

اللاقط المسطح لتسخين المياه بالطاقة الشمسية-دراسة مرجعية

د.م. محمد صادق الجوهرى⁽¹⁾ و د.م. نصر ياسين⁽²⁾

المخلص

يُعدُّ اللاقط الشمسي المسطح (Flat Plate Solar Collector) من أقدم اللواقط المستخدمة لتسخين المياه بالطاقة الشمسية حتى درجة الحرارة 100 C° التي يُستفاد منها للاستخدام المنزلي والصناعي، وتطبيقات أخرى مثل التدفئة والتبريد. يُصنَع بمواصفات فنية وتقنية وتصاميم وأبعاد ومميزات حرارية مختلفة. في هذا البحث: أُجريت دراسة مرجعية عن اللاقط الشمسي المسطح ومعادلاته الحرارية، وأهم البحوث والتطويرات التي أُجريت عليه، ليكون مرجعاً مختصراً للباحثين بهذا الموضوع.

الكلمات المفتاحية: لاقط شمسي مسطح، دراسة مرجعية.

(1) محاضر، (2) أستاذ مساعد، قسم الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، سورية.

Flat Plate Solar Water Heating Collector-Review Study

Dr. Mohamad Sadek Jouhari⁽¹⁾
and Dr. Naser Yasein⁽²⁾

Abstract

Flat Plate Solar Collector is one of the oldest collectors, which is used for solar water heating up to the temperature, 100 °C. It can be used for domestic, industrial and other applications such as heating and cooling.

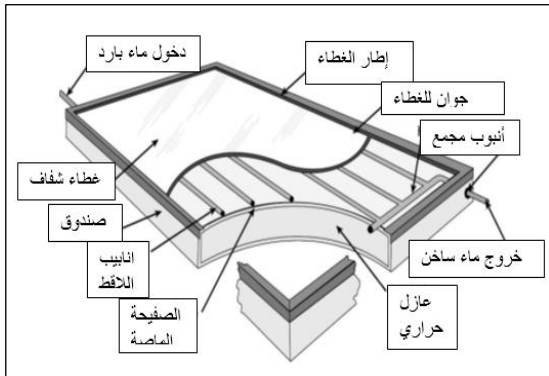
The flat plate collectors is manufactured in different technical specifications, different designs and dimensions, and different thermal features. This paper is a review study of thermal equations about the flat plate solar collector and the most important research an developments that has been achieved so far, and it serves as a brief reference to the researchers of this field.

Key words: Flat Plate Solar Collector.

⁽¹⁾Lecturer, ⁽²⁾ Ass Professor, Department of Mechanics, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University, Syria.

1- مقدمة:

عالية كالححاس والألمنيوم، ويوجد منها أشكال مختلفة أوسعها انتشاراً عبارة عن شرائح طولية تُطلى بطلاء أسود، أو طلاء انتقائي ذي امتصاصية عالية يساعد على امتصاص أكبر كمية من الإشعاع الشمسي، ويزيد من المردود الحراري للاقط. وتُصنَع شبكة الأنابيب الطولية التي تنقل السائل العامل -عادةً- من النحاس، وتُصنَع اللواقط الرخيصة من الفولاذ، ويمكن أن تُلحم فوق الصفيحة الماصة أو تحتها أو تكون مدمجة معها، كما يوجد نوع يستخدم أنبوباً واحداً متعرجاً بشكل زكزاك. والغطاء الشفاف يسمح للإشعاع الشمسي قصير الموجة بالعبور إلى الصفيحة الماصة، ويقلل من الضياع بالحمل والإشعاع إلى الجو المحيط، ويصنع من الزجاج قليل نسبة الحديد أو البلاستيك الشفاف ذي نفوذية عالية، ويمكن أن يكون من طبقة واحدة أو عدة طبقات. يُقلل العازل الحراري الخلفي من الضياع الحراري بالتوصيل إلى الجو المحيط، ويصنع من المواد العازلة المعروفة مثل الصوف الزجاجي، أو البولي ريثان، أو الصوف الصخري. يبدو في الشكل (1) مكونات اللاقط المسطح التقليدي.



الشكل (1) مكونات اللاقط المسطح

3- دراسة مرجعية

رُوجعت أهم الدراسات والتطويرات التي أُجريت على اللاقط المسطح في السنوات الأخيرة. ودُرِس تأثير نسبة طول اللاقط إلى عرضه (Ho-Ming Yeh et al., 1999) [4] ووجد تحسناً في الأداء الحراري بزيادة هذه النسبة. وجد (B, Hellström, 2005) [5] تحسناً في الأداء الحراري للاقط مسطح بوضع طبقة عازل شفاف فوق اللاقط لتخفيف الضياع الحراري عند درجات الحرارة العالية. ودرس (Poolsak Intawee et al., 2006) [6] الأداء الحراري للاقط مسطح بشكل قطع مجوف في الصفيحة الماصة. كما قارن (Andrei Ştefan Jercan, 2006) [7]

هدفت البحوث المتعلقة باللواقط الشمسية إلى زيادة التقاطها للطاقة المحمولة مع الإشعاع الشمسي، ورفع كفاءة تحويلها إلى طاقة حرارية مفيدة، وتقليل الفقد الحراري؛ ومن ثمَّ تحسين الأداء الحراري وتقليل كلفتها (S. A. Kalogiroum, 2004) [1]. عُرف اللاقط المسطح في بدايات القرن العشرين، قام (Hottel and Willier) بتطويره ونمذجته رياضياً، وقام (Hottel and Woertz 1942) بإجراء أول تجربة لاختبار الأداء الحراري، واستنتج النموذج الرياضي له. طور (Tabor, 1958) النموذج الرياضي وأدخل معاملات انتقال الحرارة بالحمل (J. Duffie, W. Beckman, 2000) [2]. أُجريت دراسات وبحوث عدة لتطوير اللواقط الشمسية وتحسين مواصفاتها، ووصلت هذه البحوث فيما يتعلق باللاقط المسطح إلى مراحل متقدمة (Christopher Pike et al., 2013) [3].

وبشكل عام فقد ركزت البحوث على رفع الأداء الحراري من خلال تصميم اللاقط، ودراسة المساحة، والتوجيه، وزاوية الميل، ونوع السائل العامل، وأبعاد الخزان، وفعالية المبادل الحراري، وأبعاد أنابيب الشبكة ومواد اللوح الماص وسماكته وعدد الأنابيب وأبعادها، والتباعد بينها ونسبة العرض إلى الارتفاع للاقط، وعدد طبقات الزجاج ونوعه ونوع الطلاء، والعازل الحراري، وعلى أمور تتعلق بطرائق التشغيل والاستثمار أو استخدامه ضمن تراكيب جديدة بما يعرف باللواقط الهجينة. يتضمن هذا البحث دراسة مرجعية للواقط الشمسية المسطحة ومعادلاتها الحرارية لتكون مرجعاً مختصراً للباحثين بهذا الموضوع.

2- تعريف اللاقط الشمسي المسطح

يعدُّ اللاقط الشمسي المسطح (Flat Plate Solar Collector) نوعاً خاصاً من المبادل الحراري إذ يقوم بتحويل الطاقة المحولة مع الإشعاع الشمسي إلى حرارة تنتقل إلى السائل العامل ضمن اللاقط، ويمكن أن تصل درجة الحرارة الناتجة منه إلى 100°C ويحتاج إلى قليل من الصيانة، وهو أبسط من اللواقط المركزة، ويستخدم في تطبيقات تسخين المياه والتدفئة والتكييف وبعض العمليات الصناعية [2]. تتكون التصميمات التقليدية منه من الصفيحة الماصة التي تقوم بنقل الطاقة الممتصة إلى السائل العامل الذي يكون الماء غالباً، تصنع من مواد ذات ناقلية حرارية

