدة التقطير الشمسي أعظمياً لزيادة الناتج على عكس ما هو في المجمع الشمسي المسطح. في حالة انخفاض ضياع الحرارة من الأعلى في وحدة التقطير الشمسي بسبب وجود غطاء تكاثف زجاجي مزدوج سيتم بذلك تقليل الناتج بشكل كبير. في هذه الحالة، سيتم زيادة درجة حرارة الماء في الحوض كما هو الحال في مجمع مسطح.

6- تأثير ميل غطاء التكاثف:

لأن هناك علاقة بين ميل غطاء التكاثف و الإشعاع الشمسي، فمن المعروف أن الإشعاع الشمسي السنوي على سطح يكون أعلى للسطح المائل عند خط عرض المكان الجغرافي. علاوة على ذلك، يجب أيضاً أن يميل غطاء التكاثف إلى سحب الماء المكثف تحت قوة الجاذبية إلى قناة التجميع في الطرف السفلي من غطاء التكثيف. و تعتمد زاوية الميل المثلى للغطاء على الزمن خلال السنة و الموقع الجغرافي للمقطر و على الظروف المحيطة. و قد أثبتت التجارب و الدراسات أن تصميم زاوية الميل المثلى للغطاء قدرها من (20-25°) مع المستوي الأفقي يعطي نتائج جيدة لعدد كبير من المقطرات الشمسية، و للظروف المناخية في نيودلهي مثلاً، فإن الميل الأمثل هو (30°).

7- تأثير تركيز الملح:

تزداد أيضاً السعة الحرارية للكتلة المائية لعمق مياه معين مع زيادة تركيز الملح، إذ يسبب هذا انخفاض درجة حرارة الماء و بالتالي يُقلل من $(T_w - T_g)$ ، و أخيراً يتم تقليل الناتج. هناك مشكلة أخرى مع ارتفاع تركيز الملح، و الذي يسبب تدرجاً عالياً في بطانة الحوض مما يزيد من تكاليف الصيانة، و هذا يُقلل من معامل امتصاص الإشعاع الشمسي في الحوض. و على أساس هذه الملاحظة، لا ينصح مطلقاً بتتقية مياه البحر للتقطير الشمسي (الملوحة بحوالي 40.000 ppm جزء في المليون). كما تتسبب مياه البحر في حدوث تآكل عالٍ في الصفيحة المعدنية، و التي يمكن حلّها باستخدام

معادن غير قابل للتآكل لبناء الحوض. كما يؤدي تراكم الملح في قاعدة المقطر إلى تكوين طبقات عاكسة لأشعة الشمس مما يؤدي إلى انخفاض إنتاجية المقطر بشكل محسوس، لذا ينصح بالتنظيف المستمر لقاعدة المقطر للمحافظة على الإنتاجية العالية.

8- تأثير عمق المياه :

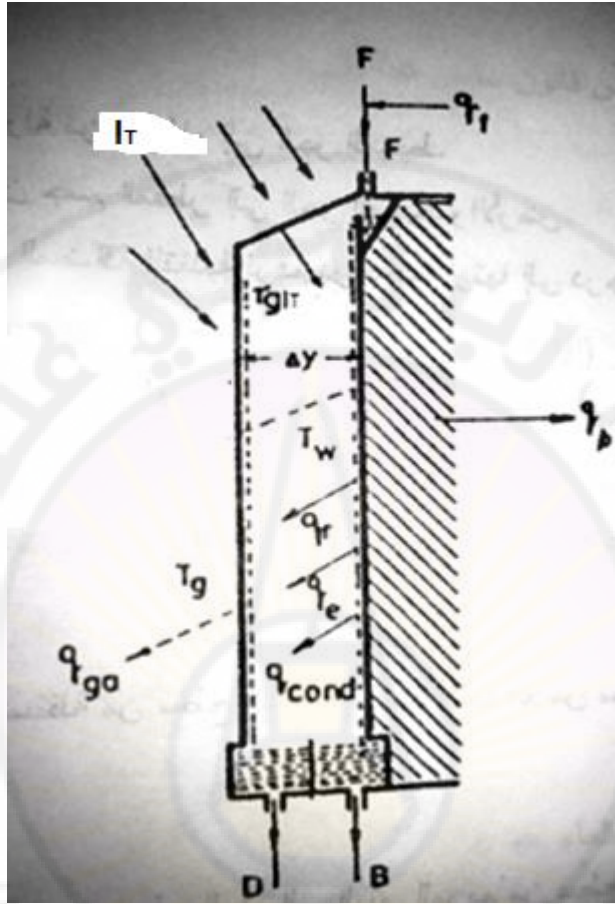
يمكن ملاحظة أنه لا يوجد تأثير لعمق المياه بدون عزل، و مع ذلك، ينخفض الناتج مع عمق المياه في حوض معزول، وقد تم التحقق من هذه النتيجة من قبل العديد من الباحثين، و لا يزال عمق المياه المثلى للمقطر الشمسي السلبي و الفعال 0.02 m و 0.05m على التوالي.

9- تأثير المسافة بين الغطاء و سطح الماء:

دلت التجارب أن إنتاجية المقطر الصندوقي تزيد كلما انخفضت المسافة الرأسية بين الغطاء و سطح الماء.

3.7. المقطرات الانتشارية:

تقل المسافة بين الغطاء و سطح الماء المالح في هذا النوع من المقطرات المبين في الشكل (3.7.1)، حتى تتلاشى الحرارة المنقولة بينها بالحمل الحراري الحر. يتم التبخير بالانتشار في هذه الحالة بين الجزئيات فقط، مما يعمل على تحسين إنتاجية المقطر. يتكون المقطر الانتشاري من صفيحتين متوازيتين رأسييتين بينهما فجوة هوائية. و من خصائص هاتين الصفيحتين أن الصفيحة الأمامية تكون على درجة من الشفافية لتسمح بنفاذ الإشعاع الشمسي، بينما الصفيحة الخلفية (الماصة) تكون مُعتمة لتسمح بامتصاص أكبر قدر من الإشعاع الشمسي. وتُسري تغذية الماء المالح إلى أسفل على شكل طبقة رقيقة على الصفيحة الخلفية حيث يتبخر الماء ثم ينتشر على الغطاء الذي له درجة حرارة أقل نسبياً من الصفيحة الماصة مما يساعد على تكثيف البخار. ويُجمَع الماء المكثف الناتج من عملية التبخير في قناة القاعدة. و يستقبل المقطر الانتشاري الإشعاع الشمسي بشدة قدرها I_T لكل وحدة من المساحة من غطاء المقطر.



الشكل (3.7.1) المقطر الانتشاري أحادي التأثير

3.7.1. التحليل الحراري للمقطر الإنتشاري:

يبين الشكل (3.7.2) سريان الحرارة في الأجزاء المختلفة في المقطر الشمسي، حيث ينقسم الإشعاع الشمسي إلى ثلاثة أجزاء، يُمتص الجزء الأول $\alpha_g I_T$ من قبل الغطاء، و أما الجزء الثاني $\tau_g I_T$ فينفذ من خلال الغطاء إلى داخل المقطر، و ينعكس الجزء الأخير $(1 - \alpha_g - \tau_g) I_T$ بواسطة الغطاء على الجو المحيط. و بنفاذ الجزء الثاني من الإشعاع $\tau_g I_T$ من غطاء المقطر فإنه بدوره ينقسم إلى جزأين:

يمثل الجزء الأول $\alpha_w \tau_g I_T$ مقدار الامتصاص بالصفحة الخلفية الماصة للإشعاع و بماء التغذية الساري عليها، و يمثل الجزء الثاني $(1-\alpha_w) \tau_g I_T$ الانعكاس على سطح الصفحة الماصة و سطح الماء، و يفترض أن هذا الجزء المنعكس ينفذ مباشرة من خلال الغطاء إلى الخارج بدون أي امتصاص أو انعكاس. و يُعطى التوازن الحراري للمقطر الآتي:

$$\alpha_g I_T + \alpha_w \tau_g I_T = q_{ga} + q_b + C_s \left(\frac{dT_w}{dt} \right) + q_f \quad (3.7.1)$$

حيث:

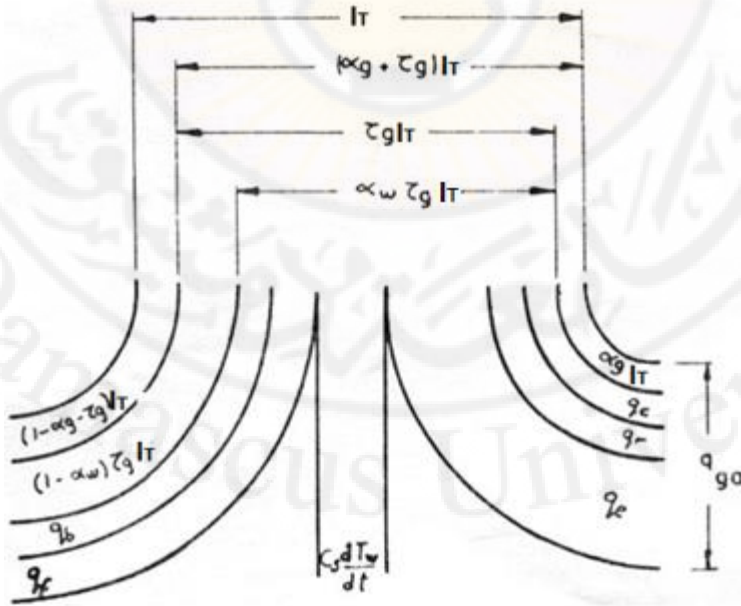
q_{ga} : الحرارة المنقولة من الغطاء إلى الجو المحيط.

q_b : الحرارة المنقولة من جسم المقطر إلى الجو المحيط و الأرض.

q_f : الحرارة المحسوسة المضافة للتغذية لرفع درجة حرارتها إلى درجة حرارة

السريان T_w على الصفحة الماصة.

C_s : السعة الحرارية للمقطر و الماء.



الشكل (3.7.2) سريان الحرارة في الأجزاء المختلفة للمقطر الشمسي الانتشاري

كما يعطي التوازن الحراري للغطاء المعادلة التالية:

$$q_{ga} = \alpha_g I_T + q_{cond} + q_e + q_r \quad (3.7.2)$$

حيث:

q و q_e و q_{cond} هي معدل الحرارة المنقولة من سطح الماء إلى متر مربع من سطح الزجاج بالإشعاع و بانتشار بخار الماء و بالتوصيل الحراري على التوالي. و تحسب q_r و q_e من معادلات مشابهة للمعادلات المستخدمة في المقطر الصندوقي أما قيمة q_{cond} فتحسب كما يلي:

$$q_{cond} = k \frac{(T_w - T_g)}{\Delta y} \quad (3.7.3)$$

حيث:

k : الموصلية الحرارية لخليط بخار الماء مع الهواء في الفجوة بين الصفيحة الماصة والغطاء.

Δy : المسافة بين سطح الماء و الغطاء (سمك الفجوة)،

يمكن حساب q_f من العلاقة التالية: $q_f = D.C_{pw}(T_w - T_f)$

حيث T_f هي درجة حرارة مياه التغذية.

أما q_e فتحسب من قانون ستيفن كما يلي:

$$q_e = DL_w \quad (3.7.4)$$

حيث:

D : معدل تبخير الماء لكل وحدة مساحة للغطاء.

L_w : الحرارة الكامنة للماء عند درجة حرارة إشباع تساوي T_w .

تحسب قيمة D كما يلي:

$$D = \frac{10^6 M_w \zeta P_T}{R(T + 273)} \cdot \frac{P_T}{(P_T - P_w)} \frac{dP_w}{dy} \quad (3.7.5)$$

حيث:

$\bar{R}$: الثابت العام للغازات (J / K) $\bar{R} = 8314.34$ لكل كيلو جزيء.

P_w : الضغط الجزئي لبخار الماء في الهواء. و بتكامل العلاقة السابقة بين الصفيحة الماصة والغطاء يتم الحصول على العلاقة التالية:

$$D = \frac{10^6 M_w \zeta}{\bar{R}(\bar{T} + 273)} \cdot \frac{P_T}{\Delta y} \ln \left\{ \frac{P_T - P_g}{P_T - P_w} \right\} \quad (3.7.6)$$

حيث:

P_T (MN/m²): الضغط الكلي للخليط.

T [°C]: درجة حرارة الخليط. و تعتبر هذه العلاقة صالحة حتى [1000 °C]

P_g و P_w : هما ضغط بخار الماء عند T_w و T_g على التوالي.

$\bar{T}$: درجة الحرارة المتوسطة للفجوة بين السطح الماص و الغطاء و تقدر كما يلي:

$$\bar{T} = \frac{T_w + T_g}{2} \quad (3.7.7)$$

أما $\zeta \left(\frac{m^2}{s} \right)$ هي انتشارية بخار الماء في الهواء فتحسب من العلاقة التجريبية التي

قام بها (سيولنج 1972):

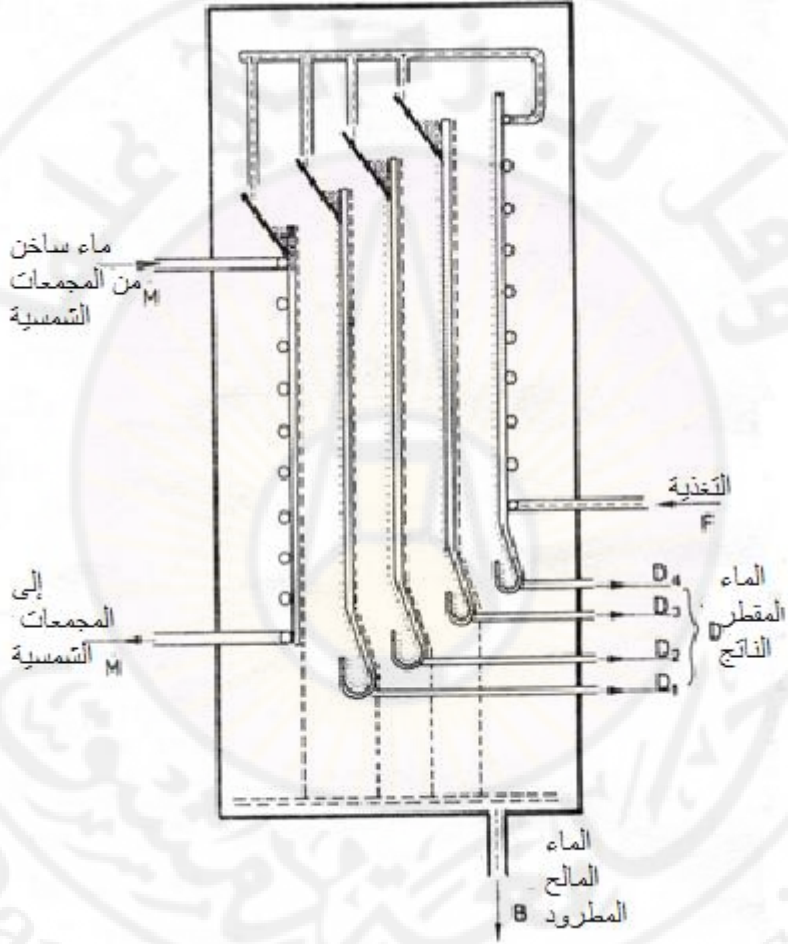
$$\zeta = \frac{0.911 \times 10^{-9}}{P_T} \cdot \frac{(\bar{T} + 273)^{2.5}}{(\bar{T} + 518)} \quad (3.7.8)$$

3.7.2. المقطرات الانتشارية ذات التأثيرات المتعددة:

تُعد قلة الإنتاجية للمقطر الصندوقي، و التي تكون في العادة في حدود $3 [L/m^2.day]$ من أهم عيوبه، و يمكن تحسين إنتاجية المقطر الصندوقي باستخدام المقطرات الانتشارية المتعددة التأثيرات التي اقترحها دانكل. و يبين الشكل (3.7.3) مقطراً ذا أربعة تأثيرات يتكون من خمس ($n=5$) صفائح معدنية جيدة التوصيل (عدد الصفائح = عدد التأثيرات + 1).

■ و تسخن الصفيحة الأولى بماء ساخن من مجمع شمسي (أو أي مصدر آخر للحرارة)، و تبرد الصفيحة الأخيرة (و تسمى مكثفاً) بماء البحر (التغذية)، و

تُوزع التغذية بعد تسخينها على سطح المكثف، كما هو موضح في الشكل (3.7.3) على الصفائح المختلفة للمقطر، و يُراعى عند تصميم نظام التوزيع للتغذية أن يكون السريان على شكل طبقة رقيقة جداً على كل صفيحة .



الشكل (3.7.3) رسم تخطيطي لمقطر انتشاري ذي تأثيرات متعددة

■ يتم تسخين التغذية السارية في التأثير الأول، على السطح الخلفي للصفحة الأولى، الأمر الذي يساعد على تبخير جزء من التغذية مقداره D_1 عند درجة الحرارة المتوسطة T_1 . و يتجه البخار الناتج بالانتشار إلى السطح الأمامي

للصفحة الثانية حيث يتكثف بملامسة سطح الصفحة عند درجة حرارة متوسطة T_2 أقل من درجة الحرارة T_1 . وتُعرف هذه العملية من إنتاج البخار على الصفحة الأولى و تكثيفه على الصفحة الثانية بالتأثير الأول للمقطر الانتشاري. أما في التأثير الثاني فتستخدم الحرارة المفقودة من البخار عند تكثيفه على السطح الأمامي للصفحة الثانية لتسخين مياه التغذية السارية على السطح الخلفي للصفحة الثانية، فينتج بخار بمعدل D_2 ، وينتقل البخار الناتج إلى الصفحة الثالثة بالانتشار حيث يتكثف عند ملامسة السطح الأمامي للصفحة عند درجة حرارة متوسطة T_3 أقل من T_2 ، وبالمثل تعرف عملية التبخير و التكثيف بين الصفحة الثانية والثالثة بالتأثير الثاني. و تتكرر هذه العملية في باقي التأثيرات حتى التأثير الأخير، و يُجَمَّع ناتج التكثيف في التأثيرات المختلفة D في خارج المقطرات الانتشارية .

3.7.3. مزايا المقطرات الانتشارية ذات التأثيرات المتعددة :

- من أهم مزايا المقطرات الانتشارية ذات التأثيرات المتعددة أنها:
- تعمل عند درجات منخفضة نسبياً الأمر الذي يُقلِّل تكوين الرواسب إلى الحد الأدنى، ويُقلِّل من احتمال التآكل بالصدأ و يُقلِّل أيضاً من معدل فقدان الحرارة إلى المحيط .
- تحتاج إلى مساحة أرضية أقل من المساحة المطلوبة للمقطرات الصندوقية التي تعطي نفس الإنتاجية .
- تعطي إنتاجية أكبر من إنتاجية المقطرات الصندوقية التي تستخدم نفس كمية الحرارة .

3.8. التناضح العكسي باستخدام الطاقة الشمسية

3.8.1. تعريف التناضح العكسي:

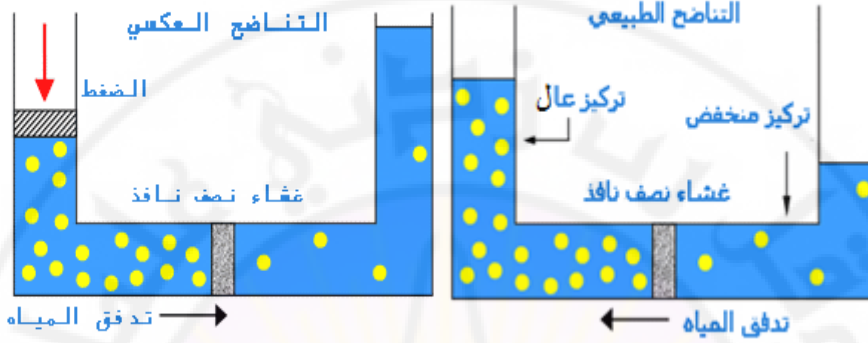
التناضح أو الإسموزية Osmosis هو الاسم الذي يطلق على عملية انتقال المذيب عبر غشاء مسامي إلى المذاب، و هو في المعنى كلمة مشتقة من الإغريق OSMOS وتعني النبض. تستخدم تقنية التناضح العكسي في تحلية مياه البحر و المياه قليلة الملوحة.

3.8.2. مفهوم التناضح العكسي:

تعتمد طريقة التناضح العكسي على الخاصية الإسموزية، حيث تستخدم الضغوط المُسلّطة على أسطح الأغشية للتغلب على الضغط الإسموزي الطبيعي للماء، فإذا وضع غشاء شبه نفّاذ بين محلولين متساويين في التّركيز تحت درجة حرارة و ضغط متساويين لا يحدث أي مرور للمياه عبر الغشاء نتيجة تساوي الجهد الكيميائي على جانبيه، و إذا ما أضيف ملح قابل للذوبان لأحد المحلولين ينخفض الضغط و يحدث تدفق إسموزي للماء من الجانب الأقل ملوحة إلى الجانب الأكثر ملوحة حتى يعود الجهد الكيميائي إلى حالة التوازن السابقة. و يحدث هذا التوازن عندما يصبح فرق الضغط في حجم السائل الأكثر ملوحة مساوياً للضغط الإسموزي، و هي خاصية من خواص السوائل ليس لها علاقة بالغشاء.

وعند توجيه ضغط مساوٍ للضغط الإسموزي على سطح المحلول الملحي يتم التوصل أيضاً الى حالة التوازن، ويتوقف سريان المياه من خلال الغشاء. و عند رفع الضغط إلى أكثر من ذلك فإنّ الجهد الكيميائي للسائل سيرتفع و يسبب تدفقاً عكسياً للماء من المحلول الملحي باتجاه المحلول الأقل ملوحة و هو ما يعرف بالتناضح العكسي. وفاعلية طريقة التناضح العكسي في التخلص من الأملاح ممتازة تصل إلى أكثر من 99 % وكذلك فإنّ أغشية التناضح العكسي لها قدرة على التخلص من البكتيريا و الجراثيم والعناصر الضارة الموجودة في المياه.

3.8.3. مقارنة بين التناضح الطبيعي و التناضح العكسي



الشكل (3.8.1) مقارنة بين التناضح الطبيعي و التناضح العكسي

3.8.4. تقنية التناضح العكسي:

تعتمد تقنية التناضح العكسي على أربع مراحل أساسية من المعالجات و هي :

1. مرحلة المعالجة الأولية:

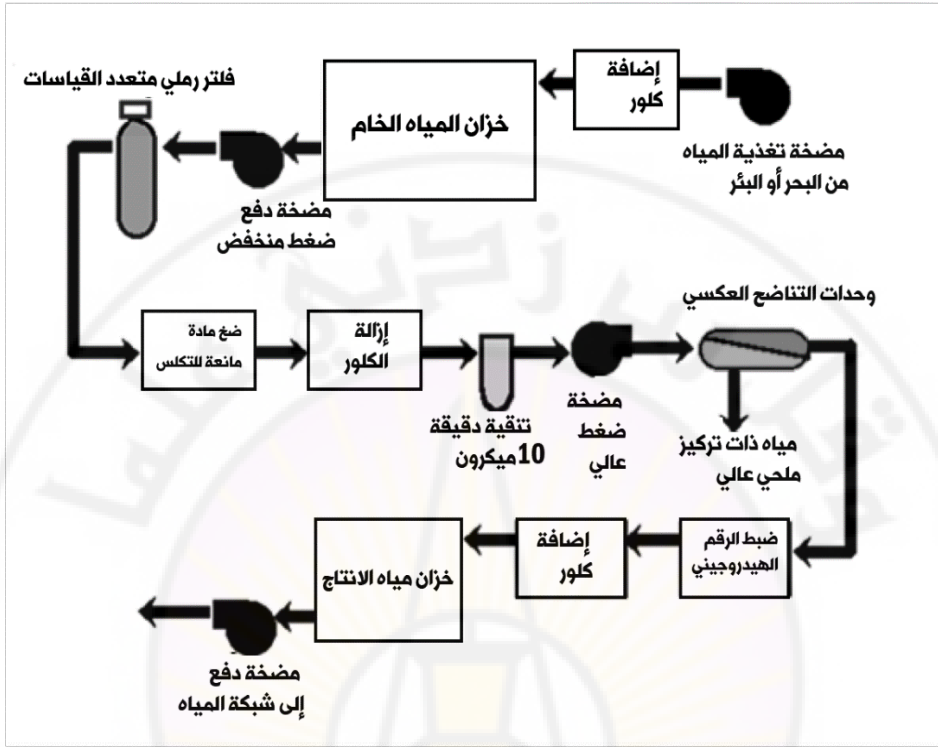
يتم معالجة تدفق مياه التغذية لتصبح منسجمة مع شروط عمل الأغشية و لتكون خالية من العوالق الصلبة عبر:

الفلتر الرملية Multimedia Filter

وحدات خراطيش ميكرونية Cartridge Filters

ضبط الرقم الهيدروجيني Ph Adjustment

إضافة مواد كيميائية Dosing Chemicals لكبح أيّ تكلسات لاحقة من مواد مختلفة مثل كالسيوم سولفايت.



الشكل (3.8.2) رسم توضيحي للمراحل الأساسية التي تمر بها المياه الخام خلال عملية المعالجة بالتناضح العكسي

2. مرحلة الضغط (مضخة ذات ضغط عال):

يتم في هذه المرحلة رفع ضغط الدفق المُعالج أولاً إلى مستوى ضغط يناسب الأغشية، و حسب نسبة الأملاح في المياه الخام.

3. مرحلة الفصل بواسطة الأغشية (مجمع أغشية):

تسمح الأغشية القابلة للنفاذ، في هذه المرحلة، للمياه العذبة فقط بالعبور، أما الأملاح الذائبة فلا تتمكن من ذلك، و يتم تحويلها إلى خط الصرف ذات التركيز الملحي العالي، علماً أن نسبة مئوية قليلة جداً تبقى في دفق المياه العذبة، و هذا يعود لعدم كمال الأغشية التي تسمح بعبور هذه النسب القليلة.

