الفصل السادس

توليد الكهرباء بالطاقة الشمسية الحرارية

6–1 مدخل:

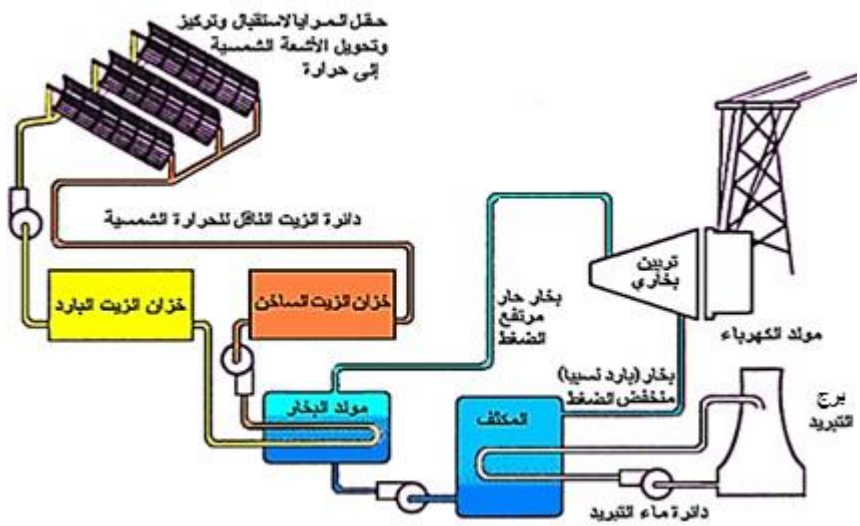
لتوليد الكهرباء بالطاقة الشمسية الحرارية لا بد من تركيز الإشعاع الشمسي الوارد، بهدف الحصول على درجات حرارة عالية، ونقله إلى سطح ماص حيث يتحول هذا الإشعاع إلى طاقة حرارية محسوسة.

يتم استجرار الطاقة الحرارية من السطح الماص بواسطة سائل ناقل للطاقة الحرارية إلى العنفة مباشرة أو عبر دارة ثانوية ليتم تحويلها إلى طاقة ميكانيكية يتم نقلها إلى مولد كهربائي لتتحول إلى طاقة كهربائية.

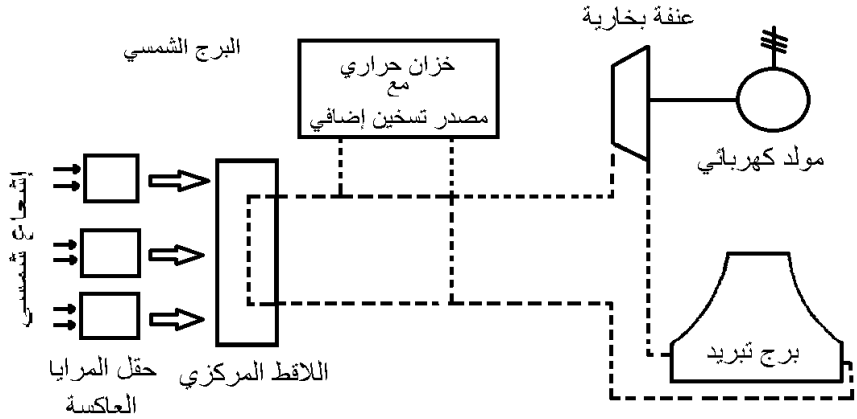
الدارة الترموديناميكية مماثلة للدارة الترموديناميكية في محطات توليد الطاقة التقليدية، الفرق هنا أن المنبع الحراري ليس مرجلاً بخارياً أو حجرة احتراق بل هو سطح ماص (نسميه هنا اللاقط أو المستقبل).

يتم توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية الحرارية بنوعين أساسيين من الأنظمة:

نظام المزرعة الشمسية، ونظام البرج الشمسي، والفرق بينهما هو بنوع المجمعات الشمسية ونوع اللاقط أو المستقبل يبين الشكل (6–1) مخططا لدارات العمل ودارة التسخين الشائعة في حالتي المزرعة الشمسية والبرج الشمسي.



(**A**)



(**B**)

الشكل (6–1) مبدأ توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية الحرارية وفق نظامي المزرعة الشمسية (A) والبرج الشمسي (B)

في المزارع الشمسية تستخدم غالبا المجمعات الشمسية القطعية بينما تستخدم المرايا المسطحة العاكسة في أنظمة الأبراج الشمسية، ويكون لكل مجمع قطعي في المزارع الشمسية لاقط (سطح ماص) خاص به بينما يكون اللاقط في النظام البرجي مركزياً وحيداً حيث توجه كافة الأشعة المنعكسة من المرايا إلى اللاقط على البرج. كلتا الحالتين يتم توجيه السطح العاكس وفق محورين ما عدا حالة المزرعة الشمسية ذات المجاري القطعية فتوجه وفق محور واحد.