من الصفيحة الماصة. درس (Arunchala, 2011) [19] تأثير ترسب الأملاح الموجودة بالمياه في الأنابيب وفي الأداء الحراري للواقط المسطحة التي تعمل بدارة تناقلية مفتوحة، ووجد أن المردود ينخفض من 72% إلى 46% عند تشكل 3.7mm سماكة ترسب أملاح في الأنابيب، إذ ينخفض معدل التدفق وتنخفض الطاقة المكتسبة 38%. درس (Ahmad Fudholi et al., 2011) [20] لاقطاً مسطحاً بوجود مجارٍ مضاعفة من الماء والهواء مع أجنحة امتصاص متوضعة بشكل طولي، وبين مواصفات الأجنحة الماصّة وعددها. درس (Johan Vestlund et al., 2012) [21] لاقطاً مسطحاً مملوءاً بغاز الأرجون بشكل محكم، ووجد أنه يمكن تحسين الأداء الحراري باستخدام سطوح ماصة غير سميكة بإملاء الفراغ بالغاز بدلاً عن الهواء. قام (Anuj Mathur et al., 2012) [22] بدراسة مرجعية للواقط المسطحة والتطبيقات في مادة الغطاء الشفاف والسطح الماص والطلاء مع تغيرات تتعلق بالتصميم وتغيير نوع السائل العامل، ودرس صفيحة ماصة بوجهين وتركيبات خلايا النحل واستخدام مواد نانوية في الطلاء لتكون أكثر فاعلية وسجل نتائجها التي توصل إليها بالمقارنة. قام (B. K. Gond et al., 2012) [23] بتصنيع لاقط من مواد متغيرة الطور ووجد تحسناً في الأداء الحراري. كما درس (Po-Chuan Huang et al., 2012) [24] لاقطاً مسطحاً يستخدم كتل معدن وفوماً في قنوات السطح الماص لزيادة الانتقال وتقليل الضياع الحراري. قام (Hamdi Kessentini et al., 2012) [25] بمحاكاة عددية ببرنامج CFD للتدفق الحراري وتدفق الماء إلى لاقط شمسي مسطح باستخدام عازل شفاف تحت الغطاء الزجاجي وقناه هوائية تحت الصفيحة الماصة، واستنتج التأثيرات المختلفة في الأداء الحراري بهذه التركيبات. قام (F. F. Mammadov, 2012) [26] بتقدير إنتاجية اللاقط المسطح، واستنتج أن الصناعة المحلية للواقط الشمسية المتوافقة مع الشروط المناخية لكل بلد قد تكون أفضل من الناحية الإنتاجية الحرارية، وأرخص من استيراد اللواقط من الدول الأخرى. درس (Atish Mozumder et al., 2012) [27] لاقطاً مسطحاً بوضع خلايا النحل بشكل أسطواني كطبقة عازلة شفافة من بوليمرات سيليلوز تحت الغطاء الزجاجي تساعد على دخول الأشعة الشمسية إلى اللاقط، وتمنع خروج الأشعة الحرارية منه ووجد تحسناً في الأداء الحراري 18%. درس

عدة أنواع من الطلاء الأسود للصفيحة الماصة مستعيناً ببرنامج حاسوبي بلغة (V.B). كما رُوجعت الاختراعات المتعلقة باللاقط المسطح من قبل (Soteris Kalogirou, 2007) [8]. ودراسة لاقط مسطح متوضع بشكل عرضي أعدّ (Simon Furbo et al., 2007) [9] ووجد أن توزع الماء الداخل إلى اللاقط يكون مضطرباً في التدفقات المرتفعة، وسيئاً في المناطق العالية من اللاقط المتوضع بشكل عرضي، ودرس تأثير درجة حرارة الدخول وزاوية الميل. وقام بتعديل تصميمي (B, Yousef et al., 2008) [10] للاقط مسطح بإضافة مادة مسامية تحت الغطاء الشفاف ومجرى هوائي تحت الصفيحة الماصة وفوقها. ومن أجل تصميم البارامترات المثلى للاقط المسطح قام (T, Matuska et al., 2009) [11] بوضع نموذج جديد، واستنتج بارامتراته باستخدام برنامج Tool Kolektor 2.2. أعدّ (H, Kessentini et al., 2009) [12] دراسة عددية وتجريبية للاقط مسطح بوضع عازل شفاف تحت الزجاج لتقليل زيادة الحرارة في أعلى اللاقط، ولاحظ انخفاضاً واضحاً في الفقد الحراري بالحمل والإشعاع وتحسناً في المردود. ودرس (J. Cadafalch, 2009) [13] تأثير الزجاج المضاعف في الأداء الحراري للاقط مسطح وقام (Kalogirou, 2009) [14] بدراسة مرجعية للواقط المسطحة من تصاميم مختلفة التي تعمل بدرجات حرارة منخفضة وقارن بين مواد تصنيعها وأدائها. قام (A. Alvarez et al., 2010) [15] بدراسة لنوع جديد من اللاقط المسطح بطريقة العناصر المنتهية مستعملاً صفيحة ماصة متعرجة لزيادة سطح التبادل الحراري. أمّا (S. Furbo et al., 2010) [16] فقام بدراسة تجريبية للاقط مسطح يستخدم زجاجاً غير عاكس متعرضاً لشروط الجو الحقيقية، واستنتج مقارنة بلاقط بزجاج عادي أن النوع الجديد يحسن المردود بحدود 8%. قام (E. I. Igweonu et al., 2011) [17] بدراسة الأداء الحراري للاقط المسطح، واستنتج أنه في المناطق الحارة يمكن استخدام تقنيات بسيطة وغير مكلفة للحصول على الماء الساخن للاستخدامات اليومية، إلا إذا كان الغرض هو تطبيقات صناعية. أمّا في المناطق الباردة فتستعمل اللواقط ذات التقنيات العالية والمكلفة. درس (M.S. Hossain et al., 2011) [18] لواقط شمسية مسطحة تعمل بالدارة التناقلية، وبين أهمية عامل التوصيل الحراري للصفيحة الماصة، وللمواد العازلة ووجد تحسناً بالأداء الحراري بمقدار 18% عند تقليل الضياع الحراري

الحراري في كل حالة. قام (Sachin Godara *et al.*, 2014) [38] قام بدراسة معامل الفقد الحراري من أعلى اللاقط المسطح بطبقة واحدة من الزجاج يعمل في شروط جوية مختلفة وتأثير الجسم الأسود في الامتصاصية، ووجد اختلافاً 14% باختلاف درجة حرارة الجو المحيط. درس (Prafull Hishikar *et al.*, 2014) [39] نوعية المياه وتأثير الأملاح في أداء لاقط مسطح يعمل بدارة تفاعلية واستنتج انخفاض الأداء مع الزمن عند مياه تحوي نسباً عالية من الأملاح المترسبة. قام (Gurveer Sandhu *et al.*, 2014) [40] بدراسة للاقط مسطح إذ أدخل في الأنابيب الطولية شريطاً بشكل محلزن ولولبي، ودرس تأثير عدد رينولدز ونوسلت بقيم مختلفة في الأداء الحراري للاقط. درس (M. A. Hamdan *et al.*, 2014) [41] الأداء الحراري للاقط مسطح يستخدم الماء كوسيط عامل، ولاقط يستخدم الزيت كوسيط عامل، واستخدم الشبكة العصبونية الصناعية من ثلاث طبقات لاستنتاج الأداء الحراري، وبين أهمية الاتجاه الجديد في تحديد الأداء الحراري للواقط الشمسية باستخدام تقنيات الذكاء الصناعي. درس (Nabeel Abdulhadi Ghyadh, 2014) [42] نوعين من اللواقط المسطحة بتركيب مختلف، وبين تأثير حركة الترموسيفون، وزاوية الميل، ودرجة حرارة الدخول، والخزان الحراري في أداء اللواقط المدروسة. درس (Z, Zhang *et al.*, 2014) [43] لاقطاً مسطحاً جديداً بشقوق في الصفيحة الماصة سماكتها قليلة. وأوجد علاقة المردود بمعدل التدفق. قام (Munish Kainth, 2014) [44] بدراسة التقنيات المستخدمة في اللواقط وأنواعها وتصاميمها المختلفة وتطوراتها في السنوات العشر الأخيرة، ووجد أن اللاقط المسطح درس بشكل واسع، ومازال مجالاً خصباً للبحث والتطوير. درس (Warunee Ariyawiriyanan *et al.*, 2013) [45] لاقطاً مسطحاً مصنعاً من اللدائن الحرارية مثل: بولي فينيل كلوريد الأزرق، وبولي بوتين، وبولي بروبيلين، وبولي فينيل كلوريد، وقد نصح بها لخفة وزنها، ورخص ثمنها، ومقاومتها للتآكل والصدأ.