3.8.5. مزايا التناضح العكسي الاقتصادية:

أحرزت تحلية مياه البحر باستخدام تقنية التناضح العكسي قبولاً مطرداً كطريقة اقتصادية معتمدة و ذلك بسبب:

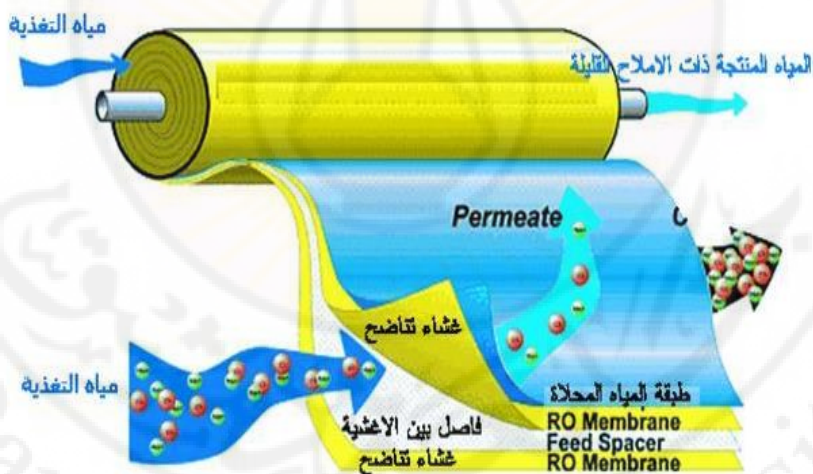
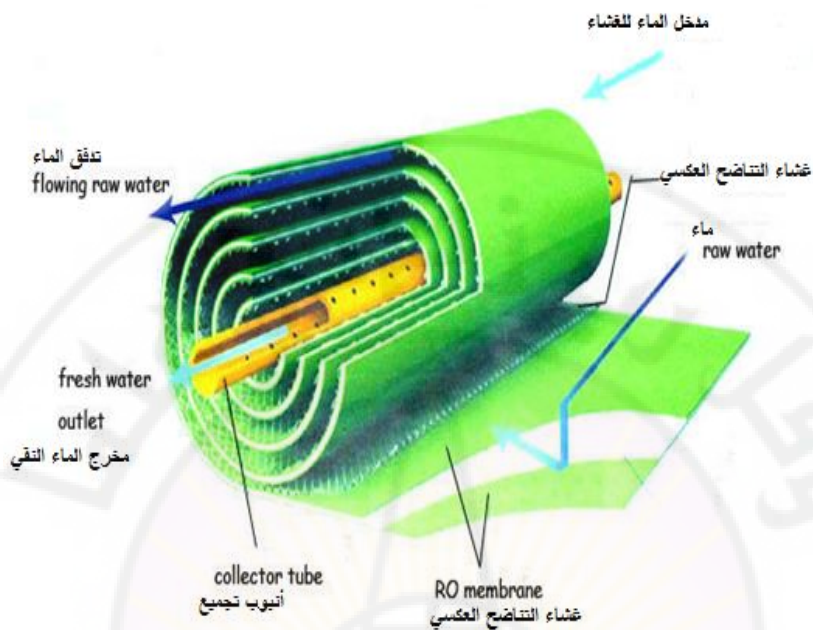
- 1- تدني استهلاك الطاقة بالمقارنة مع أغلب نظم التقطير، وذلك نظراً لعدم وجود تغيير في الصورة الفيزيائية للماء.
- 2- تدني المساحة التي يشغلها بالمقارنة بنظم التحلية الأخرى.
- 3- انخفاض معدل حدوث الترسبات والتآكل فيه بالمقارنة بنظم التحلية الأخرى.
- 4- مدة إنجاز مشاريع التناضح العكسي أقل مما هي الحال عليه بالنسبة لوحداث التقطير.
- 5- قلة تكلفة معظم مكونات هذا النظام لكونها بلاستيكية الصنع.
- 6- سهولة تجميع وتشغيل وصيانة النظام و ذلك لكونه من وحدات قائمة بذاتها.

3.8.6. الاختيار الجيد للغشاء:

تصنع أغشية التناضح العكسي بشكل شائع على شكل ثقب أو شعر كما في الألياف، أو طبقات متبادلة مستوية و فاصل مفتوح صُنع بشكل ملفوف على شكل لولب.

3.8.6.1. كيفية عمل الأغشية :

الأغشية عبارة عن مواد طبيعية أو صناعية شبه نفاذة (semi permeable) أي تسمح بمرور الماء فقط دون الأملاح. و تتكون أغشية التناضح العكسي من مواد خاصة (مثل أسيئات السليلوز) أو البولي أميد. إما على شكل شعيرات (خيوط) مجوفة مثل خيوط شعر الرأس تقريباً (hollow fine fibers) ملفوفة على شكل حرف U أو على شكل ألواح حلزونية ملفوفة (spiral wounded sheets). و تعمل الأغشية بما يسمى بنظرية السريان بالامتصاص الانتقائي (بالخاصة الشعرية) أي أن طبيعة الغشاء بامتصاص الماء فقط و رفض امتصاص الأملاح. و تعتمد قدرة الغشاء على فصل الأملاح عن قطر المسام من 1 إلى 15 أنجستروم و هي أقل كثيراً من المرشحات الدقيقة (micro filtration) و التي تمنع الأحياء الدقيقة بالمرشح.



الشكل (3.8.3) مبدأ عمل غشاء التناضح العكسي

3.8.6.2. اختيار غشاء التناضح العكسي:

لرفع كفاءة عملية التناضح العكسي لا بد من الاختيار الجيد للغشاء المناسب طبقاً للخواص التالية :

- أن يحتوي الغشاء على درجة عالية من الأملاح .
- لا بد من وجود فيض الماء المناسب لإتمام الانسياب .
- لا بد أن يكون الغشاء سهل التشييد في وحدات الفرز الغشائي .
- لا بد أن يتحمل الغشاء الضغط الواقع عليه .
- لا بد أن تكون للغشاء متانة ميكانيكية جيدة .
- لا بد أن يحتوي الغشاء على مدى تشغيلي كبير للأيونات الموجودة في الماء الخام و الضغط و درجة الحرارة و مقاومة التفاعلات الكيميائية والحيوية، و يمكن أن يعمل في ظروف مختلفة .
- لا بد أن يكون سعر الغشاء مناسباً و رخيصاً.

3.9. المحطة الحرارية الشمسية:

المحطات الحرارية الشمسية نوعان: محطات تعمل فقط بالطاقة الشمسية و محطات مزدوجة، أي تعمل بالطاقة الشمسية لكنها يمكن أن تعمل أيضاً بمصدر طاقي إضافي. المصدر الطاقي الإضافي المستعمل حالياً هو الغاز الطبيعي. تحتوي كل المحطات الحرارية الشمسية على تجهيزات استقبال و تركيز الإشعاع الشمسي ثم تحويله إلى حرارة. كما أن بعض المحطات الحرارية الشمسية تحتوي على تجهيزات لادخار الطاقة الحرارية. هذه التجهيزات تُمكن من تحكم نسبي في مستوى إنتاج الكهرباء، و كذلك تُمكن من تحسين مستوى استقرار خصائص التيار الكهربائي.



الفصل الرابع

التجفيف الشمسي



التجفيف الشمسي

4.1. الهدف من التجفيف:

مع تزايد عدد سكان العالم سيصبح ملايين من البشر ليس لديهم طعام كافٍ يتناولونه. و من الواضح أنَّ هناك طريقتين مباشرتين لحل المشكلة:

(1)- زيادة إنتاج الغذاء بزراعة المزيد من المساحات، مع تأمين الري الأفضل باستخدام طرق أحدث أو بمكننة الأعمال الزراعية.

(2)- تخفيض الطلب على الغذاء بتخفيض نمو السكان .

إنَّ البديل الثالث والهام والذي لا يُولى أهمية كافية هو تخفيض هدر الغذاء خلال الحصاد (القطف) وبعده. من الصعب تقدير الحجم الفعلي لهدر الغذاء بعد القطف (بسبب فساد المحصول و التلوث و مهاجمته من قبل الطيور و القوارض والحشرات) و خلال عملية التخزين من الصعب تقدير الأسباب الفنية لكمية الغذاء المهدور. و في البلدان (البلدان النامية غالباً) حيث لا تتوفر فيها منشآت التخزين المبردة بشكل كافٍ كانت الخسائر بعد القطف بحدود 30-50% من مواد قابلة للتلف، و هذا يحرم المزارعين من الدخل المحتمل من إنتاجهم، و بالتالي يعرض فرص المساهمة الاقتصادية المرتقبة للزراعة بشكل عام للخطر.

يمكن تخفيض هذا الهدر في الغذاء خاصة في البلدان النامية إذا تم وضع استراتيجيات قطف صحيحة، و عملية تخزين و نقل الأغذية، و بشكل خاص في المناطق الريفية. يعتمد ذلك بالطبع على تنوع المحصول و المناخ و نظام القطف و المعالجة و طرق التخزين و التسويق و الحالة الاجتماعية و الثقافية .

هناك عدّة طرق للمحافظة على الغذاء من أجل استخدامه لاحقاً، و إنّ عملية التجفيف هي الطريقة التقليدية من أجل المحافظة على الغذاء، و هي تساعد أيضاً في نقل الأغذية

بسهولة نظراً لأن الغذاء المجفف يصبح أخف بسبب فقدانه للرطوبة. إن تجفيف البذور يمنع إنباتها و نمو الفطور و البكتيريا.

و مع الاتجاه الحالي نحو استخدام موارد الطاقة المتجددة كمخاوف بشأن آثار استخدام الوقود الأحفوري لتغير المناخ، و تكلفة الطاقة و الحاجة إلى التقليل إلى أدنى حد من زيادة الأضرار بعد الحصاد، من المتوقع أن تلعب الطاقة الشمسية في تصنيع الأغذية دوراً رئيسياً في النظم الغذائية .

يتم تجفيف المنتجات الزراعية لزيادة فترة الصلاحية و تقليل تكلفة التغليف و زيادة سعة الشحن و تحسين المظهر، مع الحفاظ على النكهة و القيمة الغذائية، و تتم إزالة الرطوبة من الطعام عن طريق التجفيف، و بالتالي لا يمكن أن تنمو البكتيريا و الخميرة و العفن مما يؤدي إلى تلف الطعام.

يمكن أن تلعب مجففات الطاقة الشمسية دوراً رئيسياً في التقليل إلى أدنى حد من أضرار الحصاد في كل من البلدان المتقدمة و النامية بالإضافة إلى القيمة المضافة. إن فهم المبادئ الأساسية لعمليات مجففات الطاقة الشمسية و الأداء المتوقع سوف يقطع شوطاً طويلاً في تشجيع استخدام الطاقة الشمسية لأغراض التجفيف.

إذاً التجفيف هو إزالة الماء من المواد المعالجة و مواد أخرى. يُستعمل المصطلح "تجفيف" "Drying" للإشارة إلى إزالة الماء وسوائل عضوية أخرى، مثل البنزين، أو أي محاليل عضوية من المواد الصلبة، فالتجفيف بشكل عام، يعني عادةً إزالة كميات الماء الصغيرة نسبياً من المواد.

أما التبخر فهو إزالة كميات الماء الكبيرة نسبياً من المواد، ففي التبخر تتم إزالة الماء على شكل بخار في درجة حرارة غليانه، أما في التجفيف فتتم إزالة الماء كتبخّر في الهواء.

4.2. طرق التجفيف:

قد يمكن إزالة الماء ميكانيكياً في بعض الحالات، من المواد الصلبة بالضغط، أو بالطرد المركزي، و كذلك بطرق أخرى. و هذا أرخص من التجفيف بالوسائل الحرارية لإزالة الماء. تختلف محتويات الرطوبة بحسب نوع المنتج. يحتوي الملح الجاف على

حوالي 5% من الماء، أما الفحم فيحتوي على حوالي 4%، و تحتوي الكثير من منتجات الأغذية على حوالي 5% أيضاً. التجفيف عادةً هو العملية الأخيرة من الخطوات قبل التعبئة و هي تجعل الكثير من المواد مناسبة أكثر للتعامل والمداولة، مثل بودرات الصابون و الأصبغة.

يُستعمل التجفيف أو إزالة الماء من المواد الحيوية، و خصوصاً الأغذية كتقنية وقائية. لا تستطيع العضويات المجهرية التي تُسبب تلف و تعفن الأغذية أن تنمو و تتكاثر في غياب الماء، لا تستطيع الكثير من الأنزيمات أيضاً التي تسبب التغيرات الكيميائية في الغذاء و المواد الحيوية الأخرى العمل من غير الماء، فعندما ينقص الماء ليصبح أقل من 10% ماء، تصبح العضويات المجهرية عاجزة. و مع ذلك، من الضروري عادةً أن ننقص درجة الرطوبة حتى أقل من 5% ماء في الغذاء للحفاظ على النكهة و الغذاء. يمكن تخزين الأغذية المُجفّفة لفترة أطول من الزمن.

بعض المواد الحيوية هي مواد دوائية (صيدلانية)، و لا يمكن تسخينها من أجل التجفيف العادي، و قد تجفف بالتجميد، وهي طريقة أخرى غالباً ما يتم توظيفها من أجل الحفاظ على مثل هذه المواد.

4.2.1. الطرق الرئيسية في التجفيف :

هناك ثلاث طرق أساسية للتجفيف هي:

- (1) التجفيف الطبقي أي بالتخزين على شكل طبقات.
- (2) تجفيف الكميات أو الدفعات.
- (3) تجفيف التدفق المستمر.

يمكن تصنيف عمليات التجفيف كدفعة واحدة، حيث يتم إدخال المادة في جهاز التجفيف و تتم عملية التجفيف خلال فترة من الزمن يتم تحديدها، أو بشكلٍ مستمر، عندما تتم إضافة المادة بشكل مستمر إلى المجفف، و بنفس الوقت تتم إزالة المادة المجففة بشكل دائم.

4.2.2. أنواع أنظمة التجفيف:

1. نظام التجفيف المتقطع :

يتم في هذا النظام تجفيف مقدار معين من المادة الرطبة ثم توقف عملية التجفيف لسحب المادة المجففة و وضع مقدار آخر من المادة الرطبة و هكذا، و يتكون هذا النظام من خزان و مروحة لدفع هواء التجفيف و سخان لرفع درجة حرارة هواء التجفيف إلى درجة الحرارة اللازمة، بالإضافة إلى بعض أجهزة التحكم في درجة الحرارة و محتوى الرطوبة بالمادة المجففة و الرطوبة النسبية للهواء، و هناك عدة أنواع للمجففات بحسب هذا النظام.

2. نظام تجفيف بالمجفف الممتلئ :

و هو أكثر الأنواع انتشاراً حيث يُملأ المجفف بالمحصول الرطب إلى عمق يصل إلى حوالي 9m و نتيجة لهذا العمق الكبير تستخدم سرعات بطيئة لهواء التجفيف للحد من فقد القدرة اللازمة لدفع هذا الهواء خلال هذا العمق، و يسخن الهواء في هذا النظام عادة حوالي ($10^{\circ}\text{C} - 5^{\circ}\text{C}$) أعلى من درجة حرارة الجو، و تستمر عادةً عملية التجفيف لفترة طويلة تصل إلى عشرات الأيام، و يتم دفع الهواء خلال هذا النظام من أسفل إلى أعلى أو بالعكس، يزداد محتوى الرطوبة داخل المجفف في اتجاه سريان الهواء، في حالة دفع الهواء من أسفل إلى أعلى، مما قد يسبب تكاثف بعض الرطوبة التي يحملها الهواء على سقف المجفف حيث يتساقط مرة أخرى إلى المحصول الذي يتم تجفيفه إلا أن هذه الطريقة تمتاز بسهولة الحصول على عينة من المحصول من أعلى المجفف لقياس محتوى الرطوبة بها أثناء عملية التجفيف.

و يمتاز نظام المجفف الممتلئ بسهولة التشغيل، و من عيوبه طول زمن التجفيف الذي يصل إلى عشرات الأيام و بالتالي احتواء المحصول عند خروج الهواء من المجفف لفترات طويلة على مقدار رطوبة مرتفع مما يؤدي إلى نمو بعض أنواع الفطريات مسبباً فساد المحصول .

3. نظام تجفيف الطبقات :

يمكن تلافي إمكانية تواجد الفطريات التي تم ذكرها سابقاً بتجفيف الدفعات أو الطبقات بتلافي وجود المحصول لفترة طويلة ضمن المجفف.

توضع طبقة رقيقة من المحصول الرطب، في نظام تجفيف الطبقات، و بعد فترة تصل إلى عدة أيام توضع طبقة أخرى و بالتالي لا يبقى المحصول رطباً داخل المجفف لفترة زمنية طويلة، و يستخدم هذا النظام إذا كان المجفف سيستخدم فيما بعد لتخزين المحصول الجاف، كما يستخدم هذا النظام إذا توفر محصول ما بمحتويات رطوبة مختلفة و طلب تجفيفه، فيوضع عندئذ المحصول الرطب أولاً ثم يتوالى وضع الطبقات على فترات زمنية الأرطب فالأجف و هكذا، و تساعد هذه الطريقة على خفض زمن التجفيف بقدر محسوس.

4. نظام تجفيف الدفعات:

يملاً المجفف في هذا النظام، بطبقة واحدة لا يزيد عمقها عادة عن حوالي متر، و تستبدل هذه الطبقة بعد تمام تجفيفها بطبقة أخرى و هكذا. يتيح هذا النظام عندئذ استخدام معدلات كبيرة لسريان الهواء عند درجات حرارة مرتفعة مما يختصر زمن التجفيف إلى عدة ساعات.

5. نظام التجفيف المستمر:

تدخل المادة الرطبة إلى المجفف ثم تتم عملية التجفيف و تستمر الحركة حتى تخرج المادة المجففة من المجفف و بالتالي لا تتوقف عملية التجفيف داخل المجفف، و يقسم نظام التجفيف المستمر تبعاً للعلاقة بين اتجاه سريان المادة المجففة و سريان هواء التجفيف إلى ثلاثة أنواع هي :

- 1 . مجفف السريان الموازي: يسري كل من المادة المجففة و الهواء في نفس الاتجاه.
- 2 . مجفف السريان المعاكس: تسري المادة المجففة في اتجاه معاكس لاتجاه سريان الهواء.

3 . مجفف السريان المتقاطع: تسري المادة المجففة باتجاه عمودي على اتجاه سريان هواء التجفيف.

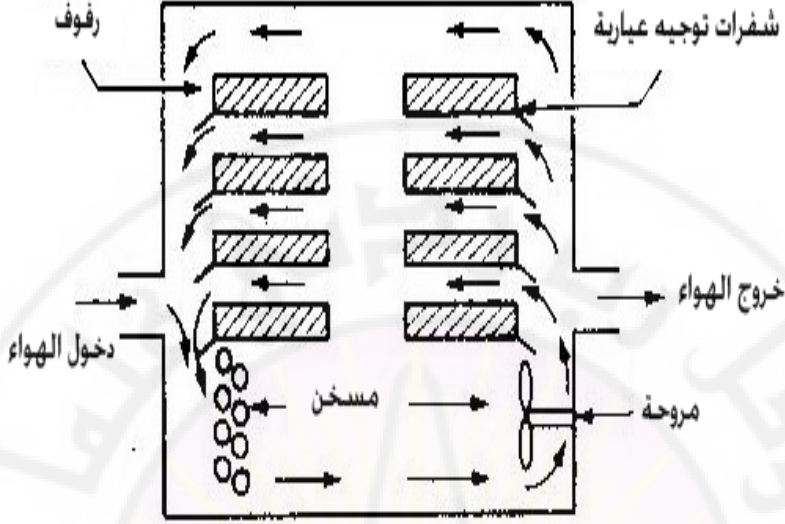
و يمتاز نظام التجفيف المستمر بسرعة عملية التجفيف حيث يصل زمن التجفيف إلى عدة دقائق، و ذلك نظراً لإمكانية استخدام معدلات كبيرة من هواء التجفيف عند درجات حرارة مرتفعة تصل إلى حوالي 150°C دون خشية إفساد الحبوب أو المحاصيل المراد تجفيفها. و لكل نوع من هذه المجففات مميزاتا الخاصة بها التي ترشحها لتجفيف بعض الحبوب و أنواع عديدة أخرى من المحاصيل دون بعضها الآخر.

4.3. تجهيزات التجفيف:

4.3.1. المجففات الصينية المجففة:

في المجففات الصينية، و التي تدعى أيضاً بالرفوف، أو الحجيرات المجففة ؛ تُتشر المادة بشكل متجانس، و قد تكون صلبة مكثّة أو صلبة عجينية، على صينية معدنية، بعمق بين (10- 100mm). يظهر في الشكل (4.3.1) شكل صينية التجفيف النموذجية، وهي تحتوي على صوانٍ محمّلة قابلة للإزالة و التركيب في الحجرة. يُدار الهواء المسخّن بالبخار بواسطة مروحة موازية لسطح الصواني، كما تستعمل الحرارة الكهربائية أيضاً، وخصوصاً لأحمال التسخين المنخفضة. حوالي 10 - 20 % من الهواء المارّ فوق الصواني يكون هواءً نقياً، أما الهواء المتبقي فهو هواء مكرّر. يتم فتح الكبين (الحجرة) بعد التجفيف، و يتم استبدال الصواني بكمية جديدة منها. إنّ تعديل هذا النموذج هو نوع عربة الصينية، حيث يتم تحميل الصواني على العربات، التي يتم دفعها نحو المجفف. و هذا يوفر وقتاً جديراً بالاعتبار، حيث إنّ العربات يمكن أن تُحمل وتُفرّغ خارج المجفف.

أما في حالة المواد الحبيبية، فيمكن إضافة المادة على شاشات موضوعة تحت بعضها البعض. و بعد ذلك، يمر الهواء المسخّن من خلال المجففات الدوّارة و عبر طبقة نافذة، تعطي زمناً أقصر للتجفيف بسبب السطح الأكبر الذي يتم تعرضه للهواء.



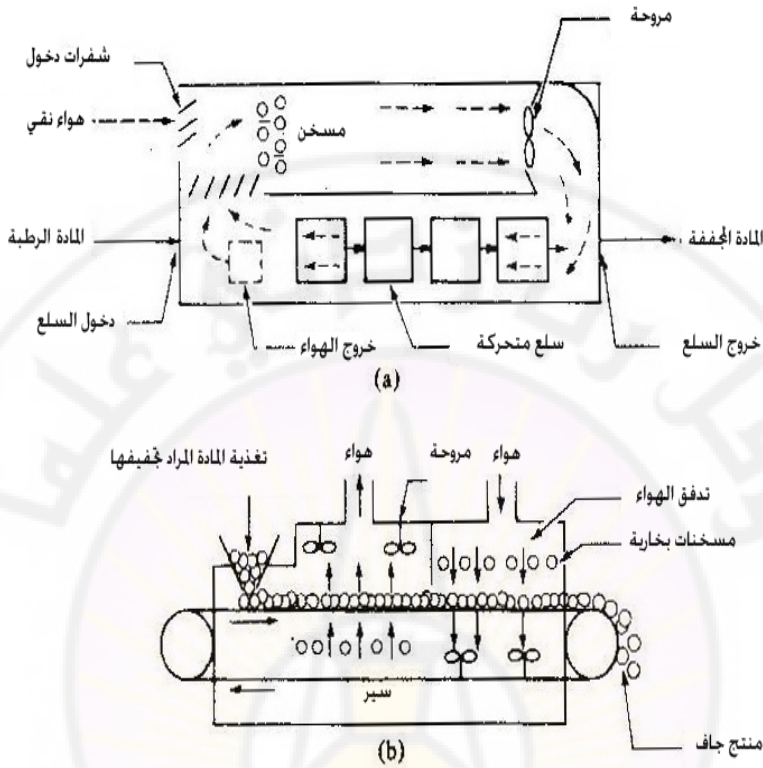
الشكل (4.3.1) المجفف الصيني

4.3.2. مجففات رف الشفط (الفاكيوم) غير المباشرة:

هذه المجففات هي مجففات عجينة مسخنة بشكل غير مباشر مشابهة للمجففات الصينية. و يتألف هذا المجفف من حجرة مصنوعة من الحديد الصلب أو من طبقات من الفولاذ مركبة على أبواب مغلقة بإحكام. و هكذا يمكن تشغيلها تحت الفاكيوم. إنَّ الصواني التي تحتوي على الأجسام الصلبة ليتم تجفيفها تبقى على الرفوف. يتم توصيل الحرارة من خلال الجدران المعدنية و تُضاف بالأشعة من الرف العلوي. تُستعمل هذه المجففات لتجفيف المواد الثمينة، أو للمواد سهلة التأكسد.

4.3.3. مجففات الأنفاق المستمرة:

وهي غالباً ما تكون حجيرات مقصورة أو صينيات تجفيف تعمل على التسلسل، كما هو موضح في الشكل (a2.3.4).



الشكل (4.3.2) مجففات الأنفاق

توضع الأجسام الصلبة على الصينية أو على المقصورات التي تتحرك باستمرار من خلال نفق مع غازات حارة تمر فوق سطح كل صينية. يتدفق الهواء الحار الذي يمكن أن يسبب تياراً في اتجاه معاكس أو بنفس اتجاه التيار أو مدمج، و يتم تجفيف الكثير من الأغذية في هذه الطريقة.