في المزارع الشمسية توجه المجمعات القطعية لتكون فتحاتها عمودية على الأشعة الشمسية.

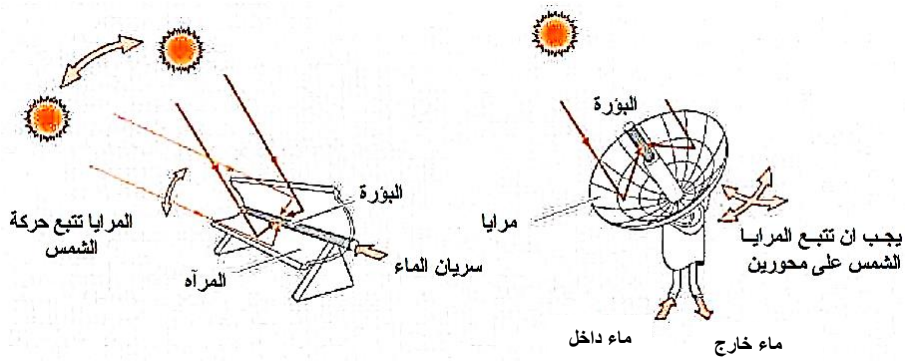
أما في الأنظمة البرجية فيتم توجيه المرايا لتبقى الأشعة المنعكسة عنها تسقط على سطح اللاقط في اللواقط المفتوحة أو على فتحة اللاقط في اللاقط ذي الحجرة.

6–2 نظام المزرعة الشمسية:

6–2–1 لمحة عامة:

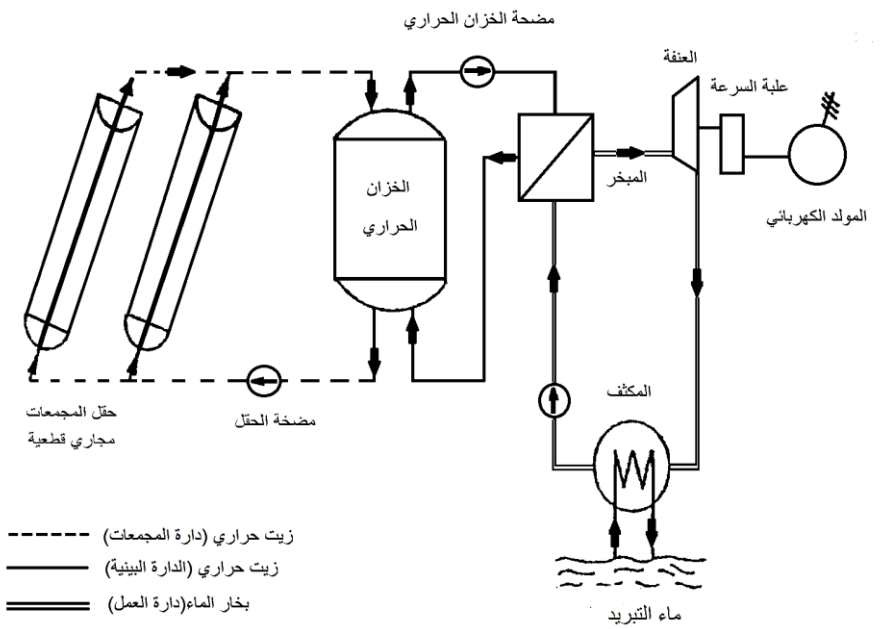
كما ذكرنا سابقا يتألف نظام المزرعة الشمسية من مجموعة (حقل) من المجمعات الشمسية المركزة، لكل منها اللاقط (السطح الماص) المستقل. ويتم توصيل هذه اللواقط على التوازي، ليقوم الوسيط الناقل للحرارة بنقل الطاقة الحرارية من اللواقط إلى خزان حراري أو إلى دارة العمل أي إلى (المبخر)

لتوليد البخار المحمص اللازم للعنفة البخارية التي ترتبط بمولد كهربائي يحول الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية.



الشكل (6–2) مجمعات شمسية مركزة تتعقب حركة الشمس

يبين الشكل (6–3) دارة وصل مبسطة لنظام مزرعة شمسية أما الشكلان (6–4) و (6–5) فيبينان صورة لمجمعين أحدهما لمجمع شمسي ذو مجرى قطعي مركز والآخر لمجمع شمسي قطعي مركز بنسبة تركيز $C = 200$.



الشكل (6–3) دارة وصل مبسطة لنظام مزرعة شمسية كهرحرارية

الشكل (6–4) مجمع شمسي ذو مجرى قطعي مركز

الشكل (6–5) مجمع شمسي قطعي مركز بنسبة تركيز $C = 200$

تعمل عادة دارة المجمعات بزيت حراري يصلح للعمل حتى درجات حرارة $\div 300)$ $400)C^o$ مع ارتفاع بسيط في الضغط ويبقى سائلا وهكذا تكون أقطار الأنابيب في دارة المجمعات صغيرة نسبياً ويتم تصميمها لتدفق وضغط صغيرين.