قام (S. Vijayakumar *et al.*, 2014) [46] بوضع شريط معدني مبروم ونابض حلزوني يحيط به داخل الأنابيب الطولية للاقط المسطح، واستنتج زيادة في الانتقال الحراري في هذه الحالة. درس (M.Sridharan *et al.*, 2014) [47] الأداء الحراري للاقط مسطح بالوصل التسلسلي، واحد بأنابيب طولية وآخر بأنابيب زكزاك مع أخذ معدل التدفق بالحسبان. قام

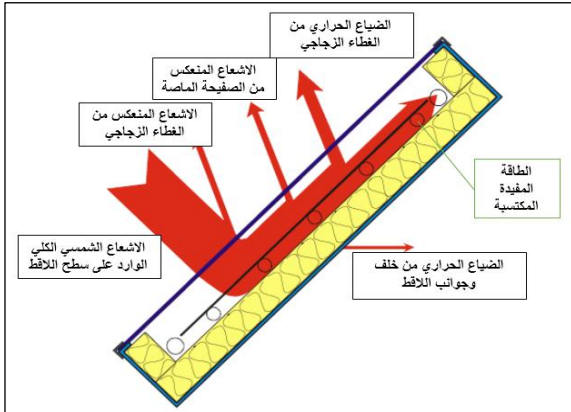
(P. Sivakumar *et al.*, 2012) [28] بتصاميم مختلفة من اللواقط المسطحة بتغيير مواصفات الأنابيب إذ استخدم مواد مختلفة، واستنتج تحسن الأداء الحراري بزيادة عدد الأنابيب. درس (Sunil. K. Amrutkar *et al.*, 2012) [29] الأداء الحراري للاقط مسطح وتأثير زاوية الميل والفقد الحراري في الجزء العلوي الذي يزداد في وقت الظهيرة. كما قام الباحث نفسه (Sunil. K. Amrutkar *et al.*, 2012) [30] بمقارنة الأداء الحراري لعدة تصاميم للصفيحة الماصة ووجد أن المردود يراوح بين 55% و 71% باستخدام تصاميم مختلفة، ويمكن تقليل مساحة اللاقط باستخدام أنواع أكثر تطوراً. قام (N. R. Avezova *et al.*, 2012) [31] بدراسة لتحديد عرض لاقط مسطح، سطحه الماص لوح خفيف مع أنابيب، ودرس التسخين المسبق للاقط المدروس وعلاقة نسبة طول الصفيحة وعرضها والمسافة بين الأنابيب في الأداء الحراري للاقط. قام (M.J.R. Abdunnabi *et al.*, 2012) [32] بدراسة الدارة التفاعلية للاقط المسطح باستخدام برنامج Transys، واستنتج العوامل التصميمية المختلفة، مثل: عدد الأنابيب، وقطر الأنابيب المجمع، ونسبة عرض اللاقط، ونسبة عرض الخزان، واستنتج أيضاً أنه لا يمكن اعتماد تصاميم جديدة إلا أن يأخذ بالحسبان عوامل متغيرة، مثل: الطقس والحرارة. قام (N, *et al.*, 2013) [33] بدراسة للبارامترات التصنيعية المؤدية إلى تحسين الأداء الحراري للاقط المسطح، وبين تأثير عدد طبقات الزجاج، وسماكة الطبقة العازلة ومعدل التدفق، والناقلية الحرارية للصفيحة الماصة، ودرجة حرارة الدخول، والمسافة بين الأنابيب، ودرجة حرارة الجو المحيط، ومساحة اللاقط في مردوده اللحظي. درس (D.E. Roberts, 2013) [34] فعالية السطح الانتقائي للاقط المسطح، واستنتج معادلة لرقم الفعالية للسطح الانتقائي. درس (Arun Kumar Tiwari *et al.*, 2013) [35] لاقطاً مسطحاً يستخدم سوائل النانو بجسيمات متناهية بالصغر متشكلة الغروية وحلل الأثر البيئي والحراري ووجد زيادة في الأداء الحراري بحدود 30% باستخدام Al_2O_3 . درس (H. Vetrivel *et al.*, 2013) [36] تأثير الضياع الحراري من أعلى اللاقط المسطح إذ وجد تحسناً بالمردود بزيادة درجة حرارة الجو المحيط. قام (M.De Jesús Ángel *et al.*, 2013) [37] قام بتحليل انتقال التدفق والحرارة في اللاقط المسطح بتصميم هندسي مستطيل واسطواني باستخدام برنامج CFD ودرس توزيع الحرارة، واستنتج عدد رينولدز لكل شكل، ومعدل التدفق والأداء

قام (Siddharth Suman *et al.*, 2015) [60] بدراسة مرجعية للأساليب التي استخدمت لتحسين الأداء الحراري للواقط الشمسية.

4-المعادلات الأساسية للاقط المسطح [2]

4-1-معادلات الأداء الحراري

يُوصف الأداء الحراري للاقط المسطح في الحالة المستقرة بعملية التوازن في القدرة الذي يعبر عنه توزع الإشعاع الشمسي الوارد إلى سطح اللاقط إلى: القدرة المكتسبة المفيدة والفقد الحراري والفقد البصري وفق الشكل (2). يساوي الإشعاع الشمسي الممتص بواسطة اللاقط لوحدة مساحة السطح الماص S الفرق بين الإشعاع الشمسي الوارد بمركباته الثلاث (المباشر، والمنتشر، والمنعكس من الأرض)، والفقد البصري المحدد بالمعادلات (1،2) الذي يمثل جداء الإشعاع الشمسي بالنافذية والامتصاصية الفعالة $e(\tau\alpha)$.



الشكل (2) التوازن الحراري في اللاقط المسطح

أما القدرة الحرارية المفقودة (الفقد الحراري) من اللاقط إلى الجو المحيط بالتوصيل والحمل والإشعاع للأشعة تحت الحمراء فيمكن تحديدها بمعامل الفقد الحراري الكلي للاقط U_L مضروباً بالفرق بين درجة الحرارة الوسطية للصفحة الماصة T_p ودرجة حرارة الجو المحيط T_a ، يمكن تحديد الأداء الحراري للاقط الشمسي بالقدرة المكتسبة والمردود. تعرف القدرة المكتسبة المفيدة المستخلصة من اللاقط Q_u في الحالة المستقرة بأنها الفرق بين مقدار الإشعاع الشمسي الممتص، ومقدار الفقد الحراري وفق المعادلة (3) إذ A_c مساحة اللاقط المرجعية المعتمدة، أو تكتب وفق المعادلة (4) كحاصل جداء معدل التدفق الكتلي m' مضروباً بمتوسط السعة الحرارية للماء داخل

[48] بدراسة تأثير رقم براندل في الجريان ضمن اللاقط المسطح ووجد أن الأداء الحراري يتحسن مع ارتفاع رقم براندل. درس (Dhrupad Sarma., 2014) [49] تأثير عدد طبقات الزجاج للاقط المسطح، ووجد أنسب مسافة بين الطبقتين أو الثلاث هي 1سم.

قام (Deli Ling *et al.*, 2015) [50] بتصميم لاقط مسطح لوضعه في الشرفة بشكل مائل 70 درجة، وبعد الاختبار وجد تأثيره بدرجة حرارة الجو المحيط وشدة الإشعاع الشمسي أكثر من تأثيره بزواوية الميل. قام (Rehena Nasrin *et al.*, 2015) [51] بدراسة لاقط مسطح باستخدام سوائل النانو، خليط من الماء وذرات النحاس، وأوجد تأثير قطر أنابيب اللاقط وشدة الإشعاع الشمسي.

قام (Abbas Sahi Shareef *et al.*, 2015) [52] بدراسة لاقط مسطح باستخدام سوائل النانو، خليط من الماء وذرات الألمنيوم، ووجد تحسناً ملموساً بالأداء الحراري باستخدام هذا الوسط. قام (Sujit Kumar Verma *et al.*, 2015) [53] بدراسة مرجعية لتطبيقات استخدام سوائل النانو المختلفة في اللواقط المسطحة.

قام (Mayouf SI Abdallah., 2015) [54] بدراسة تأثير السطح الماص المتعرج أو المتموج في الأداء الحراري للاقط المسطح. قام (Vishal G. Shelke *et al.*, 2015) [55] بدراسة أشكال وأقطار متعددة للأنابيب الطولية في اللاقط المسطح باستخدام برنامج CFD. وأوجد الشكل والقطر الأمثل. قام (Yanqiu Wang., 2015) [56] بدراسة لاقط مسطح متوضع بشكل عرضي مع زاوية ميل شاقولية يوضع كجدار على الشرفات، ويحث بالحلول لتعويض انخفاض الأداء الحراري له بفعل توضع العرضي وزاوية الميل الثابتة. قام (Jin Wei Ma *et al.*, 2015) [57] باختبار لاقط مسطح ودرسته باستخدام مضاعف الاستخدام لتسخين الهواء أو الماء.

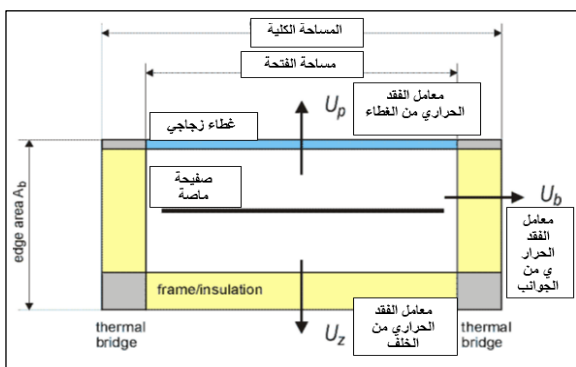
قام (Nabila Ihaddadene *et al.*, 2015) [58] بدراسة تأثير المسافة بين طبقتي الزجاج في الأداء الحراري للاقط المسطح ذي الزجاج المضاعف، ووجد أن الأداء الحراري ينقص بزيادة هذه المسافة. قام (B. N. Mankar *et al.*, 2015) [59] بدراسة مرجعية عن وسائل تحسين الانتقال الحراري في اللاقط المسطح.

