

## تحليل أداء نظام توليد بخار نوعي باستخدام الطاقة الشمسية

د.م. عدنان فرواتي\*

### الملخص

هدف هذا البحث هو دراسة وسائل تحسين مساهمة أشعة الشمس وطرائقها في تأمين الطاقة وفي حماية البيئة. وُضِعَ تصميم لنظام توليد بخار مشبع يتألف أساساً من مرجل بأنابيب نارية ومبادلات حرارية وتحكم آلي بحيث يستهلك الحرارة المنتجة بواسطة مجمع شمسي كلّها بقطع مكافئ خطي مناسب معدّل كمصدر طاقة مساعد للنظام. وقد أعد برنامج حاسوب مناسب لإيجاد القيم المثلى لخصائص المجمع الرئيسية التي تؤمن أقصى مقدار من الطاقة الشمسية سنوياً للنظام المذكور، وكذلك لحساب أداء النظام الأمثل وعرضه وبيان تأثير انحراف مختلف الخصائص عن قيمها المثلى في نسبة مساهمة الطاقة الشمسية سنوياً وذلك ضمن مخططات بيانية وضمن شروط تصميمية مختلفة. وقد تبين أنّ بهذا التصميم وبهذه الخصائص المثلى يمكن اكتساب طاقة شمسية بنسبة 50.8 بالمئة من الطاقة اللازمة لتوليد البخار سنوياً ضمن ساعات النهار.

**الكلمات المفتاحية:** مجمع قطع مكافئ خطي، لاقط ممتد، نظام توليد بخار، مبادل حراري، تحكم آلي، نسبة المساهمة الشمسية.

\* استشاري الطاقة المتجددة، جامعة إيبيلا الخاصة، إديلب، سورية.

**1- المدخل:**

انخفاض موارد البترول وتدهور البيئة يشجعان على تقييم الطاقات النظيفة المتجددة المتوافرة واستخدامها كطاقة بديلة أو مساعدة وأهمها الطاقة الشمسية. إذ تهدف البحوث إلى تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة مفيدة بمرود أفضل وكلفة أقل ومن أجل استخدامات أوسع وبيئة أنظف، وذلك باكتشاف تقنية جديدة أو تطوير تقنية قائمة أو اختيار التقنية المثلى لعملية معينة. وقد بيّن المرجع [1] كيفية اختيار نوع المجمع الشمسي الأنسب من الناحية التقنية والبيئية والمالية ومدى أهمية ذلك.

وقد تناولت الدراسة المرجعية هنا المراجع التي تبحث في توليد البخار بواسطة مجمع القطع المكافئ الخطي PTC المستخدم في مختلف العمليات مع التركيز على الحرارية منها لعلاقتها المباشرة بالبحث الحالي. فقطاع توليد البخار واسع ومهم في الصناعة، ويستهلك معدلات عالية من الوقود. ويمكن تقسيم هذا القطاع بحسب ضغط البخار إلى ثلاثة مجالات رئيسية، الأول: بضغط منخفض إلى 1.6 MPa، والثاني: بضغط متوسط من 0.5 MPa إلى 10 MPa، وهو بشكل رئيس مجال توليد الكهرباء بالعنفات البخارية.

وتوليد البخار بضغط متوسط من أجل العمليات الحرارية الصناعية IPH يشكل الجزء الأكبر، وهو بدرجات حرارة تراوح بين  $60^{\circ}\text{C}$  و  $260^{\circ}\text{C}$ ، وهو المجال الذي يمكن أن تقدمه مختلف تقنيات المجمعات الشمسية في حوض البحر الأبيض المتوسط وبمعدلات مفيدة سنوياً تراوح من  $550 \text{ kWh/m}^2$  إلى  $1100 \text{ kWh/m}^2$  [2].

وتجري البحوث والتطبيقات عن تطوير مجمع PTC والبحث عن مائع نقل الحرارة الأفضل، أو بتطبيق مبدأ توليد البخار مباشرة في مستقبل المجمع DSG مؤخراً. فالمرجع [1] يبيّن أن مجمع PTC يمكن أن يعطي حتى  $600^{\circ}\text{C}$  ومرود حراري حتى 63%، وأن استخدام طريقة

DSG في المجمع المذكور تلغي المائع الحراري إلا أنها تسبب تحديات تقنية من تشوهات كبيرة ومخاطر نتيجة الإحماء الشديد للمستقبل وتجعل التحكم اللازم للتوافق مع حالة جريان طوري الماء والبخار معقداً. وكمحاوله لتخفيف التشوه عند اتباع طريقة DSG بيّن المرجع [3] أنه باستخدام مستقبل من النحاس - حديد بدلاً من الفولاذ قد انخفض انحناءه من  $70 \text{ mm}$  إلى  $18 \text{ mm}$  عند درجة الحرارة  $200^{\circ}\text{C}$ . كما أن المرجع [4] قد أدخل الماء إلى المستقبل في مجمع PTC بجريان معاكس U لتخفيف فروق درجات الحرارة وتقليل التشوه فيه.

المرجع [5] بحث عملياً في أداء نظام توليد البخار بالطاقة الشمسية بوصفه مصدراً مساعداً لمولد البخار التقليدي من أجل حفظ الخضار في مصنع قائم في جنوب أسبانيا. المصنع يتطلب طاقة بخار سنوية 148 MWh وبدرجات حرارة  $120^{\circ}\text{C}$  و  $165^{\circ}\text{C}$  وضغط 2 barg و 7 barg وبمعدل بخار شهري معين يتوافق مع المواسم الزراعية. يستخدم المصنع مجمع PTC ومائعاً حرارياً ضمن دائرة مغلقة وخزان حراري لتخزين الفائض من الطاقة الشمسية، إذ بيّن المرجع أن الطاقة الشمسية تسهم بنسبة شهرية تراوح من 15% إلى 85% من البخار اللازم للإنتاج في كل شهر.

يبين المرجع [6] أن الصناعة هي المستهلك الرئيس للطاقة الحرارية في العالم، ومعظم الطلب بدرجة حرارة دون  $300^{\circ}\text{C}$  ما شجع الاستثمار في مشاريع الطاقة الشمسية الصناعية في السنوات الخمس الأخيرة وباستخدام المجمعات المركزة، وفي مقدمتها ذات القطع المكافئ الخطي PTC، ومنها مشروع نصر للصناعات الدوائية في مصر عام 2011 باستخدام طريقة DSG. وقد بحث المرجع المذكور في محاكاة نوعين من مجمعات PTC بمواصفات متقاربة، ولكن قطر المستقبل في الأول 15 mm وفي الثاني 25 mm، صنعا خصيصاً في أسبانيا للاستخدام في عمليات IPH مع تطبيق طريقة DSG وباستخدام Mat.