في الدارة المبينة في الشكل (6–3) تستخدم دارة ثانوية لتسخين المبخر وتقوم هذه الدارة بفصل دارة المجمعات عن دارة العمل.

ولهذا النظام ميزتين:

أ– إن دارة العمل لا تتأثر بالتذبذبات القصيرة للإشعاع الشمسي حيث تبقى درجة الحرارة وسيط التسخين ثابتة تقريباً.

ب- نظرا لفصل دارة المجمعات عن دارة العمل تصبح عملية التحكم في النظام أسهل.

6-2-2 درجة حرارة العمل والمردود:

لاحظنا أنه في المجمعات المركزة تتعلق درجة حرارة السطح الماص بدرجة التركيز للأشعة فكلما ازدادت نسبة التركيز C كلما ازدادت حرارة السطح الماص إلا أن ارتفاع درجة الحرارة كما لاحظنا يزيد من الفواقد وبالتالي يقلل من مردود المجمع.

أما الدارة الترموديناميكية فيتناسب مردودها مع درجة الحرارة حيث يزداد المردود بشكل مستمر مع ارتفاع درجة الحرارة.

إن المردود الكلي (المجمعات + الدارة) ينتج من جداء مردود الحقل الشمسي والدارة الترموديناميكية

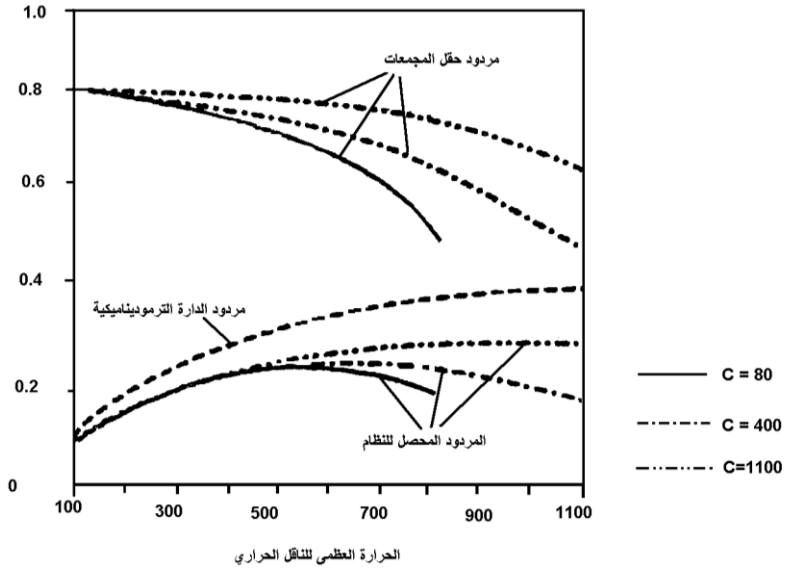
$$\eta = \eta_{CF} \cdot \eta_{TC} \qquad \langle 6-1 \rangle$$

η : المردود الكلي للنظام

η_{CF} : مردود حقل المجمعات

η_{TC} : مردود الدارة الترموديناميكية

أي من جداء تابعين لدرجة الحرارة وبالتالي ينتج تابع جديد لدرجة الحرارة يكون له ذروة (قيمة عظمى) وتكون درجة الحرارة المناسبة عند هذه القيمة.



الشكل (6–6) مبدأ تغير المردود الكلي لنظام مزرعة شمسية + دارة عمل كهر حراري

6–2–3 حقل المجمعات:

تعطى الاستطاعة المفيدة لحقل المجمعات بالعلاقة:

$$\langle 6-2\rangle \qquad Q_{NF} = J_{EV} \cdot \eta_{CF} \cdot A_{CF} \qquad [w]$$

أما الاستطاعة النوعية لواحدة المساحة فتعطى بالعلاقة:

$$\langle 6-3\rangle \qquad q_{NF} = J_{EV} \cdot \eta_{CF} \qquad [W/m^2]$$

لكن مردود الحقل η_{CF} يكون أصغر من مردود المجمعات المنفردة η_{cc} نظرا للفواقد في دارة المجمعات

$$\langle 6-4\rangle \qquad \eta_{CF} = f \cdot \eta_{cc}$$

أما قيمة f فتقع في المجال:

$$0.8 \leq f \leq 0.95$$

نعلم أن مردود المجمعات η_{cc} تحسب بالعلاقة:

$$\langle 6-5\rangle \quad \eta_{cc} = \rho \cdot \alpha - \frac{U_A}{J_{EM} \cdot C}(t_A - t_a) - \frac{\varepsilon_1 \sigma}{J_{EM} \cdot C}(T_A^4 - T_a^4)$$

تنتقل الاستطاعة المفيدة لمجمع مركزي عبر الجدار الداخلي للسطح الماص إلى السائل وتعطى بالعلاقة:

$$\langle 6-6\rangle \qquad \dot{Q}_{NC} = \alpha_i \cdot \nabla t_m \cdot A_i \qquad [w]$$