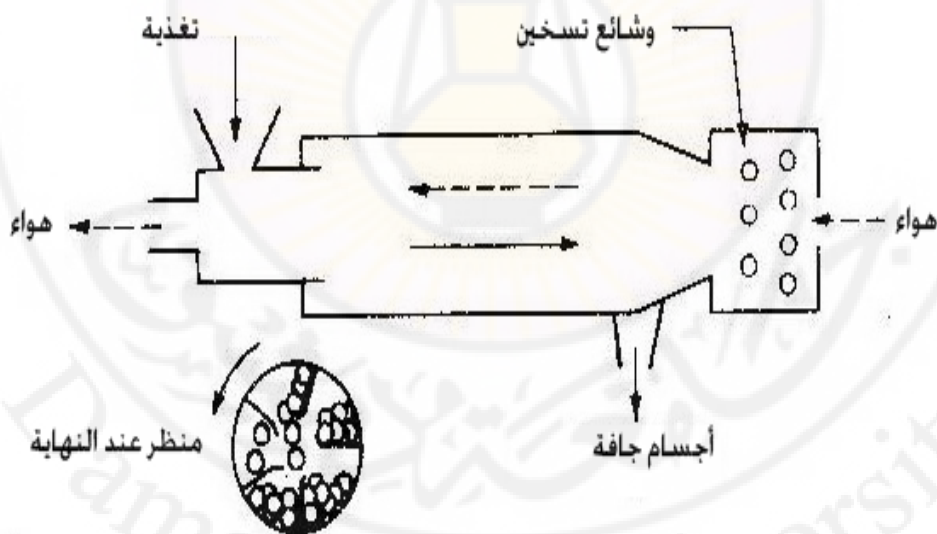
عندما يتم تجفيف حبيبات الجزيئات الصلبة، يتم غالباً استعمال سير ناقل شاشة أو متقب مستمر، كما يظهر ذلك في الشكل (4.3.2b). يتم نقل الحبيبات الصلبة على طبقة عرضها 25mm بعمق حوالي 150mm على الشاشة أو الغطاء المتقب بينما يتم نفخ الهواء نحو الأعلى عن طريق القاعدة أو نحو الأسفل. يتألف المجفف من عدة مقاطع على التسلسل، كل منها له مروحة و وشائع تسخين. يتم إخراج جزء من الهواء

نحو الغلاف الجوي بواسطة المروحة. و في بعض الحالات يمكن أن تتفد بعض المواد العجينية إلى الأسطوانات وتوضع على القاعدة لتجف.

4.3.4. المجففات الدوّارة:

يتألف المجفف الدوار من أسطوانة جوفاء تدور و تكون منحرفة قليلاً باتجاه المخرج. يتم تلقيح الحبيبات الصلبة الرطبة في النهاية العليا، كما هو واضح في الشكل (4.3.3) و تتحرك من خلال الذيل حيث تدور. تظهر الحرارة بسبب التلامس المباشر مع الغازات الحارة بتدفق تيار هواء معاكس. و في بعض الحالات يتم التسخين بواسطة التلامس عن طريق جدار الأسطوانة المسخن.

تتحرك جزيئات الحبيبات نحو الأمام ببطء لمسافة قصيرة قبل أن تهبط للأسفل عن طريق الغازات الحارة.

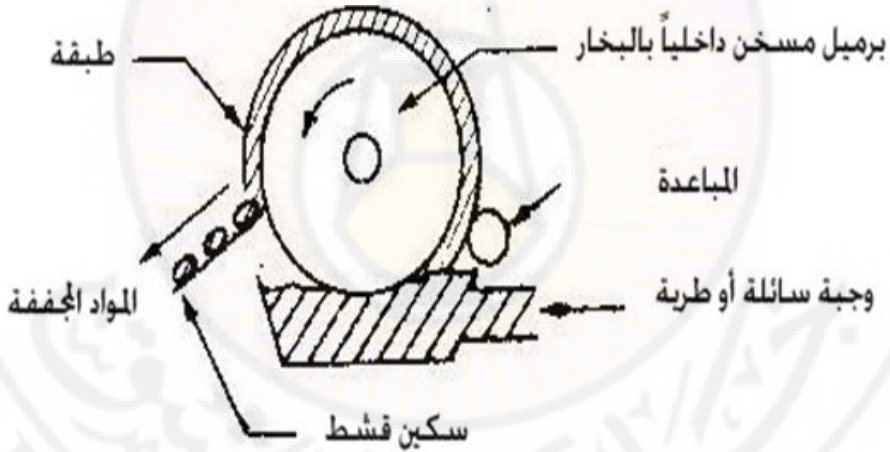


الشكل (4.3.3) المجفف الدوار

4.3.5. البراميل المجففة:

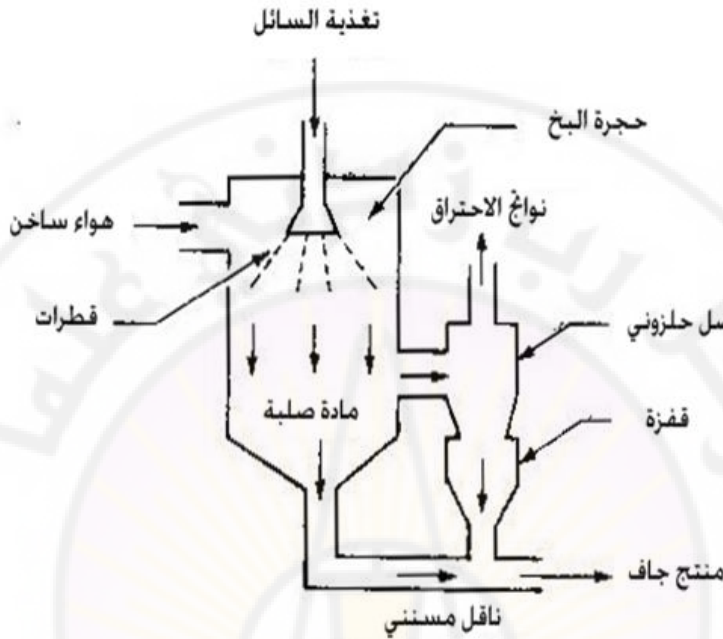
يتألف البرميل المجفف من أسطوانة معدنية مسخنة تظهر في الشكل (4.3.4) و في خارجها يتم تبخر طبقة رقيقة من سائل أو ملاط للتجفيف. تُفصل آخر حبيبة صلبة عن الأسطوانة التي تدور ببطء.

البرميل المجفف مناسب لمعالجة الملاط أو العجائن و تحويلها إلى أجسام صلبة بشكل ناعم، وكذلك للمحاصيل. وظائف البرميل كمبخر بشكل جزئي و كذلك كمجفف. خيارات أخرى لنوع البرميل المفرد هي البراميل الدوارة المزدوجة ذات التلقيم السفلي أو العلوي للبراميل. يتم تجفيف ملاط البطاطا باستخدام البراميل المجففة، بحيث توضع البطاطا في القشارات.



الشكل (4.3.4) البرميل المجفف

4.3.6. المجففات البخاخة:



الشكل (4.3.5) المجفف البخاخ

يتم بخ السائل أو المحلول الملاطي في تيار غاز حار في المجففات البخاخة على شكل رطوبة قطرات ناعمة كما هو مبين بالشكل (4.3.5) . يتم تبخر الماء بسرعة من القطرات، و تترك جزيئات من الجسم الصلبة الجاف يتم فصلها عن تيار الغاز . يمكن أن يكون تدفق الغاز و السائل في حجرة البخ بعكس التيار، أو مع التيار أو الاثنين معاً. من الضروري أن تضمن أن القطرات أو جزيئات الجسم الصلب الرطبة لا تلتصق و لا تلتصق بالسطوح الصلبة قبل أن يتم التجفيف. وهكذا، تُستعمل حبات كبيرة، و تُترك الأجسام الصلبة الجافة في قعر الحجرة من خلال مسنن ناقل. تُصنع بودرة الحليب الجاف من تجفيف الحليب بالبخ.

4.3.7. تجفيف المحاصيل والحبوب:

تحتوي الحبوب على حوالي 30 - 35% من الرطوبة، في حال تجفيف حبوب الحصاد، وللتخزين السليم حوالي سنة واحدة، يجب أن يتم التجفيف لتصبح الرطوبة حوالي 13%. يظهر المجفف النموذجي ذو التدفق المستمر في الشكل (4.3.6). تكون سماكة طبقة الحبوب في صندوق التجفيف حوالي 0.5m ، أو أقل، و يمر من خلالها الهواء الحار. أما الهواء غير المسخن في المقطع السفلي فيقوم بتبريد الحبوب قبل إخراجها.



الشكل (4.3.6) المجفف ذو التدفق المستمر

4.4. التجفيف الشمسي للأغذية:

تعتمد عملية التجفيف التقليدية للمحاصيل الغذائية في البلدان النامية على نشر الغذاء في أماكن مفتوحة تحت الشمس، و ندعو هذه الطريقة بالتجفيف الشمسي المفتوح، أو بالتجفيف الشمسي الطبيعي.

ينشر المنتج في طبقات رقيقة على أرضية صلبة، و يحرك المنتج مرة أو مرتين في اليوم، و يعتبر التجفيف الشمسي الطبيعي بسيطاً واقتصادياً لكنه يعاني من المساوئ التالية:

(1) لا يوجد تحكم بمعدل التجفيف، يمكن أن يجف المحصول بشكل زائد مما يؤدي إلى تغير أو زوال لونه أو فقدان طاقته الإنباتية، أو يؤدي في بعض الأحيان إلى تلفه بشكل كامل.

(2) عملية التجفيف غير منتظمة.

(3) ربما يكون هناك تلف للغذاء، في حال التجفيف البطيء، بسبب تشكل الفطور و البكتيريا.

(4) يكون هناك تلف كبير بسبب الطيور و الحشرات و القوارض .. إلخ.

يقصد بالتجفيف المتحكم به التحكم ببارامترات أو متغيرات التجفيف مثل درجة حرارة الهواء و الرطوبة و معدل التجفيف و محتوى الرطوبة و معدل تدفق الهواء. و هناك عدة مزايا للتجفيف المتحكم به للحبوب مثل: جودة المنتج و إمكانية التخزين و حسن الشروط الصحية للمنتج و تقليل الهدر و الزمن و الأمكنة اللازمة، و بالتالي جودة أفضل و عائد أفضل و تحسن الإنتاج الكلي.

يكون الوقود المستخدم لتجفيف الغذاء هو عادةً الكهرباء أو الوقود السائل أو الهواء الطبيعي أو الفحم .

يمكن استخدام الطاقة الشمسية لتجفيف الأغذية إذا توفرت التكنولوجيا والمال، و قد بينت التجارب التي أجريت في العديد من البلدان بوضوح، أن المجففات الشمسية يمكن أن تستخدم بفعالية من أجل تجفيف الغذاء، وأن مسألة اعتمادها أو التصميم الصحيح للمجفف الشمسي من أجل منتج معين، وتوفر الطاقة الشمسية، هي الأسباب التي تجعل عملية تجفيف الأغذية أكثر فعالية للأسباب التالية:

تعتبر الطاقة الشمسية منتشرة في طبيعتها، وهي تعطي إمكانية تسخين بدرجة منخفضة، وهذه الميزة للطاقة الشمسية جيدة من أجل التجفيف عند درجة حرارة منخفضة، ومعدلات تدفق عالية ذات تزايد طفيف لدرجة الحرارة.

لن تؤثر الطبيعة المتقطعة للإشعاع الشمسي على أداء التجفيف عند درجة حرارة منخفضة، حتى إنّ الطاقة المخزنة في المنتج نفسه ستساعد في إزالة الرطوبة الزائدة خلال فترة عدم وجود سطوع شمسي. تكون الطاقة الشمسية متاحة في موقع الاستخدام و بالتالي فهي توفر كلفة النقل.

4.4.1. أسس التجفيف الشمسي للمحاصيل الزراعية:

يعني تجفيف المواد إزالة محتواها من الرطوبة أي إزالة الرطوبة من داخل المادة إلى المحيط الخارجي عن طريق سطح مادة التجفيف.

يعرض المنتج للشمس مباشرة في التجفيف الشمسي الطبيعي في الهواء الطلق، تزد الحرارة اللازمة لإزالة الرطوبة من الشمس، و بالإضافة إلى القليل من الهواء المحيط أو الريح، و بسبب الحمل الحراري الطبيعي تنتقل الحرارة و ينتشر بخار الماء، بينما في المجففات الشمسية ذات الحمل الحراري فإنّ تدفق الهواء المسخن مسبقاً بالطاقة الشمسية والمضاف بواسطة مصدر طاقة مساعدة تسمح له بالانتقال عبر المنتج و الذي يقدم الحرارة اللازمة لإزالة الرطوبة من الداخل إلى المحيط الخارجي.

إنّ تجفيف المنتج عملية معقدة من انتقال الحرارة و الكتلة التي تعتمد على متغيرات خارجية مثل:

- درجة الحرارة.
- الرطوبة.
- سرعة جريان الهواء.
- خواص المادة المراد تجفيفها.
- ميزات السطحية (خشونة السطوح).
- التركيب الكيميائي للمادة (سكرية، نشوية .. إلخ).
- بنية المادة الفيزيائية (المسامية، الكثافة، إلخ).
- حجم و شكل المنتج.

يختلف معدل حركة الرطوبة من المنتج إلى الهواء الخارجي من منتج لآخر و يعتمد أيضاً على المادة فيما إذا كانت ماصة للرطوبة أو بمقدرتها الاحتفاظ بالرطوبة أم لا .

يمكن تجفيف المواد غير الماصة للرطوبة إلى مستوى رطوبة صفري بينما المواد الماصة للرطوبة مثل أكثر المنتجات الغذائية فإنها ستحتفظ بمحتوى من الرطوبة المتبقية، و تتواجد هذه الرطوبة في المادة الماصة للرطوبة بسبب:

- الأوعية الشعرية المغلقة.
 - أو بسبب القوة السطحية.
 - أو تبقى الرطوبة غير المحصورة في المادة نفسها بسبب التوتر السطحي للماء.
- يوجد نسبة من السكر و النشاء في الطور السائل في أكثر المنتجات الزراعية، و الذي ينتقل أيضاً إلى السطح، ويزيد ذلك من اللزوجة و بالتالي يخفض تبخر رطوبة ضغط البخار السطحي، و يتم التجفيف إما بتجفيف الطبقة الرقيقة أو تجفيف الطبقات العميقة:

1) تجفيف الطبقات الرقيقة و الذي يتم في أكثر حالات الفواكه و الخضار: ينشر المنتج بطبقات رقيقة حيث يعرض كامل سطحه للهواء، و هذا الهواء المسخن يتحرك عبر المنتج.

2) تجفف أكثر الحبوب في الطبقة العميقة، و التي يمكن اعتبارها سلسلة من الطبقات الرقيقة، و تتغير درجة الحرارة والرطوبة من طبقة لأخرى .

الخواص الترموديناميكية للهواء الرطب التي تستخدم عامة في التجفيف:

- 1- ضغط البخار .
- 2-الرطوبة النسبية.
- 3-نسبة الرطوبة.
- 4-درجة الحرارة الجافة.
- 5-درجة حرارة نقطة الندى.
- 6-درجة الحرارة الرطبة.
- 7-الإنتالبي.
- 8- الحجم النوعي.

ترتبط هذه البارامترات فيما بينها و تؤثر على بعضها البعض.
يبين الجدول التالي درجات الحرارة وزمن التجفيف لعدد من المحصولات الزراعية الخاصة بالتجفيف الشمسي.

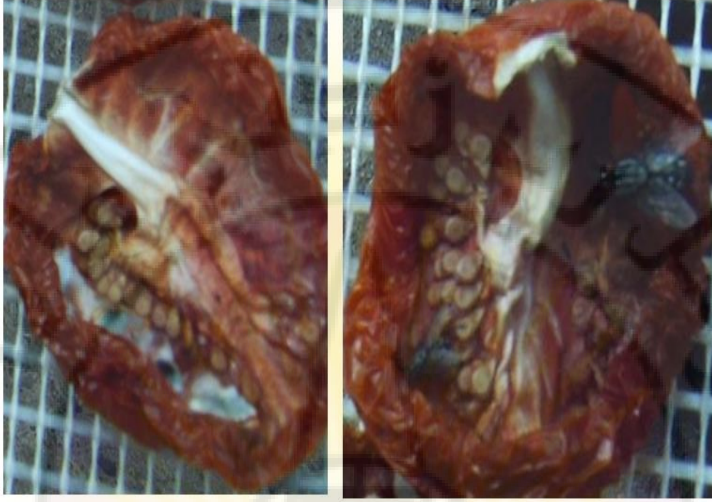
الجدول (4.4.1) درجات الحرارة وزمن التجفيف لعدد من المحاصيل الزراعية الخاصة بالتجفيف الشمسي

المنتج المراد تجفيفه	درجات الحرارة (مئوية)	زمن التجفيف (ساعة)
ملوخية	30	8
بصل	60	24-30
ثوم	50	36-40
بامية	60	48-60
بندورة	65	30-35
بازلاء	40	60-70
عنب	65	35-40
جزر	50	60-65
موز	60	48
بطاطا	60	12
خوخ	50	40
تين	50	14
بلح	60	24

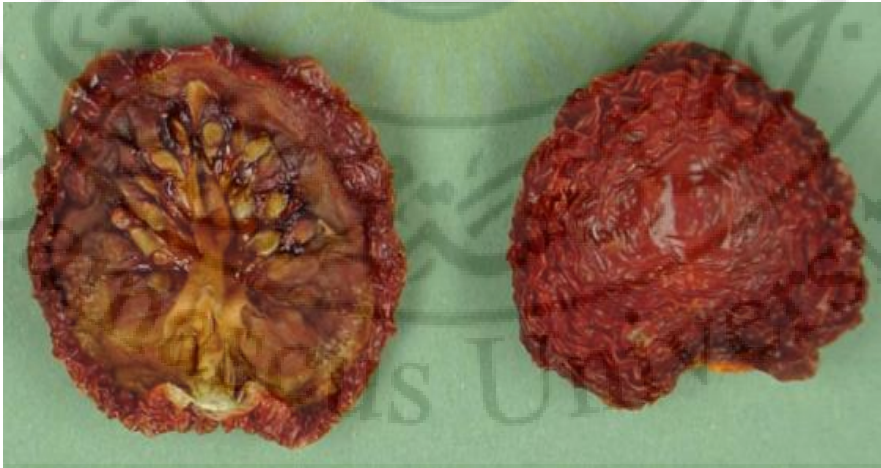
4.4.2. أنواع المجففات الشمسية:

الطريقة التقليدية لتجفيف المنتجات الزراعية في البلدان النامية هي نشر المادة على طبقة رقيقة تحت الشمس، و التجفيف الطبيعي لا يتضمن أي كلفة مادية عدا بعض العمال، لكن النتائج هي ذات جودة ضعيفة للمنتج بسبب عدم وجود تحكم بمعدل التجفيف، و الشروط غير الصحية، و الفساد. يبين الشكلان (4.4.1)، (4.4.2) مقارنة

بين تجفيف البندورة بالتجفيف الطبيعي الشمسي و بين تجفيف البندورة بالمجفف الشمسي المتحكم به.



الشكل (4.4.1) تجفيف البندورة بالتجفيف الشمسي الطبيعي



الشكل (4.4.2) تجفيف البندورة بالمجفف الشمسي

يجب أن يُصمم المجفف الشمسي بعناية مع إبقاء كل بارامترات التجفيف السابقة في الذهن لإعطاء أفضل تصميم فعّال للمجفف، و نظراً لوجود العديد من الخيارات في تصميم المجففات الشمسية فهناك تنوع كبير لها، و قد تم تصنيف هذه المجففات الشمسية بعدة طرق، لكن يمكن تصنيفها إلى ثلاث طرق من ناحية الأنماط التشغيلية و العملية:

1- المجففات الشمسية المباشرة أو المجففات من النوع الطبيعي

2- المجففات الشمسية غير المباشرة

3- المجففات الشمسية الهجينة أو المجففات من النوع القسري.

1.4.4.2. مجففات الحمل الطبيعي أو المجففات الشمسية المباشرة:

(Direct Type Drying)

يبدو أن هذه المجففات أكثر استخداماً في البلدان النامية نظراً لأنها لا تستخدم مروحة أو دافع هواءٍ يعمل بالطاقة الكهربائية، و هي منخفضة الكلفة أيضاً وسهلة التشغيل، و من مساوئ هذه المجففات هي:

1. التجفيف البطيء.

2. عدم وجود تحكم جيد بدرجة الحرارة و الرطوبة.

3. يمكن تجفيف كميات صغيرة.

4. تغير لون بعض المنتجات و طعمها بسبب التعرض المباشر للشمس.

تسخن المنتجات الغذائية بسبب الامتصاص المباشر للحرارة أو بسبب درجة الحرارة العالية ضمن الغلاف، و بالتالي تتبخر الرطوبة من المنتج و تخرج بواسطة الدوران الطبيعي للهواء، وهناك عدة تصاميم للمجففات من النوع المباشر، وقد طورت هذه المجففات بسبب توفر المواد المحلية اللازمة لتصنيعها لتجفيف منتج معين، و قد صنعت عدة مجففات و تم اختبارها، وسيتم هنا مناقشة المجفف ذا الحجرة (الكابين) البسيطة .

ويتألف من حجرة مجفف شمسية (Solar Cabinet Dryer) لتجفيف الخضار و الفواكه، و هي بسيطة التركيب و الكلفة و بدرجة حرارة عالية $[^{\circ}\text{C}] 80$ و مردودية عالية، كما تُخفض زمن التجفيف، حيث تسقط الأشعة الشمسية عبر حجرة التجفيف الشمسية و تُسخن الهواء الذي يمتص رطوبة المنتج مباشرة. و تعتمد حركة الهواء الساخن ضمن حجرة التجفيف على الحمل الطبيعي، أي يسخن الهواء فتتخفض كثافته فيتحرك نحو الأعلى مجففاً المنتجات المراد تجفيفها، و عندما يمتص الرطوبة و يبرد يتم طرحه إلى الوسط الخارجي.

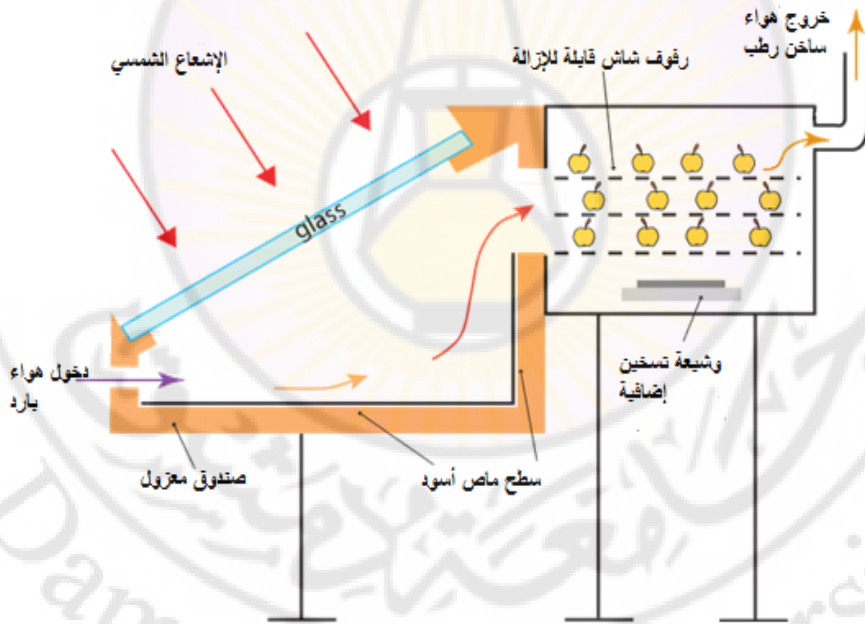
و يتألف المجفف الشمسي في شكله البسيط من صندوق خشبي (أو أي مادة) ذي عرض و طول معينين (ويكون الطول عادةً 3 أمثال العرض)، ويكون معزولاً من قاعدته و يفضّل عزله من الجانبين أيضاً و يُغطى بسطح شفاف، أما الأسطح الداخلية للصندوق فهي مطلاة بطلاء أسود، و يبقى المنتج الذي سيجفف في صوانٍ مصنوعة من قاعدة شبكية سلكية، و تدخل هذه الصواني المحملة بالمنتج عبر باب يمكن فتحه موجود في الطرف الخلفي من المجفف. يبين الشكل (4.4.3) المجفف الشمسي المباشر ذا الحجرة.



الشكل (4.4.3) المجفف الشمسي المباشر ذو الحمل الطبيعي

4.4.2.2. المجففات غير المباشرة (Indirect Type Drying) :

يتألف هذا المجفف من نفس الحجرة في المجففات المباشرة و لكن يوضع المنتج على رفوف مثقبة في حجرة أخرى ملحقة به كما يبينه الشكل (4.4.4)، يدخل الهواء الى المجفف عن طريق تشكل تيارات حمل هواء طبيعية نتيجة تسخين الشمس للهواء في الحجرة الأولى فتغير كثافته ليحل مكانه الهواء الأبرد من خارج المجمع، و يدخل الهواء الساخن إلى الحجرة الثانية من الأسفل و يلامس المنتج الموضوع على الصواني فيحمل جزءاً من رطوبة المادة فتزداد رطوبته النسبية، وبالتالي تنخفض الرطوبة النسبية للمادة، و يخرج الهواء الساخن الرطب عبر المدخنة.



الشكل (4.4.4) المجفف الشمسي غير المباشر

Psychrometric chart showing the cooling and dehumidification process of air. The chart plots dry-bulb temperature (t) on the x-axis and humidity ratio (W) on the y-axis. A saturation curve is shown on the left. Two states of air are marked: State 1 ($t_1 = 33^\circ\text{C}$, $W_1 = 0.011$) and State 2 ($t_2 = 25^\circ\text{C}$, $W_2 = 0.014$). A process line connects State 1 to State 2, with a wet-bulb temperature (t_w) of 21°C indicated. The humidity ratio at the dew point (dpt) is 19.5°C . The process is labeled with $\phi = 100\%$ at State 2 and $\phi_2 = 70\%$ at State 1. The enthalpy (h) is 61 kJ/kg at State 2.