الوصول إلى الضغط 0.75 MPa في المرجل فإنه حصل في آخر نهار الاختبار ولم يتولد بخار. أما في ضغوط البخار المنخفضة والمرتفعة فقد أُسْتُخْدِمَ أيضاً مجمع PTC. المرجع [7] استخدم المجمع هذا في تحلية مياه البحر، كما استخدم المرجع [8] مجمع القطع المكافئ الخطي المركب CPC وبطريقة الإفلات المتعدد المراحل MSF لتبخير مياه البحر تحت ضغوط دون الضغط الجوي والحصول على ماء مقطر بعد تكثيف البخار بدرجات حرارة متوسطة والإفادة من حرارة التكايف. وفي مجال توليد الكهرباء بالعنقات البخارية عرض المرجع [1] خمسة أنواع من المجمع المركزة وفي مقدمتها مجمع PTC ثلاثة منها مشتقة من PTC ومجمع واحد وهو حقل المرايا الموجهة لعكس أشعة الشمس على مرجل البخار. إذ بيّن المرجع أن اختيار نوع المجمع لا يتوقف على نوع العملية فحسب بل على نواحٍ ثلاث أخرى هي النواحي التقنيّة والبيئية والمالية. وقد بيّن المرجع شجرة تسلسل الاختيار بالطريقة التحليلية AHP، كما بيّن نسبة الأفضلية لكل خيار من المجمع المذكورة لأربع مناطق مختلفة. المرجع [9] عرض محاكاة لمحطة توليد كهرباء بخارية قائمة تعمل بمجمعات PTC الشمسية وباستخدام مائع حراري ناقل. وبمقارنة النتائج المحسوبة بالقياسات الواقعية للمحطة نفسها تبين وجود توافق جيد مع متوسط خطأ نسبي بحدود 9.86%. ومنه استخدمت هذه المحاكاة من أجل أربعة مواقع لمحطات كهربائية في الجزائر ومنها بيشار، إذ تبين أن مردود الحقل الشمسي السنوي 41% وأن المردود الكلي السنوي للمحطة الكهربائية الشمسية 12%. يستنتج مما تقدم أن مجمع PTC هو الأكثر انتشاراً وأن تطبيق طريقة DSG فيه يمكن أن تكون مجدية من أجل جزء محدود من عمليات IPH ذات الضغوط الأكبر من 1.5 MPa، أي درجات الحرارة الأكبر من 200 °C. وأن الدراسة المتكاملة التي تشمل المجمع الشمسي بمواصفاته

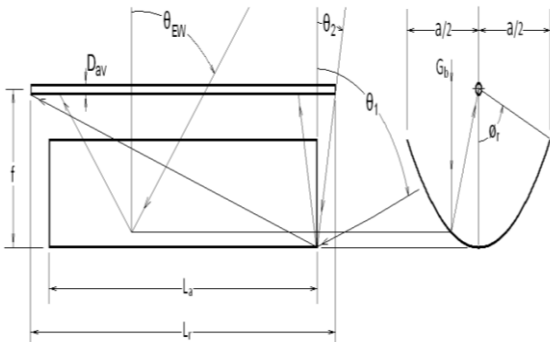
كما وُصِلَتِ المجمعات بحيث تسبب أقل فقد ضغط واختيرت شروط تشغيل بحيث تعطي عند المخرج بخاراً بنسبة قرابة 50% على الأقل وبدرجة حرارة قرابة 200 °C. بيّنت الدراسة أنه يحصل فقد ضغط مرتفع عند تطبيق طريقة DSG يصل إلى 0.3 MPa وسببه الرئيس غليان الماء داخل أنبوب المستقبل. إذ إنَّ فقد الضغط يتبع عدة متحولات هي ضغط ودرجة حرارة دخول الماء إلى المستقبل والغزارة وقطر المستقبل وإلى شكل شبكة وصل المجمع وطولها، والأهم تبعية فقد الضغط إلى شدة الإشعاع المتغير تلقائياً. وهذا ما يجعل الحصول على بخار بالنوعية والكمية المطلوبة أمراً حرجاً خصوصاً في الضغوط الأصغر من 1.5 MPa إذ تصبح طريقة DSG غير مقبولة [6].

وفي المرجع [4] استُخْدِمَ مجمع PTC لتوليد البخار في المستقبل أي بطريقة DSG وبدرجات حرارة دون المتوسطة وابتاع طريقة الجريان الطبيعي (الثرموسيفون) بين مستقبل المجمع والمرجل غير الناري، وهي الطريقة المتبعة في سخانات الماء الشمسية المسطحة، كما استخدم أنبوب U في المستقبل كما ذكر سابقاً. أي يتولد البخار في المستقبل ضمن دارة مغلقة ليختر الماء في المرجل ويطلقه تحت ضغط معين. لم يبيّن المرجع بُعد محرق العاكس وقد ضغط البخار عبر الدارة ودرجة حرارة دخول الماء إلى المرجل وقطر الملف فيه. فقد أجرى المرجع ثلاثة اختبارات في ثلاثة أيام تحت ضغط 0.2 MPa و 0.5 MPa و 0.75 MPa إذ قيس الإشعاع الشمسي ودرجات حرارة الجو ومختلف أجزاء النظام وقيس ضغط المرجل وغزارة البخار المتولد منه. عرض المرجع أداء النظام عند الساعة 13:50 تحت الضغط 0.5 MPa كونه بمواصفات ومعدل بخار يمكن الإفادة منه عملياً. أمّا توليد البخار من المرجل فقد حصل بين الساعة 13:50 و 15:40 بدرجة حرارة 153.5 °C وبمقدار 35.18 kg بخار مشبع ومردود 38.52% أمّا

درجات الحرارة المتوسطة والمرتفعة مباشرة في توليد البخار ودون الحاجة إلى خزان حراري احتياطي. ويايجاز فإن هذه الدراسة تقدم مساهمة علمية ضمن شقين: الأول تصميم نظام توليد بخار نوعي معدّل، والثاني إعداد برنامج حاسوب لاستنتاج القيم المثلى لخصائص المجمع وبيان أداء النظام الأمثل، ومدى تأثير انحراف إحدى خصائصه في نسبة مساهمة الطاقة الشمسية سنوياً  $F_{an}$  في توليد البخار ومن أجل شروط تصميمية مختلفة.

## 2 - الأسس النظرية:

حَسِبَ الإشعاع الكلي والمنتثر والمباشر  $G$  و  $G_d$  و  $G_B$  الساقط على متر مربع أفقي عند اليوم الأوسط من كل شهر باستخدام البيانات المناخية لمدينة حلب، وذلك بحسب الطرائق والبيانات الواردة في المرجعين [11] و [12].