هذه الاستطاعة نفسها تعطى للسائل وبالتالي يكون:

$$\langle 6-7\rangle \qquad \dot{Q}_{NC} = C_1 \cdot \dot{m} \cdot (t_1 - t_2) \qquad [w]$$

في العلاقتين السابقتين:

A_i : السطح الناقل للاقط من جهة السائل $[m^2]$

∇t_m : فرق درجات الحرارة بين السطح الماص والسائل $[K]$

α_i : معامل الانتقال الحراري السطحي بين السائل والسطح الداخلي اللاقط $[w/m^2\ K]$

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

$\dot{m}$: التدفق الكلي $[kg/s]$

C_1 : الحرارة النوعية للسائل $[J/kg\ K]$

أما الاستطاعة حقل المجمعات فتكون:

$$\langle 6-8\rangle \qquad \dot{Q}_{NF} = \dot{Q}_{NC} \cdot n_c \cdot f \qquad [w]$$

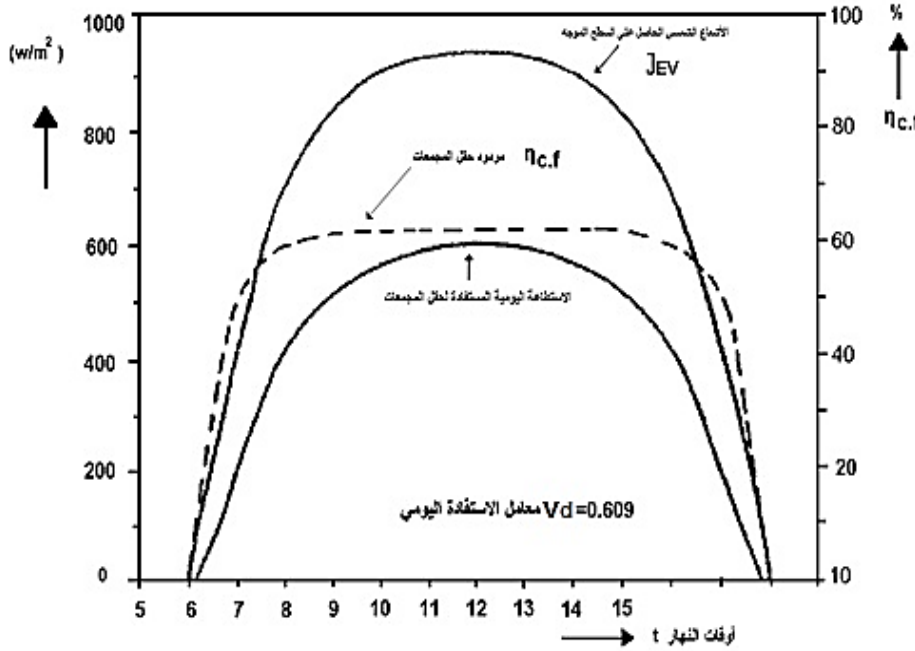
f : معامل الفقد في دارة المجمعات

n_c : عدد المجمعات في الحقل

يمكن تقييم كفاءة نظام شمسي ما من خلال معامل الاستفادة والذي يمثل النسبة بين الطاقة المستفادة والطاقة الواصلة إلى المجمعات خلال فترة معينة (يوم، شهر، سنة) فمثلا خلال يوم يعطى بالعلاقة:

$$\langle 6-9\rangle \qquad \nu_d = \frac{\int_{t_1}^{t_2} \dot{Q}_{NF}\ dt}{A_{cf} \int_{t_1}^{t_2} J_{EV}\ dt}$$

t_1 , t_2 : لحظة الغروب والشروق على التوالي.



الشكل (6–7) الاشعاع والاستطاعة المفيدة والمردود ومعامل الاستفادة اليومي لحقل مجمعات على شكل مجاري قطعية

معطيات المجمع:

$$\rho = 0.85 \ , \ c = 50 \ , \ t_a = 25\ [°c] \ , \ f = 0.89$$
$$\alpha = 0.95 \ , \ t_A = 265\ [°c] \ , \ \varepsilon_1 = 0.15$$
$$U_A = 8\ [w/m^2 \cdot K]$$

في الشكل (6–7) تمثل النسبة بين المساحة التي يحصرها منحني الاستطاعة النوعية المفيدة لحقل المجمعات والمساحة التي يحصرها منحني الإشعاع الشمسي J_{EV} مع محور الوقت معامل الاستفادة اليومي ويبلغ في حالتنا $\nu_d = 0.609$.

6–2–4 الخزان الحراري:

للخزان الحراري في المحطات الكهرحرارية الشمسية وظيفتان:

- للتغلب على التذبذبات القصيرة للإشعاع الشمسي خلال النهار.
- تأمين الطاقة خلال ساعات الليل.