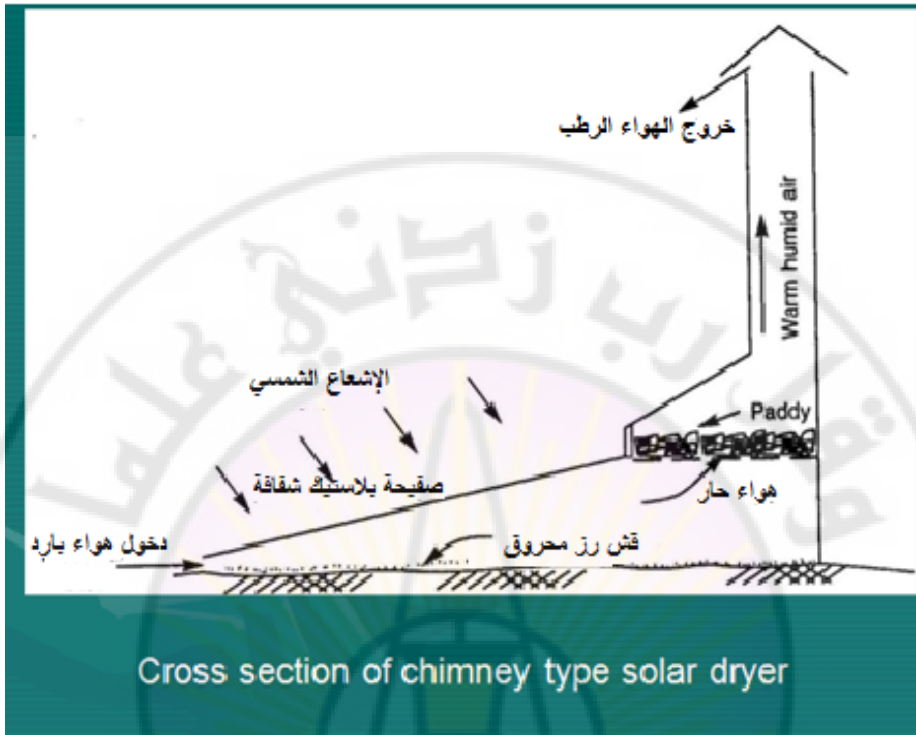
عيوب المجففات الشمسية: تَغَيّر الحرارة المستعملة طوال اليوم، فهي تكون منخفضة في أول النهار و تزداد بالتدريج حتى تصل ذروتها عند الظهيرة ثم تنخفض بعد ذلك بالتدريج لتتساوى بالليل مع درجات حرارة الجو السائد، و لذلك فإن التصميمات الحديثة للمجففات

الشمسية أخذت في الاعتبار وجود خزان حراري يمكن استعماله لحد ما أثناء الليل حتى يمكن استمرارية عملية التجفيف.

أحد أشهر أنواع هذه المجففات يسمى مجفف الأرز المبين في الشكل (4.4.6) و قد طُور من قبل إكسل في بانكوك، تايلند، و هو يتألف من لاقط شمسي هوائي بسيط، و حجرة تجفيف و مدخنة طويلة تستخدم لزيادة تأثير الحمل الحراري، و توضع أسلاك مغطاة برقائق شفافة من الـ PVC بسماكة 0.15 mm فوق الأرضية و تغطي بقش رز محروق يمتص الإشعاع الشمسي و يسخن الهواء الذي يجاوزه، يرتفع الهواء الساخن في هذا السخان الهوائي إلى حجرة التجفيف المطلية بمادة عاتمة مناسبة، و مادة التجفيف (الرز) تبقى على صينية شبكية من النايلون حيث يدخلها الهواء الساخن و المسخن عن طريق مسخنات الهواء من أسفلها و يرتفع نحو الأعلى و يخرج من المدخنة، و المدخنة الأسطوانية طويلة مصنوعة من إطار مغطى بواسطة الـ PVC الأسود لإبقاء الهواء الداخلي دافئاً، و هناك غطاء في أعلى المدخنة، حيث يُترك فراغاً بين أعلى المدخنة و الغطاء ليسمح للهواء الدافئ الرطب بالخروج و لحماية المنتج من المطر و المواد الغريبة الأخرى، يخلق ارتفاع المدخنة و الهواء الساخن بداخلها فرق ضغط بين أعلى و أسفل المدخنة و بالتالي يخلق حركة قسرية للهواء عبر فرشاة الرز باتجاه أعلى المدخنة، و بالرغم من أن هذا المجفف مصمم لتجفيف الرز الجاف فقط لكن يمكن استخدامه لتجفيف منتجات غذائية أو حبوب أخرى تحتاج إلى تجفيف بطيء و درجة حرارة منخفضة.

يعتمد معدل التجفيف على: عمق الفرشة و المحتوى الأولي لرطوبة المادة و شدة الإشعاع الشمسي و درجة الحرارة المحيطة و تصميم المجفف.

وجد بالخبرة أنه إذا بقيت المادة في المجفف بدون تلامس فعندها ستسخن المادة في الطبقة السفلى بشكل زائد، بينما ستبقى عند السطح بدون تجفيف، و بالتالي، فإنه يُوصى بتحريك المادة و تجفيفها على طبقات رقيقة .



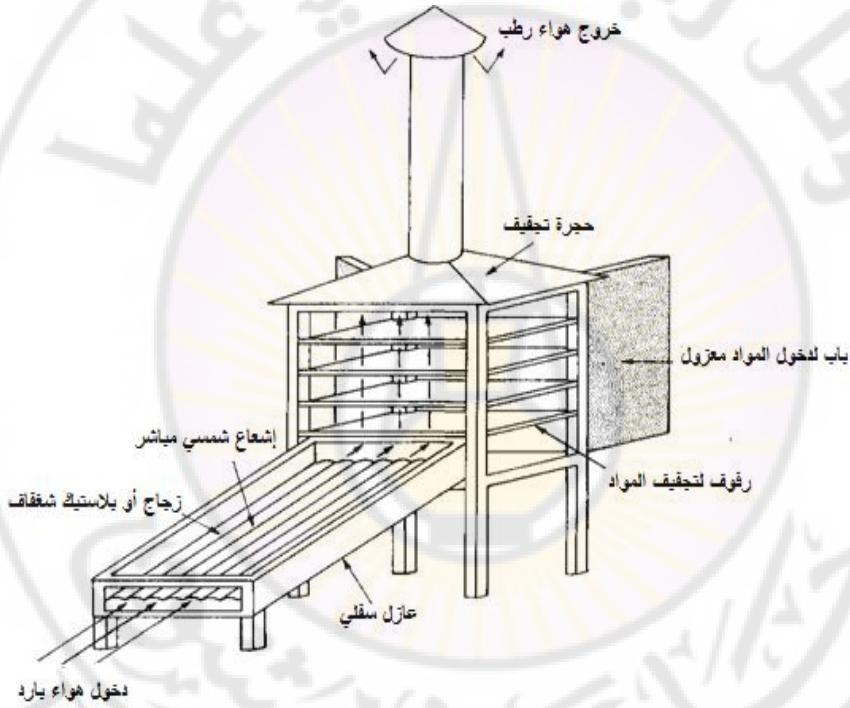
الشكل (4.4.6) مقطع عرضي لمجفف رز شمسي ذي مدخنة

4.4.2.3. المجففات الهجينة:

يُستخدم غالباً نظام التسخين المساعد، بسبب الطبيعة المتقطعة و الشدة المنخفضة للإشعاع الشمسي، تعرف مثل هذه الأنظمة التي تستخدم الطاقة الشمسية بالإضافة لمصدر الطاقة المساعدة بأنظمة التجفيف الشمسية المساعدة أو الهجينة .

المجفف الشمسي الهجين المبين في الشكل (4.4.7) هو من المجففات غير المباشرة، و يتكون من لاقط شمسي هوائي و مقصورة للتجفيف، و يعزل جسم المجفف و اللاقط تماماً حتى لا تتسرب الحرارة عن طريق التوصيل إلى الخارج. و يشتمل المجمع الشمسي على مواد ماصة للحرارة كسطح معدني أسود معرج حتى يمكن زيادة السطح المعرض

للحرارة. و بسبب أن السعة الحرارية للهواء قليلة، فيمكن زيادة السطح الماص بوضع زعانف معدنية تتصل بهذا السطح، مما يعمل على زيادة كفاءة المجفف و يغطي هذا السطح الأسود الماص بطبقة من البلاستيك المعامل ضد الأشعة فوق البنفسجية لضمان عدم نفاذها، و يعمل هذا الغطاء على ارتفاع درجة حرارة السطح الماص، و ذلك لمنع فقد الحرارة عن طريق الرياح (تيارات الحمل).



الشكل (4.4.7) مجفف شمسي هجين غير مباشر ذو مدخنة

و يوضع المنتج على رفوف مثقبة في المقصورة المجاورة للاقط، حيث يدخل الهواء المسخن باللاقط الشمسي إلى المقصورة من الأسفل ليلامس المنتج عبر الرفوف الشبكية، و تتم عملية إزالة الرطوبة من المنتج ليخرج الهواء الساخن الرطب عبر المدخنة. و

يستخدم سخان مساعد لإتمام عملية التجفيف في ظروف الطقس السيئة أو في غياب الإشعاع الشمسي.

يمكن تنشيط مرور تيارات الهواء داخل المجفف، و ذلك عن طريق مسارات علوية هوائية مرتفعة، و يؤدي ذلك إلى خلق فرق في الضغط بين الهواء الداخلي و الخارجي مما يدفع الهواء البارد داخل المجفف من الفتحة السفلية، الذي ترتفع درجة حرارته بعد مروره على السطح الماص الحراري فيرتفع و يمر من خلال المدخنة و هكذا.

و في بعض الأحيان عند ازدياد حمولة المجفف و لضرورة طرد الهواء المحمل بالرطوبة خارج المجفف فإنه يستعمل دافعات هوائية تدفع الهواء بسرعات مختلفة، الأمر الذي يؤدي إلى التحكم في قوة دفع الهواء المار على السطح الماص، و قد توضع شفاطات على فتحات الخروج العلوية عند استعمال التيارات الطبيعية لإمكان استعمالها لتنشيط حركة الهواء داخل المجفف.

تم تسجيل درجات حرارة في هذا المجفف وهو فارغ فبلغت حوالي 90°C ، والقياسات المجراة على هذا المجفف في العديد من البلدان مشجعة جداً، وقد خلصت إلى أنه يمكن تخفيض زمن التجفيف من النصف إلى الثلث مقارنة مع التجفيف الشمسي المباشر.

4.4.2.4. المجففات ذات الدوران القسري:

تكون حركة الهواء قسرية، أي يتم تدوير الهواء الساخن ضمن المجفف بواسطة منظومة مراوح يتم اختيارها بحسب كمية الهواء اللازمة لإتمام عملية التجفيف و سرعته المطلوبة، و الذي يعمل إما كهربائياً أو ميكانيكياً، و مثل هذه المجففات تكون أكثر فعالية و أسرع، و يمكن استخدامها من أجل تجفيف كميات كبيرة من المنتجات الزراعية، و يمكن استخدامها عند درجات حرارة منخفضة و مرتفعة أيضاً، ولتجفيف كميات كبيرة من المنتجات الزراعية. و هذا النوع يسمح بإمكانية عالية بالتحكم بعملية التجفيف و مواصفات المنتجات المجففة النهائية .

هناك نوع من المسخنات الشمسية للهواء، في مثل هذه المجففات الهجينة القسرية كما هو مبين بالشكل (4.4.8)، يتألف من سلة تجفيف و مروحة أو دافع هواء و وحدة تغذية

مساعدة بالطاقة و جهاز تخزين حراري. و يمكن إمداد الطاقة المساعدة إما بواسطة التسخين الكهربائي أو بواسطة حراقات الوقود أو الغاز أو الحرارة من جهاز التخزين الحراري.



الشكل (4.4.8) مجفف شمسي قسري

في حال لم تكن الطاقة اللازمة من أجل تجفيف المنتج كافية فيمكن إمدادها من جهاز التخزين الحراري لتزويد النظام بالطاقة اللازمة، و قد اقترحت أنظمة متعددة للتخزين ولكن النظام الأكثر تفضيلاً هو نظام التخزين ذو الفرشة الصخرية، و الذي يخزن الحرارة بشكل حرارة محسوسة، و يقوم بمهمتين أي كمخزن للحرارة و كمبادل حراري بآن واحد. و يتم شحن وحدة التخزين عندما يكون الإشعاع الشمسي في ذروته أو عند عدم الحاجة لعملية التجفيف، و توضع وحدة التخزين على التسلسل مع دائرة اللواقط الشمسية .

4.5. بارامترات هامة للتجفيف:

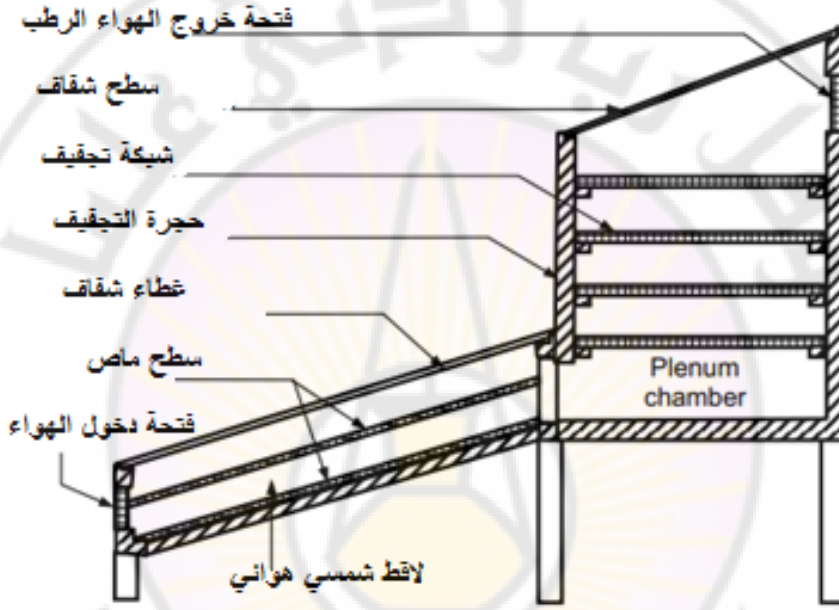
يتوقف نجاح عملية التجفيف باستعمال المجففات الشمسية على عدة عوامل أهمها:

- 1- درجة حرارة الجو و بالتالي درجة حرارة الهواء المجفف.
- 2- الرطوبة النسبية لهواء التجفيف.
- 3- سرعة هواء التجفيف.
- 4- نوعية المادة المطلوب تجفيفها و خاصة من ناحية محتواها من الرطوبة و تركيبها الكيميائي.
- 5- طور النضج الذي تكون فيه الثمار أو أجزاء النباتات المزمع تجفيفها.
- 6- المعاملة الآلية التي تسبق عملية التجفيف مثل حجم القطع أو الشرائح و سمكها، و هل جرى إزالة الطبقة السطحية لها بالبشر أو الكشط و ما إلى ذلك.
- 7- المعاملة الحرارية، و تعرض تلك الأجزاء النباتية لعملية السلق مثلاً قبل التجفيف، و هل أضيف لماء السلق أي مركب كيميائي كمشتقات الصوديوم أو فيتامين ج.
- 8- عملية الكبرتة و نسبة و مدة التعرض لغاز ثاني أكسيد الكبريت.

4.6. الدراسة الفيزيائية للتجفيف:

تتطوي عملية التجفيف على انتقال الماء من داخل المادة إلى سطحها، يليه إزالة الماء من السطح، الأمر الذي يتطلب كمية من الحرارة تساوي الحرارة الكامنة لتبخّر الماء. تأتي الحرارة من الهواء، في معظم الحالات، الذي يتم تسخينه بواسطة مجمعات الهواء بالطاقة الشمسية في حالة التجفيف الشمسي.

إذاً يجب أن نجد كمية الحرارة اللازمة لتبخّر الماء و معدل التجفيف المتوسط و كتلة الهواء اللازمة للتجفيف، و كمية الحرارة المضافة إلى الهواء، و مساحة المجمع ، إلخ. يبين الشكل (4.6.1) مقطعاً عرضياً لمجفف شمسي هجين.



الشكل (4.6.1) مقطع عرضي لمجفف شمسي هجين

تقدر الطاقة الكلية المطلوبة لعملية تجفيف كمية من الغذاء باستخدام معادلة توازن الطاقة لتبخّر الماء :

$$M_w h_{fg} = m_a C_p (T_1 - T_2) \quad (4.6.1)$$

حيث:

M_w [kg] : كمية الماء المتبخرة من مواد الغذاء.

m_a [kg] : كمية الهواء المجفف.

T_2, T_1 : درجة الحرارة الابتدائية و النهائية لهواء التجفيف.

C_p : السعة الحرارية عند ثبات الضغط . $[kJ / kg.K]$

h_{fg} : إنتالبي التبخر (الحرارة الكامنة للتبخر). $[kJ / kg]$

(1) للعثور على مقدار الرطوبة بالكيلوغرام و المراد إزالتها من المنتج (كتلة الماء المتبخرة) يتم حسابه باستخدام المعادلة التالية:

$$M_w = \frac{m_i (M_i - M_e)}{100 - M_e} \quad (4.6.2)$$

حيث:

m_i : الكتلة الأولية لمواد الغذاء. $[kg]$

M_e : محتوى الرطوبة التوازني (%) أسس التجفيف)

M_i : محتوى الرطوبة الأولي (%)

(2) لإيجاد كمية الحرارة اللازمة لتبخر الماء:

$$Q = (M_w \times h_{fg}) \quad (4.6.3)$$

(3) يمكن إيجاد الحرارة الكامنة للتبخر من المعادلة العامة:

$$h_{fg} = 4.186 \times 10^3 \times (597 - 0.56 T_{pr}) \quad (4.6.4)$$

T_{pr} : هي درجة حرارة المنتج

(4) لإيجاد كمية الحرارة اللازمة للتبخر = الكتلة * الحرارة الكامنة للتبخر
الطاقة الحرارية الكلية:

$$E = m_a \times (h_f - h_i) \times t_d \quad (4.6.5)$$

حيث:

h_f و h_i : هما المحتوى (الإنتالبي) النهائي و الأولي لهواء التجفيف $[kJ/kg]$

و t_d : هي فترة التجفيف. $[sec]$

(5) لإيجاد متوسط معدل التجفيف :

$$m_{dv} = \frac{M_w}{t_d} \quad (4.6.6)$$

(6) لإيجاد كتلة الهواء اللازمة للتجفيف:

$$m_a = \frac{m_{dv}}{(w_f - w_i)} \quad (4.6.7)$$

حيث:

w_f, w_i محتوى الرطوبة النهائي و الأولي على التوالي.

(7) لإيجاد معدل التدفق الحجمي : الكثافة/معدل تدفق الكتلة $V_a =$

(8) لإيجاد كمية الحرارة المضافة للهواء:

$$E = m_a \times (h_f - h_i) \times t_d \quad (4.6.8)$$

حيث:

m_a [kg/hr]: معدل تدفق كتلة الهواء.

(9) الطاقة الشمسية الكلية المجمعة (E_T) الواردة على المجمع الشمسي، يمكن حسابها كما في المعادلة (4.6.9) بينما الطاقة الحرارية الكلية (E) في [kJ] اللازمة لتبخير الماء يمكن الحصول عليها من المعادلة (4.6.10):

$$E_T = A_c \cdot I \quad (4.6.9)$$

$$E_T = m_a (h_f - h_i) t_d = \frac{A_c \cdot I \cdot \eta}{1000} \quad (4.6.10)$$

حيث:

I [W/m^2]: هو الإشعاع الشمسي الكلي على سطح أفقي خلال فترة التجفيف.

يمكن تقريب المحتوى الحراري للهواء الرطب في [J / kg] عند درجة الحرارة [°C] T باستخدام المعادلة (4.6.11):

$$h = 1006.9T + m_w (251231.0 + 1552.4T) \quad (4.6.11)$$

يعتمد أداء المجمع الشمسي، ممثلاً بدرجة حرارة الهواء الخارجة و كفاءته، على بارامترات مثل: المنطقة الجغرافية التي يتم فيها تشغيل المجمع، و البارامترات الداخلية للمجمع مثل السطح، و الشروط الخارجية مثل درجة الحرارة و سرعة الهواء المحيط. يمكن التعبير عن كفاءة اللاقط الشمسي من أجل الحالة المستقرة كما في المعادلة:

$$\eta = \frac{Q_{useful}}{A_c I} = F_R (\tau \alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{I_T} \quad (4.6.12)$$

حيث:

$Q_{use} [W]$: الطاقة المفيدة المعطاة للهواء من اللاقط .

F_R : هو معامل إزالة الحرارة من اللاقط الشمسي، و يحسب من المعادلة:

$$F_R = \frac{\dot{m} C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp \left(\frac{-A_c U_L F'}{\dot{m} C_p} \right) \right] \quad (4.6.13)$$

حيث:

$\dot{m}$: هي معدل تدفق الكتلة.

F' : معامل كفاءة اللاقط.

$C_p [J/kg.K]$: السعة الحرارية النوعية.

$A_c [m^2]$: مساحة اللاقط الشمسي.

يتم الحصول على توازن الطاقة على السطح الماص عن طريق مساواة إجمالي الحرارة المكتسبة مع إجمالي الحرارة المفقودة بواسطة السطح الماص الخاص بمجمع الطاقة الشمسية، لذلك :

$$I A_c = Q_u + Q_{cond} + Q_{conv} + Q_R + Q_{\rho} \quad (4.6.14)$$

حيث:

$I [W/m^2]$: معدل الإشعاع الشمسي الوارد على سطح أفقي،

إذا كان τ معامل النفوذية للزجاج العلوي و I_T هو الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على الماص فإنَّ الإشعاع الشمسي الكلي الوارد على مساحة المجمع يمكن أن يكتب كما يلي:

$$I A_c = \tau I_T A_c \quad (4.6.15)$$

حيث:

$Q_u [W]$: معدل الطاقة المفيدة المعطاة للهواء.

$Q_{cond} [W]$: معدل الضياع الحراري بالتوصيل من الماص.

$[W]Q_{conv}$: معدل الضياع الحراري بالحمل من الماص.
 $[W]Q_R$: معدل الضياع الناتج عن إعادة إشعاع الأمواج طويلة الموجة من الماص.

$[W]Q_p$: معدل الضياع الحراري بالانعكاس من الماص.
تجمع عادة مركبات الضياع الحراري الثلاثة Q_{cond} و Q_{conv} و Q_R في مصطلح واحد يسمى Q_L أي:

$$Q_L = Q_{cond.} + Q_{conv.} + Q_R = U_L A_c (T_c - T_a) \quad (4.6.16)$$

حيث:

$U_L [W/m^2.K]$: هو معامل نقل الحرارة الكلي من الماص.

$T_c [^\circ C]$: درجة حرارة ماص المجمع.

$T_a [^\circ C]$: درجة حرارة الهواء المحيط.

Q_p ضياع الطاقة بالانعكاس من السطح الماص، و تعطى كما يلي:

$$Q_p = \rho \tau I_T A_c \quad (4.6.17)$$

حيث:

ρ : هو معامل الانعكاس من السطح الماص.

τ : هو معامل النفوذية من الغطاء الشفاف.

$Q_u [W]$: هو معدل الطاقة المفيدة المجمعة بالهواء و التي يمكن تحديدها من المعادلة

(4.6.18) بالاعتماد على المعادلات (4.6.14) و (4.6.15) و (4.6.16) و

(4.6.17) كما يلي:

$$Q_u = (\tau \alpha) I_T A_c - Q_L \quad (4.18)$$

بتبديل قيمة Q_L من المعادلة (4.6.16) في المعادلة (4.6.18):

$$Q_u = (\tau \alpha) I_T A_c - U_L A_c (T_c - T_a) \quad (4.6.19)$$

لذلك تستخدم المعادلة (4.6.19) في تحديد معدل الطاقة المفيدة التي يتم جمعها عن طريق الهواء.

و بالتالي الطاقة المفيدة من أجل واحدة المساحة للمجمع:

$$q = (\tau\alpha) I_T - U_L (T_c - T_a) \quad (4.6.20)$$

إذا كان الهواء الساخن يغادر المجمع بنفس درجة حرارة المجمع فإن (heat gained) الطاقة المعطاة للهواء Q_g تعطى:

$$Q_g = \dot{m}_a C_{pa} (T_c - T_a) \quad (4.6.21)$$

حيث:

$\dot{m}_a$ [kg / s] : التدفق الكتلي للهواء المغادر المجفف.

C_{pa} [kJ / kg.K] : السعة الحرارية للهواء.

عامل انتزاع الحرارة F_R هو النسبة بين الطاقة المعطاة للهواء إلى الطاقة المفيدة المكتسبة من المجمع لذلك:

$$F_R = \frac{\dot{m}_a C_{pa} (T_c - T_a)}{(\tau\alpha) I_T A_c - U_L A_c (T_c - T_a)} \quad (4.6.22)$$

أو

$$Q_g = F_R (\tau\alpha) I_T A_c - F_R U_L A_c (T_c - T_a) \quad (4.6.23)$$

يعطى المردود الحراري للمجمع:

$$\eta_c = \frac{Q_g}{I_T A_c} \quad (4.6.24)$$

4.6.1. مراحل التجفيف:

يزيد معدل انتقال الكتلة داخلياً عنه خارجياً في المرحلة الأولى من التجفيف كما في الشكل (4.6.2)، فيصبح سطح المادة الرطبة مشبعاً دائماً بالماء مما يعني أن انتقال الكتلة داخلياً يزيد عما يمكن للسطح أن ينقله خارجياً

$$\dot{m}_w = \rho_a h_D (W_s - W_\infty) \quad (4.6.25)$$

حيث:

$\dot{m}_w$ [kg / s] : معدل الماء المتبخر من وحدة المساحات من السطح.

ρ_a [kg / m³] : كثافة الهواء.

h_D [m / s] : معامل انتقال الكتلة من السطح.

W_s [kg_{H₂O} / kg_{dry air}] : محتوى الرطوبة للهواء المجاور للسطح.

W_∞ [kg_{H₂O} / kg_{dry air}] : محتوى الرطوبة للهواء بعيداً عن السطح.

وباستمرار عملية التجفيف يقل محتوى الرطوبة عند السطح إلى محتوى الرطوبة الحرج W_{cr} أي القيمة التي يصبح عندها انتقال الكتلة داخل الجسم الرطب أقل منه خارجه .
و يوضح الشكل (4.6.2a) توزيع محتوى الرطوبة داخل الجسم الرطب و توزيع نسبة الرطوبة في الهواء المجاور للجسم خلال مراحل التجفيف .