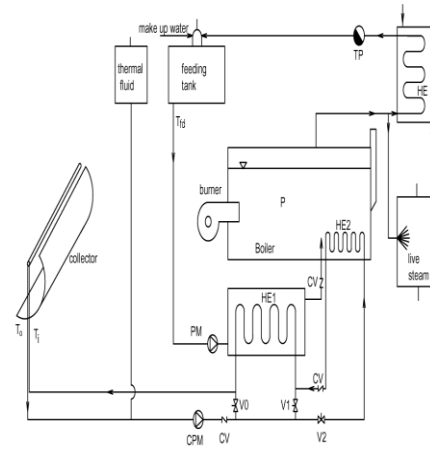


الشكل 2- ابعاد و زوايا العاكس و المستقبل في المجمع الشمسي.

يتألف النظام المعني بالبحث أساساً من المجمع الشمسي ومرجل البخار وتوابعه والمبادلات الحرارية والتحكم وملحقاته، كما هو مبين في الشكل 1.

**المجمع الشمسي:** هو مجمع قطع مكافئ خطي يدور حول محوره الممتد شرقاً وغرباً ليتعقب أشعة الشمس، كما هو مبين في الشكل 2، وبحيث يكون الإشعاع المباشر ومحور المستقبل (اللاقط) والناظم على مستوي فتحة العاكس في مستوي واحد بقصد التقاط أكبر قدر ممكن من

كلها والعملية الحرارية بجميع شروطها تعطي نتائج أكثر دقة ويمكن الاعتماد عليها. ومن أجل العمليات التي تتطلب معدل بخار ثابتاً تقريباً، فإن استخدام الطاقة التقليدية وأجهزتها المتوفرة حالياً إلى جانب الطاقة الشمسية المتغيرة يؤمن استقراراً في التزويد بالطاقة ويستغني عن خزان الطاقة الشمسية المكلف.



الشكل 1- نظام توليد البخار المشبع.

كما أن المراجع المختلفة لم تعط كامل مواصفات المجمعات التي استخدمتها وخصوصاً بُعد محرق العاكس الذي له تأثير في أداء المجمع وكلفته. هذا وقد أخذت هذه الأفكار بالحسبان لدى إعداد البحث الحالي.

وفي هذا البحث حُوّل الإشعاع الشمسي إلى طاقة حرارية بواسطة مجمع بقطع مكافئ خطي لاستخدامها كطاقة مساعدة لتوليد البخار المشبع بواسطة النظام المبين في الشكلين 1 و 2. ويقصد زيادة استقبال الإشعاع المنعكس مُدَدَ الأنبوب المستقبل اللاقط خارج جانبي العاكس (كجزء من إسهامات هذا البحث لتطوير النظام). أمّا المرجل فهو بأنابيب نارية وبضغط متوسط واستطاعة منخفضة، وهو المستخدم بشكل واسع في وحدات العمليات الصناعية [10]. تساعد المبادلات الحرارية والعناصر المستخدمة في هذا النظام والتحكم المتبع على التقاط قدر أكبر من الإشعاع واستخدام الطاقة الحرارية الناتجة ذات

$$\begin{aligned} \theta_{EW} \leq \theta_2, \quad L_{rx} &= L_a \quad (6) \\ \theta_1 > \theta_{EW} > \theta_2, \quad L_{rx} &= \frac{(R+1)}{2} L_a - f \tan \theta_{EW} \\ \theta_{EW} \geq \theta_1, \quad L_{rx} &= 0. \\ \cos \theta_{EW} &= (1 - \cos^2 \delta \times \sin^2 \omega)^{0.5} \quad (7) \end{aligned}$$

إذ  $\delta$  و  $\omega$  هما زاويتا الانحراف الشمسي والزاوية الساعية [11]. أمّا درجة حرارة المائع الحراري عند مخرج المجمع فتستنتج من معادلة التوازن الحراري التفاضلية لمقطع أنبوب المستقبل اللاقط مع غلافه الشفاف المحيط به، وبعد التكامل تصبح

$$\begin{aligned} T_o &= \text{Exp} \left( \frac{-A_r U_i F}{m_c C_{tf}} \right) \left( T_i - T_a - \frac{S}{U_i} \right) + \\ &T_a + \frac{S}{U_i} \quad (8) \end{aligned}$$

إذ  $A_r$  مساحة سطح المستقبل، و  $U_i$  عامل فقد الحرارة الكلي للمستقبل عبر الغلاف الشفاف، و  $F$  العامل الحراري للمجمع، و  $m_c$  غزارة المائع الحراري، و  $C_{tf}$  الحرارة النوعية للمائع و  $T_i$  درجة حرارة دخول المائع للمستقبل، و  $T_a$  درجة الحرارة الخارجية، و  $S$  الإشعاع المنقطع من قبل المستقبل [11] و [13].

$$\begin{aligned} A_r &= \pi D_{av} L_r \quad (9) \\ m_c &= \frac{1}{2} \times \frac{\pi}{4} D_{av}^2 V \rho_{tf} \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S &= (\tau \alpha)_b \frac{\alpha - D_{av}}{\pi D_{av}} \frac{L_{rx}}{L_r} G_b R_b \rho_{rf} \gamma \mu_{\tau \alpha} + \\ &(\tau \alpha)_b G_b R_b \mu_{\tau \alpha} / \pi + (\tau \alpha)_d G_d / \pi + \\ &(\tau \alpha)_d G \rho_{sr} / \pi \quad (11) \end{aligned}$$

$V$  سرعة المائع داخل المستقبل وهي في مختلف الحالات لا تزيد على  $1 \text{ m/s}$  و  $\rho_{tf}$  كثافة المائع و  $(\tau \alpha)_b$  مضروب النفاذية والالتقاطية للإشعاع المباشر، و  $\rho_{rf}$  الانعكاسية للعاكس، و  $\mu_{\tau \alpha}$  معدّل زاوية السقوط من أجل  $(\tau \alpha)_b$ ، وأخيراً  $\rho_{sr}$  انعكاسية الجوار [11] و [13]. وكذلك

$$R_b = \cos \theta_{EW} / \cos \theta_2, \quad (12)$$

$$\gamma = D_{av} / D_x \text{ for } D_x > D_{av}, \quad (13)$$

الإشعاع الشمسي المباشر. إذ يحسب أصغر قطر لأنبوب المستقبل من المعادلة الآتية [11]:

$$D_{min} = 2 r_r \sin(\Delta^\circ / 2 + 0.267) \quad (1)$$

إذ الزاوية  $\Delta^\circ$  تمثل تناثر الأشعة والتوجيه غير الدقيق للمجمع. نصف قطر الحافة وزاوية الحافة للعاكس هما على التوالي:

$$r_r = 2f / (1 + \cos \Phi_r) \quad (2)$$

$$\tan \Phi_r = \frac{f/a}{2(f/a)^2 - (1/8)} \quad (3)$$

إذ  $f$  بعد المحرق و  $a$  عرض فتحة العاكس. أمّا قطر اللاقط فيجب أن يكون دوماً

$$D_{av} \geq D_{min} \quad (4)$$

وخلافاً لذلك فإنّ جزءاً من الإشعاع لا يُستقبل من قبل اللاقط.