غالبا ما يستخدم السائل في دارة المجمعات كوسيط تخزين للطاقة الحرارية حيث يتم تخزين الطاقة الحرارية على حساب رفع درجة حرارة هذا السائل (شريطة عدم حصول تحولات كيميائية) بمقدار:

$$\langle 6-10\rangle \qquad \Delta T = t_{max} - t_{min} \qquad [°c]$$

t_{max} : درجة الحرارة العظمى لأعلى الخزان الحراري $[°c]$

t_{min} : درجة الحرارة الصغرى لأسفل الخزان الحراري $[°c]$

حيث يتوضع السائل على طبقات حارة في الأعلى وأقل حرارة في الأسفل ويتم تحقيق تنضيد حراري جيد وعدم خلط الطبقات من خلال تدفق ملائم داخل الخزان وسحب ملائم أيضا وكذلك أبعاد مناسبة للخزان. هذا الفرق في درجات الحرارة عند إهمال الفواقد في الخزان الحراري والدارة يساوي إلى الفرق في درجات حرارة سائل التسخين للمبخر ويساوي الفرق بين درجات حرارة السائل الخارج والداخل إلى المجمعات. تحصل فواقد الخزان الحراري يمكن حسابها تقريبا بالعلاقة:

$$\langle 6-11\rangle \qquad \dot{Q}_{vs} = \frac{\lambda_I}{\delta_I} \cdot A_{sp} \cdot (t_{sp} - t_a) \quad [w]$$

λ_I : معامل التوصيل الحراري للعازل $[w/m \cdot K]$

δ_I : سماكة الطبقة الحدية $[m]$

A_{sp} : مساحة سطح الخزان الحراري $[m^2]$

t_{sp} : درجة حرارة سطح الخزان $[°c]$

t_a : درجة حرارة الوسط المحيط $[°c]$

ويتم عزل الخزان الحراري بحيث لا يكون الهبوط في درجة الحرارة خلال الليل يتجاوز 1 درجة مئوية.

يحسب حجم الخزان الحراري اللازم من العلاقة:

$$\langle 6-12\rangle \qquad V_{sp} = \frac{Q_{NSd} + Q_{vs}}{C_{sp} \cdot \rho_{sp} \cdot \Delta t_{sp}}$$

V_{sp} : حجم الخزان اللازم $[m^3]$

Q_{NSd} : الطاقة اليومية المفقودة من الخزان الحراري $[J]$

Q_{vs} : الطاقة اليومية المفقودة من الخزان الحراري $[J]$

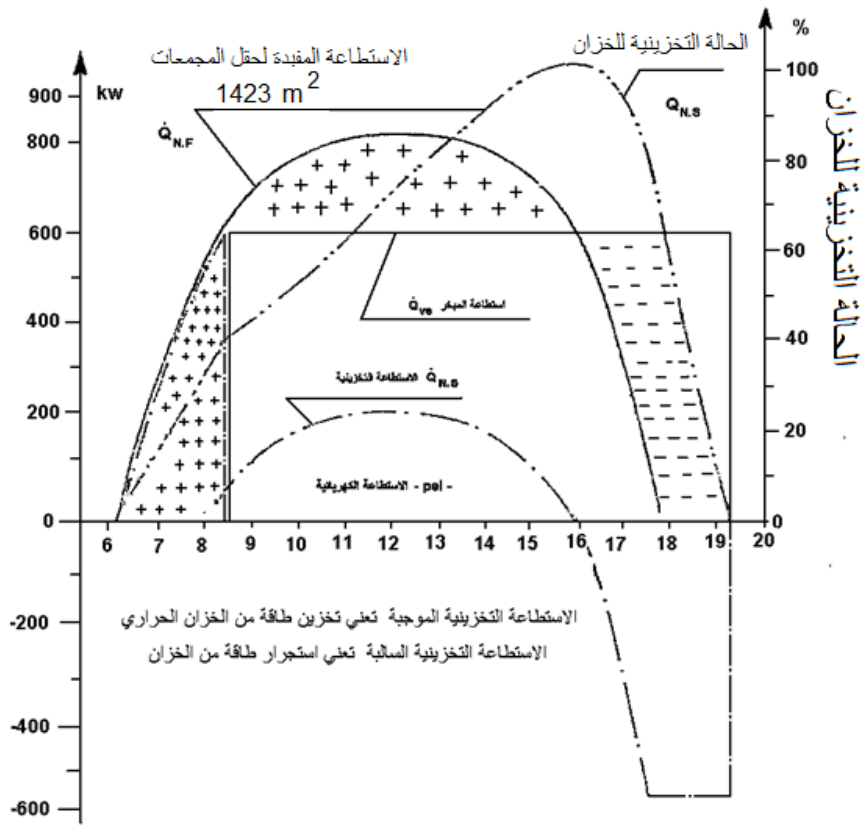
C_{sp} : الحرارة النوعية لسائل التخزين الحراري $[J/kg \cdot K]$

ρ_{sp} : كثافة وسيط التخزين (السائل الحراري) $[kg/m^3]$

Δt_{sp} : فرق درجات الحرارة $[K]$

حسب العلاقة $\langle 10 - 6 \rangle$ يؤمن الخزان توليد الطاقة الكهربائية باستطاعة ثابتة خلال فترة العمل التصميمية ،وفي حالة الخزان الشكل (6-8) من حوالي الساعة الثامنة صباحاً وحتى الساعة السابعة مساءً أي بعد غروب الشمس بحوالي ساعة .