تبدأ المرحلة الثانية للتجفيف التي يبينها الشكل (4.6.2b)، أي مرحلة التجفيف بمعدل متناقص عندما تقل قيمة محتوى الرطوبة عند السطح W_w عن قيمة محتوى الرطوبة الحرج W_{cr} ، عندئذ تكون نسبة الرطوبة للهواء المجاور للسطح W_w أقل من نسبة الرطوبة للتشبع W_s .

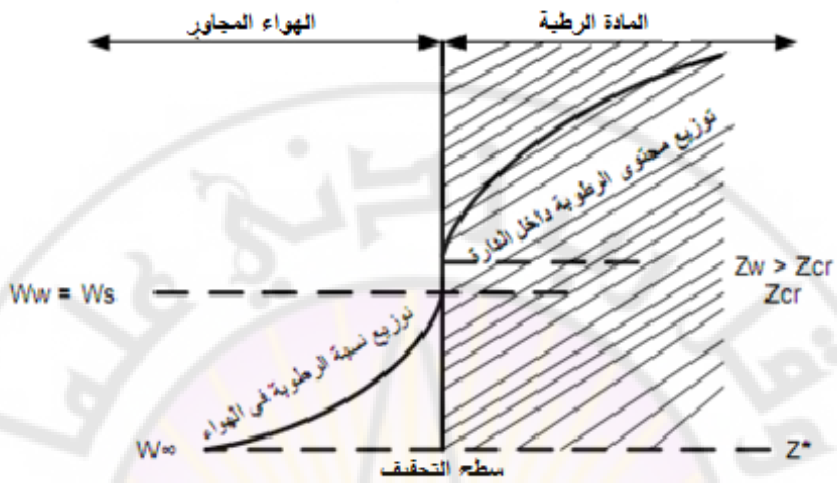
و يحسب معدل انتقال الكتلة من السطح إلى الهواء المجاور بالعلاقة التالية:

$$\dot{m}_w = \rho_a h_D (W_w - W_\infty) \quad (4.6.26)$$

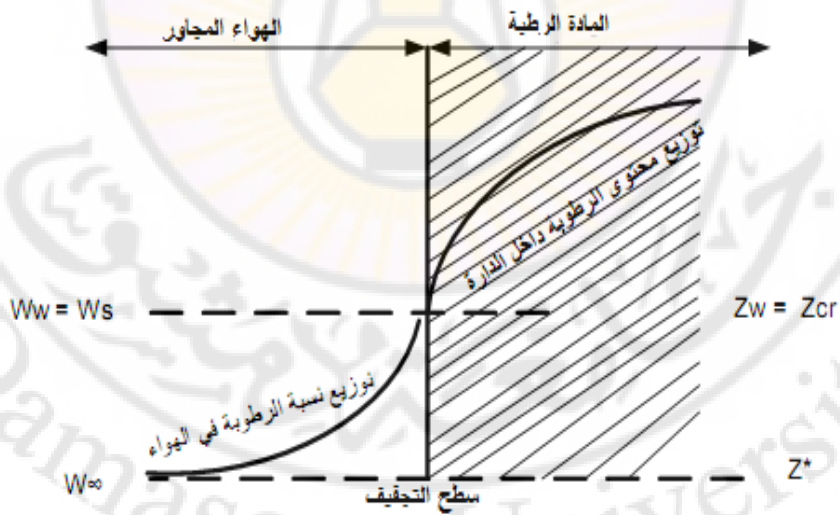
و يتضح من الشكل (4.6.2c) أن عملية التجفيف تتوقف عندما يصل محتوى الرطوبة للسطح إلى محتوى الرطوبة التعادلي، أي محتوى الرطوبة الذي يجعل نسبة الرطوبة للهواء المجاور للسطح مساوية W_∞ .

ويلاحظ عند تجفيف المحاصيل الزراعية أن المرحلة الأولى للتجفيف (مرحلة التجفيف بمعدل ثابت) قصيرة زمنياً بالمقارنة بالمرحلة الثانية مما يعني إمكانية إهمالها .
كما يلاحظ أيضاً في كثير من الأحيان أن محتوى الرطوبة الأولي للمادة المطلوب تجفيفها يقل عن محتوى الرطوبة الحرج، مما يجعل عملية التجفيف تبدأ مباشرة بالمرحلة الثانية دون المرور بمرحلة التجفيف بمعدل ثابت.

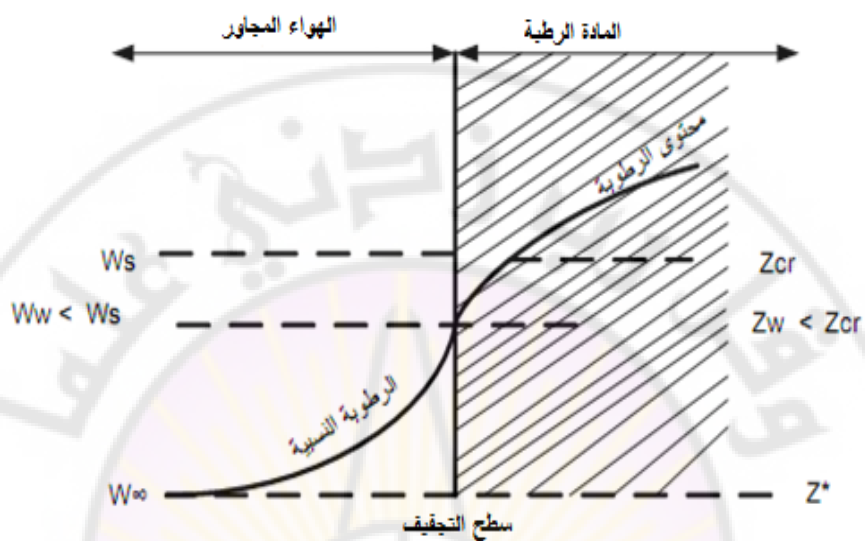
تجفيف المنتجات الزراعية



الشكل (4.6.2a) مرحلة التجفيف بمعدل ثابت (التحكم بانتقال الكتلة من السطح للهواء)



الشكل (4.6.2b) الانتقال من مرحلة التجفيف بمعدل ثابت إلى مرحلة التجفيف بمعدل متناقص



الشكل (4.6.2c) مرحلة التجفيف بمعدل متناقص

الفصل الخامس

البرك الشمسية المدخنة الشمسية



البرك الشمسية (Solar Pond)

5.1. البرك الشمسية

تُعد البرك الشمسية و المجمعات الشمسية من أنظمة الطاقة الشمسية الهامة جداً، التي تولد طاقة حرارية من الطاقة الشمسية. البرك الشمسية هي أجهزة بسيطة نسبياً تعمل بشكل مباشر، و تتطلب القليل من الصيانة، تحتاج إلى تنظيف للحفاظ على شفافية المياه، ولها عمر طويل .

5.1.1. مبدأ عمل البرك الشمسية:

1. البرك العادية :

من المعروف أنَّ المياه عندما تزداد درجة حرارتها ترتفع الى الأعلى نتيجة لانخفاض الكثافة، و عندما تصل الى السطح تفقد حرارتها بسبب الهواء العابر عن طريق الحمل أو التبخر، و بطبيعة الحال الماء البارد (الأثقل) يحل محل الساخن مما يشكل تيارات حمل تؤدي الى مزج المياه و توزيع الحرارة .

2. البرك الشمسية :

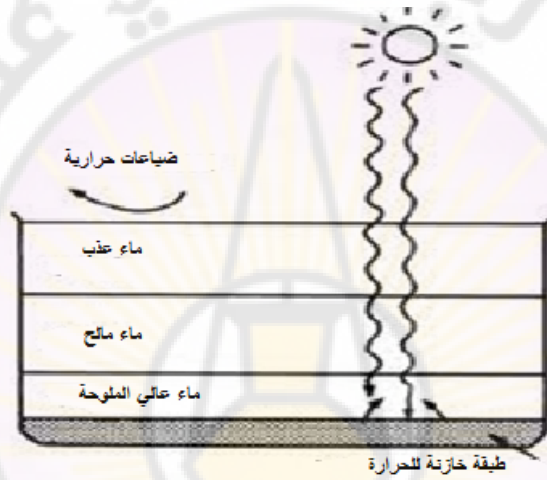
مبدأ البرك الشمسية هو منع تشكل تيارات الحمل هذه للحفاظ على كمية الحرارة التي تخزنها البحيرة.

إذابة ملح في الطبقة السفلى من البحيرة الشمسية يجعلها أعلى كثافة و بالتالي أكثر وزناً، ممّا يمنع تشكل تيارات الحمل في هذه الطبقة عندما تسخن، و بالتالي تبقى الحرارة المختزنة في هذه الطبقة دون أن تنتقل بالحمل الى أعلى البحيرة .
يخترق الإشعاع الشمسي المياه في الطبقات العليا واصلأ الى الطبقة السفلى ذات التركيز الملحي المرتفع.

يكون سطح البحيرة السفلي غالباً عبارة عن سطح أسود مطلي بمواد انتقائية تزيد من امتصاصية البحيرة للإشعاع الشمسي، كما في الشكل (5.1.1).

تكون الأملاح المستخدمة عادةً هي كلوريد المغنيزيوم أو كلوريد الصوديوم أو نترات الصوديوم. حيث يتم حل هذه الأملاح بالمياه العادية بتركيز 30% في القاع، و يتناقص تدريجياً مع الارتفاع حتى يكون مساوياً للصفر تقريباً عند السطح.

إذاً البركة الشمسية عبارة عن بركة مائية، يعمل سطحها على امتصاص طاقة حرارة الشمس الساقطة عليه و تخزينها كطاقة حرارية بنظام معين .



الشكل (5.1.1) البركة الشمسية

5.1.2. أنواع البرك الشمسية:

هناك نوعان من البرك الشمسية:

1. البرك اللاحملية (non-convecting ponds):

تقلل من فقدان الحرارة عن طريق منع الحمل الحراري الذي يحدث داخل البركة. و قد يستخدم غشاء انتقائي شفاف يمنع الحمل عن طريق الفصل الفيزيائي بين طبقات البحيرة، و يعتمد على تركيز الأملاح بالبركة و يخترن الطاقة الحرارية عن طريق إعاقه تيارات الحمل.

2. البرك الحملية (convecting ponds):

يكون ضياع الحرارة منها قليلاً، و يختزن الطاقة عن طريق إعاقه عملية التبخر عن طريق غطاء خارجي شفاف يُسدل على سطح البركة.

ينقسم النوع الأول إلى نموذجين: النموذج الأول يسمى بالبرك المتدرجة الملوحة (تدرج درجة تركيز الأملاح) salt gradient ponds ، و النموذج الآخر يسمى بالبرك الغشائية membrane ponds، حيث يوضع في النموذج الأخير عدد من الأغشية الرقيقة بمواصفات معينة على أعماق مختلفة بالبركة لمنع تيارات الحمل من توزيع الحرارة بكل المكون المائي للبركة، لإعاقه فقدان الحرارة بعد اكتسابها من طاقة الشمس الحرارية .

الذي يعنينا هنا هو النموذج المتدرج الملوحة، و هذا النموذج تمّ اكتشافه كظاهرة طبيعية في بعض المناطق، و تمت محاكاته و تصميمه صناعياً للاستفادة من الحرارة المختزنة في توليد الطاقة الكهربائية أو في بعض الأغراض الصناعية و خاصة الصناعات الغذائية، أو في تحلية مياه البحر في المناطق النائية التي تعاني نقصاً في المياه الصالحة للاستخدام الآدمي.



الشكل (5.1.2) بركة شمسية طبيعية

تم تسجيل تلك الظاهرة الطبيعية بمصر بمعرفة الدكتور Dave Grant مدير معهد المحيطات بساندى هوك بولاية نيوجرسي بالولايات المتحدة الأمريكية أثناء عمله بمشروعات تربية الأحياء المائية بمنطقة الشرق الأوسط عام 1980، حيث اكتشف بركة ملحية عمقها (4.9m) و هي المبنية في الشكل (5.1.2)، شرق شبه جزيرة سيناء قرب شاطئ خليج العقبة، تكونت مياهها بالتسرب من خلال حاجز حصوي حجري طبيعي يفصلها عن مياه الخليج. و تركزت الأملاح بها بالتبخر، حيث يفوق معدل التبخر معدل التسرب بقليل لوجود البركة في مناخ شبه قاري تسطع الشمس فيه معظم أيام العام.

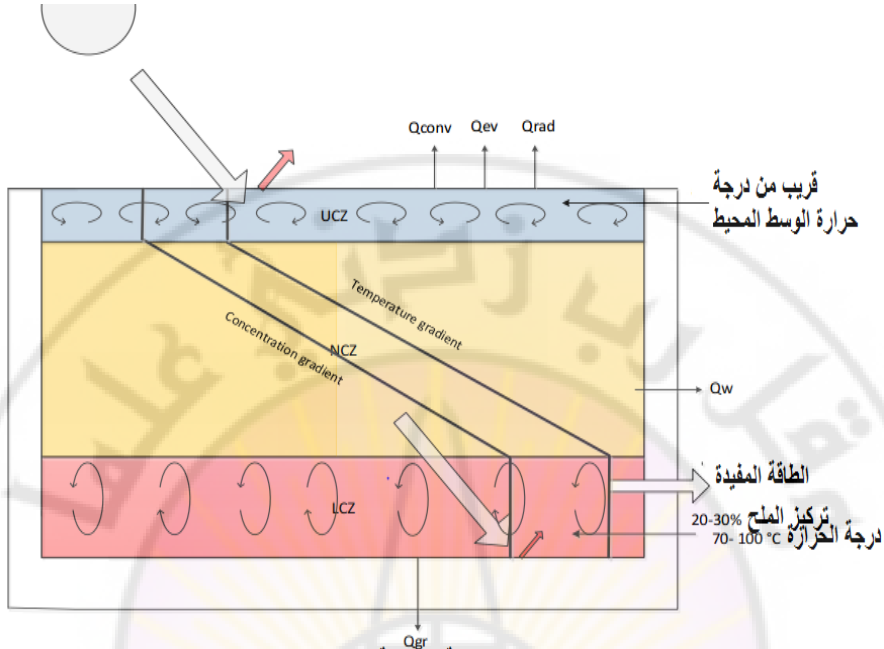
وجد "Grant" أن درجة حرارة الماء بسطح البركة هي 20°C و هي أقل قليلاً من درجة حرارة مياه الخليج القريبة، و أن درجة تركيز الأملاح بمياه السطح هي 80 جزءاً في المليون - أي تساوي ضعف درجة تركيز الأملاح في مياه المحيطات، كما لاحظ "Grant" أن منطقة الطبقة السطحية التي يصل عمقها إلى حوالي متر من سطح البركة، تفقد حرارتها تدريجياً مع بداية المساء و غروب الشمس إلى أن تتساوى حرارتها مع درجة حرارة جو الصحراء البارد المحيط بها ليلاً، و لكنه لاحظ أيضاً أن تلك المنطقة التي نقلت حرارة الشمس نهاراً للمنطقة التي تحتها لا تنتقل إليها حرارة الطبقة التي تحتها حتى مع انخفاض حرارة الجو ليلاً، وذلك نظراً لتركيز الأملاح العالي بها الذي يؤدي إلى زيادة كثافتها، فيجعلها تحتزن الحرارة التي اكتسبتها و لا تفقدها بالتوصيل أو بتيارات الحمل للطبقة السطحية التي تعلوها. و سجل "Grant" درجة حرارة تلك الطبقة السفلية التي تبدأ من قاع البركة، فكانت 60°C طوال اليوم نهاراً وليلاً، و كانت درجة تركيز الأملاح بها 180 جزءاً في المليون، مما يعني أن تلك الطبقة قادرة على تخزين الحرارة والاحتفاظ بها ليلاً و نهاراً و صيفاً و شتاءً، و أن الطبقة التي تعلوها تعمل كموصل لحرارة الشمس لها نهاراً و كعازل لها ليلاً، كما تعمل على تغذيتها بالأملاح الهابطة منها بفعل الجاذبية و خاصة مع زيادة تركيز الأملاح بها بالتبخر. و في وقت معاصر لملاحظات "Grant" أنشأ علماء الكيان الصهيوني المهتمون بالطاقة الشمسية بركة شمسية تجريبية بالقرب من خليج العقبة بميناء إيلات، مساحتها 1000m^2 لتنفيذ مشروع بركة شمسية بمساحة 10000m^2 لاستخدام طاقتها الحرارية في تحلية مياه الخليج .

5.1.3. الفكرة الأساسية للبركة الشمسية:

تتلخص الفكرة الأساسية للبركة الشمسية المبينة في الشكل (5.1.3)، في أنها بركة مبطنة الجوانب و القاع بمادة قاتمة اللون تتميز بالقدرة على امتصاص أكبر قدر من حرارة الشمس، و في نفس الوقت فهي تعمل على عزل ماء البركة لمنع تسربه إلى المياه الجوفية إن وجدت، ثم يتم ملؤها بمحلول ملحي ثقّل درجة تركيز أملاحه تدريجياً من قاع البركة إلى سطحها، بحيث يمكن تقسيم الجسم المائي بالبركة تبعاً لتدرج درجة تركيز الأملاح إلى ثلاث طبقات كما هو موضح بالشكل (5.1.4):



الشكل (5.1.3) طبقات البركة الشمسية



- ١- المنطقة السطحية التي يتم ضياع الحرارة منها بالحمل والإشعاع والتبخر
- ٢- منطقة اللاحمل يتزايد فيها الملح ودرجة الحرارة تدريجياً نحو الأسفل،
- ٣- منطقة الحمل وهي المنطقة الحارة وتركيز الملح الأعلى فيها

الشكل (5.1.4) التدرج الملحي في البركة الشمسية

1- منطقة الحمل العليا (UCZ) Upper Convective Zone :

تكون هذه الطبقة أقل سمكاً وأقل ملوحة، وتعمل بكفاءة على امتصاص حرارة الشمس ونقلها إلى منطقة الطبقة الوسطى، وهي طبقة المياه العذبة في الجزء العلوي من البركة. يتم تغذية هذه المنطقة بالمياه العذبة للحفاظ على كثافتها بالقرب من كثافة المياه العذبة وتجديد المياه المفقودة بسبب التبخر.

2- منطقة اللاحمل: (منطقة التدرج الملحي) Non-Convective Zone (NCZ)

هذه الطبقة هي الأكبر سمكاً من الطبقتين الأخريين، وتخلو تقريباً من تيارات الحمل، طبقة NCZ هي المفتاح الوظيفي لبركة الطاقة الشمسية، وتزداد فيها درجة تركيز الأملاح وتزداد كثافة محاليلها تدريجياً نحو LCZ وتزداد أيضاً درجة الحرارة في هذه

المنطقة مع زيادة العمق، وتعمل على نقل معظم حرارة الشمس إلى الطبقة السفلية بالتوصيل، يُعد تدرج الكثافة في NCZ مهماً للغاية للحفاظ على الطاقة المخزنة.

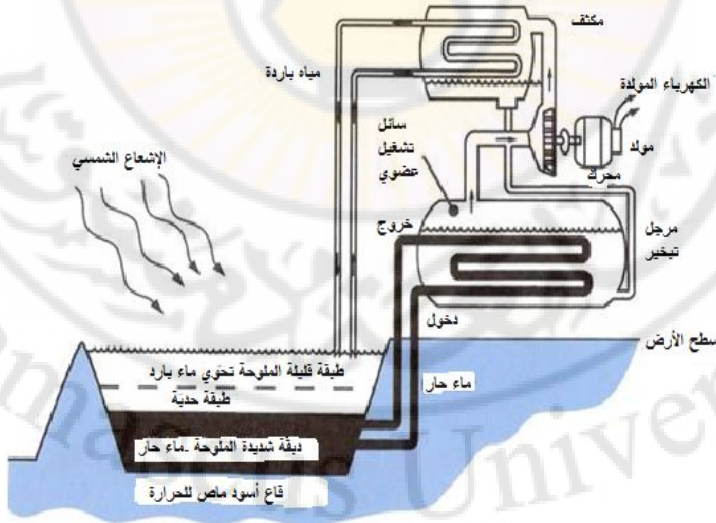
3-طبقة الحمل السفلى (LCZ) Lower Convective Zone:

هي الطبقة السفلية و الأكثر تركيزاً في الأملاح و الأعلى كثافة من الطبقات الأخرى. يتم امتصاص جزء كبير من الطاقة الشمسية و تخزينه في هذه المنطقة السفلية حيث تتم عملية جمع و تخزين الحرارة في LCZ لأن الماء غير شفاف للإشعاع تحت الأحمر حتى تصل درجة حرارتها إلى حوالي 95°C فتحتفظ بها نظراً لكثافتها العالية. و تسمى أيضاً منطقة التخزين الحراري (HSZ).

5.1.4. تطبيقات البرك الشمسية:

هناك العديد من التطبيقات التي يستفاد فيها من الحرارة الناتجة عن البرك الشمسية، نذكر من هذه التطبيقات:

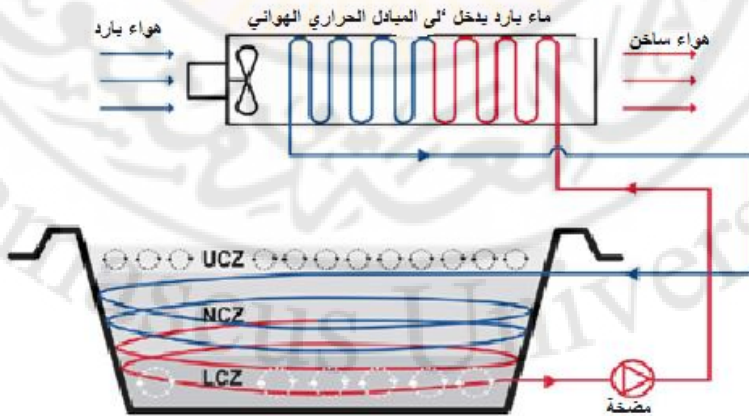
1. العمليات الحرارية لتوليد الكهرباء :



الشكل (5.1.5) توليد الكهرباء من البرك الشمسية عن طريق دورة رانكين العضوية

لتحويل الطاقة الحرارية المخزنة إلى طاقة كهربائية يتم سحب المحلول الساخن منها و ضخه إلى مبادل حراري موضوع بمرجل بخار، كما في الشكل (5.1.5) فيه سائل عضوي سريع الغليان و التبخر $[50 - 60^{\circ}\text{C}]$ ، فيتحول السائل إلى الحالة الغازية منتجاً ضغطاً عالياً داخل المرجل، يعمل على إدارة توربين متصل بالمولد الذي يولد القدرة الكهربائية المطلوبة. ويلاحظ أنه يتم سحب المياه الباردة من سطح البركة في دورة مغلقة مع مكثف ليعمل على تكثيف بخار السائل العضوي في دورة مغلقة مع مرجل البخار أيضاً، كما أن المحلول الملحي الساخن الذي يتم سحبه من الطبقة السفلية بالبركة ثم ضخه في المبادل الحراري يعود في دورة مغلقة أيضاً إلى نفس الطبقة بالبركة، أي لا يحدث أي فقد تقريباً للمواد المستعملة بنظام البركة الشمسية التي تُستخدم طاقتها الحرارية في توليد الكهرباء. و تُعرف دورة توليد الكهرباء في هذا النظام بدورة رانكين العضوية، تتميزاً لها من دورة رانكين التقليدية بمحطات توليد الكهرباء البخارية التي تستخدم فيها طاقة الوقود الأحفوري الحرارية، لتحويل الماء إلى بخار بضغط عالٍ لإدارة التوربينات المتصلة بمولدات الكهرباء. و يمكن عملياً بالتكنولوجيات المتاحة حالياً تنفيذ محطات لتوليد الكهرباء بحرارة البرك الشمسية بقدرة 10 MW بدورة رانكين العضوية.

2. دارات التدفئة والتبريد الحرارية :



الشكل (5.1.6) بركة شمسية لتوليد حرارة تستخدم في التدفئة والتبريد

يبين الشكل (5.1.6) إحدى الطرق للاستفادة من البركة الشمسية في تسخين الهواء: حيث توصل البركة الشمسية إلى مبادل حراري بحيث يمر الهواء البارد ليسخن بالمبادل الحراري عن طريق الماء الساخن المأخوذ من أسفل الطبقة السفلية الخازنة في البركة الشمسية ليعود بعد أن يفقد حرارته إلى القسم العلوي من الطبقة السطحية من البركة الشمسية. الهواء الذي تم تسخينه يستخدم لأغراض التدفئة أو لأغراض أخرى.

3. تجفيف الفواكه والخضروات والحبوب:

يستخدم نفس الشكل (5.1.6) لتسخين الهواء اللازم لعملية التجفيف.

4. عمليات تحلية المياه:

جرت محاولة لتحسين إنتاجية المقطرات الشمسية من خلال ربطها مع بركة صغيرة للطاقة الشمسية، وكان الربط بينهما على التسلسل. وقد ثبت أن العائد الاقتصادي من استخدام نظام البرك الشمسية كمصدر من مصادر الطاقة هو عائد مؤكد ومجدٍ، وخاصة إذا تم ربط القدرة الكهربائية المنتجة في نظام متكامل مع وحدة لتحلية مياه البحر، لكي تتم الاستفادة من الأملاح الناتجة كنفائات من وحدة التحلية لتغذية البرك الشمسية، و يتم ذلك في كثير من البلدان مثل السعودية وليبيا.

5. ربط البرك الشمسية بالملاحات و إنتاج الملح:

يمكن تعظيم العائد الاقتصادي من البرك الشمسية إذا تم إنشاؤها كملحقات بالملاحات الشمسية، فيتم استخدام السائل المر Bittern - في إنشاء البرك الشمسية و هو سائل ملحي يتم صرفه كنفائات من الملاحات الشمسية بعد ترسب ملح كلوريد الصوديوم و حصده، تعطي البرك الشمسية بالمقابل طاقة كهربائية و حرارية يمكن أن تستخدمها الملاحات الشمسية في معالجة ملح كلوريد الصوديوم و تجفيفه، كما يمكن ربط القدرة الكهربائية المولدة بنظام البرك الشمسية بشبكة الكهرباء المحلية.

