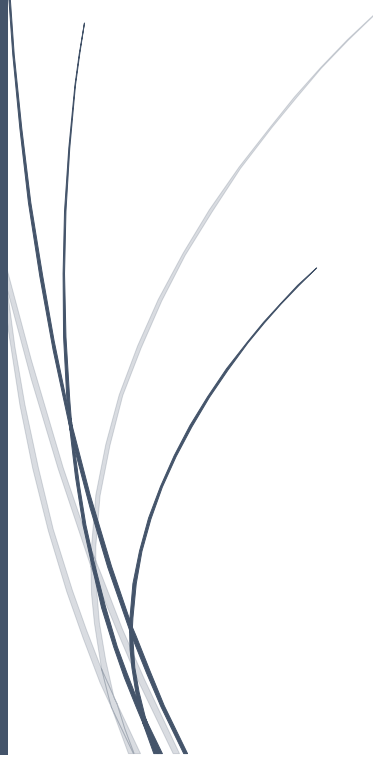
الفصل الثالث

المجمعات الشمسية المسطحة



المجمعات الشمسية المسطحة

3–1 مدخل:

وظيفة المجمعات الشمسية هي التقاط الأشعة الشمسية وتحويل طاقتها إلى طاقة حرارية قابلة للاستثمار. وللمجمعات الشمسية نوعان أساسيان:

- مجمعات شمسية مسطحة (دون تركيز للأشعة الشمسية).
- مجمعات شمسية مركزة.

تسمى المجمعات الشمسية المسطحة في العديد من المراجع بمجمعات الحرارة المنخفضة، وذلك نظراً لأنَّ درجات الحرارة العملية التي يمكن الوصول إليها بواسطة هذه المجمعات لا تتجاوز $120[°C]$. أي أنه بواسطة هذه المجمعات يمكن إنتاج مصدر طاقة حرارية بمنسوب جيد يجد تطبيقات واسعة. لذلك تلقى المجمعات الشمسية المسطحة انتشاراً واسعاً، وذلك أيضاً لسهولة تصنيعها وانخفاض سعرها.

إن درجات الحرارة التي يمكن الوصول إليها بواسطة المجمعات المسطحة وكذلك مردود هذه المجمعات يتعلق بشكل رئيس ببنية هذه المجمعات ونوعية المواد المستخدمة وذلك عند شروط خارجية معينة.

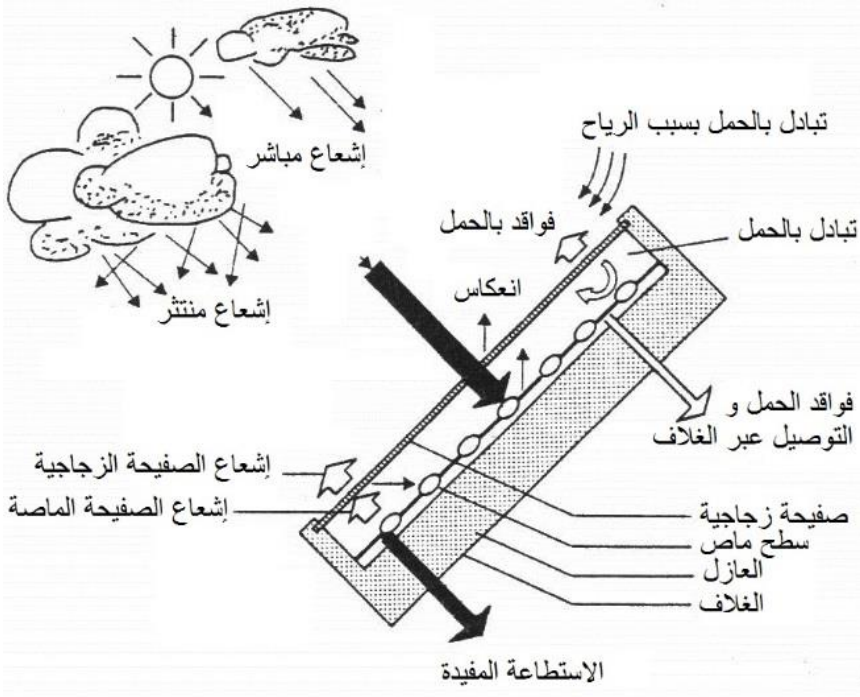
في هذا الفصل سيتم دراسة المجمعات الشمسية المسطحة وسيخصص فصل مستقل للمجمعات الشمسية المركزة.