ويستخدم المائع الحراري 'Therminol 66' [13] ليجري عبر مجريين ذهاباً وإياباً داخل الأنبوب اللاقط وينقل الطاقة الحرارية من المجمع إلى المرجل عبر المبادلات الحرارية. وهنا يمدد طول اللاقط  $L_r$  إلى خارج العاكس من الجانبين لالتقاط قدر أكبر من الإشعاع باكراً وقبل الغروب كوسيلة لتطوير النظام المعني بالدراسة هنا.

زاوية السقوط للأشعة المباشرة على مستوي سطح العاكس  $\theta_1$  هي الزاوية التي يبدأ الإشعاع بالسقوط على المستقبل، و  $\theta_2$  هي زاوية السقوط التي يصبح فيها المستقبل معرضاً للأشعة المباشرة بمقدار  $L_a$  كامل طول فتحة العاكس كحد أقصى، كما هو مبين في الشكل 2. في هذه الحالة وإذ  $R$  نسبة تمديد اللاقط فإنّ

$$\tan \theta_1 = L_a (R + 1) / 2f \quad (5)$$

$$R = L_r / L_a$$

$$\tan \theta_2 = L_a (R - 1) / 2f.$$

يتغير طول المستقبل المعرض للأشعة  $L_{rx}$  بحسب تغير زاوية السقوط  $\theta_{EW}$  كالآتي:

قيمة غزارة البخار الثابتة  $\dot{m}_b$  من أجل نظام محدد الموصفات،

$$\dot{m}_b = \dot{Q}_b / (h_g - C_w T_{fd}), \quad (17)$$

إذ  $h_g$   $C_w$   $T_{fd}$  هي على التوالي الحرارة الكامنة لتبخر الماء، والحرارة النوعية للماء ودرجة حرارة ماء التغذية [14]. أما مدة تشغيل المرجل فقد عُدَّت أنها تبدأ بعد نصف ساعة من وقت شروق الشمس [11]، وتستمر حتى غروب الشمس. المبادلات هي ذات جريان معاكس وتؤمن فرق درجة حرارة بين مخرج المائع الحراري الساخن من المبادلات (الراجع إلى المجمع) ومدخل ماء التغذية البارد إليها [15] بمقدار

$$DT_\epsilon = T_i - T_{fd}. \quad (18)$$

أما الفقد الحراري في المرجل فهو تابع لجودة العزل وإلى التدابير المتبعة في تقليصه إلى أدنى حد، وسيطألع في حالتين: الأولى عند بحث النظام الأمثل ISS-30 في الفقرة التالية إذ يُعدُّ الفقد الحراري ضئيلاً إلى درجة إهماله. والحالة الثانية وهي عند تحليل تأثير أداء النظام لدى تغيير الشروط المثلى. إذ يقاس الفقد الحراري من المرجل وملحقاته عبر العزل الحراري كنسبة مئوية من إجمالي الطاقة الحرارية لتوليد البخار  $K_{insul}$ .

**وحدة التحكم الآلي:** وظيفة هذه الوحدة هي توجيه المجمع نحو الشمس والتحكم بالصمامات بحسب تغيير  $T_o$  كما هو مبين في الشكل 1. يوجه السائل الحراري ليُدور عبر المجمع فقط عندما  $T_o \leq (T_{fd} + DT_\epsilon)$  إذ يكون  $\dot{Q}_u = 0$ . ويوجه السائل الحراري إلى المبادل HE1 ليسخن ماء التغذية فقط ويعود للمجمع عندما  $T_o \leq (T_{fd} + DT_\epsilon) \leq T_{sat}$  أما عندما يصبح  $T_o > T_{sat}$  فإن الصمامات توجه السائل إلى المبادل HE2 داخل المرجل، ثم يعود إلى المجمع عبر المبادل HE1 بعد أن يسخن ماء التغذية. إذ  $T_{sat}$  هي درجة حرارة الإشباع للماء المقابلة لضغط المرجل. ووحدة التحكم

$$D_x = 2[(L_a - L_{rx})^2 + r_r^2]^{0.5} \sin(\Delta/2 + 0.267) \quad (14)$$

إذ  $D_x$  هو قطر المستقبل اللازم لالتقاط الإشعاع المنعكس من العاكس جميعه. وفي حال  $D_x \leq D_{av}$  فإن  $\gamma = 1$  أما معدّل زاوية السقوط الخاصة بالمضروب  $(\tau\alpha)_b$  فهو [11]

$$\mu_{\tau\alpha} = 1 - (67.4 \theta_{EW}^2 + 1.64 \theta_{EW}^3 + 0.0251 \theta_{EW}^4) \times 10^{-6}. \quad (15)$$

في حساب تحول الإشعاع الشمسي هذا إلى طاقة حرارية مفيدة يكون قد عُدَّت عناصر الفقد كلاًها ومركباتها الضوئية والإشعاعية والحمل وبمستويات عملية.

**مرجل البخار:** تحدد استطاعة المرجل ومن ثمَّ غزارة البخار الذي يولده بحيث يستطيع استهلاك أقصى معدل كسب حراري مفيد يلتقطه المجمع الشمسي  $\dot{Q}_u$ ، ويُنفَق لتسخين ماء التغذية والمرجل عند الظهر، وفي اليوم الأوسط من الشهر الذي يكون فيه هذا الكسب المفيد أعظماً من بين أشهر السنة، وهذا المبدأ في حساب الغزارة هو أحد الأسس المتبعة في تصميم النظام المعتمد ككل في هذه الدراسة، أما  $\dot{Q}_u$  فهي تابعة لشدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الجو الخارجي وإلى تصميم النظام وحركته وتحسب كالتالي:

$$\dot{Q}_u = \dot{m}_c C_{tf} (T_o - T_i) \quad (16)$$

إذ  $\dot{m}_c$  غزارة السائل الحراري عبر اللاقط، و  $C_{tf}$  حرارته النوعية، و  $T_o$  درجة حرارة مخرج المجمع، و  $T_i$  درجة حرارة مدخله. وبحسب المبدأ المتبع فإن الطاقة الحرارية اللازمة لتوليد البخار بغزارة  $\dot{m}_b$  هي  $\dot{Q}_b$  وتساوي  $(\dot{Q}_u)_{max}$ . وبذلك لا حاجة للطاقة التقليدية في اللحظة التي يكون فيها  $\dot{Q}_b = (\dot{Q}_u)_{max}$ ، أما في الأوقات الأخرى إذ  $\dot{Q}_u < \dot{Q}_b$  فإن الفرق  $\dot{Q}_b - \dot{Q}_u$  يُعوَّض من الاستطاعة الحرارية لاحتراق الوقود التقليدي. وعليه فإن

التي جعلتها قصوى. وباستخدام أجزاء من البرنامج يمكن بيان مختلف أوجه أداء النظام. وقد عُيِّرَت المتحولات بالفواصل والمجالات المطبقة عملياً، كما هو مبين في مخططات النتائج.