نتيجة لما سبق يمكن القول: طالما يوجد الملح رخيصاً أو دون ثمن كنفائات مع توفر سطوع الشمس معظم أيام السنة و توفر المناخ المناسب و الأرض المستوية بتكلفة

معقولة، فسوف تعطي البرك الشمسية طاقة نظيفة و متجددة و مستدامة و جديرة بمنافسة باقي مصادر الطاقة المتجددة الأخرى و مصادر الطاقة التقليدية أيضاً في حدود التكنولوجيات المتاحة التي تتطور حالياً و بمعدلات سريعة.

5.1.5. ميزات وسلبيات البرك الشمسية:

1. ميزات البرك الشمسية :

- 1-تكاليف الاستثمار المنخفضة.
- 2-التخزين الحراري: تتميز البرك الشمسية كمصدر للطاقة المتجددة عن باقي تكنولوجيات الطاقة الشمسية بقدرتها الذاتية الطبيعية built-in على تخزين الطاقة الحرارية ليلاً و نهاراً و صيفاً و شتاءً.
- 3-استثمار كامل الإشعاع الكلي (المنتشر و المباشر).
- 4 -الاستفادة من السطوح الكبيرة في توليد الطاقة.
- 5-تجنب تنظيف الأسطح المكلف المقابلة للمركبات و المجمعات في المناطق المغبرة.

2. سلبيات البرك الشمسية :

- 1-تحتاج في بداية إنشائها إلى عدد من الأسابيع يتوقف على مساحتها و طبيعة موقعها الجغرافي لكي تصل درجة الحرارة في منطقة الطبقة السفلية القريبة من قاعها إلى حالة الاتزان و الثبات الحراري .
- 2-لاستمرار عمل البركة الشمسية بأعلى كفاءة على مدار العام يجب ألا يتعدى متوسط سحب المحلول الملحي المركز الساخن منها قدراً معيناً يكفي لتوليد قدرة كهربائية حتى [KW] 570 فقط، لكي تسترجع الطبقة السفلية بالبركة الشمسية ما فقدته من حرارة وتستعيد اتزانها الحراري مرة أخرى و هذا لا يعني عدم إمكان إنتاج قدرات أعلى من ذلك، و لكن سوف يتم التشغيل في هذه الحالة ساعات قليلة يومياً، لكي نعطي وقتاً كافياً في ساعات النهار حتى تسترجع الطبقة السفلية بالبركة الشمسية ما فقدته من حرارة و تستعيد اتزانها الحراري مرة أخرى، و ينشغل الباحثون بآماكن كثيرة بالعالم بهذا الأمر لبحث كيفية

تصميم برك شمسية على المستوى التجاري قادرة على توليد كهرباء بقدرات عالية حتى 10[MW].

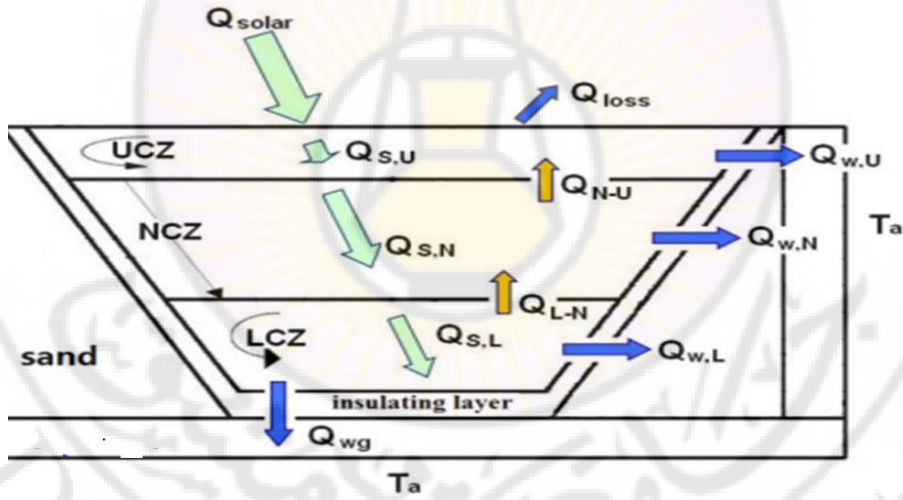
و يعتبر الكيان الصهيوني الرائد في تكنولوجيا البرك الشمسية، حيث سبق العالم في هذا الشأن، و بدأ العمل البحثي والتجريبي في هذا المجال عام 1958. و في عام 1975 أعلن اعتبار مشروعات البرك الشمسية مشروعاً قومياً طموحاً، حيث نال أحد تلك المشروعات التي تم تنفيذها شهرة عالمية كبيرة عندما أنشئت بركة شمسية عام 1977 على مساحة 7000 m^2 على شاطئ البحر الميت لتوليد كهرباء بقدرة 150 KW ، و انتهى هذا المشروع بنجاح عام 1980، و مازال يعمل هذا المشروع حتى الآن. و شجع هذا النجاح الكيان الصهيوني على البدء في مشروع إنشاء بركة شمسية أكبر على مساحة 1 Km^2 ، تم الانتهاء منه عام 1986 لتوليد كهرباء بقدرة 5 MW - و استمر تشغيل هذا المشروع بنجاح حتى عام 1988 ثم توقف بعد ذلك لأسباب اقتصادية. و قبل أن يتوقف وضع خطة طموحة لإنشاء العديد من البرك الشمسية على البحر الميت و على خليج العقبة بالقرب من ميناء إيلات و بصحراء النقب لتوليد كهرباء بقدرات 5 MW و أكبر، لتعطي كل البرك الشمسية قدرة إجمالية قدرها 2000 MW تساوي في ذلك الوقت القدرة الإجمالية المركبة لكل محطات توليد الكهرباء بالكيان الصهيوني. و لكن توقفت تلك الخطة الطموحة بعد توقف أول بركة شمسية بقدرة 5 MW بسبب مشكلة ارتفاع تكلفة تشغيل و صيانة مشروعات البرك الشمسية .

و لغرض المقارنة يمكن القول: إنَّ البرك الشمسية كمصدر من مصادر الطاقة أقل في التكلفة الاستثمارية بكثير من باقي تكنولوجيات الطاقة الشمسية الأخرى سواء كانت حرارية أو كهروضوئية، فضلاً عن أن البرك الشمسية تتميز بأنها تعمل في غياب الشمس ليلاً وتعمل صيفاً وشتاءً بكفاءة منتظمة تقريباً حتى و إن غطى سطحها طبقة رقيقة من الجليد، حيث يمتلك نظام البركة الشمسية قدرة ذاتية على الاحتفاظ بكمية الحرارة المختزنة ثابتة تقريباً لفترات طويلة. تتميز الكهرباء المولدة بنظام البرك الشمسية باستقرار الجهد و التردد، على خلاف الكهرباء المولدة بنظام تكنولوجيا طاقة الرياح مثلاً التي يعيبها عدم استقرار الجهد والتردد، و يلزم لعلاج تلك المشكلة عدد كبير من البطاريات أو من

المكثفات فائقة السعة لتخزين طاقة كهربائية مناسبة لتغذية شبكة الجهد في حالة سكون الرياح أو انخفاض سرعتها أو تغيير اتجاهها، مما يؤدي إلى خفض درجة الاعتماد عليها، و يرفع في المقابل من درجة الاعتماد على نظام البرك الشمسية كمصدر من مصادر الطاقة.

5.1.6. تحليل أداء تخزين الحرارة:

يتم جمع الطاقة الشمسية عن طريق البركة الشمسية، تصل الطاقة الشمسية إلى البركة من أشعة الشمس، و يبقى الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى قاع البركة محاصراً و يُخزن هناك، ثمّ يتم سحب الطاقة الحرارية المفيدة من أسفل الحوض الشمسي على شكل ماء ساخن عن طريق مبادل حراري. يبين الشكل (5.1.7) مخطط توازن الطاقة في البرك الشمسية.



الشكل (5.1.7) توازن الطاقة في البرك الشمسية

1. معادلة توازن الطاقة لـ HSZ :

يمكن كتابة معادلة توازن الطاقة لطبقة التخزين الحراري (الطبقة السفلى) HSZ للبرك الشمسية (يمكن دمج البركة مع اللواقط الشمسية المسطحة للحصول على أعلى

درجة حرارة في طبقة التخزين الحراري بغية الحصول على ماء حار في معظم الأوقات (كما يلي:

$$Q_{HSZ} = Q_{HSZ,solar} - Q_{bt} - Q_{up} - Q_{sw} \quad (5.1.1)$$

حيث:

Q_{HSZ} : كمية الحرارة المخزنة في HSZ .

$Q_{HSZ,solar}$: كمية الإشعاع الشمسي التي تدخل HSZ و التي تنتقل من NCZ الطبقة الوسطى بعد تخفيف الإشعاع الشمسي في طبقة NCZ .

Q_{bt} : الحرارة المفقودة من قاع البركة.

Q_{up} : الحرارة المفقودة من HSZ إلى NCZ ،

Q_{sw} : الحرارة المفقودة من الجدران الجانبية.

2. معادلة توازن الطاقة لـ NCZ:

و ينتقل الإشعاع الشمسي الوارد إلى سطح المنطقة الوسطى (NCZ)، و الذي هو جزء من الإشعاع الشمسي الذي يقع على سطح البركة، و الذي ينتقل من المنطقة العليا (UCZ). و ينعكس جزء صغير من الإشعاع الشمسي الوارد على طبقة NCZ من طبقة NCZ إلى طبقة UCZ . يزيد الجزء المنعكس من الإشعاع الشمسي الوارد من كفاءة طبقة UCZ. ينتقل جزء من الإشعاع الشمسي الوارد إلى طبقة HSZ في حين يتم امتصاص جزء من الإشعاع الشمسي الوارد من قبل طبقة NCZ . يمكننا كتابة توازن الطاقة لطبقة NCZ على الشكل:

$$Q_{NCZ} = Q_{NCZ,solar} + Q_{down} - Q_{up} - Q_{sw} \quad (5.1.2)$$

حيث:

Q_{NCZ} : كمية الطاقة الحرارية المخزنة في NCZ .

$Q_{NCZ,solar}$: كمية الإشعاع الشمسي التي تدخل NCZ و التي تنتقل من UCZ بعد

توهين (إضعاف) الإشعاع الشمسي الوارد في UCZ .

Q_{down} : الحرارة المنقولة من قاع البركة.

Q_{up} : الحرارة المنقولة من NCZ إلى المنطقة العلوية.

Q_{sw} : الحرارة المفقودة من الجدران الجانبية.

3. معادلة توازن الطاقة لـ UCZ :

يتم نقل جزء من الإشعاع الشمسي الوارد من سطح الطبقة العليا UCZ إلى الهواء، و ينتقل جزء آخر من الإشعاع الشمسي الوارد من UCZ إلى NCZ و يتم امتصاص بقية الإشعاع الشمسي الوارد في المنطقة. يمكننا كتابة معادلة توازن الطاقة لـ UCZ على النحو التالي:

$$Q_{UCZ} = Q_{UCZ, solar} + Q_{down} - Q_{up} - Q_{sw} \quad (5.1.3)$$

حيث:

Q_{UCZ} : الطاقة المخزنة بالحرارة في UCZ .

$Q_{UCZ, solar}$: كمية الإشعاع الشمسي الذي يدخل UCZ من سطح البركة.

تُعطى كفاءة الطاقة للبركة الشمسية على النحو التالي:

$$\eta = \frac{Q_{storege}}{Q_{solar}} \quad (5.1.4)$$

حيث:

$Q_{storege}$: كمية الطاقة الحرارية المخزنة الصافية في البركة الشمسية،

Q_{solar} : كمية الطاقة الشمسية التي تصل إلى سطح البركة.

المدخنة الشمسية (Solar Chimney)

5.2. المدخنة الشمسية

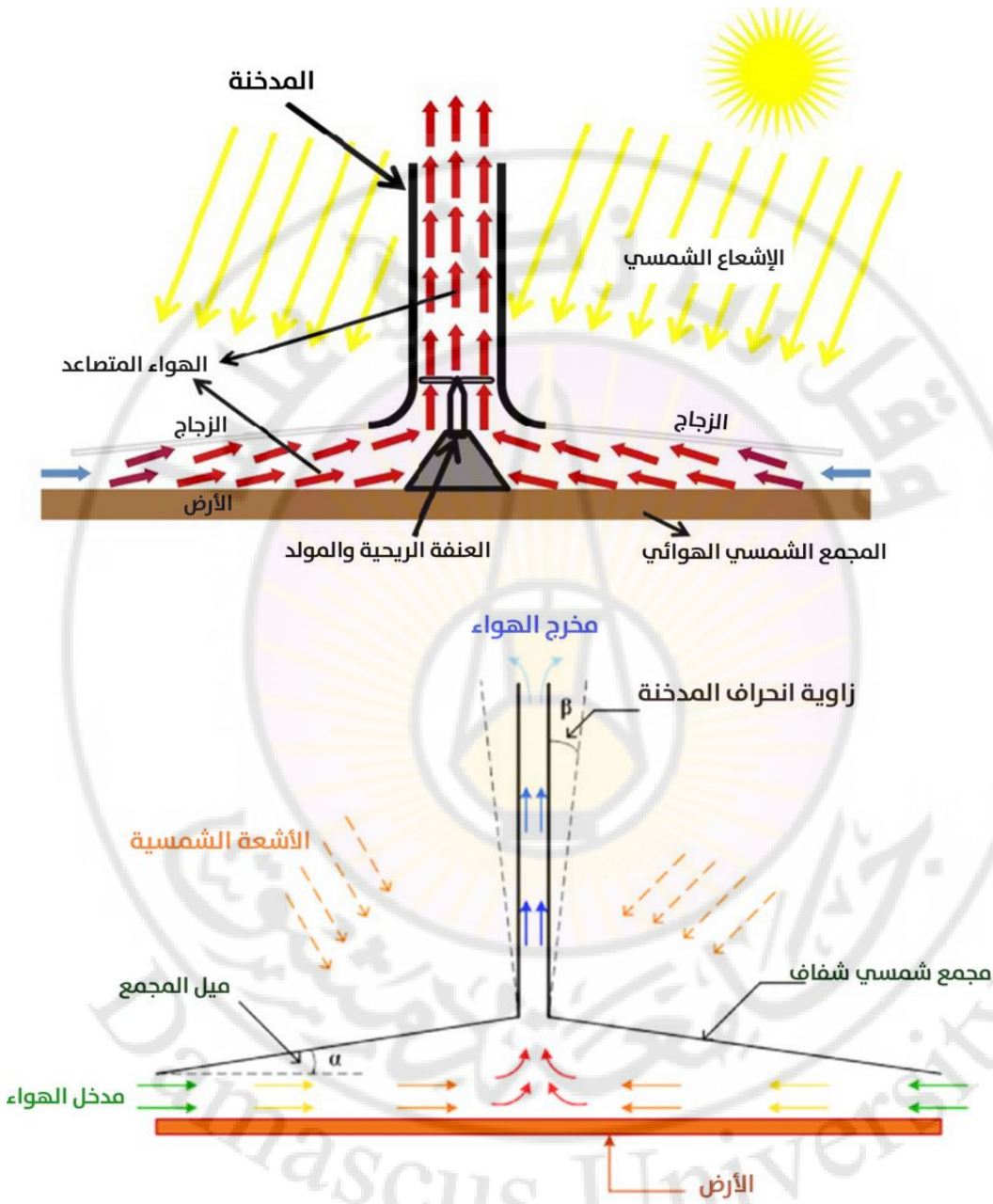
5.2.1. المقدمة:

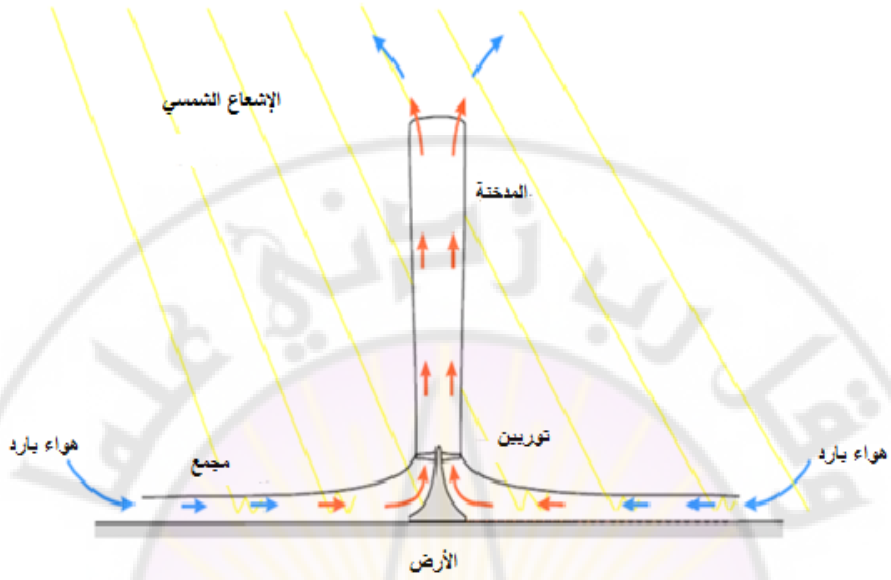
لجأ باحثون في البلدان النامية في الآونة الأخيرة إلى مصادر الطاقة المتجددة النظيفة و الرخيصة و "الخضراء" لتغطية الطلب على الطاقة التي أصبحت مهمة بشكل متزايد، مع استمرار ارتفاع تكاليف الطاقات التقليدية و مع تزايد تكاليف التشغيل لعمليات توليد الطاقة الأخرى بسبب التغيرات البيئية. تتميز دول العالم الثالث بأنها تمتلك إمكانات هائلة من مصادر الطاقة المتجددة و خاصة الطاقة الشمسية و طاقة الرياح، و لهذا السبب، يتعين على البلدان النامية التركيز أكثر على تطوير تكنولوجيات و تقنيات جديدة تسمح باستغلال و تحويل هذه المصادر إلى شكل مفيد آخر مثل الطاقة الكهربائية. يهتم الباحثون بتكنولوجيا هجينة جديدة تُدعى المداخل الشمسية. هذا النظام مناسب للتطبيق في المناطق القاحلة و شبه القاحلة و هو طريقة متقدمة لتوليد الكهرباء من الإشعاع الشمسي. في العقود الأخيرة، تم تصميم و تجهيز و اختبار عدة نماذج تجريبية للمداخل الشمسية مع هياكل مختلفة، و تم بناء أول نموذج مدخنة شمسية في الواقع و اختباره في مانزاناريس (المدينة الإسبانية على بعد 150 [Km] من مدريد) بإشراف المهندس الألماني Schlaigh.

5.2.2. العناصر الأساسية للمدخنة الشمسية :

المدخنة الشمسية هي جهاز يجمع بين ثلاث تقنيات معروفة بما في ذلك:

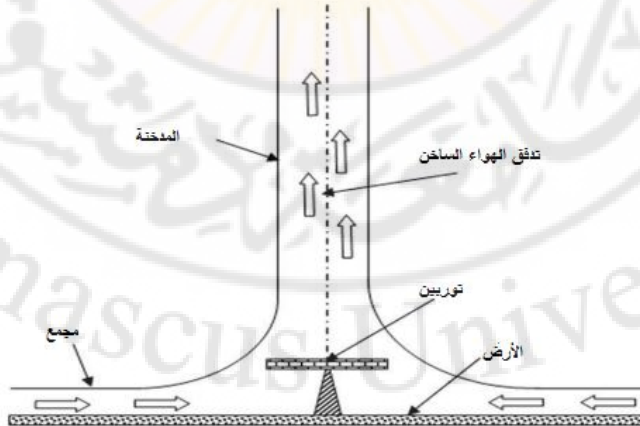
- 1- مجمع ضخ مغطى بسقف شفاف، مفتوح عند المحيط و يرتفع عند ارتفاع معين (h) من الأرض.
- 2- برج طويل محاط بالمجمع.
- 3- توربينات رياح وضعت في قاعدتها.





الشكل (5.2.1) وصف محطة المدخنة الشمسية

تدمج هذه المركبات بطريقة بسيطة لتؤلف المدخنة الحرارية الشمسية كما هو مبين بالشكل (5.2.1). و يبين الشكل (5.2.2) مخططاً توضيحياً لآلية عمل المدخنة الشمسية.



الشكل (5.2.2) مخطط يوضح آلية عمل المدخنة الشمسية

5.2.3. المبدأ الأساسي لعمل المدخنة الشمسية:

تعتمد هذه التقنية على مبدأ بسيط: يسخن الهواء بالإشعاع الشمسي الذي يخترق الغطاء الشفاف، و يصل جزء من الإشعاع الوارد إلى الأرض، ممّا يزيد من درجة حرارته. يتم نقل الحرارة من الأرض عن طريق الحمل إلى الهواء تحت السقف الشفاف، فهو بالإضافة للأرض الطبيعية تحته يشكلان مجعاً هوائياً حاراً. إنّ استمرار العملية مضمون لمدة 24 ساعة بوجود أنابيب ضيقة مملوءة بالمياه تحت السقف. يسخن الماء خلال النهار و يُصدر هذه الحرارة خلال الليل، و تُملأ هذه الأنابيب بالماء لمرة واحدة و لا نحتاج لمياه في المستقبل. يوجد في منتصف السقف مدخنة عمودية مزودة بفتحات هوائية كبيرة عند قاعدة المدخنة، و بما أنّ الهواء الساخن أخف من الهواء البارد فإنّه يصعد إلى أعلى المدخنة و يتم امتصاصه من قبل المدخنة و هكذا فإنّ الإشعاع الشمسي يسبب جرياناً ثابتاً في المدخنة. تُحوّل هذه الطاقة الكامنة إلى طاقة ميكانيكية بتوربينات الرياح منظمة الضغط عند قاعدة المدخنة، ثم تُحوّل إلى طاقة كهربائية بمولدات تقليدية.

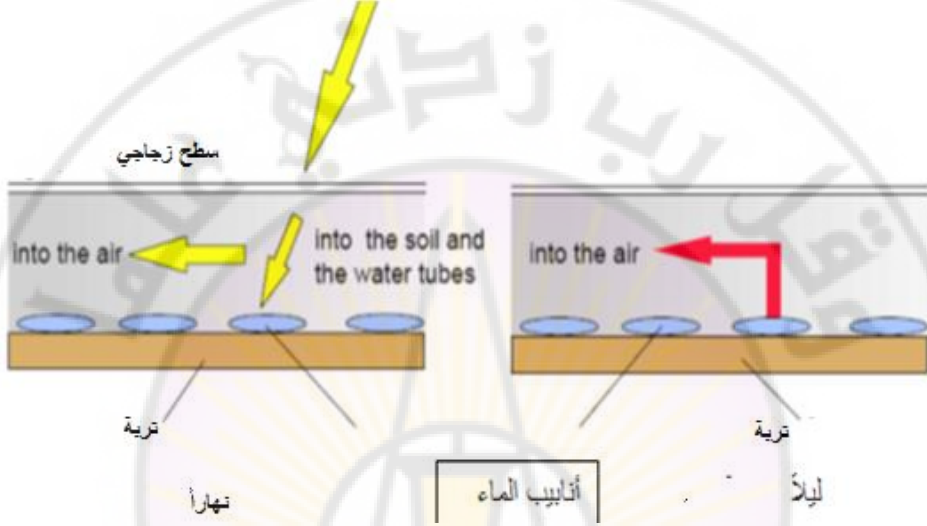
5.2.4. تقنية المدخنة الشمسية:

A. المجمع:

يُنتج الهواء الحار للمدخنة الشمسية من تأثير البيت الزجاجي في مجمع هواء بسيط يتألف فقط من غلاف زجاجي أو بلاستيكي ممتد بشكل أفقي يرتفع (2 - 6m) عن الأرض، يزداد ارتفاع الغطاء قرب قاعدة المدخنة و لذلك يحول الهواء إلى حركة عمودية مع فواقد احتكاك أصغر، و يسمح هذا الغلاف لدخول الأشعة الشمسية قصيرة الموجة و يحتجز الأشعة طويلة الموجة من الأرض الساخنة، و بذلك فإنّ الأرض تحت السقف تسخن و تنقل حرارتها إلى الهواء المتدفق بشكل قطري فوقها من الخارج إلى المدخنة.

B. تخزين الطاقة:

توضع الأنابيب السوداء المملوءة بالماء جنباً إلى جنب على التربة تحت سقف المجمع الزجاجي و تبقى مغلقة، و بالتالي لا يحدث تبخر كما يبينه الشكل (5.2.3).



الشكل(5.2.3) مبدأ اختزان الحرارة تحت السقف باستخدام الأنابيب السوداء المملوءة بالماء

نظراً لكون انتقال الحرارة بين الأنابيب السوداء و الماء أكبر بكثير من انتقال الحرارة بين سطح الأرض و طبقات التربة الأعماق حتى عند انخفاض سرعة تدفق الماء، و نظراً لكون السعة الحرارية للماء أعلى بكثير من السعة الحرارية للتربة، فإن الماء داخل الأنابيب يَختزن جزءاً من الحرارة الشمسية و يحررها في الليل، و ذلك عندما يبرد الهواء في المجمع .

C- المدخنة الشمسية:

المدخنة بنفسها هي المحرك الحراري الحقيقي للمنشأة، فهي أنبوب ضغط بفواقد احتكاك قليلة. يرفع المجمع في المداخل الشمسية الكبيرة درجة حرارة الهواء إلى 35 [°C]، و هذا يوصل سرعة الهواء في المدخنة إلى حوالي 15 [m/s]. و من الممكن

الدخول من الأسفل إلى منشأة المدخنة الشمسية من أجل الصيانة بدون صعوبة. يمكن أن تُبنى المداخل بارتفاع (1000 m) بدون صعوبة، و أفضل بناء لها مُشيد بالإسمنت المسلّح، لكن حبال التثبيت يمكن أن تكون ذات أغلفة مصنوعة من صفائح معدنية مضلعة، كما هو الحال في تصاميم شبكة كابلات مغلقة بالأغشية.