3–2 بنية المجمعات الشمسية المسطحة:

يتألف المجمع الشمسي المسطح من صفيحة معدنية سوداء تمتص الإشعاع الشمسي وتحوله إلى طاقة حرارية محسوسة، تسمى هذه الصفيحة (السطح الماص).

تحت السطح الماص تتوضع أنابيب يتدفق عبرها الوسيط الناقل للحرارة (الماء غالباً). يقوم هذا الوسيط بنقل الطاقة الحرارية من السطح الماص عبر دارة مناسبة لاستثمار هذه الطاقة. ولتخفيض الفواقد الحرارية يتم عزل اللاقط من الأسفل وتغطيته بطبقة شفافة أو أكثر من الأعلى.

يبين الشكل (3–1) مبدأ بناء مجمع شمسي مسطح وكذلك تيارات التوازن الحراري للمجمع.

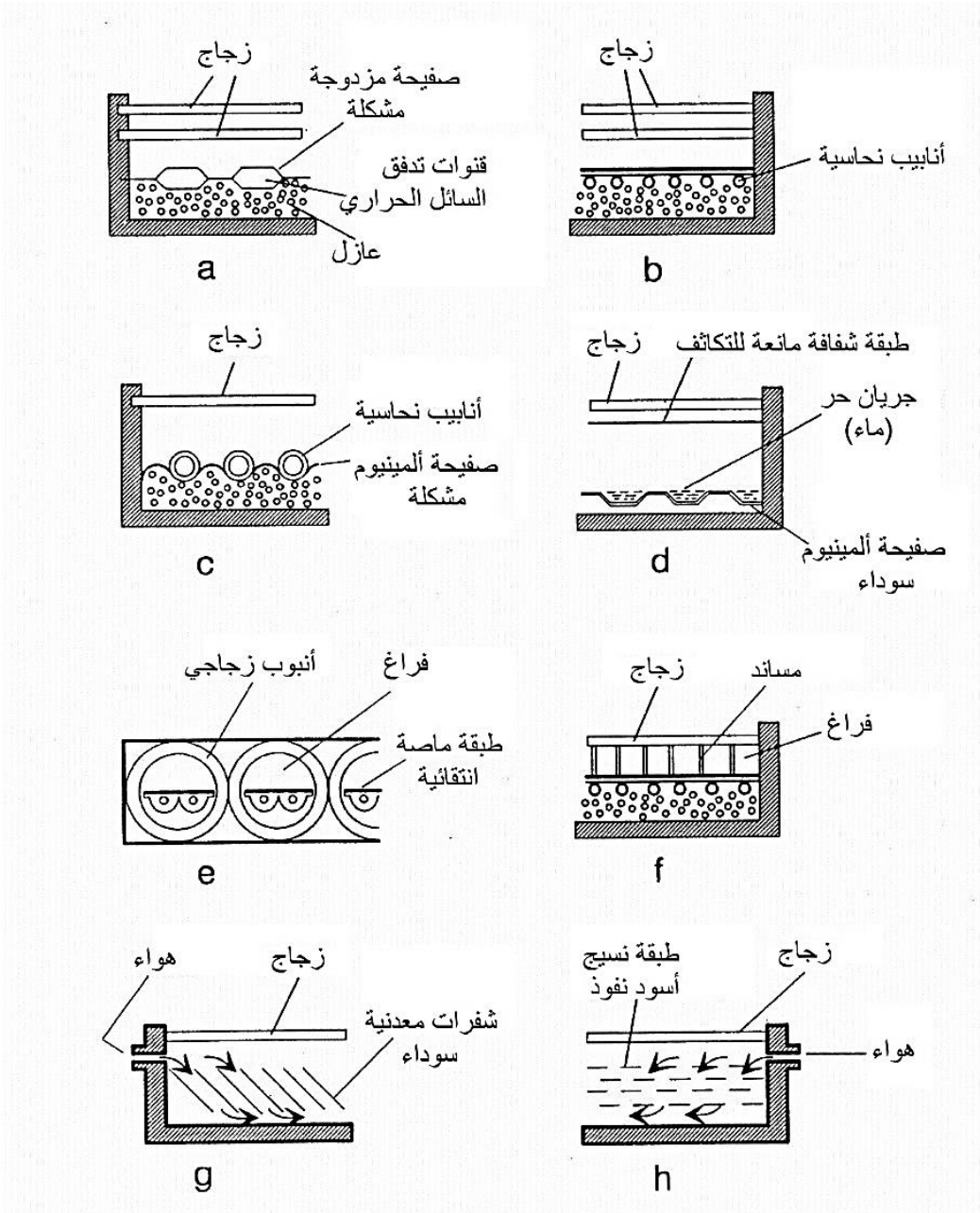


شكل (3–1) مقطع عرضي في مجمع شمسي مسطح

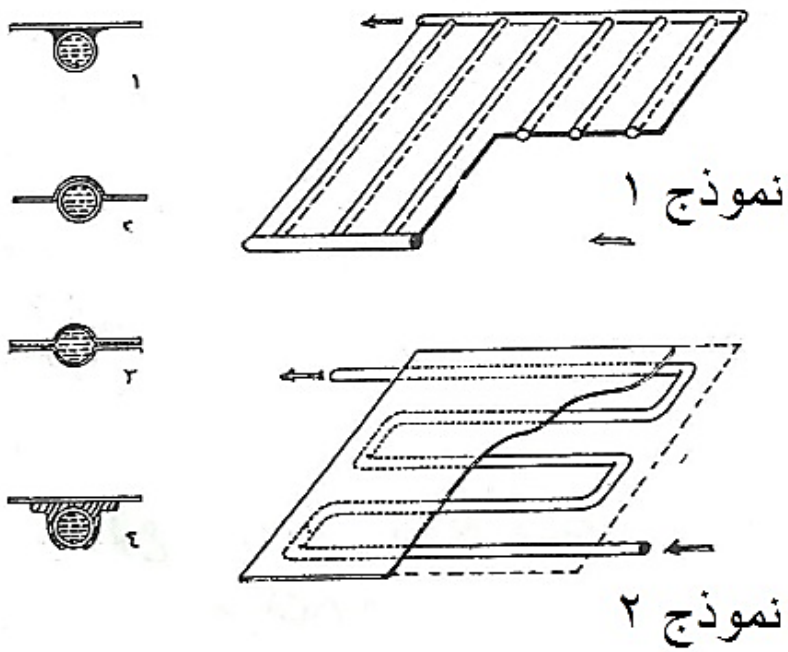
أما الشكل (3–2) فيبين مقاطع لمجمعات شمسية مختلفة البيئة. وتعتبر المجمعات الشمسية التي تستخدم الماء كوسيط ناقل أكثر انتشاراً نظراً لسهولة وصلها على شبكات الماء الساخن والتدفئة وغيرها من التطبيقات.

يعتبر السطح الماص الجزء الأهم في المجمع. ويتألف غالباً من صفيحة معدنية رقيقة مع جملة أنابيب نحاسية تتصل مع بعضها عبر أنبوبين (مجمعين)، سفلي يدخله الماء البارد وعلوي يجمع الماء الساخن. وتثبت الأنابيب على الصفيحة إما باللحام أو بالتثبيت الميكانيكي.