أ. لدى التشغيل الأولي للبرنامج واستعراض النتائج في مختلف الحالات اختيرت نسبة تمديد المستقبل إلى  $R = 1.06$  بوصفها نسبة تسهم في رفع الكسب الشمسي السنوي من جهة، ويمكن تنفيذها عملياً في هيكل المجمع من جهة ثانية، كما تبيّن أن القيمة العظمى للاستطاعة الشمسية المفيدة تحصل ظهراً في اليوم الأوسط من شهر 8. أمّا القيم المثلى للمواصفات  $f$  و  $D_{av}$  و  $\dot{m}_c$  و  $V$  المقابلة لطول العاكس  $L_a$  كمتحول مستقل فإنها تحدد بحيث تؤمن قيمة عظمى للطاقة الشمسية المفيدة التي يكسبها نظام توليد البخار سنوياً ومن أجل لاقت ممتد بنسبة  $R = 1.06$  ولاقت غير ممتد  $R = 1$  للمقارنة بين الحالتين، وهذا مبين في الأشكال 3 و 4 و 5 و 6.

يبين الشكل 3 أن تمديد الأنبوب المستقبل (اللاقت) عن طول العاكس بنسبة 1.06 يتطلب بعد محرق أمثل أكبر، وهذا يعني طول قوس أقصر، أي مساحة أصغر للعاكس ومن ثمّ توفيراً في المواد اللازمة له.

كما تم بيان تغير الطاقة المكتسبة من الشمس لمتر مربع واحد من فتحة المجمع  $Q_{uan}$  بحسب تغير طول المجمع  $L_a$  في الشكل 7. وكذلك بيان معدل تغير هذه الطاقة مع ازدياد الطول  $L_a$  من أجل  $R = 1.06$ ، كما في الشكل 8 الذي يظهر فيه أن تحسن  $Q_{uan}$  يزداد ازدياداً ملحوظاً حتى الطول  $L_a = 30m$ ، وعليه يمكن اعتماد هذا الطول لدراسة أداء النظام.

ب. هنا تم بيان أداء النظام من أجل المواصفات المثلى الآتية:

$$L_a = 30m \quad , \quad R = 1.06$$

$$D_{av} = 27.4 mm \quad , \quad f = 402.5 mm$$

هذه تدبير الحراق أيضاً للمحافظة على ضغط البخار وغازاته للمرجل.

### 3 - مواصفات النظام:

يعتمد في هذا البحث مجموعتين من المواصفات: الأولى هي مواصفات ذات قيم عملية ثابتة اعتمدت كالاتي:

$$a = 2 m, R = 1 \text{ and } 1.06, \Delta = 1^\circ,$$

$$U_l = 4.6 \frac{W}{m^2} \text{ } ^\circ C, F = 0.97, (\tau\alpha)_b = 0.9,$$

$$(\tau\alpha)_d = 0.7, \rho_{rf} = 0.97, \rho_{sur} = 0.5,$$

$$P = 8 \text{ bar g}, DT_\varepsilon = 8^\circ C, T_{fd} = 65^\circ C.$$

في حين يتم الحصول على المجموعة الثانية من المواصفات في فقرة النتائج الآتية.

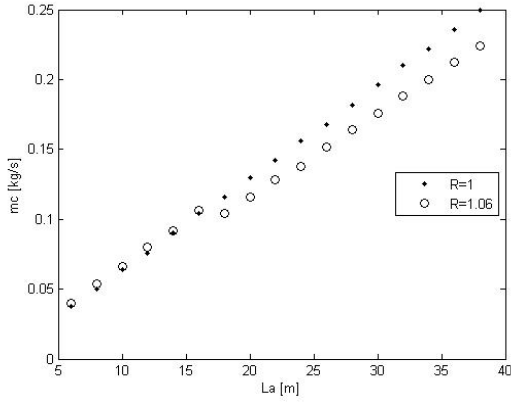
### 4 - النتائج:

المجموعة الثانية من المواصفات هي قيم المواصفات الرئيسية التي تجعل الطاقة التي يكتسبها النظام سنوياً من الإشعاع الشمسي الساقط على فتحة المجمع فيها  $Q_{uan}$  أعظمية. إذ

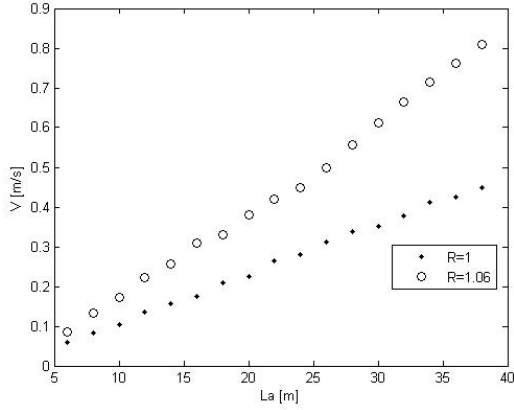
$$Q_{uan} = N1 \int_{-\omega}^{\omega} \dot{Q}_u d\omega + \dots + N12 \int_{-\omega}^{\omega} \dot{Q}_u d\omega$$

وإذ  $N$  هي عدد أيام الشهر.

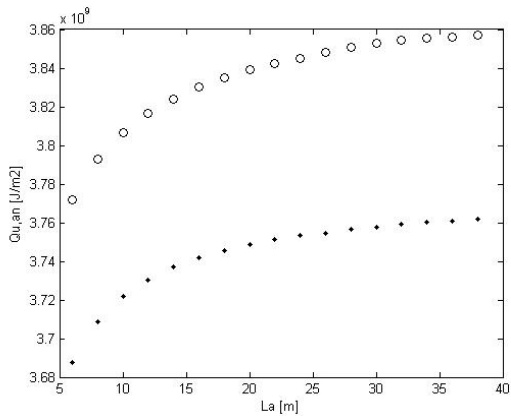
وقد أعد برنامج خاص لإيجاد هذه القيم المثلى، ومن ثمّ دُرِسَ أداء النظام الأمثل وفق لغة Mat Lab. إذ استخدمت عدة حلقات من (for...end) محيطة ببعضها تبدأ بالحلقة الداخلية النواة لحساب الطاقة المفيدة اللحظية واليومية الملتقطة من أشعة الشمس بدءاً من الشروق إلى الغروب، وتتضمن خطة التحكم بالصمامات باستخدام صيغة (if...end). يلي النواة حلقة محيطة لحساب الطاقة المفيدة على مدار أشهر السنة ثم تليها عدة حلقات من (for...end) لقيم المواصفات المثلى، حيث تُرصد في نهاية تعليمات الحلقة الخارجية الطاقة الشمسية المفيدة السنوية القصوى، وتُنَبَّط جملة المواصفات المرافقة لها



الشكل 5- غزارة المانع المثلي كتابع لطول العاكس ونسبة تمديد المستقبل.