تبلغ الطاقة المخزنة في الخزان الحراري في حالة الذروة وفق مخطط عمل نظام المزرعة الشمسية مع الخزان الحراري لمحطة كهرشمسية حرارية باستطاعة $100[kw]$ حسب الشكل المذكور حوالي $1800[kw.h]$ وعند فرق أعظمي في درجة حرارة الخزان الحراري $\Delta t_{sp} = 100[K]$ وكثافة الزيت $\rho_{sp} = 830[kg/m^3]$ والحرارة النوعية للسائل الحراري $C_{sp} = 2.3[kJ/kg.K]$ ويكون حجم الخزان حوالي $V_{sp} = 35[m^3]$. يشكل هذا الحجم مشكلة في المحطات الكبيرة نظراً لكمية الزيت الكبيرة المطلوبة ولذلك يتم اللجوء إلى حلول مساعدة بإضافة أجسام صلبة ذات سعات حرارية كبيرة نسبياً إلى داخل الخزان. في بعض المحطات يستغنى عن الخزان ويستخدم مصدر طاقة إضافي لتأمين عمل مستقر للمحطة الكهرشمسية الحرارية وتكون المحطة في هذه الحالة محطة هجينة.



الشكل (6–8) مخطط عمل نظام مزرعة شمسية مع خزان حراري لمحطة حرارية كهرشمسية ذات استطاعة كهربائية $\mathbf{P_{el} = 100[kW]}$

تحسب نسبة التخزين (الحالة التخزينية) للخزان الحراري من العلاقة التالية:

$$\langle 6-13\rangle \qquad L = \frac{Q_{NS}}{Q_{NSd}} 100\%$$

Q_{NS} : المحتوى الحراري الحالي للخزان.

Q_{NSd} : السعة الحرارية للخزان.

يمكن حساب Q_{NS} من العلاقة:

$$\langle 6-14\rangle \qquad Q_{NS} = \int_{t_1}^{t} \dot{Q}_{NF}.\,dt - Q_{ve}(t-t_0) \qquad [J]$$

t_1: لحظة بدء حقل المجمعات (لحظة الشروق) [s]

t: اللحظة المدروسة [s]

t_0: لحظة بدء عمل المبخر [s]

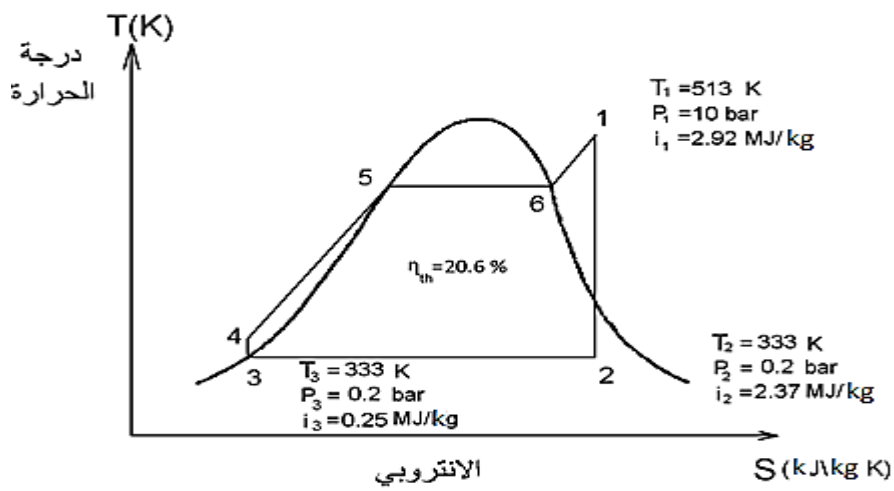
أو من العلاقة:

$$\langle 6-15\rangle \qquad Q_{NS} = \int_{t_1}^{t} \dot{Q}_{NS} dt \qquad [J]$$

$\dot{Q}_{NS}$: الاستطاعة التخزينية [w]

سعة الخزان الحراري يمكن إيجادها من المخطط إذا علمنا أن الطاقة المستفادة من حقل المجمعات يومياً تساوي الطاقة المستهلكة في المبخر. أما الطاقة المستفادة من حقل المجمعات تمثلها المساحة المحصورة بين $\dot{Q}_{NF}$ ومحور الزمن أما الطاقة المستهلكة في المبخر فتمثلها مساحة المستطيل المحصور بين $\dot{Q}_{EV}$ ومحور الزمن وعليه تكون المساحة المهشرة (+) تساوي إلى المساحة المهشرة (−) وكلا المساحتين و تمثلان سعة الخزان الحراري .