D-التوربينات :

يمكن استخدام التوربينات للحصول على طاقة ميكانيكية على شكل طاقة تدويرية مستمدة من تيار الهواء في المدخنة. لا تعمل التوربينات في المداخل الشمسية بالاعتماد على الطاقة الحركية مثل محول طاقة الرياح ذي التدفق الحر، إنما تعتمد على طاقة الضغط مثل العنفات، و بشكل مشابه لمحطات الطاقة الهيدروليكية، حيث يحول فيها الضغط الستاتيكي إلى طاقة تدويرية، و بالتالي تنتج طاقة أكبر بثمانى مرات من إنتاج الطاقة لدى العنفات، و تكون الطاقة المنتجة متناسبة مع التدفق و الضغط المطبقين على التوربين.

تُحدد درجة ميل ريش التوربين أثناء عملية تنظيم إنتاج الطاقة وفقاً لتدفق و سرعة الرياح، فإذا كانت الأطراف المسطحة لريش التوربين عمودية على مجرى الهواء فلن يدور التوربين، و إذا كانت متوازية مع تيار الهواء و سمحت للهواء أن يتدفق خلالها بدون أي مقاومة فلن يُطبق أي ضغط على التوربين و بالتالي لن يولد الكهرباء. بين هاتين الحالتين المتطرفتين هناك وضع أمثل لتوضع ريش التوربين، حيث يرتفع الإنتاج إذا كان الضغط المطبق على التوربين حوالي ثلثي الضغط الإجمالي المتوفر .

5.2.5. توازن الطاقة في المجمع:

يتكون المجمع من تربة مع الأنابيب المملوءة بالمياه كنظام لتخزين الحرارة و سطح شفاف يقع على بعد أمتار قليلة فوق الأرض و حقل دوران الهواء. يتم تسخين الهواء عن طريق امتصاص الإشعاع الشمسي الذي يعبر السطح العلوي الشفاف للمجمع، و هو

يدور داخل المجمع حسب ظاهرة انتقال تيارات الحمل . من أجل التبسيط، اعتبرت بعض الأبحاث النظرية أن معادلة توازن الطاقة للمجمع يتم إعطاؤها بواسطة:

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p \Delta T = (\tau\alpha)A_{coll}G - h_{conv} \Delta T_a A_{coll} \quad (5.2.1)$$

حيث:

G : الإشعاع الشمسي.

A_{coll} : مساحة المجمع.

$\dot{Q}$: كمية الحرارة الناتجة من الهواء الساخن.

$(\tau\alpha)$: ناتج ضرب الامتصاصية بالنفوذية.

T_a : درجة حرارة الوسط المحيط.

$\dot{m}$: معدل تدفق الكتلة من الهواء المار في المجمع الشمسي والذي يعبر عنه:

$$\dot{m} = \rho_{coll,air} A_2 V_2 \quad (5.2.2)$$

بتعويض المعادلة (5.2.2) في (5.2.1) يتم الحصول على سرعة الهواء في مخرج المجمع و التي تكتب كما يلي:

$$V_2 = \frac{(\tau\alpha)A_{coll}G - h_{conv} \Delta T_a A_{coll}}{\rho_{coll,air} A_2 C_p \Delta T} \quad (5.2.3)$$

حيث:

C_p : السعة الحرارية النوعية للهواء.

ρ : كثافة الهواء.

A_2 : مساحة المدخنة.

r_c : نصف قطر المدخنة: $A_2 = 2\pi r_c h_{coll}$

A_{coll} : مساحة المجمع $A_{coll} = \pi R^2$

R : نصف قطر المجمع.

5.2.6. مزايا و مساوئ المداخل الشمسية:

A. مزايا المداخل الشمسية:

- 1- يستفيد المجمع من كل الإشعاع الشمسي سواء أكان الإشعاع مباشراً أم مُبعثراً. و هذا جيد للبلدان الاستوائية حيث إنّ السماء غالباً ما تكون مغطاة بالغيوم. بينما محطات الكهرباء الحرارية الشمسية التي تستخدم بشكل رئيسي المجمعات الشمسية المركزة للإشعاع ذات شكل قطع مكافئ و تستفيد من الإشعاع الشمسي المباشر فقط .
- 2- تعمل المدخنة الشمسية بوجود نظام تخزين الحرارة و هي تعمل طيلة 24 ساعة على الطاقة الشمسية الصافية.
- 3- تُنتج المداخل الشمسية الكهرباء ليلاً بشكل جيد لأنّ أنابيب المياه المتوضعة تحت السقف الزجاجي تمتص جزءاً من الطاقة التي يتم إشعاعها خلال النهار و تُحررها خلال الليل .
- 4- المداخل الشمسية موثوقة جداً و ليست عرضة للتوقف، بالمقارنة مع محطات التوليد الشمسية الأخرى. التوربينات و المولد و الناقل تخضع لتدفق هواء ثابت، و هي الأجزاء الوحيدة المؤثرة في المحطات. يضمن هذا التركيب البسيط و المتين عملية لا تحتاج إلا للقليل من الصيانة و لا تحتاج لوقود قابل للاحتراق.
- 5- المداخل الشمسية (على خلاف محطات الطاقة التقليدية و أنواع محطات الطاقة الحرارية الشمسية الأخرى) لا تحتاج لمياه تبريد، و هذه ميزة أساسية بالنسبة للعديد من البلدان المشمسمة التي تملك مشاكل جوهريّة مع مياه الشرب.
- 6- إنّ المواد الإنشائية التي تحتاجها المدخنة الشمسية (بشكل رئيسي الإسمنت و الزجاج) متوفرة في كل مكان بكميات كافية.
- 7- يمكن أن تبني المداخل الشمسية الآن حتى في البلدان غير المتطورة صناعياً، لأن الصناعة المتوفرة بكل البلدان تكفي تماماً لاحتياجاتهم، و لا داعي للاستثمار في المؤسسات الصناعية التقنية .

8- لا يوجد ضرر بيئي و لا استهلاك لمصادر الطاقة و إن كان من أجل البناء، تصنع المداخل الشمسية من الإسمنت المسلح و الزجاج المصنوع من الرمل والحجارة، و بالتالي يمكن أن تتزايد المداخل الشمسية في الأراضي الصحراوية الغنية بالرمال و الحجارة بنفسها، فإنّها حقاً منابع طاقة معقولة .

9- يمكن بناء مدخنة كبيرة حتى في البلدان الفقيرة بدون إنفاق أموال أجنبية كثيرة، و ذلك باستخدام مصادرههم و أيديهم العاملة، فهذا يخلق فرص عمل كثيرة و يقلص احتياج الاستثمار الرأسمالي و يخفف من تكلفة توليد الكهرباء .

B. مساوئ المداخل الشمسية:

1- يمكن أن تُحوّل المداخل الشمسية نسبة صغيرة فقط من الحرارة الشمسية المجمعة إلى كهرباء، و بهذا فإنّ فعاليتها قليلة و لكنها يمكن أن تعوض عن هذه المساوئ ببنائها المتين و الرخيص و بتكاليف صيانتها المنخفضة.

2- تحتاج المداخل الشمسية إلى مجمع ذي مساحة كبيرة حيث إنّ العمليات الاقتصادية لإنتاج الكهرباء في المصانع المعتمدة على الطاقة الشمسية محصورة في الأقاليم ذات الإشعاعات الشمسية العالية، لكن هذا الأمر ليس فيه مشكلة أساسية بالنسبة للأقاليم التي تمتلك صحارى كبيرة و مساحات غير مستخدمة، و هكذا فإنّ الأرض المستخدمة لبناء المدخنة ليست عاملاً أساسياً .

5.2.7. أنواع المداخل الشمسية:

يمكن تصميم مدخنة شمسية واحدة بمنطقة ذات سقف زجاجي كبير مناسب لتوليد من (100- 200MW) بشكل مستمر 24 ساعة يومياً. بهذا الشكل فإنّ هذا العدد الصغير من المداخل الشمسية يمكن أن يحل مكان محطة طاقة نووية كبيرة.

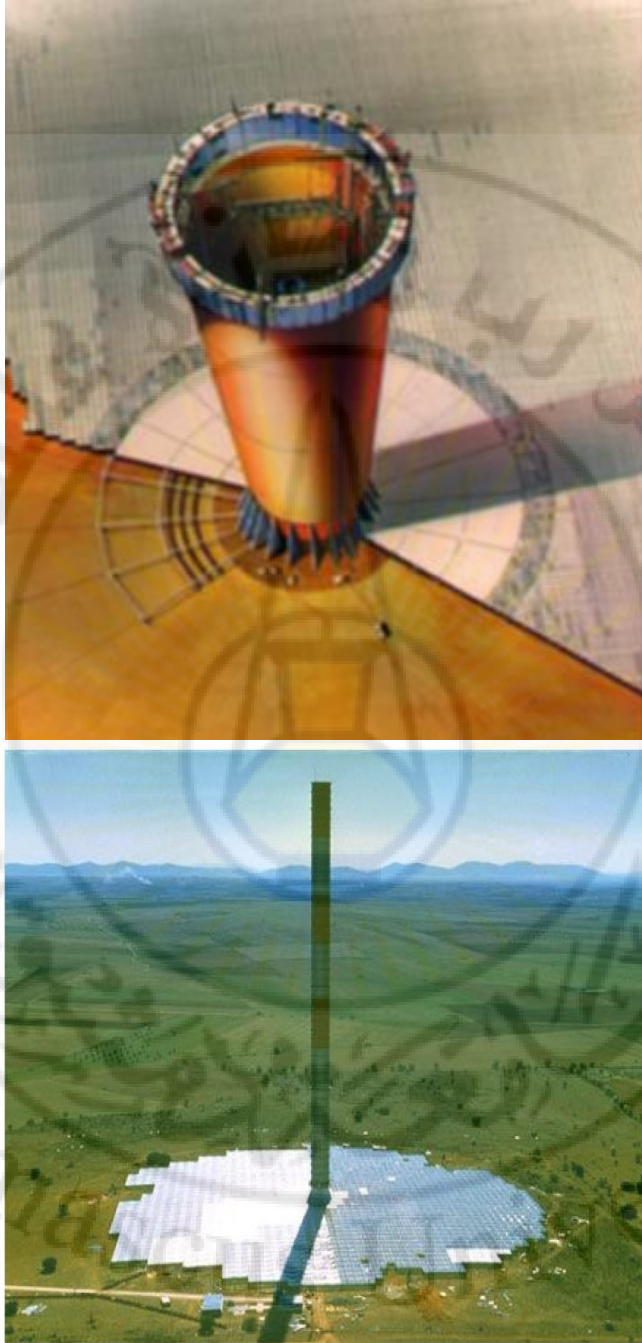
A- المدخنة الشمسية العمودية:

يبين الشكل (4.2.5) مدخنة شمسية عمودية في ولاية أريزونا في الولايات المتحدة الأمريكية.



الشكل (5.2.4) مدخنة شمسية عمودية في أريزونا

أما الشكل (5.2.5) فيبين المدخنة الشمسية العمودية التجريبية في مدينة مانزاناريس في إسبانيا.



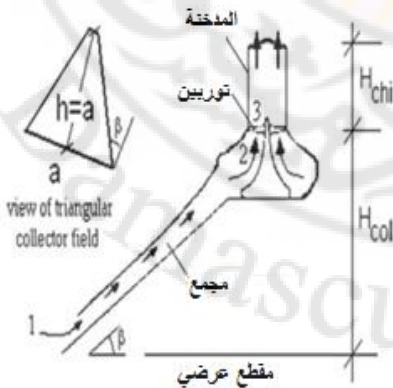
الشكل (5.2.5) المدخنة الشمسية العمودية التجريبية في ال Manzanares

B. محطة للطاقة الشمسية مائلة:

تم اقتراح محطة لتوليد الطاقة الشمسية مائلة كما يبين الشكل (5.2.6) (كلش، ناعمة، 2014). إنَّ تصميم نظام مدخنة شمسية على سطح مائل أو تلالٍ مناسبة، له ميزتان رئيسيتان..:

أولاً: إذا تم تحسين منحدر المجمع، يمكن تحسين الإشعاع الشمسي الذي يستقبله نظام التجميع إلى مستوى مُرضٍ للعمل على مدار العام .

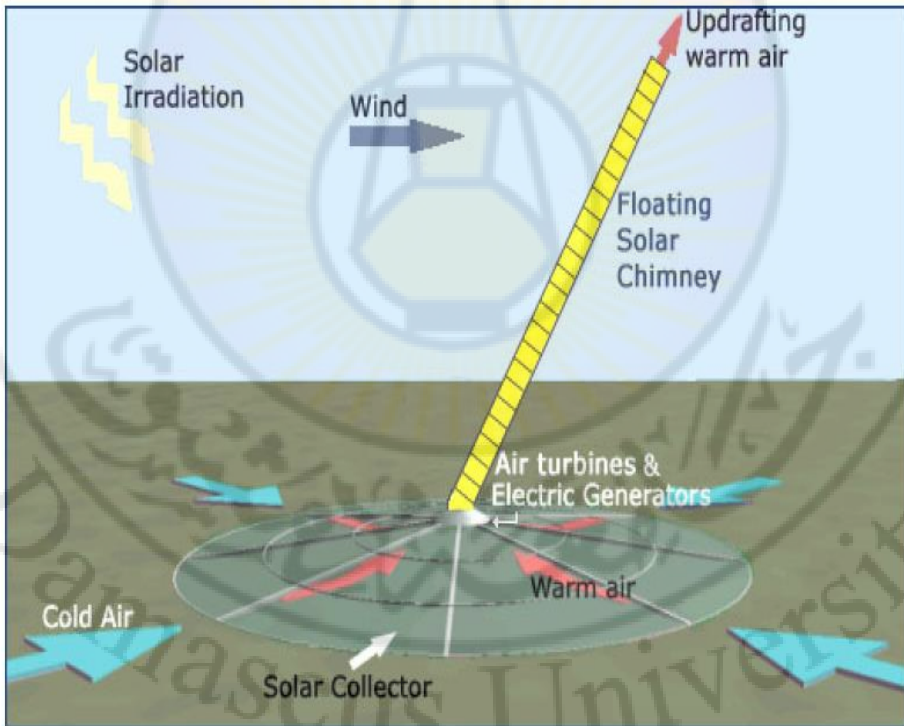
ثانياً: يشكل سطح المنحدر مدخنة طبيعية؛ و بالتالي قد يتم تخفيض ارتفاع المدخنة الذي يقف فوق ارتفاع المجمع بشكلٍ كبير، و بالتالي تقليل مشاكل الهندسة المدنية و التكلفة. و يسمى هذا التصميم الجديد محطة الطاقة الشمسية المائلة (SSUPP). تم تسجيل متوسط القيم الشهرية لمخرج المجمع و مدخل المدخنة و درجة الحرارة المحيطة و الإشعاع الشمسي، و تخطيطها للتحقيق في أداء النموذج الأولي على مدار السنة . و تُبين التَّحريات أنَّ فرق درجة الحرارة بين درجة الحرارة المحيطة و درجة حرارة مدخل المدخنة هي تقريباً نفسها في فصل الشتاء و الصيف، و ترجع هذه النتيجة إلى تحسين مجمع الطاقة الشمسية الذي كان يميل في نفس زاوية خط العرض في موقع النموذج الأولي. تُظهر النتائج تأثيراً مباشراً لكل من الإشعاع الشمسي و درجة الحرارة المحيطة على درجة حرارة هواء مخرج المجمع.



الشكل (6.2.5) نظام مدخنة شمسية مائلة

C- المدخنة الشمسية العائمة:

اقترح الأستاذ كريستوس بياجورجيو بناء مداخن شمسية ذات ارتفاع أعلى وأقل كلفة وذات وزن أقل من وزن التراكيب الهوائية لزيادة مردود محطات طاقة المدخنة الشمسية وتقليل كلفتها، سُميت المداخن الشمسية العائمة كما في الشكل (5.2.7). لقد أظهر المُخترع أنَّ محطات طاقة المدخنة الشمسية ذات الاستطاعة [100 MW] و التي تنتج سنوياً على الأقل [300 million KWh] يمكن أن تحتاج كلفة من (35 – 70) مليون يورو. ستحتاج هذه المحطات إلى مدخنة شمسية عائمة ذات ارتفاع من [2–3 Km] و قطر داخلي [50 – 85 m] و مجمع شمسي ذي قطر [200 – 300 m].



الشكل (5.2.7) المدخنة الشمسية العائمة

يجب الأخذ بعين الاعتبار أن محطات العنفات الريحية ذات الاستطاعة [MW] 100 و التي تنتج بمعدل سنوي [250 million KWh] تحتاج لتكلفة بناء 100 مليون يورو، فمن الواضح أن استخدام تقنية المدخنة الشمسية العائمة هنا هو خيار جيد من أجل إعادة توليد الكهرباء.

1. المكونات الأساسية لل (FSC):

- إنّ ال (FSC) مصنوعة من ثلاثة عناصر :
- مجمع شمسي دائري كبير مدعوم بسقف شفاف يرتفع فوق الأرض بعدة أمتار يدعى (بيت زجاجي).
- أسطوانة طويلة مركّبة لسحب الهواء الساخن للأعلى عند مركز المجمع الزجاجي، تدعى (المدخنة الشمسية العائمة).
- مجموعة من التوربينات الهوائية موصولة مع مولدات كهربائية ملائمة حول قاعدة المدخنة الشمسية تدعى (المولدات التوربينية).

2. كيف تعمل ال (FSC) :

- تُسَخَّن الطاقة الشمسية الهواء داخل المجمع الشمسي .
- يميل الهواء الساخن إلى الهروب من خلال المدخنة الشمسية إلى الجو الأعلى.
- يفقد تيار الهواء الساخن المسحوب للأعلى جزءاً من طاقته الحرارية خلال مروره عبر التوربينات الهوائية الموصولة بالمولدات الكهربائية و التي تُحول هذه الطاقة إلى كهرباء.

3. تأثير التخزين الحراري على عمل المدخنة :

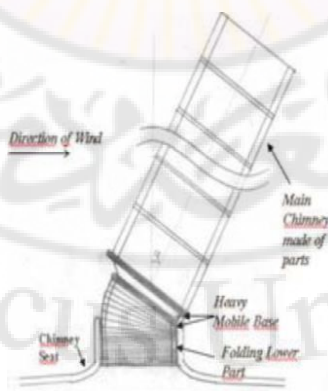
تُزَوّد المحطات الكهروهوائية بوسائل تخزين حرارية كما في المداخل العمودية و ذات تكلفة قليلة، و من الممكن أن تعمل 24 ساعة في اليوم و لمدة 365 يوماً في السنة، منتجة طاقة مضمونة، و هكذا فإنّ هذه المحطات من الممكن أن تُستبدل عوضاً عن تلك

التي تستهلك الوقود التقليدي، و يمكن أن تحل هذه التقنية مشكلة حماية البيئة و تضمن التنمية المستدامة للعالم.

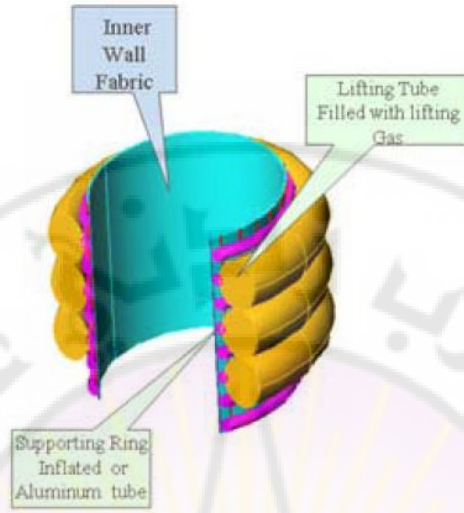
لكي نبني مداخن شمسية عائمة (FSC) Float Solar Chimny فعالة و رخيصة يجب أن نملك مداخن شمسية أطول من الأبراج الشمسية المثبتة بالإسمنت المسلح. المداخن الشمسية العائمة أخف من المداخن الهوائية و يتراوح طولها من (3000m - 1500) و قد تم تنفيذ عملها بكفاءة.

4. بنية المداخن الشمسية العائمة FSC :

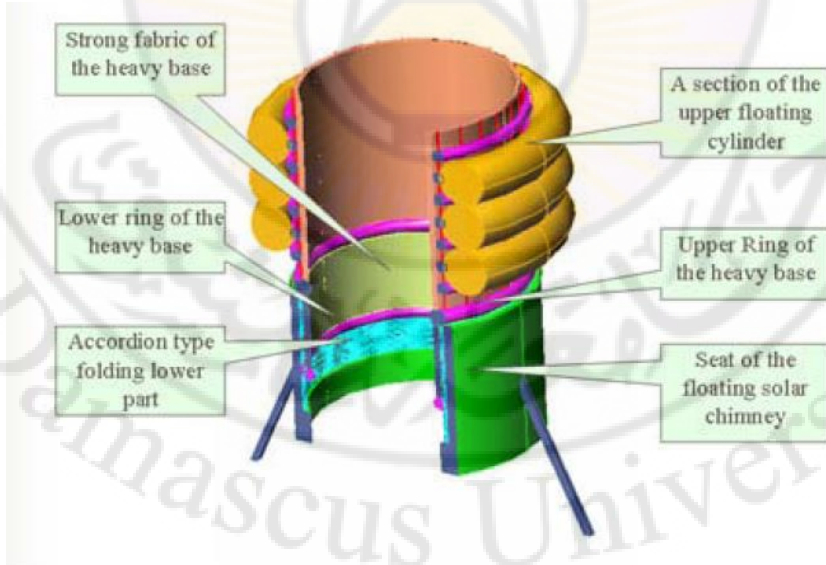
- الهيكل الرئيسي لل (FSC) أخف من الهواء حيث إنّ الأسطوانة التي تسحب الهواء الساخن للأعلى مصنوعة من مجموعة من الأنابيب الحلزونية المتتابعة المملوءة بغاز أخف من الهواء (هيليوم He أو نشادر HN_3) كما هو مبين في الشكل (5.2.8).
- تُصنع الأسطوانة التي تسحب الهواء الساخن من أجزاء متتابعة مربوطة بشكل منفصل مع قاعدة ثقيلة و منحنية، كما تكون لها نهاية منخفضة و مطوية كما هو مبين في الأشكال (5.2.9) و (5.2.10) و (5.2.11) .
- هذه النهاية ذات النموذج المطوي تفتح جزئياً عندها لتضمن بآلا يتسرب الهواء الساخن عند قاعدتها.



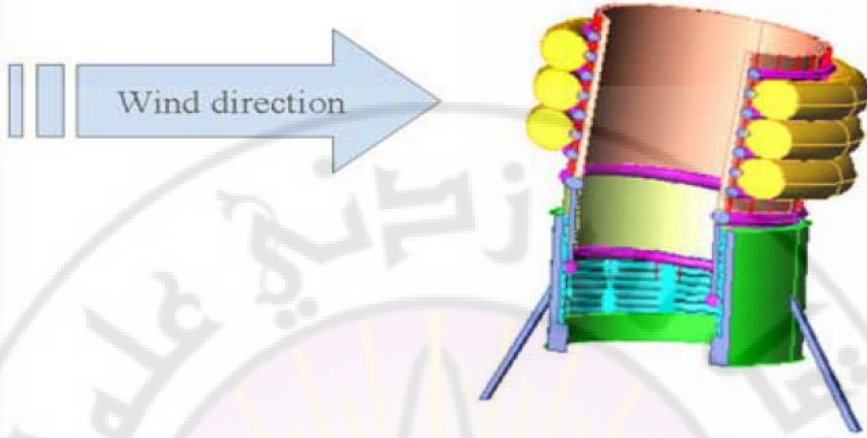
الشكل (5.2.8) بنية المداخن الشمسية العائمة



الشكل (5.2.9) بنية الجزء العلوي من المدخنة الشمسية العائمة



الشكل (5.2.10) المؤشرات الحيوية للجزء الأخفض من بنية المدخنة الشمسية العائمة



الشكل (5.2.11) المؤشرات الحيوية للجزء الأخفض من المدخنة الشمسية العائمة تحت تأثير الرياح الخارجية

5. مشاكل ال (FSCs) كونها أخف من الهواء :

- تأثير ضغط الرياح على جدران المدخنة .
- السلوك الشامل للرياح الخارجية .
- تغير سرعة الرياح مع الارتفاع .

6. كيف تواجه ال (FSCs) هذه المشاكل :

يُواجه الضغط المؤثر على جدران هيكل أسطوانة ال (FSC) بصنع حلقات داعمة مصنوعة من الألمنيوم أو بصنع أنابيب مملوءة بالهواء المضغوط كما في الأشكال أعلاه.

- تُواجه قوى الرياح الكبيرة و العزوم المتعلقة بها من خلال قدرة البنية على الميلان أي قدرة قاعدتها الضخمة على الميلان، و كذلك تُواجه من خلال سلوك الجزء المطوي الذي يمنع أي تسرب للهواء .

- تُواجه تغيرات الرياح مع الارتفاع من خلال أنابيب معزولة ومنتشرة أعالي الأسطوانة بشكل متتابع ومستقلة بشكل ديناميكي.

- تأثير الرياح على الارتفاع التشغيلي للمدخنة الشمسية العائمة (FSCs) : بسبب الميل المحتمل للمدخنة الشمسية العائمة (FSC) ينقص الارتفاع التشغيلي للمداخل

الشمسية العائمة (FSCs) مع تأثير سرعة الرياح السنوية الوسطية وقوة رفع لمدخنة شمسية عائمة أخف من أسطوانة الهواء، فمثلاً، من أجل سرعة رياح متوسطة $3[m/sec]$ و تضمن قوة رفع انحناء 50% ينقص الارتفاع الوسطي % 3.7 .