الشكل 6- سرعة المانع المثلي كتابع لطول العاكس ونسبة تمديد المستقبل.



الشكل 7- الطاقة الشمسية المفيدة السنوية القصوى كتابع لطول العاكس ونسبة تمديد المستقبل.

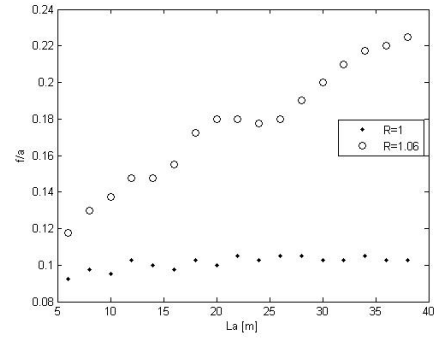
$$\dot{m}_c = 0.176 \text{ kg/s}$$

التي استُنتجت من الفقرة السابقة، إذ يسمى هذا النظام الأمثل: ISS-30. وقد حسبت قيم  $T_o$  و  $T_i$  و  $T_a$  و  $S$  و  $\dot{Q}_u$  و  $F_{in}$  كتابع للتوقيت الشمسي  $st$  من الشروق إلى الغروب؛ وذلك في نهار اليوم الأوسط من شهر 8، وعرضت في الأشكال 9 و 10 و 11، إذ

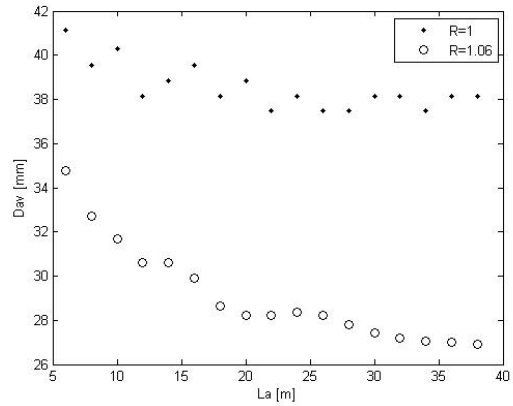
$$st = \frac{\omega}{15} + 12 \quad (20)$$

$$F_{ins} = \dot{Q}_u / \dot{Q}_b \quad (21)$$

هي نسبة مساهمة الاستطاعة الشمسية اللحظية إلى الاستطاعة الحرارية اللازمة لتوليد البخار المشبع.

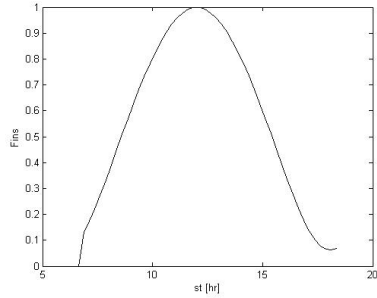


الشكل 3- بعد المحرق الأمثل كتابع لطول العاكس ونسبة تمديد المستقبل.

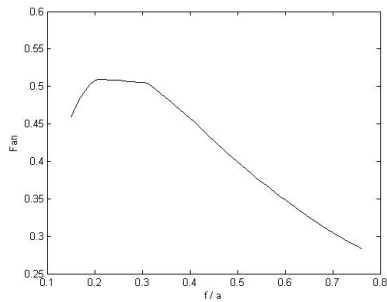


الشكل 4- قطر اللاقط الأمثل كتابع لطول العاكس ونسبة تمديد المستقبل.

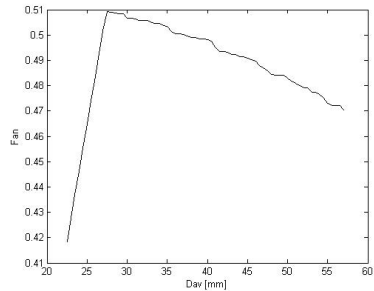




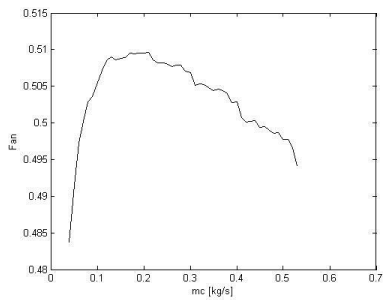
الشكل 11- نسبة المساهمة الشمسية اللحظية كتابع للتوقيت الشمسي.



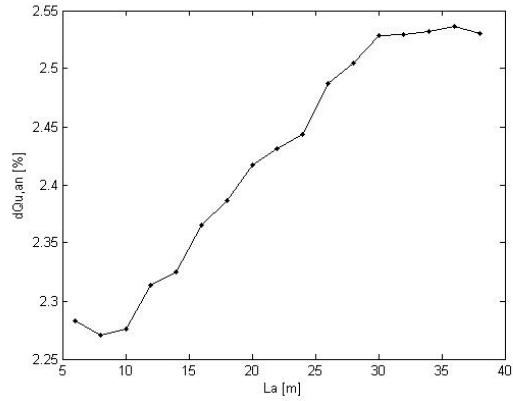
الشكل 12- نسبة المساهمة الشمسية السنوية كتابع لبعد المحرق.



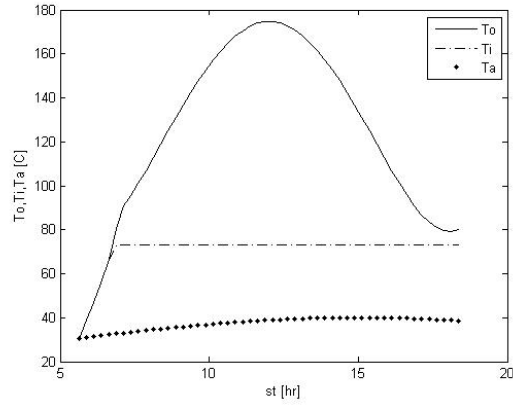
الشكل 13- نسبة المساهمة الشمسية السنوية كتابع لقطر اللاقط



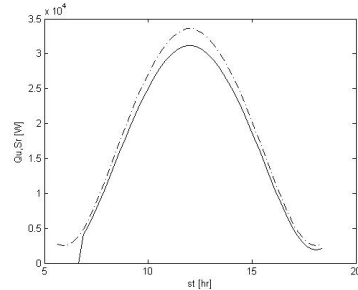
الشكل 14- نسبة المساهمة الشمسية السنوية كتابع للغزارة.