6-2-5 دارة العمل:



الشكل (6–9) المخطط (T–S) (الدارة الترموديناميكية) لعمل محطة توليد كهرشمسية حرارية باستطاعة $P_{el} = 100[kW]$ وسيط العمل هو الماء (المثال المدروس سابقاً).

2-1 تمدد في العنفة

2-3 تكاتف (انتزاع طاقة من المكثف)

3-4 رفع الضغط بواسطة مضخة التغذية

4-5 تسخين مسبق

5-6 تبخر

6-1 تحميص

تحسب المقدمة للمبخر Q_{re} من العلاقة:

$$\dot{Q}_{ev} = \dot{m} \cdot (i_1 - i_4) \qquad \langle 6-16 \rangle$$

m : التدفق الكلي لوسيط العمل (الماء) $[kg/s]$

$(i_1 - i_4)$: فرق الإنتالبي للماء الداخل والبخار الخارج من المبخر $[kJ/kg]$

أما المردود الحراري فيحسب من:

$$\eta_{th} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_4} \qquad \langle 6-17 \rangle$$

أما الاستطاعة الحرارية المقدمة للعنفة فتحسب من:

$$p_{th} = \dot{m}(i_1 - i_4).\eta_{th} \qquad [kw] \qquad \langle 6-18 \rangle$$

وتتعلق الاستطاعة الكهربائية المنتجة بالعوامل التالية:

η_m : الفواقد الميكانيكية والتي يعبر عنها بالمردود الميكانيكي

η_{th} : المردود الترموديناميكي للدارة

η_g : مردود المولد الكهربائي

η_s : الاستهلاك الذاتي لعناصر النظام (مضخات، تحكم، ....)

وعندها تكون الاستطاعة الكهربائية المنتجة:

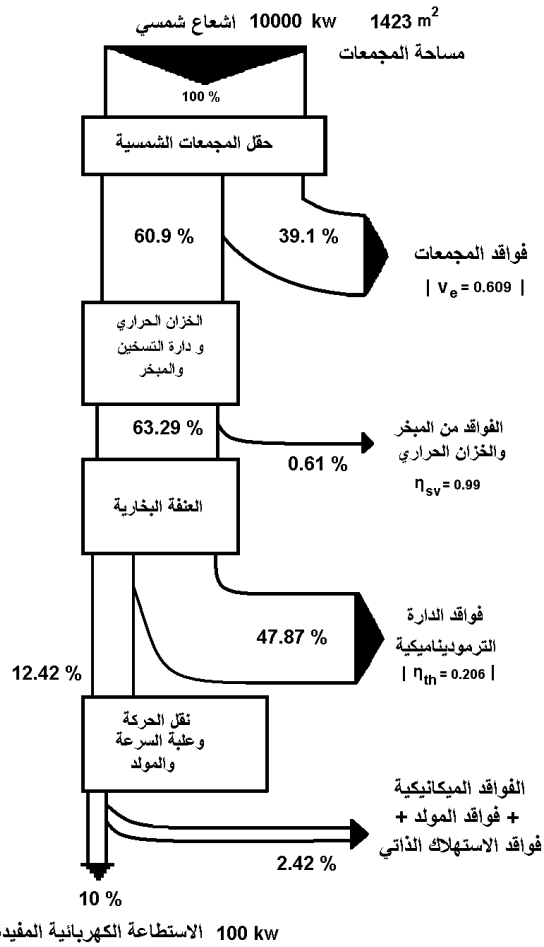
$$p_{el} = \dot{m}.(i_1 - i_4).\eta_{th}.\eta_m.\eta_g.\eta_s \qquad [kw] \qquad \langle 6-19 \rangle$$

أو:

$$p_{el} = p_{th}.\eta_m.\eta_g.\eta_s \qquad [kw] \qquad \langle 6-20 \rangle$$

6-2-6 مخطط انسياب الطاقة لمحطة توليد كهرشمسية حرارية:

يبين الشكل (6-10) مخطط انسياب الطاقة لمحطة توليد كهرشمسية حرارية لمزرعة شمسية ليوم محدد تبلغ فيه كمية الإشعاع الشمسي $8.46[kw.h/m^2.day]$ حسب المثال المدروس سابقاً لنظام مزرعة شمسية باستطاعة كهربائية $P_{el} = 100[kw]$



الشكل (6-10) مخطط انسياب الطاقة لمحطة توليد كهرشمسية حرارية

أما المراديد الواردة فتمثل المراديد الوسطية اليومية.