يبين الشكل (3–3) نماذج مختلفة لصفائح ماصة وطرق تثبيت الأنابيب الناقلة بها.



شكل (3–2) أشكال مختلفة لبنية المجمعات الشمسية المسطحة



شكل (3–3) طرق تثبيت الأنابيب الناقلة بالسطح الماص

تقوم الصفائح الماصة كما ذكرنا بامتصاص الطاقة الشمسية وتحويلها إلى طاقة حرارية مفيدة. يجب أن تتمتع الصفائح الماصة بمعاملات امتصاص عالية α وفي الحالة المثالية يكون $\alpha(\lambda) = 1$ وهي حالة الجسم الأسود المطلق الذي يمتص كل الإشعاعات مهما اختلف طول الموجه λ .

من المعروف أن العديد من السطوح السوداء العادية لها معامل امتصاص $\alpha \geq 0.9$ لكن لهذه الأجسام وحسب قانون كيرشوف معامل إشعاع $\varepsilon(\lambda)$ أعظمي.

والنسبة بين الطاقة التي يشعها الجسم الأسود والطاقة التي يمتصها تتعلق بطول الموجة ودرجة حرارة الجسم أي:

$$\frac{\varepsilon(\lambda)}{\alpha(\lambda)} = f(\lambda, t) \qquad \langle 3-1 \rangle$$

ويستفاد من هذه العلاقة في اختيار سطوح ماصة انتقائية لها معاملات امتصاص α كبيرة في مجال الأشعة المرئية، ومعاملات إشعاع صغيرة ما أمكن في مجال الأشعة تحت الحمراء.