الشكل 8- نسبة ازدياد الطاقة الشمسية نتيجة تمديد المستقبل مقابل طول العاكس.



الشكل 9- درجة حرارة مخرج ومدخل المجمع والجو الخارجي كتابع للتوقيت الشمسي.



الشكل 10- الإشعاع الملتقط والاستطاعة الشمسية المفيدة كتابع للتوقيت الشمسي.

ج . يتم في هذه الفقرة بيان تأثير انحراف إحدى الموصفات  $f$  و  $D_{av}$  و  $\dot{m}_c$  و  $L_a$  و  $R$  و  $T_{fd}$  و  $DT_\epsilon$  عن قيمها المثلى في نسبة مساهمة الطاقة الشمسية السنوية  $F_{an}$  مع المحافظة على الموصفات المختارة الثابتة المعتمدة في فقرة موصفات النظام، كما في الأشكال 12 و 13 و 14 و 15 و 16 و 17 و 18. إذ

$$F_{an} = Q_{u,an}/Q_{b,an} \quad (21)$$

و  $Q_{b,an}$  هي مقدار الطاقة الكلية اللازمة لتوليد البخار سنوياً.

أمّا انعكاس جودة العزل على  $F_{an}$  فهو تابع إلى عامل الفقد الحراري عبر العزل الذي ذكر في فقرة المرجل  $K_{insul}$  كالآتي:

$$F_{an,insul} = F_{an}/(1 + K_{insul}/100)$$

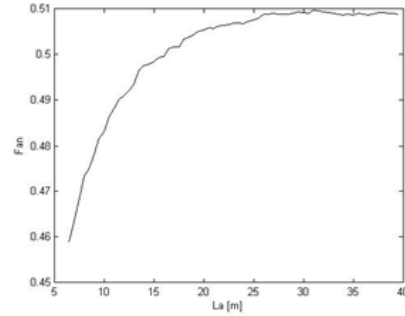
وباعتبار عامل الفقد يراوح من 2% إلى 6% من الطاقة الإجمالية لتوليد البخار سنوياً، فإن انخفاض نسبة المساهمة الشمسية السنوية المثلى البالغة 50.8% يراوح من 49.8% إلى 47.9% .

#### 5 - الاستنتاجات:

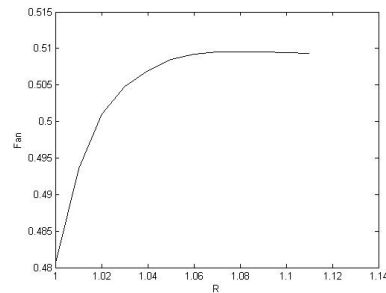
الاستنتاجات الأساسية التي لوحظت هي:

أ . يبين البحث أن نسبة مساهمة الطاقة الشمسية السنوية في نظام توليد البخار الأمثل ISS-30 تصل إلى 50.8 بالمئة. أمّا الفرق في الطاقة الشمسية بين ما يلتقطه المجمع الأمثل وما يلتقطه المجمع نفسه ولكن من دون تمديد المستقبل فإنه يشكل 5.3% منسوباً إلى الطاقة الملتقطة بالمجمع الأمثل بحسب (الشكل 16). كما أن تمديد المستقبل يؤدي من ناحية ثانية إلى انخفاض في طول قوس العاكس، مما يوفر في استهلاك المواد اللازمة لطول العاكس (الشكل 3).

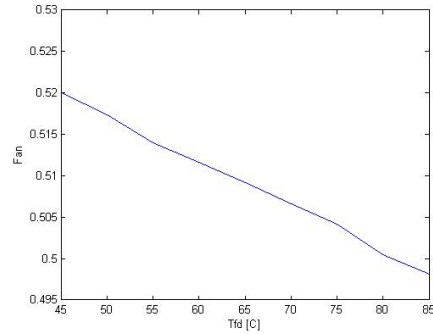
ب . إن الابتعاد عن القيم المثلى لموصفات النظام ISS-30 زيادةً أو نقصاناً يؤدي بشكل عام إلى خفض نسبة مساهمة الطاقة الشمسية السنوية. ولكن الأكثر تأثيراً هو



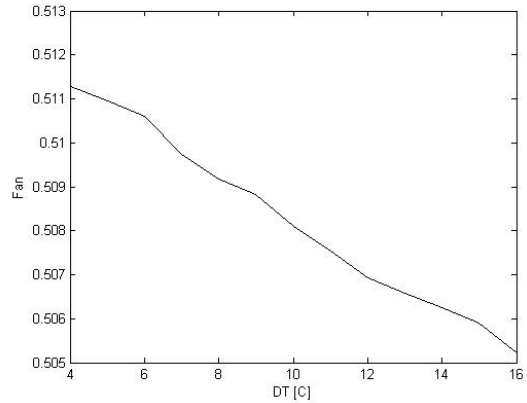
الشكل 15- نسبة المساهمة الشمسية السنوية كتابع لطول العاكس.



الشكل 16- نسبة المساهمة الشمسية السنوية كتابع لنسبة تمديد اللاقط.



الشكل 17- تأثير تغير  $T_{fd}$  في  $F_{an}$ .



الشكل 18- تأثير تغير  $DT_\epsilon$  في  $F_{an}$ .