4-2- التحليل الحراري

4-2-1- الأساس المعتمد:

عُرِضَ التحليل الحراري للاقط مسطح من نوع الأنابيب الطولية الملحومة على السطح العلوي للصفحة الماصة المشكلة من شرائح (سراشد) طولية بدهان أسود عادي، وطبقة واحدة من الزجاج وعازل حراري من الصوف الزجاجي.

افترض ما يأتي بحسب نموذج اللاقط المسطح الموضوع من قبل (Whillier, 1953) و (Hottel and Whillier, 1958) [2]. العمل في الحالة المستقرة، يعطي الأنبوب المجمع العلوي والسفلي مساحة صغيرة من اللاقط ويمكن إهماله، الأنبوب المجمع يعطي تدفقاً منتظماً إلى الأنابيب، لا يوجد امتصاص للأشعة الشمسية من الغطاء الزجاجي، التدفق الحراري خلال الغطاء الزجاجي باتجاه واحد، وانخفاض الحرارة خلال الغطاء الزجاجي مهم، والتدفق الحراري باتجاه واحد من الطرف الخلفي المعزول، تدرج درجة الحرارة حول الأنابيب مهم، ولا يهمل تدرج درجة الحرارة باتجاه التدفق وبين الأنابيب، يجري الفقد الحراري من الأمام والخلف بدرجة حرارة الجو المحيط نفسها. في الشكل (3) مركبات الضياع الحراري في اللاقط، وفي الشكل (4) مقطع في الصفحة الماصة يبين التوازن الحراري في اللاقط، وفي الشكل (5) شكل الأنابيب الملحومة فوق الصفحة الماصة.



الشكل (3) مركبات الضياع الحراري في اللاقط المسطح

اللاقط C_p ويفرق درجات الحرارة ΔT بين مخرج اللاقط ومدخله وفق المعادلة (5). ويعرف المرود η بأنه نسبة القدرة المكتسبة المفيدة في مدة زمنية محددة مقسوماً على معدل شدة الإشعاع الشمسي الواردة على اللاقط في هذه المدة نفسها وفق المعادلة (6). يُكتب المرود $\eta_{(p,a)}$ بدلالة الفرق بين متوسط درجة حرارة الصفحة الماصة T_p ودرجة حرارة الجو المحيط T_a وفق المعادلة (7). ولأن متوسط درجة حرارة الصفحة الماصة الواردة في هذه المعادلة T_p من الصعوبة قياسها أو حسابها وهي تابعة لتصميم اللاقط والإشعاع الشمسي الوارد وشروط السائل الداخل إلى اللاقط من درجة حرارة ومعدل التدفق، فيكتب المرود بالصيغة $\eta_{(m,a)}$ بدلالة الفرق بين وسطي درجة حرارة الماء في اللاقط T_m ودرجة حرارة الجو المحيط T_a ، إذ يُدخل عامل كفاءة اللاقط F' وفق المعادلة (8). أو يُكتب بالصيغة $\eta_{(i,a)}$ بدلالة الفرق بين درجة حرارة الماء الداخل إلى اللاقط T_i ودرجة حرارة الجو المحيط T_a إذ يُدخل عامل إزاحة الحرارة من اللاقط F_R وفق المعادلة (9). أو يُكتب بالصيغة $\eta_{(m,i)}$ بدلالة الفرق بين وسطي درجة حرارة الماء في اللاقط T_m ودرجة حرارة مدخل اللاقط T_i ، إذ يُدخل عامل تدفق اللاقط F'' وفق المعادلة (10). وتكون المعادلات الأساسية للاقط كما يأتي [2]:

$$S = I_{br} \cdot R_{br}(\tau\alpha)_{br} + I_{dr}(\tau\alpha)_{dr} \cdot \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \rho_{gr}(I_{br} + I_{dr})(\tau\alpha)_{gr} \cdot \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (1)$$

$$S = G(\tau\alpha)_e \quad (2)$$

$$Q_u = A_c [S - U_L(T_p - T_a)] \quad (3)$$

$$Q_u = m' \cdot C_p \cdot (T_e - T_i) \quad (4)$$

$$\Delta T = T_e - T_i \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\int Q_u \cdot dt}{A_c \int G \cdot dt} \quad (6)$$

$$\eta_{(p,a)} = \left((\tau\alpha)_e - U_L \cdot \frac{T_p - T_a}{G} \right) \quad (7)$$

$$\eta_{(m,a)} = F' \left((\tau\alpha)_e - U_L \cdot \frac{T_m - T_a}{G} \right) \quad (8)$$

$$\eta_{(i,a)} = F_R \left((\tau\alpha)_e - U_L \cdot \frac{T_i - T_a}{G} \right) \quad (9)$$

$$\eta_{(m,i)} = F'' \left((\tau\alpha)_e - U_L \cdot \frac{T_m - T_i}{G} \right) \quad (10)$$

و N عدد الأغطية الزجاجية، وتحسب قيمة h_w عامل انتقال الحرارة بالحمل بين الغطاء الزجاجي والوسط المحيط من العلاقة الآتية: إذ v سرعة الهواء فوق سطح اللاقط، L طول اللاقط

$$h_w = \frac{8.6(v)^{0.6}}{L^{0.4}} \quad (13)$$

يُعطى معامل الفقد الحراري من خلف اللاقط U_z بالعلاقة الآتية:

$$U_z = \frac{\lambda_z}{d_z} \quad (14)$$

معامل الفقد الحراري من جوانب اللاقط U_b يعطى بالمعادلة المقترحة من قبل (Tabor1958):

$$U_b = \frac{(UA)_{edge}}{A_c} \quad (15)$$

4-2-3- توزيع درجات الحرارة بين الأنابيب (مردود الريشة وعامل كفاءة اللاقط):

يمكن تعريف F مردود الزعنفه أو الريشة في السطح الماص:

$$F = \frac{\tanh[m(W - D_e)/2]}{m(W - D_e)/2} \quad (16)$$

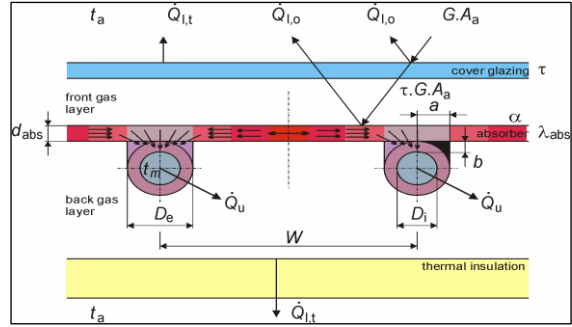
يكتب F' عامل كفاءة اللاقط بدلالة مردود الزعنفه أو الريشة:

$$F' = \frac{1/U_L}{W \left[\frac{1}{U_L[D_e + (W - D_e)F]} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_{fi}} \right]} \quad (17)$$

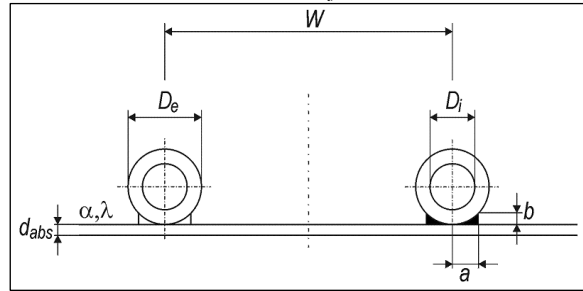
يمثل عامل كفاءة اللاقط F' نسبة القدرة الفعلية المفيدة المكتسبة المسحوبة من اللاقط عن طريق السائل العامل منسوبة إلى القدرة المفيدة المكتسبة الممكن سحبها، إذا كانت درجة حرارة السطح الماص T_p مساوية إلى وسطي درجة حرارة السائل العامل في اللاقط T_m . ويمكن عدّه النسبة بين:

$$F' = \frac{U_0}{U_L} \quad (18)$$

أي إنّ عامل كفاءة اللاقط يمثل مقاومة الانتقال الحراري من السائل إلى الجو المحيط مقسوماً على مقاومة الانتقال الحراري من السطح الماص إلى الجو المحيط، وتُعطى الثوابت بالعلاقات الآتية:



الشكل (4) مقطع في الصفيحة الماصة يبين التوازن الحراري في اللاقط



الشكل (5) شكل الأنابيب الملحومة فوق الصفيحة الماصة

4-2-2- معامل الفقد الحراري الكلي

يُعطى معامل الفقد الحراري الكلي U_L للاقط بالعلاقة الآتية [2]

$$U_L = U_p + U_z + U_b \quad (11)$$

يمكن تحديد معامل الفقد الحراري من الغطاء U_p بالعلاقة التجريبية التي طورها (Klein 1975):