تسمى الطبقات بالمواصفات السابقة بطبقات α/ε وحسب نوع المادة وطريقة تغطية الصفيحة الماصة يمكن الوصول إلى سطوح انتقائية بنسبة α/ε تصل إلى أكثر من 10 . بينما تكون هذه النسبة عند السطوح غير الانتقائية مساوية للواحد.

ورغم أن السطوح الانتقائية أدت إلى تحسين أداء المجمعات الشمسية بشكل كبير إلا أن لهذه السطوح سلبيتين هامتين:

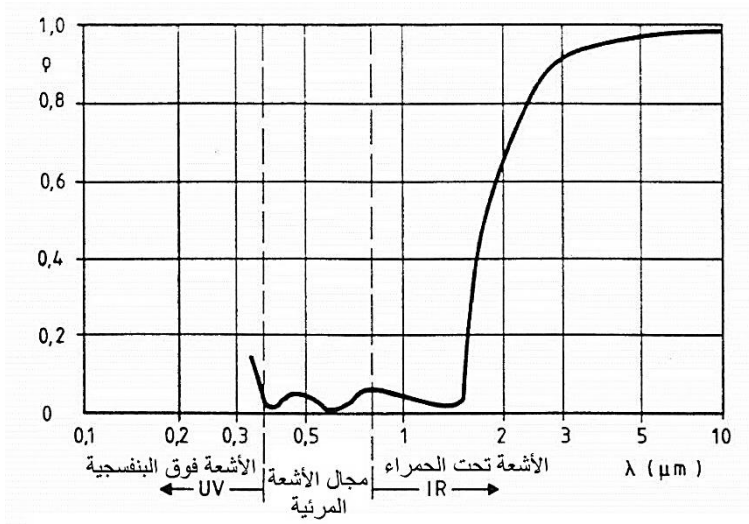
أولاً: حساسة بشكل كبير لدرجات الحرارة والعوامل الجوية الخارجية.

ثانياً: كلفة إنتاج عالية.

تتعلق جودة الطبقة الماصة أيضاً بمعامل الانعكاس ρ ، ومن المعروف أن للأجسام غير الشفافة معامل انعكاس يحقق العلاقة $\alpha + \rho = 1$.

وبالتالي فالأمر محلول بالنسبة للطبقات الانتقائية ذات معامل الامتصاص الكبير في مجال الأشعة المرئية حيث تكون α أعظمية فتكون ρ صغيرة.

يبين الشكل (3–4) العلاقة بين معامل الانعكاس وطول الموجة لطبقات ماصة.



شكل (3–4) معامل الانعكاس ρ كتابع لطول الموجة للطبقات الماصة الانتقائية

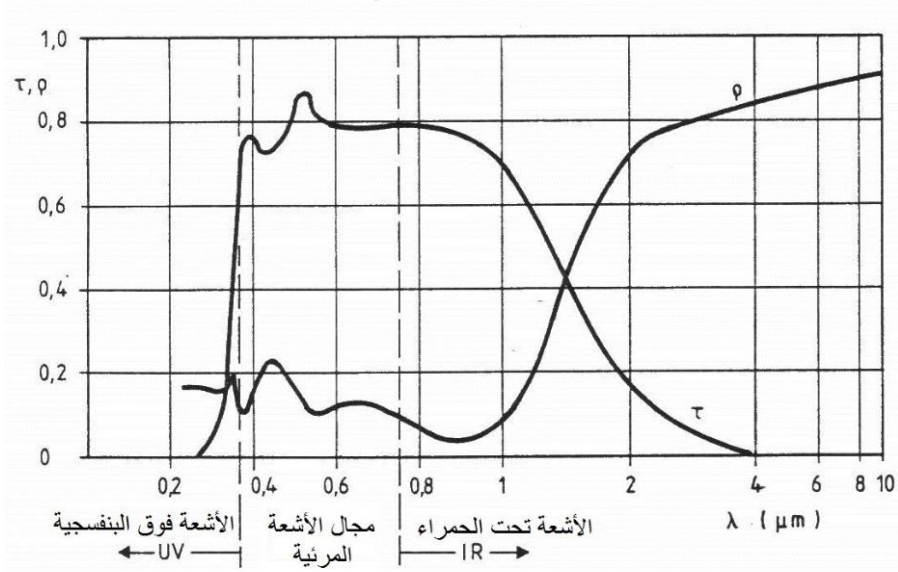
للغطاء الشفاف أيضاً أهمية كبيرة في رفع كفاءة المجمعات الشمسية المسطحة وتخفيض فواقد الحمل بشكل كبير، ولكن الصعوبة تكمن في خفض الإشعاع من وعبر الغطاء الشفاف. لكن كما في الطبقات الماصة الانتقائية على الزجاج أن يكون ذا معامل نفاذ للأشعة المرئية τ عالياً. بينما يجب أن يكون هذا المعامل أصغر ما يمكن للأمواج الطويلة. وهنا يتم الحديث عن زجاج اصطفائي.