$f$ - Focal length, $m$	توليد البخار المباشر	انخفاض قيمة $D_{av}$ عن القيمة المثلى، إذ يؤدي إلى انخفاض شديد في المساهمة الشمسية السنوية قد تتجاوز 9 بالمئة (الشكل 13).
$F$ - Collector heat factor	بعد المحرق	ج. أما تغير شروط التشغيل $T_{fd}$ و $DT_{\epsilon}$ في النظام فإنه يؤثر تأثيراً طفيفاً في $F_{an}$ وخصوصاً تأثير $DT_{\epsilon}$ في $F_{an}$ بسبب تغير فاعلية المبادلات الحرارية، فإنه يكاد يكون معدوماً إذ لا يتجاوز 0.6 بالمئة (الشكل 18)، وسببه الفقد الحراري من اللاقط فقط الناجم عن الارتفاع البسيط نسبياً في درجة حرارة السائل الحراري الراجع إلى المجمع.
$F_{an}$ - Annual solar fraction	العامل الحراري للمجمع	وأخيراً إن التصميم الجيد لنظام توليد البخار بالطاقة الشمسية والاختيار الأمثل لمواصفاته وتمديد اللاقط فيه هي العوامل التي أدت إلى رفع مساهمة الطاقة الشمسية السنوية في تزويده بالطاقة اللازمة.
$F_{ins}$ - Instantaneous solar fraction	نسبة مساهمة الشمس السنوية	
$G_b$ - Beam radiation on horizontal surface, $W/m^2$	نسبة مساهمة الشمس اللحظية	
$G_d$ - Diffuse radiation on horizontal surface, $W/m^2$	الإشعاع المباشر على مستوى أفقي	
$G$ - Global radiation on horizontal surface, $W/m^2$	الإشعاع المتناثر على مستوى أفقي	
$HE$ - Heat exchanger	الإشعاع الكلي على مستوى أفقي	<b>المصطلحات:</b>
$IPH$ - Industrial process heat	مبادل حراري	$a$ - Aperture width, $m$
$h_g$ - Enthalpy of saturated steam, $J/kg$	عملية حرارية صناعية	عرض الفتحة
$K_{insul}$ - Heat loss factor thru insulation%	أنتلبي البخار المشبع	$A_r$ - Absorber area, $m^2$
$L_a$ - Aperture (reflector) length, $m$	عامل الفقد الحراري عبر العازل	مساحة اللاقط
$L_r$ - Absorber length, $m$	طول فتحة العاكس	$AHP$ - Analytical hierarchy process
$MSF$ - Multi stage flash	طول اللاقط (المستقبل)	عملية التسلسل التحليلية
$\dot{m}_b$ - Steam flow rate, $kg/s$	الإفلات متعدد المراحل	$C_{tf}$ - Specific heat of thermal fluid, $W/kg\ ^\circ C$
	غزارة البخار	الحرارة النوعية للمائع الحراري
		$C_w$ - Specific heat of water, $W/kg\ ^\circ C$
		الحرارة النوعية للماء
		$CPM$ - Circulation pump
		مضخة التوزيع
		$D_{av}$ - Available installed diameter of absorber, $m$
		قطر اللاقط المركب المتوفر
		$D_x$ - Required absorber diameter, $m$
		قطر اللاقط اللازم
		$DSG$ - Direct steam generation

$T_{sat}$ - Water saturation temperature, °C	مصيدة بخار	$\dot{m}_c$ - Thermal fluid flow rate thru the collector, $kg/s$	
$V$ - Thermal fluid velocity, $m/s$	درجة حرارة الإنباع للماء	$PM$ - pump	غزارة المائع الحراري عبر المجمع
$VO$ - Control valve	سرعة المائع الحراري	$PTC$ - Parabolic trough collector	مضخة
$U_i$ - Collector heat loss coefficient, $W/m^2°C$	صمام تحكم	$p_{sat}$ - Boiler saturation pressure, bar	مجمع القطع المكافئ الخطي
$\gamma$ - Intercept factor	عامل الفقد الحراري للمجمع	$Q_{b,an}$ - Thermal energy per year for boiler,	ضغط الإنباع للمرجل
$\delta$ - Declination angle, degree	عامل الانقطة	$\dot{Q}_b$ - Thermal power for steam generation, $W$	الطاقة الحرارية السنوية للمرجل
$\theta_{EW}$ - Incidence angle for east west oriented collector, degree	زاوية الانحراف	$Q_{u,an}$ - Solar energy collected per year, $J$	الاستطاعة الحرارية لتوليد البخار
$\theta_z$ - Zenith angle, degree	زاوية السقوط على المجمع الموجه شرقاً-غرباً	$\dot{Q}_u$ - Collector useful gain, $W$	الطاقة الشمسية الملتقطة سنوياً
$\mu_{\tau\alpha}$ - Incidence angle modifier for $(\tau\alpha)$	زاوية السميت	$r_r$ - Rim radius of parabolic reflector, $m$	الكسب الحراري المفيد للمجمع
$\rho_{tf}$ - Density of thermal fluid, $kg/m^3$	معامل زاوية السقوط للشعاع الملتقط	$S$ - Absorbed radiation, $W/m^2$	نصف قطر القطع المكافئ للعاكس عند الحافة
$\rho_{rf}$ - Reflectance of the reflector	كثافة المائع الحراري	$st$ - solar time, $hr$	الإشعاع الملتقط
$\rho_{sr}$ - Reflectance of surrounding	انعكاسية العاكس	$T_a$ - Outdoor temperature, °C	الوقت الشمسي
$(\tau\alpha)_b$ - Transmittance- absorptance product for normal beam radiation	انعكاسية الجوار	$T_{fd}$ - Feeding water temperature, °C	درجة حرارة الجو الخارجي
$\phi_r$ - Rim angle, degree	مضروب الامتصاصية-الإثفانية من أجل الإشعاع الناظم المباشر	$T_i$ - Collector inlet temperature, °C	درجة حرارة ماء التغذية
$\omega$ - Hour angle, degree	زاوية الحافة	$T_o$ - Collector outlet temperature, °C	درجة حرارة مدخل المجمع
	الزاوية الساعية	$TP$ - Steam trap	درجة حرارة مخرج المجمع

- [12] Association of Syrian Engineers-Aleppo, Climatic Data, 1995.
- [13] Therminol 66, Heat Transfer Fluid, Solutia, USA.
- [14] Van Wylen, J. and Sonntag, R., Fundamentals of Classical Thermodynamics, John Wiley, New York, 1990.
- [15] Holman, J.P., Heat Transfer, McGraw-Hill, N. Y., 2010.

## \*المراجع

- [1] Nixon, J.D. and others, Aston University, UK, Which is the best solar thermal collection technology for electricity generation in north-west India? Evaluation of options using the analytical hierarchy process. *Energy*, 35, 2010.
- [2] Kalogirous, S., The potential of solar industrial process heat applications, *Applied Energy*, vol 76,4, 2003.
- [3] Flores V. and other, Direct steam generation in parabolic trough concentrators with bimetallic receivers, *Energy* vol. 29, 2004.
- [4] Zhang, L., and others, An experimental investigation of a natural circulation heat pipe system applied to a parabolic trough solar collector steam generation system, *Solar Energy* 86, 2012.
- [5] Silva, R. and others, Process heat generation with parabolic trough collectors for a vegetable preservation industry in Southern Spain, *Energy Procedia*, 48, 2014.
- [6] Valenzuela L., and others, sensitivity analysis of saturated steam production in parabolic trough collectors, *Energy Procedia* 30, 2012.
- [7] Kalogirou S., Use of parabolic trough solar energy collectors for sea-water desalination, *Applied Energy* vol 60, 1998.
- [8] Farwati M., Theoretical study of multi-stage flash distillation using solar energy, *Energy*, vol. 221, 1997.
- [9] Zaaraoui A. and others, Technical and economical performance of parabolic trough collector power plant under Algeria climate, *Procedia Engineering*, 33, 2012.
- [10] Ganapathy, V., Industrial Boilers and Heat Recovery steam Generators, Marcel Dekker, N.Y., 2003.
- [11] Duffie, J. A. and Beckman, W. A. *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley, New York, 1991.