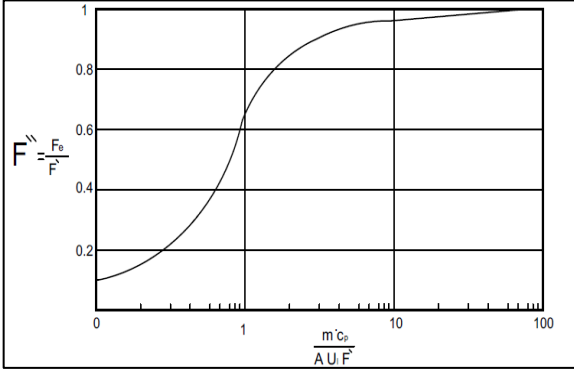
$$U_p = \left\{ \frac{N}{\frac{c}{T_p} \left[\frac{(T_p - T_a)^e}{(N+f)} \right]} + \frac{1}{h_w} \right\}^{-1} \quad (12)$$

$$+ \frac{\sigma(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{(\epsilon_p + 0.00591N h_w)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133\epsilon_p}{\epsilon_g} - N}$$

وهذه العلاقة تصلح حتى نهاية درجة حرارة سطح ماص بحدود $T_p \approx 200 [^\circ C]$ ، إذ إنّ الثوابت في المعادلة (12) هي:

$$\begin{aligned} f &= (1+0.089 h_w - 0.1166 h_w \cdot \epsilon_p) (1+0.07866N) \\ C &= 520(1-0.000051\beta^2) \text{ for } 0^\circ < \beta < 70^\circ, \text{ for } \\ &= 70^\circ < \beta < 90^\circ, \text{ use } \beta = 70^\circ \\ e &= 0.430(1-100/T_p) \end{aligned}$$

بدلالة المقدار $\frac{m \cdot C_p}{A_c U_L F'}$ ، وهو مقدار لا بعدي يسمى معدل سعة اللاقط، أو معدل التدفق الكتلي اللاعدي للاقط.



الشكل (6) عامل تدفق اللاقط F'' بدلالة معدل سعة اللاقط

يعادل عامل إزاحة الحرارة من اللاقط F_R فعالية مبادل حراري التي تحدد بالنسبة بين الانتقال الحراري الفعلي إلى الانتقال الحراري الأعظمي الممكن عندما يكون كل اللاقط بدرجة حرارة الدخول للسائل، ومن ثم يكون الفقد الحراري للجو المحيط أصغرياً بهذه الحالة. ويضرب عامل إزاحة الحرارة من اللاقط بالقدرة العظمى المفيدة الممكن اكتسابها فنحصل على القدرة الفعلية المكتسبة من اللاقط بالمعادلة:

$$Q_u = A_c F_R [S - U_L (T_i - T_a)] \quad (25)$$

هذه المعادلة مهمة جداً وأساسية في اللاقط المسطح، إذ يظهر أن القدرة المكتسبة المفيدة للاقط تُحسب كتابع لدرجة حرارة الدخول للسائل التي يمكن معرفتها بالقياس. ومقارنة بالعلاقة (3) يُلاحظ استبدال درجة حرارة السطح الماص T_p بدرجة حرارة دخول الماء إلى اللاقط T_i بإدخال عامل إزاحة الحرارة من اللاقط F_R وبالطريقة نفسها يمكن كتابة المعادلة باستبدال بدرجة حرارة السطح الماص T_p بدرجة حرارة الماء المتوسطة داخل اللاقط T_m بإدخال عامل كفاءة اللاقط F' فنجد:

$$Q_u = A_c F' [S - U_L (T_m - T_a)] \quad (26)$$

ويمكن استبدال بدرجة حرارة الجو المحيط T_a بدرجة حرارة دخول الماء إلى اللاقط T_i بإدخال عامل تدفق اللاقط F'' إلى المعادلة السابقة فتصبح:

$$Q_u = A_c F'' [S - U_L (T_m - T_i)] \quad (27)$$

بتعويض المعادلة (2) والمعادلة (6) مع المعادلة (3) نجد معادلة المردود بدلالة الفرق بين درجة حرارة السطح

$$C_b = \frac{\lambda_b}{b} a \quad (19)$$

$$m = \sqrt{U_L / \lambda_{abs} d_{abs}} \quad (20)$$

يعدُّ عامل كفاءة اللاقط F' ثابتاً أساسياً ومهماً لتصميم وتحديد معدل التدفق لأي لاقط شمسي، وهو تابع لكل من U_L و h_{fi} التي لها علاقة بالحرارة، ينقص مع زيادة المسافة بين الأنابيب، ويزداد مع سماكة معدن الصفيحة الماصة ومعامل التوصيل الحراري لها، وينقص مع زيادة معامل الفقد الحراري الكلي للاقط، ويزداد مع زيادة الانتقال الحراري بين الصفيحة الماصة والسائل.

4-2-4-2-4 توزع درجات الحرارة في اتجاه الجريان (عامل إزاحة الحرارة من اللاقط وعامل التدفق):

يدخل السائل إلى اللاقط بدرجة حرارة T_i ، وتزداد الحرارة حتى خروج السائل بدرجة حرارة T_e ، وإجراء توازن للطاقة في السائل لأنبوب واحد نجد المعادلة:

$$\frac{T_e - T_a - S/U_L}{T_i - T_a - S/U_L} = \exp(-A_c U_L F' / m \cdot C_p) \quad (21)$$

عامل إزاحة الحرارة من اللاقط F_R هو نسبة القدرة الفعلية المكتسبة المسحوبة من اللاقط عن طريق السائل العامل إلى القدرة المكتسبة الممكن سحبها من اللاقط إذا كانت درجة حرارة السطح الماص T_p مساوياً إلى درجة حرارة دخول الماء إلى اللاقط T_i ويكتب بالمعادلة:

$$F_R = \frac{m \cdot C_p (T_e - T_i)}{A_c [S - U_L (T_i - T_a)]} \quad (22)$$

$$F_R = \frac{m \cdot C_p}{A_c U_L} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{m \cdot C_p}\right) \right] \quad (23)$$

$$F'' = \frac{F_R}{F'} = \frac{m \cdot C_p}{A_c U_L F'} \left[1 - \exp\left(-\frac{A_c U_L F'}{m \cdot C_p}\right) \right] \quad (24)$$

إن عامل تدفق اللاقط F'' هو نسبة القدرة الفعلية المكتسبة المسحوبة من اللاقط عن طريق السائل العامل إلى القدرة المكتسبة الممكن سحبها من اللاقط، إذا كان وسطي درجة حرارة السائل العامل مساوياً إلى درجة حرارة دخول الماء إلى اللاقط T_i . ويرسم بحسب الشكل (6)

4-2-6- النفاذية والامتصاصية الفعالة

تكون النفاذية والامتصاصية الفعالة $(\tau\alpha)_e$ أكبر من جداء النفاذية والامتصاصية $(\tau\alpha)$ التي عُدَّ فيها الفقد الحراري من الزجاج هو خسارة وفي الواقع، فإن هذا الفقد سيقوم بتسخين الزجاج مع مرور الوقت، ومن ثمَّ سيعيق الفقد الحراري من الصفيحة الماصة إلى الجو المحيط ومن ثمَّ يمكن كتابة:

$$(\tau\alpha)_e \cong 1.02 (\tau\alpha) \quad (30)$$

4-2-7- زاوية الورود ومعدل زاوية الورود

هناك بارامتر آخر يمكن تحديده أحياناً وخصوصاً في اختبارات الحالة شبه الديناميكية، وهو معدّل زاوية الورود $K_{\tau\alpha}$ Incidence Angle Modifier ويمكن تحديده بالمعادلة:

$$K_{\tau\alpha} = \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \quad (31)$$

وبإدخال معدّل زاوية الورود تصبح معادلة القدرة المفيدة المكتسبة:

$$Q_u = A_c F_R [G K_{\tau\alpha} (\tau\alpha)_n - U_L (T_i - T_a)] \quad (32)$$

اقترح (Souka and Safwat 1966) إدخال معامل معدّل زاوية الورود b_o للواقط المسطحة:

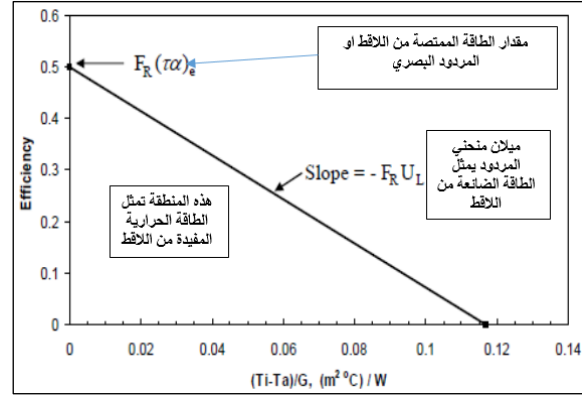
$$K_{\tau\alpha} = 1 + b_o \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (33)$$

يمكن رسم منحني $K_{\tau\alpha}$ معدّل الزاوية كتابع لزاوية الورود θ و $1 - \frac{1}{\cos \theta}$. يكون معظم القدرة الممتصة من اللاقط عادة في الوقت الذي تكون فيه زاوية الورود $\theta < 60^\circ$. وبشكل عملي أثناء الاختبارات، يمكن إهمال حساب تأثير معدّل زاوية الورود إذا دُورَت منصّة الاختبار التي يثبت عليها اللاقط باتجاه (شرق-غرب) بحيث تكون زاوية الورود بحدود $\theta = 20^\circ$ في أثناء الاختبار وتقاس بطريقة القرص ذي الحلقات [2].