انظر الشكل (3–5) في حالة الزجاج الاصطفائي.

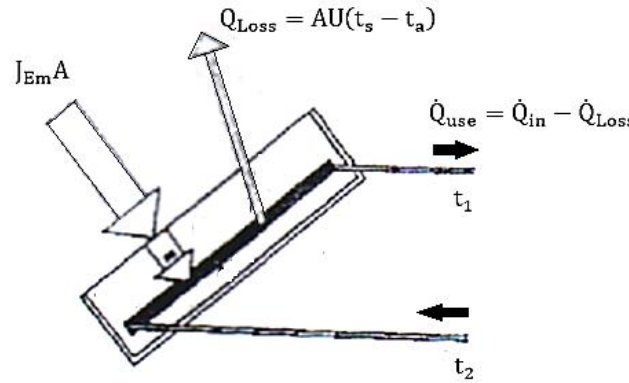
يكون الانعكاس أيضاً أصغرياً في مجال الأشعة المرئية وفي مجال الأشعة ذات الأمواج الطويلة.

3–3 الاستطاعة المفيدة للمجمعات الشمسية المسطحة والمردود:

يبين الشكل (3–6) مخططاً مبسطاً للتوازن الحراري لمجمع شمسي مسطح بإهمال الفواقد الناتجة عن الانتقال الحراري عبر السطوح المعزولة، ودمج الفواقد عبر الغطاء الزجاجي من إشعاع وانعكاس وحمل في مركبة واحدة وبمعامل انتقال حراري كلي U نحصل على الشكل المذكور.



شكل (3–5) معاملا نفاذ الأشعة المرئية τ والانعكاس ρ لزجاج اصطفائي كتابع لطول الموجة



شكل (3–6) مخطط التوازن الطاقي لمجمع شمسي مسطح

يتلقى سطح المجمع إشعاع شمسي طاقته $J_{Em}A\ [w]$.

J_{Em} : شدة الإشعاع الشمسي على السطح المائل للمجمع $[w/m^2]$

A : مساحة سطح المجمع $[m^2]$

ينفذ من هذه الاستطاعة عبر الزجاج ما مقداره $J_{Em}A \cdot \tau$.

τ : معامل نفاذ الأشعة المرئية عبر الزجاج

تصل الاستطاعة المتبقية إلى السطح الماص ويتم امتصاص ما مقداره:

$$\langle 3-2 \rangle \qquad \dot{Q}_{in} = J_{Em}A \cdot \tau \cdot \alpha \ [w]$$

أما الاستطاعة المفقودة فتحسب بالعلاقة التالية:

$$\langle 3-3 \rangle \qquad \dot{Q}_{Loss} = AU(t_s - t_a) \ \ [w]$$

t_s : درجة حرارة السطح الماص $[°C]$

t_a : درجة حرارة الهواء المحيط $[°C]$

U : معامل الانتقال الحراري الكلي بين سطح المجمع والجو المحيط $[w/m^2°C]$

تتعلق قيمة U بنوع السطح الماص ونوع وعدد الأغطية الزجاجية، ويتراوح بين $8[w/m^2°C]$ لمجمع بسطح ماص عادي وغطاء زجاجي واحد من النوع غير الاصطفائي و $2[w/m^2°C]$ لمجمع شمسي بسطح ماص انتقائي وغطاءين زجاجيين من النوع الانتقائي.