يبلغ المردود اليومي الكلي للمزرعة والمحطة معا 10% وهو مردود مقبول وشائع لمزرعة شمسية صغيرة بينما يصل لأنظمة حديثة وكبيرة من فئة $30[MW]$ إلى حوالي 15%

6-2-7 التحكم بعمل نظام المزرعة الشمسية الكهرحرارية:

الغاية من التحكم بعمل نظام المزرعة هو الى حد بعيد الحصول على استطاعة كهربائية ثابتة او حسب حاجة المستهلك دون التأثر بشدة الاشعاع الشمسي اللحظية، او بمعنى اخر تامين استقرار في عمل المحطة عند الحمل الكامل او الجزئي.

يبين الشكل (6-11) نظام تحكم لمزرعة شمسية كهرحرارية. يتم الابقاء على درجة حرارة السائل الخارج من المجمعات t_0 ثابتة بواسطة المنظم R_1 ، عن طريق التحكم بتدفق السائل عبر المجمعات وذلك بغض النظر عن التذبذبات في شدة الإشعاع الشمسي.

لإيضاح ذلك ننطلق من علاقة t_0 ببقية بارامترات الدارة التي يمكن صياغتها على الشكل التالي:

$$\langle 6-21 \rangle \qquad t_o = \frac{J_{EV}\, A_{CF}\, \eta_{CF}}{C_C\, m} + t_e \qquad [°c]$$

J_{EV} : شدة الإشعاع الشمسي على السطح العمودي على أشعة الشمس $[w/m^2]$

A_{CF} : مساحة حقل المجمعات $[m^2]$

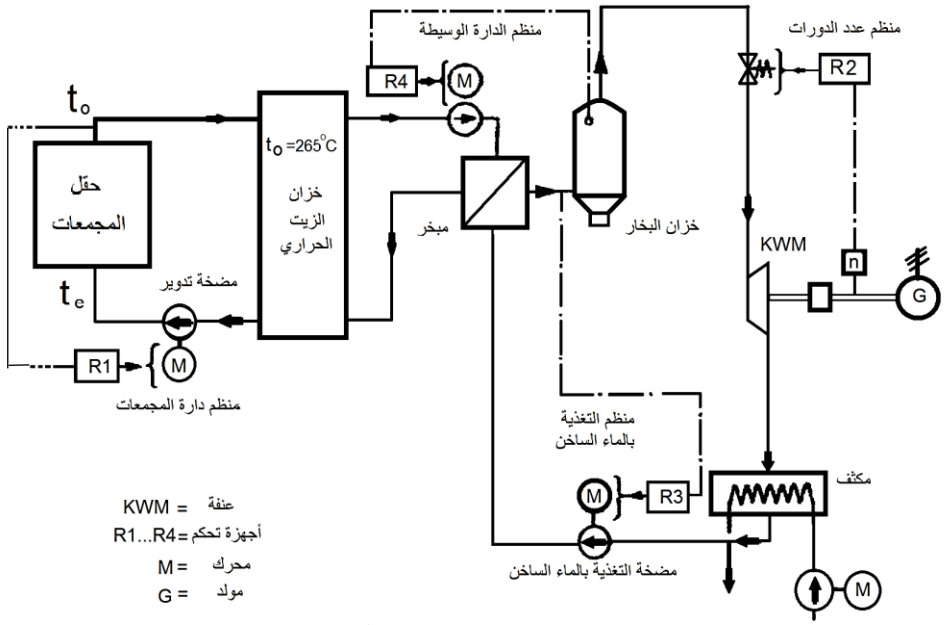
η_{CF} : مردود حقل المجمعات

C_C : الحرارة النوعية للزيت الحراري $[J/kg]$

m : تدفق السائل $[kg/s]$

t_e : درجة حرارة السائل الداخل إلى المجمعات $[°c]$

في نظام المزرعة الشمسي تكون t_e ، η_{CF} ، A_{CF} ، C_C ثابتة وللحفاظ على t_0 ثابتة عند تغيير J_{EV} يتم التحكم بتدفق السائل $\dot{m}$. عند انخفاض أو ازدياد الإشعاع الشمسي يزداد أو ينخفض تدفق الزيت عبر المجمعات بحيث تبقى درجة حرارة السائل الخارج من المجمعات ثابتة. أما التحكم بالاستطاعة الكهربائية المنتجة فيتم بواسطة التحكم بعدد دورات العنفة وهذا يحققه المنظم R_2 الذي يتحكم بتدفق البخار مما يؤدي إلى ازدياد أو نقصان عدد دورات العنفة حسب الحاجة، وفي حال وجود فائض في كمية البخار المنتجة في المبخر يتم تخزينها في خزان البخار، عند ازدياد أو نقصان الضغط في خزان البخار يقوم المنظم R_4 بتمرير كمية أقل أو أكبر من زيت



التسخين من الخزان الحراري إلى المبخر لإنتاج كمية أقل أو اكبر من البخار. أما المنظم R_3 فيقوم بتغذية المبخر (مولد البخار) بالماء حسب الحاجة.

الشكل (6–11) نظام التحكم بمزرعة شمسية