4-2-8- مستوى الإشعاع الشمسي الحرج

يعمل اللاقط الشمسي (نظرياً) من شروق الشمس إلى غروبها وتتحول القدرة المحمولة مع الإشعاع الشمسي الواردة إليه إلى قدرة حرارية تنتقل عبر الوسيط السائل. ولكن في الحالة الواقعية لا يستفيد من كامل فترة السطوع

الماص T_p ودرجة حرارة الجو المحيط T_a رقم (7). ومع المعادلة (26) نجد معادلة المردود بدلالة الفرق بين درجة الحرارة المتوسطة للماء داخل اللاقط T_m ودرجة حرارة الجو المحيط T_a رقم (8). ومع المعادلة (25) نجد معادلة المردود بدلالة الفرق بين درجة حرارة دخول الماء إلى اللاقط T_i ودرجة حرارة الجو المحيط T_a رقم (9). ومع المعادلة (27) نجد معادلة المردود بدلالة الفرق بين درجة الحرارة المتوسطة للماء داخل اللاقط T_m ودرجة حرارة دخول الماء لللاقط T_i رقم (10). تظهر المعادلات السابقة جميعها منحني المردود اللحظي بحسب الشكل (7) إذا كانت الثوابت الحرارية لللاقط: F_R ، U_L ، $(\tau\alpha)$ ذات قيم ثابتة إذ يُمثل جداء $(\tau\alpha) F_R$ المردود البصري لللاقط والجداء $U_L F_R$ ميل منحني المردود، ويمثل الضياع الحراري من اللاقط.



الشكل (7) منحني المردود اللحظي لللاقط الشمسي

4-2-5- متوسط درجة حرارة السائل والصفيحة

الماصة

يمكن معرفة متوسط درجة حرارة السائل T_m وفق [2] انطلاقاً من المعادلة (28) كما يأتي:

$$T_m = T_i + \frac{Q_u / A_c}{F_R U_L} (1 - F'') \quad (28)$$

يكون متوسط درجة حرارة الصفيحة الماصة T_p أكبر من متوسط درجة حرارة السائل T_m بفعل المقاومة الحرارية بين السطح الماص والسائل، ويمكن الإفادة منها في حساب القدرة المفيدة المكتسبة من اللاقط من المعادلة (3)، ومن ثمَّ يمكن أن نحسب متوسط درجة حرارة الصفيحة الماصة T_p من العلاقة:

$$T_p = T_i + \frac{Q_u / A_c}{F_R U_L} (1 - F_R) \quad (29)$$

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{T_m - T_a}{G} - a_2 \cdot G \left(\frac{T_m - T_a}{G} \right)^2 \quad (45)$$

$$Q_u = A \cdot G \left[\eta_0 - a_1 \frac{T_m - T_a}{G} - a_2 \cdot G \left(\frac{T_m - T_a}{G} \right)^2 \right] \quad (46)$$

6-النتائج:

1- دُرِس اللاقط المسطح بشكل واسع، وتركزت الدراسات على تحسين الأداء الحراري عن طريق تحسين التصميم والمواد، والأبعاد والمسائل العامل، وعدد طبقات الزجاج، ونوع الطلاء، وشكل الصفيحة الماصة وأنواع الأنابيب وأقطارها.

2- مازال اللاقط المسطح مجالاً خصباً للبحوث والتطوير وخصوصاً في مجال تأثير زاوية الميل والتوجيه والملاحقة الشمسية وطرائق جديدة في التشغيل والاستثمار ومعدل التدفق ووضع بدارة مغلقة أو مفتوحة، وتأثير حجم خزان حفظ الطاقة في أدائه الحراري.

3- تتركز التوجهات الحديثة حالياً باستخدام اللاقط المسطح ضمن تطبيقات وتراكيب هجينة، مثل وصله مع الخلايا الضوئية، أو أجهزة تحلية المياه بالطاقة الشمسية، أو الاستخدام المضاعف لتسخين الماء والهواء معاً.

4- مازالت المعادلات الحرارية الأساسية للاقط المسطح تمثل الأساس لمعادلات الأنواع الأخرى من أنواع اللواقط مع وجود طريقتين، الأولى [2] تعتمد على درجة حرارة دخول الماء إلى اللاقط وتعدُّ معادلة المردود اللحظي من الدرجة الأولى، وتعتمد على المساحة الكلية للاقط في الحسابات، والثانية [61] تعتمد درجة الحرارة الوسطية للماء داخل اللاقط، كما تستخدم معادلة من الدرجة الثانية للمردود اللحظية ومساحة الفتحة أو مساحة السطح الماص في الحسابات، وفي الحالات جميعها فإن الشكل العام لمنحنى المردود اللحظي يكون متشابهاً في الحالتين.

بسبب الإشعاع الشمسي (الحر) الذي هو القيمة المنخفضة للإشعاع الشمسي الوارد الذي يحصل بداية شروق الشمس وغروبها، وعند التغييم المفاجئ في أثناء النهار ويعمل عنده اللاقط كمشع للحرارة بدلاً من أن يمتص الحرارة ومن ثمَّ تصبح قيم القدرة المكتسبة الناتجة عنه سالبة. تتعلق قيمة الإشعاع الشمسي (الحر) بخصائص الأداء الحراري للاقط وبشروط التشغيل، وتختلف من لاقط إلى آخر ومن مكان جغرافي إلى آخر، من المعادلات (2) و(25) نجد المعادلة الآتية للقدرة المكتسبة المفيدة للاقط:

$$Q_u = A_c [F_R(\tau\alpha)G - F_R U_L(T_i - T_a)] \quad (34)$$

إن الإشعاع الشمسي الحر G_{cr} هو قيمة الإشعاع الشمسي الذي يجعل قيمة الحد بين القوسين يساوي الصفر، إذ تكون عندها قيمة الإشعاع الممتص والفقد الحراري متساويين وفق المعادلة:

$$[F_R(\tau\alpha)G - F_R U_L(T_i - T_a)] = 0 \quad (35)$$

ومن ثمَّ تُكتب قيمة الإشعاع الشمسي الحر بالمعادلة:

$$G_{cr} = \frac{F_R U_L(T_i - T_a)}{F_R(\tau\alpha)} \quad (36)$$

5-معادلات اللاقط المسطح وفق المواصفة الأوروبية [61]

تستخدم في المواصفات الأوروبية المعادلات الآتية للحساب الحراري للاقط الشمسي التي تعتمد بشكل عام على T_m بدلاً من T_i ، كما تُعتمد معادلات المردود اللحظي من الدرجة الثانية:

$$Q_u = m \cdot C_p \Delta T \quad (37)$$

$$Q_u = A_c \cdot G \cdot \eta \quad (38)$$

$$T_m = T_i + \frac{\Delta T}{2} \quad (39)$$

$$\Delta T = T_e - T_i \quad (40)$$

$$T_m^* = \frac{T_m - T_a}{G} \quad (41)$$

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot T_m^* \quad (42)$$

$$U_L = a_1 + a_2(T_m - T_a) \quad (43)$$

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot T_m^* - a_2 \cdot G(T_m^*)^2 \quad (44)$$