وهذه القيم تم إيجادها تجريبياً عند سرعة رياح $5[m/sec]$ ودرجة حرارة خارجية $10[°C]$. والاستطاعة المفيدة تمثل فرق بين الاستطاعة الممتصة والاستطاعة المفقودة وعليه:

$$\langle 3-4\rangle \quad \dot{Q}_{use} = \dot{Q}_{in} - \dot{Q}_{Loss} \ [w]$$

$$\langle 3-5\rangle \quad \dot{Q}_{use} = J_{Em} A \cdot \tau \cdot \alpha - AU(t_s - t_a) \ [w]$$

أما الاستطاعة النوعية المفيدة:

$$\langle 3-6\rangle \quad \dot{q}_{use} = \frac{\dot{Q}_{use}}{A} = J_{Em} \cdot \tau \cdot \alpha - U(t_s - t_a) \ \left[\frac{w}{m^2}\right]$$

أما المردود:

$$\langle 3-7\rangle \quad \eta = \frac{\dot{q}_{use}}{J_{Em}} = \tau \cdot \alpha - \frac{U}{J_{Em}}(t_s - t_a)$$

أو بشكل أبسط:

$$\langle 3-8\rangle \quad \eta = \eta_0 - \frac{U}{J_{Em}}(t_s - t_a)$$

في علاقات الاستطاعة المفيدة والمردود السابقة نلاحظ ارتباطها بدرجة حرارة السطح الماص. وحيث أن درجة حرارة السطح الماص ليست ثابتة ويصعب تحديدها فقد طور كل من العالمين Hottel و Woertz عام 1942م نموذجاً عملياً لمجمع شمسي مسطح.

قام العالم Bliss لاحقاً بتحسينه لذلك يسمى HWB-MODELL نسبة إلى العلماء الثلاثة. ولا يزال هذا النموذج معتمداً حتى الآن في كل عمليات النمذجة للمجمعات الشمسية المسطحة. والمعادلة الأساسية لهذا النموذج هي:

$$\langle 3-9\rangle \quad \dot{Q}_{use} = F_R \, A \, [\tau \cdot \alpha \cdot J_{Em} - U(t_2 - t_a)] \ [w]$$

$\dot{Q}_{use}$: الاستطاعة المفيدة للمجمع $[w]$

F_R : معامل تحريك الحرارة

t_2 : درجة حرارة دخول السائل إلى المجمع $[°C]$

بقية الرموز كما في العلاقات السابقة.

يمثل معامل تحريك الحرارة F_R النسبة بين الاستطاعة المفيدة والاستطاعة المستفادة من نفس المجمع فيما لو كانت درجة حرارة سطحه ثابتة $t_s = t_2$ ومساوية لدرجة حرارة دخول السائل إلى المجمع عند ثبات بقية الشروط. أو:

$$F_R = \frac{\text{الاستطاعة المفيدة الفعلية}}{\text{الاستطاعة المفيدة في حالة } (t_s = t_2)}$$

في العلاقة $\langle 9-3 \rangle$ نجد أن $\dot{Q}_{use}$ هي تابع خطي لفرق درجات الحرارة بين السائل الداخل إلى المجمع والوسط المحيط. وبدلاً من t_s في العلاقة $\langle 5-3 \rangle$ والتي يصعب تحديدها تستخدم هنا درجة الحرارة t_2 التي يسهل قياسها ومعرفتها. ويفيد F_R كمعامل تصحيح لحساب الاستطاعة المفيدة.

يتم تعويض الخطأ في اعتماد العلاقة $\langle 9-3 \rangle$ لدرجة حرارة ثابتة للسطح الماص مساوية لدرجة حرارة دخول السائل t_2 عن طريق إيجاد قيم تجريبية لمعامل انتقال الحرارة الكلي U.

يمكن حساب معامل تحريك الحرارة من العلاقة:

$$\langle 3-10 \rangle \qquad F_R = F' \cdot F''$$

F' : معامل فاعلية السطح الماص

F'' : معامل السعة الحرارية للمجمع

معامل السعة الحرارية F'' يأخذ بالاعتبار السعة الحرارية للسائل الناقل للحرارة في واحدة السطح من المجمع والتي لم تؤخذ بالاعتبار حتى الآن.

$$\langle 3-11 \rangle \qquad F'' = \frac{\dot{m} \cdot C}{U \cdot F'}\left(1 - e^{-F'\frac{U}{\dot{m} \cdot C}}\right)$$

C : الحرارة النوعية للسائل الحراري $[J/kg°C]$

$\dot{m}$: التدفق الكتلي لواحدة السطح $[kg/s \cdot m^2]$

U : معامل انتقال الحرارة الكلي للمجمع $[w/m^2°C]$

يمثل معامل فاعلية السطح الماص F' النسبة بين الاستطاعة المفيدة والاستطاعة التي يمكن الحصول عليها من نفس المجمع لو كانت درجة حرارة السطح الماص t_m ثابتة عند ثبات بقية الشروط.