7. المواد التي تصنع منها المدخنة الشمسية العائمة :

- أقمشة صناعية متينة و قوية مثبتة بواسطة الألياف على الأنابيب أو الجدران الداخلية.
- يجب أن تكون أقمشة أنابيب الرفع محمية و كتيمة للغاز مثل أقمشة السفن الشراعية أو المناطق.
- الألياف أو الحبال الرابطة لهيكل المدخنة عبارة عن مركبات من الخيوط القوية.
- غاز الرفع هو الهيليوم He أو النشادر NH_3 و هو قليل الكلفة و متواجد بكثرة.
- توربينات هوائية محورية.
- علب سرعة مخصصة لمرحلة واحدة.
- مولدات كهربائية مع الكترونياتهم الكهربائية. و توضع هذه الوحدات المتكاملة لإنتاج الطاقة على محور أفقي حول قاعدة المدخنة الشمسية العائمة. و تكون الطاقة الشاملة المقدرة حسب التخزين الحراري الصناعي بين (60 - 100 %) من الطاقة المقدرة للمداخن العمودية أي : إنتاج الطاقة الكهربائية الأعظمية في الصيف.

نجد من خلال العرض السابق أنَّ المواد الضرورية و المعدات اللازمة لبناء الـ (FSCs) يمكن أن تتواجد بسهولة في الأسواق، عند الأخذ بعين الاعتبار الخبرات في مجال البناء و الشركات ذات العلاقة بالأعمال المتماثلة، و نجد بأن بنية المداخن العائمة (FSCs) يُمكن أن تُنفذ محلياً في كلِّ مكان من العالم. يمكن أن تصمم و تبني أسطوانات المداخن العائمة (FSCs) من قبل شركات صناعية متخصصة و تنقل إلى مكان تنفيذ الهيكل النهائي لـ FSCs.

8 . الأماكن المفضلة لبناء ال (FSCs) :

يجب أن تمتلك الأماكن المفضلة لبناء (FSC) الأمور التالية :

- إشعاع شمسي سنوي مرتفع على السطح الأفقي للمجمع الشمسي أكثر من 1600 [kWh/m²] و يفضل أن يكون أكثر من [kWh/m²] 2000 .
- رياح سنوية منخفضة السرعة أقل من [m/sec] 3 .
- عدم وجود ثلج ثقيل أو عواصف قوية أو عواصف رملية و غبارية.
- فعالية الزلازل غير قوية.
- في كل قارة هناك أماكن ممتازة من أجل تطبيق تكنولوجيا المداخل الشمسية العائمة بشكل واسع لتغطي احتياجات السكّان من الطاقة.
- من الممكن أن ندمج إنتاج الكهرباء مع المنتجات الزراعية باستخدام السقوف الزجاجية للمجمعات الشمسية .

9. مقارنة الـ (FSC) مع محطات الطاقة التقليدية :

مع الأخذ بعين الاعتبار تكاليف الاستثمار المنخفضة و تكاليف الصيانة و التشغيل المنخفضة لـ (FSC) فإنّ إنتاج [kWh] 1 بواسطة الـ (FSC) يُمكن أن يكلف بشكل نهائي أقل من 50 % مما يكلف إنتاجه في محطات الطاقة المعتمدة على استهلاك الوقود.

10. تشابه الـ (FSC) مع محطات الطاقة الكهرومائية:

- إن الـ (FSC) مشابهة لمحطات الطاقة الكهرومائية (لذلك ندعوها كهرومائية) .
- تحوّل توربيناتها الهوائية الطاقة الحركية للهواء المسحوب للأعلى (بفعل طوفان الهواء) إلى طاقة تدويرية مثلما تحوّل التوربينات المائية طاقة المياه الحركية (بفعل الجاذبية) إلى طاقة تدويرية .
- يتناسب إنتاج كلّ من محطتي إنتاج الطاقة مع الضاغط (H) (ارتفاع سحب الهواء للمدخنة الشمسية العائمة أو ارتفاع سقوط الماء من منسوب السد).

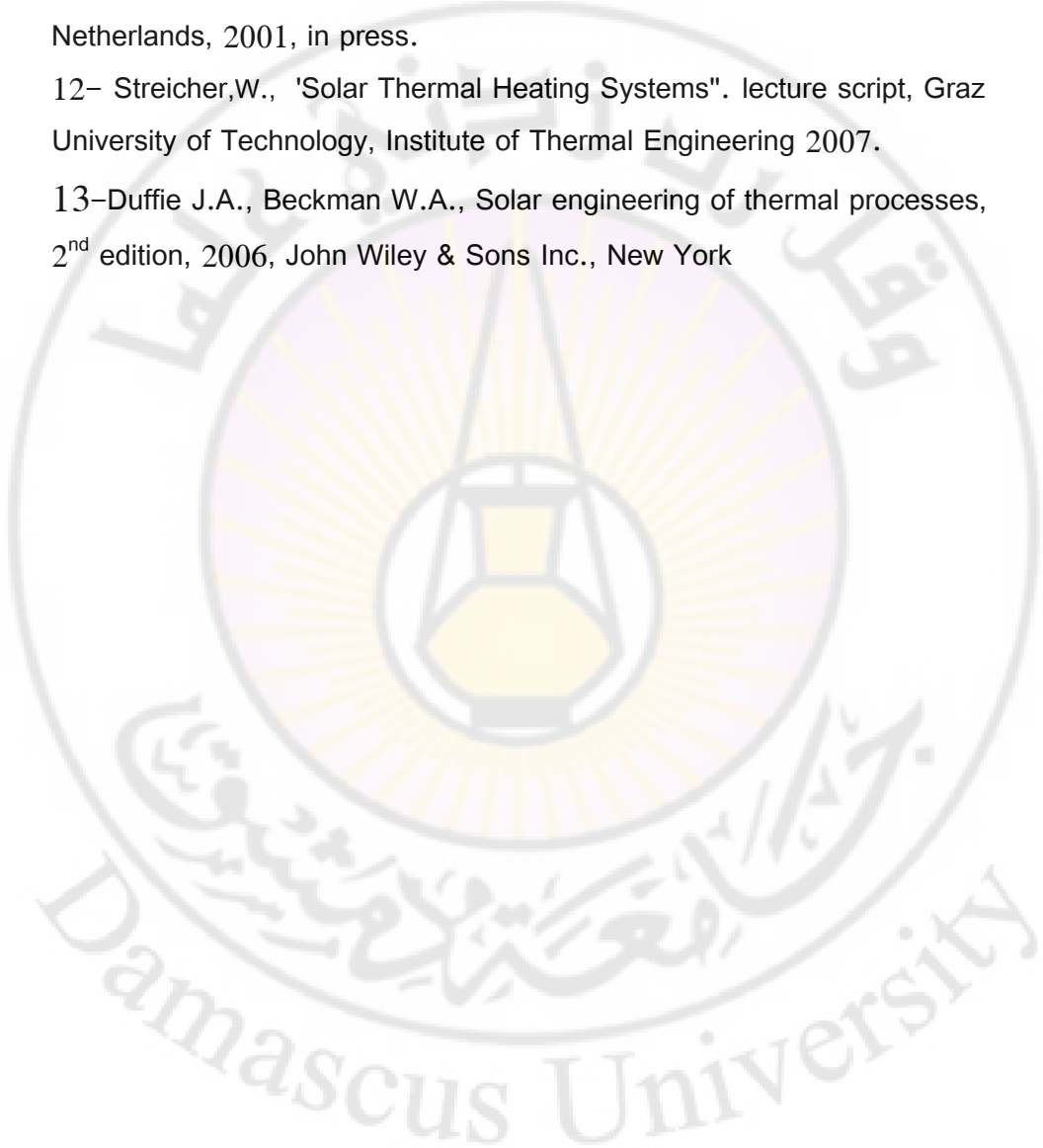
المراجع العلمية

- 1-Duffie J.A., Beckman W.A., Solar engineering of thermal processes, 2nd edition, 1991, John Wiley & Sons Inc., New York
- 2-METEONORM, Weather Data Generator. By the company METEOTEST, Fabrikstrasse 14, CH-3012 Bern, Switzerland, 1999, www.meteotest.com
- 3-Streicher, W., Lecture book "Sonnenenergienutzung", Institute of Thermal Engineering, Graz University of Technology, 2005
- 4-Jivan Shaw L.; SOLAR HEATING SYSTEMS – From Research to Development; 2004
- 5-Kaltschmitt M., Streicher W., Wiese A. (Eds.); Renewable Energy – Technology, Economics and Environment; Springer, Berlin; 2007
- 6-Suter J.M. et al.; Durability and reliability of solar combisystems; in Weiss W. (Ed.); Solar Heating Systems for Houses – A design handbook for solar combisystems; James & James, London; 2003
- 7-Wagner, Wagner&Co.; Technical Report; <http://www.wagnersolar.de>; 2001.
- 8-Weiss, W. "Industry Workshop", Solar Combisystems IEA-SHC Task 26, Delft, The Netherlands, April 2001.
- 9-Wolferen, H. "Legionella in hot water preparation", "Industry Workshop", Solar Combisystems IEA-SHC Task 26, Delft, The Netherlands, April 2001.
- 10-Jordan, U., Vajen, K.: Influence of the DHW profile on the Fractional Energy Savings – A Case Study of a Solar Combisystem, in: CD-ROM of the Third ISES Europe Solar Congress EuroSun 2000, Copenhagen, Denmark.

11–Knudsen, S.: Consumers' Influence on the Thermal Performance of Small DHW Systems – Theoretical Investigations, 9th International Conference on Solar Energy in High Latitudes, NorthSun, Leiden, The Netherlands, 2001, in press.

12– Streicher, W., "Solar Thermal Heating Systems". lecture script, Graz University of Technology, Institute of Thermal Engineering 2007.

13–Duffie J.A., Beckman W.A., Solar engineering of thermal processes, 2nd edition, 2006, John Wiley & Sons Inc., New York



الرموز والمصطلحات

الرمز	المعنى	الوحدة
$A_{Optimal}$	مساحة المجمع الشمسي المثلى	$[m^2]$
A_c	مساحة اللاقط الشمسي	$[m^2]$
b_o	معامل معدل زاوية الورود IAM	–
C	نسبة التركيز	–
C_p	السعة الحرارية	J/kg.K
$C_{p,min}$	السعة الحرارية الدنيا للسائل في المبادل الحراري	J/kg.K
DHW	ماء الاستخدام المحلي الساخن.	–
d_{off}	بارامتر زمن التغير	–
$\dot{E}_{opt}$	معدل الطاقة الإشعاعية البصرية الساقطة على السطح الماص	W
F_m	نسبة التغطية الشمسية الشهرية من الحمل الكلي الشهري المزود بواسطة النظام الطاقى الشمسي.	–
F	نسبة التغطية الشمسية السنوية من الحمل الكلي السنوي المزود بواسطة النظام الطاقى الشمسي	–
F_R	معامل إزالة الحرارة من اللاقط	–
F'_R/F_R	تصحيح أداء المجمع من تأثير المبادل الحراري	–
$F_R(\tau\alpha)$	كمية الطاقة الممتصة من قبل اللاقط	–
$F_R U_L$	كمية الطاقة الضائعة من اللاقط	W/m ²
H	الإشعاع الشمسي اليومي على سطح أفقي	W/m ²
H_b	الإشعاع الشمسي المباشر اليومي على سطح أفقي	W/m ²
H_d	الإشعاع الشمسي المنتشر اليومي على سطح أفقي	W/m ²
$\bar{H}$	المتوسط الشهري للإشعاع اليومي الساقط على سطح أفقي	MJ / m ² .day
$\bar{H}_d$	المتوسط الشهري للإشعاع اليومي المنتشر الساقط على سطح	MJ / m ² .day

	مائل	
$MJ / m^2 .day$	المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي	$\bar{H}_o$
$MJ / m^2 .day$	الإشعاع الشمسي اليومي على سطح مائل	$\bar{H}_T$
	معدل إنتاج الحرارة من المبنى بسبب السكان والإضاءة والأجهزة والإشعاع الشمسي الداخل	$\dot{g}$
W/m^2	شدة الإشعاع الشمسي الساقط على سطح المجمع	G_m
W/m^2	الإشعاع الشمسي اللحظي خارج الغلاف الجوي	G_o
W/m^2	شدة الإشعاع الشمسي الاستقرائية	G_s
W/m^2	الثابت الشمسي	G_{sc}
W/m^2	الإشعاع الشمسي اللحظي على سطح مائل خارج الغلاف الجوي	G_T
–	معدل زاوية الورود	IAM
W/m^2	الإشعاع المباشر الساعي على سطح أفقي	I
W/m^2	الإشعاع الشمسي المباشر الساعي على سطح أفقي	I_b
W/m^2	الإشعاع الشمسي المنتشر الساعي على سطح أفقي	I_d
W/m^2	الإشعاع الكلي على سطح على سطح أفقي	I_g
W/m^2	الإشعاع المباشر الساعي على سطح مائل	I_t
W/m^2	الإشعاع الحرج	I_{tc}
–	متوسط مؤشر الوضوح الساعي الشهري	$\bar{k}_T$
–	معامل الوضوح	$\bar{K}_T$
$J/mounth$	إجمالي حمل التدخين الشهري المطلوب	L
$J/mounth$	معدل الطاقة المضافة للبناء (من مصدر كالسخان، المشعات، نظام التدخين الشمسي)	$\dot{L}$
$J/mounth$	الطاقة المساعدة للنظام الشمسي	L_{AUX}
$[\circ]$	خط الطول للمكان المدروس	L_{loc}
–	خط السميت القياسي للمنطقة	L_{st}

W	معدل الضباعات الحرارية من الخزان	$\dot{L}_t$
W	حمل المياه الساخنة	$\dot{L}_w$
W	الحمل الحراري الشهري للماء	L_w
$L / m^2.s$	معدل التدفق الكتلي	$\dot{m}$
$L / m^2.s$	القيمة الحقيقية لمعدل التدفق في المجمع/ لكل متر مربع من مساحة المجمع	$\dot{m}_a$
$L / m^2.s$	القيمة القياسية لمعدل التدفق في المجمع/ لكل متر مربع من مساحة المجمع	$\dot{m}_s$
Kg	الكتلة الحقيقية لسعة التخزين	M
m^3/m^2	السعة التخزينية الفعلية للحصى لكل متر مربع من مساحة اللاقط	$M_{a,b}$
m^3/m^2	سعة التخزين القياسية لكل متر مربع من مساحة اللاقط	$M_{b,s}$
L/m^2	سعة التخزين الحقيقية لكل متر مربع من مساحة المجمع	$M_{w,a}$
L/m^2	سعة التخزين القياسية لكل متر مربع من مساحة المجمع	$M_{w,s}$
-	رقم اليوم في السنة	N
-	عدد أيام الشهر	N
J/m^2	الطاقة الإنتاجية من كل متر مربع من اللاقط	P
J/month	المعدل الوسطي للطاقة الناتجة من اللاقط شهرياً	Q_{cm}
W	الضياع الحراري بالتوصيل	$\dot{Q}_{cond}$
W	الضياع الحراري بالحمل	$\dot{Q}_{conv}$
W	معدل الضياع الحراري من السطح الماص	Q_{loss}
W	الضياع الحراري بالاشعاع	$\dot{Q}_{rad}$
W	الضياع الحراري بالانعكاس	$\dot{Q}_{re,abs}$
W	الطاقة الشمسية الممتصة بالنظام الطاقوي الشمسي	Q_s
J/month	مجموع كمية الحرارة الشمسية الداخلة للنظام شهرياً	Q_{sm}
J/month	حمل التخزين	Q_{st}

W	معدل الطاقة "المفيدة" المغادرة للسطح الماص	Q_{useful}
J/month	حمل تسخين الماء اللازم شهرياً	Q_{wm}
-	نسبة الإشعاع الكلي الساعي إلى الإشعاع الكلي اليومي	R
-	نسبة الإشعاع المنتشر الساعي إلى الإشعاع المنتشر اليومي	r_d
-	نسبة الإشعاع المنتشر الساعي إلى الإشعاع المنتشر اليومي عند الظهر الشمسي	$r_{d,n}$
=	نسبة الإشعاع الكلي الساعي إلى الإشعاع الكلي اليومي عند الظهر الشمسي	r_n
-	نسبة متوسط الإشعاع الساعي الشهري على سطح مائل إلى مثله على سطح أفقي	$\bar{R}_h$
-	النسبة بين تركيز الإشعاع الساعي عند الظهر على سطح مائل إلى مثله على سطح أفقي	R_n
-	النسبة بين المتوسط الشهري للإشعاع اليومي على سطح مائل إلى مثله على سطح أفقي	$\bar{R}$
-	معامل بين الشعاع المباشر على سطح أفقي إلى الشعاع المباشر على سطح مائل.	R_b
-	نسبة المتوسط الشهري للإشعاع اليومي المباشر على السطح المائل إلى نظيره على سطح أفقي	$\bar{R}_b$
-	نسبة السعة الحرارية التخزينية القياسية لواحدة مساحة اللاقط	R_s
J/m ²	الإشعاع الشمسي الممتص من قبل اللاقط الشمسي المسطح	S
-	نسبة تغطية التسخين الشمسي لحمل تسخين الماء اللازم	SHF _{DHW}
[°C]	متوسط درجة الحرارة الشهرية للوسط المحيط	$\bar{T}_a$
K	درجة حرارة السماء فوق المجمع	T_a'
[°C]	درجة حرارة الماص الوسطية	$\bar{T}_{abs}$
[°C]	درجة حرارة الهواء المحيط	$\bar{T}_{air}$
[°C]	المعدل السنوي لدرجة حرارة الماء البارد	T_{av}

[°C]	درجة الحرارة الوسطية	T_{av}
[°C]	درجة حرارة التوازن	T_b
[°C]	درجة حرارة التزويد	T_{cold}
[°C]	درجة حرارة التوزيع	T_d
-	تخزين الطاقة الحرارية	TES
[°C]	درجة حرارة الماء البارد	T_{frwat}
[°C]	درجة حرارة السائل الداخل إلى السطح الماص	T_{in}
[°C]	درجة حرارة الماء الباردة الرئيسية	T_m
[°C]	درجة حرارة السائل الخارج من السطح الماص	T_{out}
[°C]	المعدل الشهري لدرجة الحرارة في الخزان	$\overline{T}_s$
[°C]	درجة حرارة الركود	$\overline{T}_s$
-	معدل قيمة ذروة التغير الموسمي	ΔT_{sh}
H	ساعة من السنة ، قيمة داخلية TRNSYS	Time
Sec.	عدد الثواني في الشهر	Δt
[°C]	درجة الحرارة المرجعية	T_{REF}
[°C]	درجة حرارة الماء الساخن الدنيا المقبولة	T_w
W/K	معامل الضياع الحراري للمبنى مضروباً بمساحة المنطقة المدروسة	$(UA)_h$
W/K	معامل ضياعات الخزان بالمساحة الخارجية	$(UA)_t$
[W / m ² .°C]	معامل الفقد الحراري الكلي للاقط	U_L
[W / m ² .°C]	معامل الانتقال الحراري الوسطي عندما تكون ضياعات التوصيل والحمل من المجمع صفر أو عند سرعة رياح محددة.	U_{coll}^*
m ³ /s	تدفق المياه	$\dot{V}$
L	حجم ناقل الحرارة الذي يمكن أن يتبخر في حال التوقف	V_D

	الكلبي (الركود)	
L	الحجم الناتج عن التمدد الحراري للوسط الناقل للحرارة	V_e
	حجم التجهيزات الشمسية	V_{plan}
	الحجم الاحتياطي ليحفظ جهاز التمدد عند قيمة الضغط الأعلى اللازمة للعمل	V_v
L	الحجم الاسمي للخزان	V_s
-	نسبة الطاقة المفقودة من المجمع	X
-	شعاع حرج لا قياسي	X_c
-	نسبة الطاقة الشمسية الممتصة الى حمل التسخين	γ
-	الفائدة الشهرية	ϕ
[°]	زاوية خط العرض للموقع على شمال أو جنوب خط الاستواء	ϕ
-	الفائدة اليومية	$\bar{\phi}$
-	الفائدة الساعية	Φ_h
[°]	زاوية ورود الإشعاع الشمسي عند الظهر الشمسي	θ_{noon}
-	القيمة الأعظمية للفائدة اليومية	$\bar{\phi}_{max}$
[°]	زاوية انحراف موضع الشمس عن الظهر الشمسي	δ
[°]	زاوية ميل السطح المدروس مع المستوي الأفقي	β
[°]	زاوية سمت السطح	γ
[°]	زاوية ورود الإشعاع المباشر	θ
[°]	زاوية سمت	θ_z
[°]	زاوية ارتفاع الشمس	α_s
[°]	زاوية سمت الشمس	γ_s
[°]	زاوية سمت الشمس المزيفة	γ'_s
[°]	الزاوية الساعية	ω
[°]	الزاوية الساعية عندما تكون الشمس على المحور شرق-غرب	ω_{ew}
[°]	زاوية غروب الشمس على سطح أفقي	ω_s

$[\circ]$	زاوية غروب الشمس على سطح مائل	ω'_s
μm	طول موجة الأشعة	λ
—	معامل النفوذية	τ
—	معامل النفوذية من أجل أطوال موجات الطيف تحت الأحمر من طيف الإشعاع الشمسي	τ_i
—	معامل النفوذية من أجل أطوال موجات الطيف المرئي من طيف الإشعاع الشمسي	τ_s
—	معامل النفوذية للغطاء الزجاجي من أجل الإشعاع الشمسي	τ_{cov}
—	معامل الامتصاصية	α
—	معامل الامتصاصية للماص من أجل الإشعاع الشمسي	α_{abs}
—	معامل الامتصاص من أجل أطوال موجات الطيف تحت الأحمر من طيف الإشعاع الشمسي	α_i
—	معامل الامتصاص من أجل أطوال موجات الطيف المرئي من طيف الإشعاع الشمسي.	α_s
Kg/m^3	كثافة الماء	ρ
—	معامل الانعكاس	ρ
—	معامل الانعكاس من أجل أطوال موجات الطيف المرئي من طيف الإشعاع الشمسي	ρ_s
—	معامل الانعكاس من أجل أطوال موجات الطيف تحت الأحمر من طيف الإشعاع الشمسي	ρ_i
—	الانبعاثية	ε
—	معامل الانبعاثية من الماص	ε_{abs}
—	معامل الانبعاثية من أجل أطوال موجات الطيف تحت الأحمر من طيف الإشعاع الشمسي	ε_i
—	فعالية المبادل الحراري ماء - هواء	ε_L
—	معامل الانبعاثية من أجل أطوال موجات الطيف المرئي من	ε_s

	طيف الإشعاع الشمسي	
-	معامل الالتقاط	Γ
-	المركبة المباشرة لجداء معامل النفوذية للغطاء بمعامل الامتصاص للسطح الماص	$(\overline{\tau\alpha})_b$
-	المركبة المنتشرة لجداء معامل النفوذية للغطاء بمعامل الامتصاص للسطح الماص	$(\overline{\tau\alpha})_d$
-	المركبة المنعكسة من الأرض لجداء معامل النفوذية للغطاء بمعامل الامتصاص للسطح الماص	$(\overline{\tau\alpha})_g$
-	جداء معامل نفوذية غطاء المجمع بمعامل امتصاصية اللوح الماص للأشعة الشمسية الساقطة	$(\tau\alpha)_n$
-	التصحيح في قيمة $(\tau\alpha)$ والناتج عن تغير زاوية ورود الأشعة الشمسية على سطح المجمع	$(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n$
-	مردود اللاقط الشمسي	η_i
W/m^2K^4	ثابت ستيفان - بولتزمان $5,67 \times 10^{-8} W/m^2K^4$	σ
-	الانحراف المعياري للمتوسط الشهري لدرجة حرارة الوسط المحيط	σ_m
-	الانحراف المعياري للمتوسط الشهري لدرجة حرارة الوسط المحيط من المتوسط السنوي لدرجة حرارة الوسط المحيط	σ_{yr}

المدققون العلميون

-الأستاذ الدكتور المهندس سعيد الجراح -قسم الميكانيك العام-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة دمشق
-الأستاذ الدكتور المهندس وجيه ناعمة- قسم الميكانيك العام-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة دمشق
-الأستاذ الدكتور المهندس علي سلامي- قسم الميكانيك العام-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-جامعة دمشق

المدقق اللغوي

الأستاذة الدكتورة منى الحمد -قسم اللغة العربية -كلية الآداب والعلوم الإنسانية-جامعة دمشق

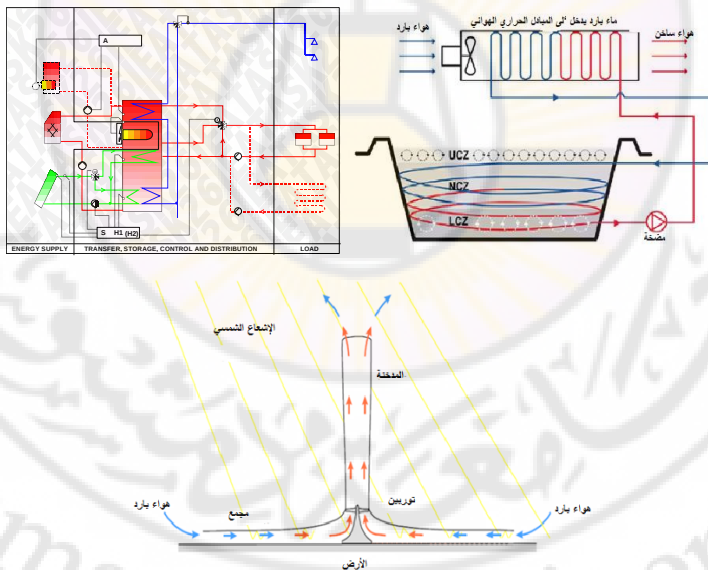
حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات



DAMASCUS UNIVERSITY

Mechanical & Electrical Engineering Faculty

SOLAR CONCENTRATING SYSTEMS and Electricity Generation (Solar Heating Systems 2)



DR. ENG. AMINA FARES

Associate Professor at Mechanical department

مطبعة جامعة دمشق

سعر المبيع للطالب () ل.س