عامل الشكل لعملية الإشعاع بين اللاقط والسماء	$\frac{1 + \cos\beta}{2}$	[-]
عامل الشكل لعملية الإشعاع بين اللاقط والأرض المحيطة	$\frac{1 - \cos\beta}{2}$	[-]
زاوية ميل اللاقط عن الأفق	β	[°]
شدة الإشعاع الشمسي الوارد إلى سطح اللاقط	G	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
درجة حرارة السائل العامل الخارج من اللاقط	T_e	[°C]
عدد الاغطية الزجاجية في اللاقط	N	[-]
ثوابت تتعلق بمواصفات اللاقط	f, C, e, m	[-]
معامل انتقال الحرارة بالحمل بين الغطاء الزجاجي والوسط المحيط	h_w	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
ثابت (ستيفن-بولتزمان)	σ	[-]
إصدارية الصفيحة الماصة للاقط	ϵ_p	[-]
إصدارية الزجاج للاقط	ϵ_g	[-]
سرعة الهواء فوق سطح اللاقط	v	$\left[\frac{m}{sec}\right]$
طول (ارتفاع) اللاقط	L	[mm]
عامل التوصيل الحراري للمادة العازلة	λ_z	$\left[\frac{W}{m.K}\right]$
سماعة المادة العازلة	d_z	[mm]
الفقد الحراري الجانبي للاقط لوحدة المساحة	(UA) _{edge}	[W/K]
عرض الزعنفة أو الريشة للصفيحة الماصة	W	[mm]
القطر الخارجي للأنبوب الطولي في اللاقط	D_e	[mm]
موصلية اللحام بين الأنابيب والصفيحة الماصة	C_b	$\left[\frac{W}{m.K}\right]$
القطر الداخلي للأنبوب الطولي في اللاقط	D_i	[mm]
معامل الانتقال الحراري بين السائل العامل وجدار الأنبوب	h_{fi}	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
معامل الانتقال الحراري بين الصفيحة الماصة والجو المحيط	U_0	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
عامل التوصيل الحراري لوصلة اللحام بين الأنابيب والصفيحة الماصة	λ_b	$\left[\frac{W}{m.K}\right]$
عرض الوصلة للحامية	a	[mm]
سماعة الوصلة للحامية	b	[mm]
سماعة الصفيحة الماصة	d_{abs}	[mm]
عامل التوصيل الحراري للصفيحة الماصة	λ_{abs}	$\left[\frac{W}{m.K}\right]$
مردود الزعنفة أو الريشة في السطح الماص	F	[-]
معامل سعة اللاقط أو معدل التدفق الكتلي اللابدي للاقط	$\frac{m \cdot C_p}{A_c U_L F'}$	[-]
امتصاصية الطلاء على الصفيحة الماصة للاقط المسطح	α_p	[-]
نفاذية الإشعاع الشمسي المباشر للغطاء الزجاجي للاقط مسطح	τ_g	[-]
معامل زاوية الورود	$K_{\tau\alpha}$	[-]
معامل زاوية الورود	b_0	[-]
زاوية الورود	θ	[-]
المردود البصري للاقط ويمثل القيمة العظمى للمردود اللحظي عند درجة حرارة مختزلة $T^* = 0$	η_0	[%]
معامل ضياع الحرارة الصفري عند $T_m - T_a = 0$	a_1	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
معامل ضياع الحرارة كتابع لدرجة الحرارة	a_2	$\left[\frac{W}{m^2K^2}\right]$
درجة الحرارة المختزلة	T^*	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

مسرد المصطلحات

الشرح	الرمز	الوحدات
شدة الإشعاع الشمسي الممتص لوحدة مساحة السطح الماص	S	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
جداء النفاذية بالامتصاصية	$(\tau\alpha)$	[-]
جداء النفاذية بالامتصاصية الفعّال	$(\tau\alpha)_e$	[-]
جداء النفاذية بالامتصاصية ورود ناظمي	$(\tau\alpha)_n$	[-]
معامل الفقد الحراري الكلي للاقط	U_L	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
معامل الفقد الحراري من الغطاء للاقط	U_p	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
معامل الفقد الحراري من خلف اللاقط	U_z	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
معامل الفقد الحراري الجانبي للاقط	U_b	$\left[\frac{W}{m^2K}\right]$
درجة الحرارة الوسطية للصفيحة الماصة	T_p	[°C]
درجة حرارة الجو المحيط	T_a	[°C]
القدرة المكتسبة المفيدة من اللاقط	Q_u	[W]
مساحة اللاقط المرجعية المعتمدة	A_c	[m ²]
معدل التدفق للسائل العامل داخل اللاقط	\dot{m}	$\left[\frac{kg}{sec}\right]$
السعة الحرارية للسائل العامل داخل اللاقط	C_p	$\left[\frac{J}{kg.K}\right]$
فرق درجات الحرارة بين مخرج اللاقط ومدخله.	ΔT	[°C], [K]
مردود اللاقط نسبة القدرة المكتسبة المفيدة المنقولة بواسطة السائل العامل خلال مدة زمنية محددة dt مقسوماً على شدة الإشعاع الشمسي الواردة إلى مساحة اللاقط في مستوى ميلانه بالفترة نفسها.	η	[%]
المردود بدلالة الفرق بين درجة حرارة السطح الماص T_p ودرجة حرارة الجو المحيط T_a	$\eta_{(p,a)}$	[%]
المردود بدلالة الفرق بين وسطي درجة حرارة الماء في اللاقط T_m ودرجة حرارة الجو المحيط T_a	$\eta_{(m,a)}$	[%]
وسطي درجة حرارة السائل العامل في اللاقط	T_m	[°C]
عامل كفاءة اللاقط	F'	[-]
المردود بدلالة الفرق بين درجة حرارة الماء الداخل إلى اللاقط T_i ودرجة حرارة الجو المحيط T_a	$\eta_{(i,a)}$	[%]
درجة حرارة السائل العامل الداخل إلى اللاقط	T_i	[°C]
عامل إزاحة الحرارة من اللاقط	F_R	[-]
المردود بدلالة الفرق بين وسطي درجة حرارة الماء في اللاقط T_m ودرجة حرارة الدخول T_i	$\eta_{(m,i)}$	[%]
عامل تدفق اللاقط	F''	[-]
مركب الإشعاع المنتثر	I_{dr}	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
مركب الإشعاع المباشر	I_{br}	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$
نسبة الإشعاع المباشر على السطح المائل إلى الإشعاع المباشر على السطح الأفقي	R_{br}	[-]
دليل الإشعاع المباشر	b_r	[-]
دليل الإشعاع المنتثر	d_r	[-]
دليل الإشعاع المنعكس من الأرض	g_r	[-]
مركب الإشعاع المنعكس من الأرض	ρ_{gr}	$\left[\frac{W}{m^2}\right]$

14. Kalogirou. S., 2009. Low temperature solar collector, solar energy conversion and photo energy system-vol1.
15. Alvarez *et al.*, 2010. Experimental and numerical investigation of a flat-plate solar collector, *Energy* 35: 3707e3716.
16. S. Furbo *et al.*, 2010. Long-Term Investigation of The Advantages of Anti Reflection Treated Glass Covers Exposed To Real Climatic Conditions, www.researchgate.net
17. E. I. Igweonu *et al.*, 2011. Solar collector efficiency: Analysis and Application, *Continental J.Engineering Sciences* 6(1):24- 30.
18. M.S. Hossain *et al.*, 2011. Review on solar water heater collector and thermal energy performance of Circulating pipe, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15:3801– 3812.
19. Arunchala U. C., 2011. Performance Deterioration Of Thermo siphon Solar Flat Plate Water Heater Due To Scaling, *IJUM Engineering Journal*, Special Issue, Mechanical Engineering.
20. Ahmad Fudholi *et al.*, 2011. Thermal Efficiency of Double Pass Solar Collector with Longitudinal Fins Absorbers, *American Journal of Applied Sciences* 8(3): 254-260.
21. Johan Vestlund *et al.*, 2012. Thermal and mechanical performance of sealed, gas-filled, flat plate solar collectors, *Solar Energy* 86: 13– 25.
22. Anuj Mathur *et al.*, 2012. Recent development in the field of solar water heater using flat plate collector- Review, *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 3(2):68-70.
23. B.K. Gond *et al.*, 2012. Manufacturing and performance analysis of solar flat plate collector with phase change material, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2(3).
24. Po-Chuan Huang *et al.*, 2012. Numerical study of heat transfer enhancement for a novel flat-plate solar water collector using metal-foam blocks, *International Journal of Heat & Mass Transfer* 55 -6734–6756.
25. Hamdi Kessentini *et al.*, 2008. Numerical simulation of heat transfer and fluid flow in a flat plate solar collector with TIM and ventilation channel, *Heat and Mass Transfer Technological Center Universitat Politècnica de Catalunya*, Spain.
26. F.F. Mammadov. 2012. Estimation of Flat Plate Solar Collector Productivity, *Technical and Physical Problems of Engineering*, (IJTPE), Issue 10, Vol. 4(1): 35-40.
27. Atish Mozumder *et al.*, 2012. Study of Cylindrical Honeycomb Solar Collector, *Moti Lal Nehru College, University of Delhi, New Delhi* 110021.