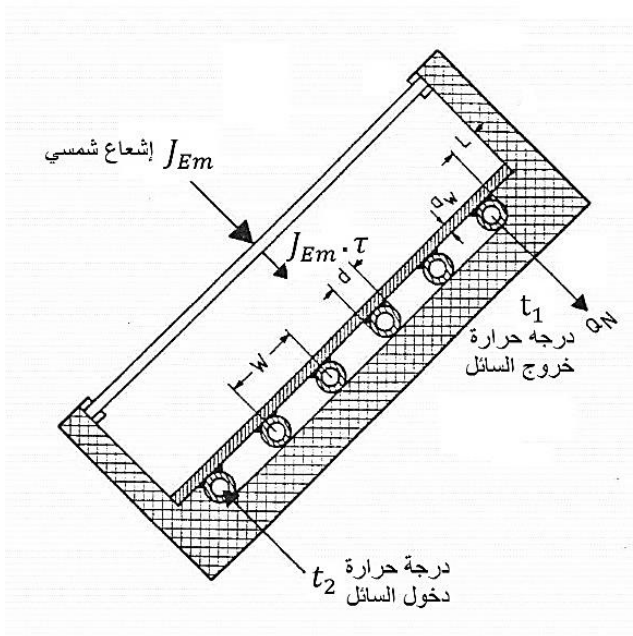
حيث:

$$t_m = (t_1 + t_2)/2 .$$

علماً بأن $F' = 1$ للسطح الماص المثالي.

تتعلق قيمة F' بالأبعاد الهندسية للأنابيب والسطح الماص وكذلك بنوعية المواد المستخدمة. انظر الشكل (3–7). ويمكن حسابه من العلاقة التالية:

$$\langle 3-12 \rangle \qquad F' = \frac{1/U}{w\left[\frac{1}{U[d+(w-d)F^*]} + \frac{1}{\pi d \alpha_R}\right]}$$



شكل (3–7) الأبعاد الهندسية للمجمع الشمسي المسطح

في العلاقة السابقة :

w : المسافة بين أنبوبين $[m]$

d : قطر الأنبوب $[m]$

α_R : معامل الانتقال الحراري في الأنبوب $[w/m^{2\circ}K]$

F^* : معامل الترييش. ويأخذ بالاعتبار انتقال الحرارة من الصفيحة الماصة (زعانف وأضلاع) إلى الأنبوب:

$$\langle 3-13\rangle \qquad F^* = \frac{\tanh(b\,.\,\ell)}{b\,.\,\ell}$$

حيث:

$$b = \sqrt{\frac{U}{\lambda \cdot \alpha_w}} \quad \left[\frac{1}{m}\right]$$

λ : معامل التوصيل الحراري للسطح الماص $[w/m°K]$

α_w : سماكة السطح الماص $[m]$

ℓ : طول الريشة (الزعنفة) $[m]$

ويعطى معامل تحريك الحرارة بالعلاقة التالية:

$$\langle 3-14\rangle \qquad F_R = \frac{\dot{m}\cdot C}{U}\left(1 - e^{-F'\frac{U}{\dot{m}\cdot C}}\right)$$

ويكون المردود وفق نموذج HWB:

$$\langle 3-15\rangle \qquad \eta = \frac{Q_{use}}{J_{Em}A}$$

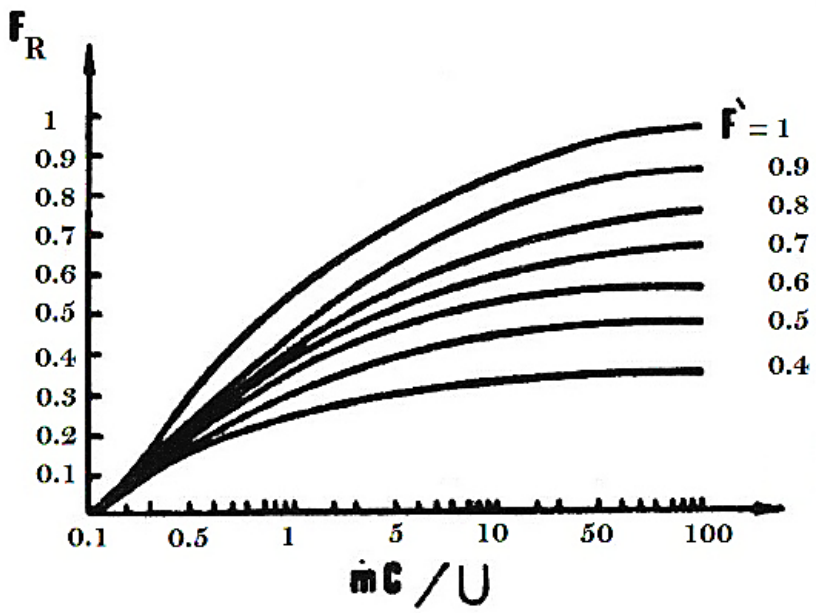
وبالتعويض من العلاقة $\langle 3-9\rangle$ نجد :