References

1. Kalogirou. S. 2004. Solar thermal collectors and applications, *Progress in Energy and Combustion Science* 30: 231–295.
2. John A. D Duffie & William A. Beckman. 2000. *Solar engineering of thermal processes*, second edition, John Wiley & Sonce, INC.
3. Christopher Pike *et al.*, 2013. A side-by-side outdoor performance analysis of three types of solar thermal collector under varying ratios of direct and diffuse radiation, *Appalachian State University Katherine Harper Hall Boone, NC* 28608.
4. Ho-Ming Yeh *et al.*, 1999. The Effect of Collector Aspect Ratio on the Collector Efficiency of Sheet-and-Tube Solar Fluid Heaters, *Tamkang Journal of Science and Engineering*, 2(2):61-68.
5. Bengt Hellström. 2005. Calculation and Measurement. Methods for the Performance of Solar Collectors, Division of Energy and Building Design, Department of Construction and Architecture, Lund University, Lund Institute of Technology, Report EBD-T-05/2.
6. Poolsak Intawee *et al.*, 2006. Efficiency Enhancement of Solar Water Heater, Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, Thailand.
7. Andrei Ștefan Jercan, 2006. The Simplified Calculus Of The Flat Plate Solar Collector, *Annals of the university of Craiova, electrical engineering series*, no.30,2006.
8. Kalogirou.S.,2007, Recent Patents in Solar Energy Collectors and Applications, *Recent Patents on Engineering* 2007, 1, 23-33.
9. Simon Furbo *et al.*,2007, Flow Distribution In A Solar Collector Pane With Horizontally, Inclined Absorber Strips, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.
10. BAA Yousef *et al.*, 2008. Performance analysis for flat plate collector with and without porous media, *Journal of Energy in Southern Africa*, 19(4).
11. Tomas Matuska *et al.*. 2009. Detailed Modeling Of Solar Flat-Plate Collectors With Design Tool Kolektor 2.2, Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, July 27-30.
12. Hamdi Kessentini *et al.*, 2013. Numerical and Experimental Study of A Flat Plate Solar Collector With Transparent Insulation and Overheating Protection System, *Energy Conversion and Management*.
13. J. Cadafalch. 2009. A detailed numerical model for flat-plate solar thermal devices, *Solar Energy* 83 (2009) 2157–2164.

40. Gurveer Sandhu *et al.*, 2014. Experimental study on the combined effects of inclination angle and insert devices on the performance of a flat-plate solar collector, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 71:251–263.
41. M.A.Hamdani *et al.*, 2014. Comparison of Neural Network Models in the Estimation of the Performance of Solar Collectors, *Journal of Infrastructure Systems*, ASCE, ISSN 1076-0342.
42. Abdulhadi Ghyadh., 2014. Experimental and Theoretical Analysis for Thermos phone, *International Journal of Mechanical & Mechatronics Engineering* 14(01).
43. Zhenxing Zhang *et al.*, 2014. High Instantaneous Efficiency and High Flow Rate Slotted-Plate Solar collector, *Advanced Materials Research* Vol. 860-863 pp.
44. Munish Kainth., 2014. Latest Evolutions in Flat Plate Solar Collectors Technology, *International Journal of Mechanical Engineering*, 1(1):88-92.
45. Warunee Ariyawiriyanan *et al.*, 2013. Thermal Efficiency of Solar Collector Made from Thermoplastics, *Energy Procedia* 34:500 – 505.
46. S. Vijayakumar *et al.*, 2014, Enhancement of Heat Transfer Rate in a Solar Flat Plate Collector Using Twisted Tapes and Wire Coiled Tabulators, *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, 8(2).
47. M. Sridharan *et al.*, 2014. Experimental Investigation on Series Solar Flat Plate Collectors with Variable Mass Flow Rates, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(3).
48. Rehana Nasrin *et al.*, 2014. Effect of Prandtl Number on 3D Heat Transfer through a Solar Collector, *International Conference on Mechanical, Industrial and Energy Engineering*, December, Khulna, Bangladesh.
49. Dhruvad Sarma., 2014. Optimization of Glazing Cover Parameters of a Solar Flat Plate Collector (FPC), *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT) – 14(2)*.
50. Deli Ling *et al.*, 2015. Research on annual thermal performance of solar water heating balcony system, *Energy Procedia* 70: 71–78.
51. Rehana Nasrin *et al.*, 2015. Thermal performance of Nano fluid filled solar flat plate collector, *International journal of heat and technology*, 33(2).
52. Abbas Sahi Shareef *et al.*, 2015. Experimental investigation on a flat plate solar collector using Al₂O₃ Nano fluid as a heat transfer agent, *International journal of energy and environment*. 6(4): 317-330.
28. P. Sivakumar *et al.*, 2012. Performance Comparison of Differently Configured Solar Water Heaters. *European Journal of Scientific Research*, 91(1):23-31.
29. Sunil. K. Amrutkar *et al.*, 2012. Solar Flat Plate Collector Analysis, *Journal of Engineering*, 2(2): 207-213.
30. Sunil.K.Amrutkar *et al.*, 2012. Solar Flat Plate Collector Performance By Variation of Different Parameters, *IOSR Journal of Engineering*, 2(2): 369-371.
31. N. R. Avezova *et al.*, 2012. Thermal optimization The Width of Light Absorbing Plate of Sheet-Tube Solar Absorbers For Preheating Of Feed Water In Combined Solar fuel Systems of Hot Water Supply, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Santiago de Compostela (Spain), 28th to 30th March, 2012.
32. M. J. R. Abdunnabi *et al.*, 2012. Optimization of Thermo syphon Solar Water Heaters Using TRNSYS. Part2: Parametric Study Using a Modified TRNSYS Model, *International Conference on Future Environment and Energy*, IPCBEE vol.28.
33. Nirmal Ghimire *et al.*, 2013. Analysis of Parameters of Locally Manufactured Flat Tube Solar Water Heater to Increase the Efficiency, *Rentech Symposium Compendium*, Vol.3.
34. D.E. Roberts., 2013, A figure of merit for selective absorbers in flat plate solar water heaters, *Solar Energy* 98, 503–510.
35. Arun Kumar Tiwari *et al.*, 2013. Solar Water Heating Using Nano fluids, *A Comprehensive Overview And Environmental Impact Analysis*, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 3(3):221-224.
36. H. Vettrivel *et al.*, 2013. Experimental Study on a Flat Plate Solar Collector, *International Journal of Mechanical Engineering and Research*, 3(6): 641-646.
37. M.De Jesús Ángel *et al.*, 2013. Analysis of Flow and Heat Transfer in a Flat Solar Collector with Rectangular and Cylindrical Geometry Using CFD, *Ingeniería Investigación Tecnología*, volumen XIV (número 4).
38. Sachin Godara *et al.*, 2014. Top Heat Loss Coefficient of Single Glazed Flat Plate Collector at different Ambient Conditions, *International Journal of Applied Research and Studies* 3(3).
39. Prafull Hishikar *et al.*, 2014. Estimation of Blockage in Thermo siphon Flat Plate Solar Water Heater: Feasibility in Chhattisgarh, DOI: 10.7763/IPEDR. 2014. V75. 13.

53. Sujit Kumar Verma *et al.*, 2015. Application of Nano fluid in direct absorbing solar collector: A review International conference on Science, Technology and Management, YMCA, New Delhi (India).
54. Mayouf SI Abdallah.,2015. Effects of the Wavy Surface on a Solar Collector in Algeria, Recent Advances in Renewable Energy Sources, the 9th International Conference on Renewable Energy Sources, Kuala Lumpur, Malaysia, April 23-25.
55. Vishal G. Shelke *et al.*, 2015. Analyze the Effect of Variations in Shape of Tubes for Flat Plate Solar Water Heater, International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER), 3(4).
56. Yanqiu Wang., 2015. Investigation of Thermal Performance of Balcony Wall Flat-Plate Solar Collector, International Journal of Science 2(3).
57. Jin wei Ma *et al.*, 2015, Performance Investigation and Structure Optimization of a Flat Dual-Function Solar Collector, Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photo energy, ID 532059.
58. Nabila Ihaddadene *et al.*, 2015. Effect of Distanca between Double Glazing on the Performance of a Solar Thermal Collector Control, Journal of Mechanics Engineering and Automation 5 : 161-166.
59. B. N. Mankar *et al.*, 2015. Heat Transfer Enhancement in a Flat Plate Solar Water Collector: A Review, International Journal of Advanced Engineering and Global Technology, I, 3(6).
60. Siddharth Suman *et al.*, 2015. Performance enhancement of solar collectors-A review, Renewable and Sustainable EnergyReviews49: 192–210.
61. Thermal solar systems and components, solar collector part 2: test methods, EN12975-2:2001.

Received	2015/08/11	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2016/01/21	قبول البحث للنشر