$$\langle 3-16\rangle \qquad \eta = F_R \cdot \alpha \cdot \tau - F_R \cdot \frac{U}{J_{Em}}(t_2 - t_a)$$

عندما لا يكون هناك حرارة ضائعة أي $\dot{Q}_{Loss} = 0$ يمكن كتابة العلاقة $\langle 3-16\rangle$ على الشكل التالي:

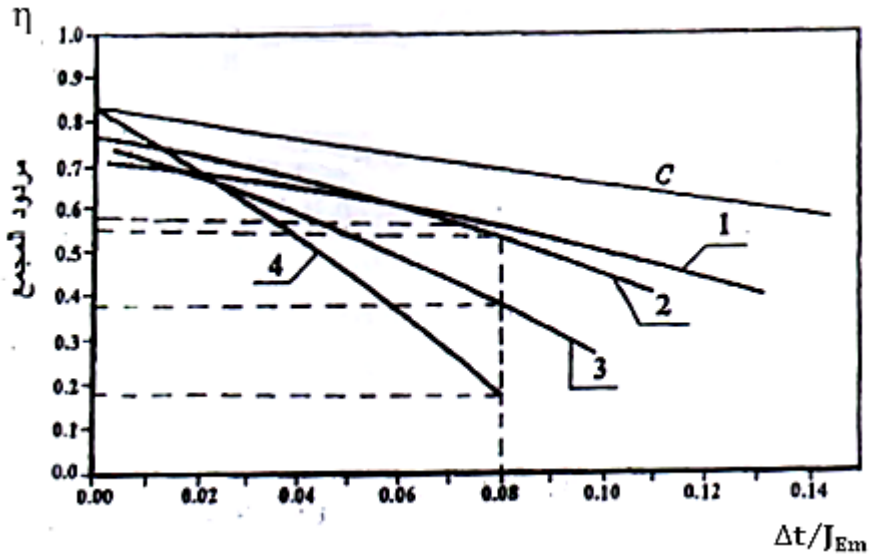
$$\eta_0 = F_R \cdot \alpha \cdot \tau$$

نلاحظ أن مردود المجمع من العلاقة ⟨16 – 3⟩ يتعلق بالعوامل $\{\tau , F_R , U , J_{Em} , \alpha\}$، وبالتالي يتعلق بنوع الطبقة الماصة، نوع وعدد الطبقات الزجاجية، نوع ودرجة العزل، بنية الطبقة الماصة وتوزع الأنابيب، شروط عمل المجمع (درجة حرارة دخول السائل وخروجه، شدة الإشعاع الشمسي، توجيه المجمع، درجة الحرارة الخارجية). العلاقة بين F_R والتدفق الكتلي مبينة بيانياً في الشكل (3–8).



الشكل (3–8) معامل تحريك الحرارة كتابع للتدفق الكتلي من أجل قيم مختلفة لمعامل فعالية السطح الماص F'

الشكل (3–9) يبين العلاقة بين المردود والنسبة $\Delta t/J_{Em}$ من مجمعات بمواصفات مختلفة ابتداء بمجمع مسطح عادي ذو سطح ماص أسود وغطاء زجاجي واحد مروراً بمجمعات شمسية مسطحة بسطوح ماصة انتقائية وأغطية زجاجية اصطفائية ثم مجمع شمسي مركز.



الشكل (3–9) منحنيات المردود لمجمعات شمسية مسطحة مختلفة كتابع للنسبة $\Delta t/J_{Em}$

① مجمع ذو سطح ماص اصطفائي وطبقتين من الزجاج الإصطفائي أيضاً

② مجمع ذو سطح ماص اصطفائي وطبقة زجاجية اصطفائية واحدة

③ مجمع بسطح ماص أسود وطبقتين زجاجيتين

④ مجمع بسيط بسطح ماص أسود وغطاء زجاجي واحد

⑤ مجمع شمسي مفرغ