

تصميم وتصنيع لاقط شمسي (مركَّب) لتسخين المياه بالطاقة الشمسية واستنتاج النموذج الرياضي له

م. محمد صادق الجوهرى¹ د.م. سنجار طعمة² أ.د.م. نديم مخبير³

¹طالب دكتوراه في قسم الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

²باحث في المركز الوطني لبحوث الطاقة بدمشق.

³أستاذ في قسم الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية جامعة دمشق.

الملخص

تصنف اللواقط الشمسية المستخدمة لتسخين المياه للتطبيقات المنزلية والصناعية والعاملة عند درجة حرارة أدنى من 100 درجة مئوية الى نوعين رئيسيين: اللاقط المسطح واللاقط الانبوي المفرغ. أظهرت نتائج اختبار الأداء الحراري أن لكل نوع منهما مميزات حرارية مختلفة عن الآخر. وبينت نتائج المقارنة أنه يمكن الاستفادة من المميزات الحرارية المختلفة للنوعين معاً عند عملهما في نفس الشروط المناخية وتداخل هذه المميزات الحرارية عند عملهما في الشروط التشغيلية المختلفة، ويتم ذلك في اللاقط الشمسي (المركَّب) الذي يستخدم لتسخين المياه بالطاقة الشمسية، يتألف من جزء بشكل لاقط مسطح وجزء بشكل لاقط انبوي مفرغ يتمتعان بمساحات مرجعية متساوية ومتصلان معاً كلاقط شمسي واحد بحيث تدخل المياه أولاً الجزء المسطح ومنه الى الجزء الانبوي المفرغ ومنه الى الخزان أو الاستخدام النهائي. تم في هذا البحث تصميم وتصنيع لاقط شمسي (مركَّب) واستنتاج النموذج الرياضي له. أجريت على هذا اللاقط الاختبارات الميكانيكية وفق متطلبات المتانة والوثوقية والأمان بنجاح. واختبارات الأداء الحراري في الحالة المستقرة عند الشروط المناخية لمدينة دمشق واستنتجت الثوابت الحرارية له. أظهرت النتائج تحسن مؤشرات الأداء الحراري لللاقط (المركَّب) مقارنة مع النوعين المكونين له. وأظهرت المقارنة بين قيم الثوابت الحرارية التجريبية لللاقط

(المركب) وقيمها في النموذج الرياضي المقترح تطابقاً جيداً، حيث اختلفت قيم المرئود البصري η_0 بحدود 2.8%، وقيم معامل ضياع الحرارة الصفري a_1 بحدود 3.4%.

الكلمات المفتاحية: لاقط شمسي مركب، لاقط انبوبي مفرغ، لاقط مسطح، النموذج الرياضي.

مقدمة: تصنف اللواقط الشمسية المستخدمة لتسخين المياه لدرجات الحرارة الى حوالي 100 درجة مئوية ضمن نوعين: اللواقط المسطحة والانبوبية المفرغة ولكل منها مواصفات تقنية وحرارية مختلفة، يتم الاعتماد عند المقارنة بينها على التصميم والكلفة والأداء الحراري. تهدف الأبحاث المتعلقة باللواقط الشمسية لزيادة الطاقة التي يمكن استغلالها من الإشعاع الشمسي وتحويلها إلى أقصى طاقة حرارية مفيدة وتحسين الأداء الحراري [1]. أجريت العديد من الأبحاث لتطوير تصاميم وتراكيب للواقط الشمسية لتحسين مواصفاتها واستنباط أنواع جديدة وهجينة. صنفت الى ثلاثة محاور رئيسية [1]، [2]، [3]، [4]، [5]، [6]. المحور الأول: أبحاث لتطوير التصميم الهندسي لكل جزء من اللاقط وتصاميم ومواد وأبعاد وطبقات مختلفة وتنوع الوسيط العامل وتطوير أنواع جديدة هجينة تستخدم لتطبيقات مختلفة. ولم يعد يوجد أي جزء من اللاقط المسطح الا وتم دراسته لتطويره بكافة الاتجاهات [7]. أما الأبحاث المتعلقة باللاقط الانبوبي المفرغ واللواقط الهجينة و(المركبة) مازالت في تطور مستمر [6]. المحور الثاني: أبحاث لدراسة التوجيه المناسب وزوايا الميل وزوايا الورود للأشعة الشمسية وملاحقة الشمس [8]. المحور الثالث: أبحاث تهتم بالاستخدام الأمثل للطاقة الناتجة من الإشعاع الشمسي وتخزينها وتطوير أساليب التشغيل والعزل والتحكم للمضخات ومعدل التدفق ودرجات الحرارة العاملة [2]. اللاقط (المركب) موضوع البحث يهدف للاستفادة من المميزات الحرارية المختلفة للاقط المسطح واللاقط الانبوبي المفرغ لتحسين الأداء الحراري دون زيادة بالكلفة، تم تصميمه وتصنيعه واختباره واستنتاج النموذج الرياضي له.

أولاً: دراسة مرجعية: عُرف اللاقط المسطح منذ بدايات القرن العشرين، قام Hottel - Willier بتطويره ونمذجته رياضياً في الخمسينيات من القرن العشرين، أجريت عليه

الكثير من التحسينات لرفع الأداء الحراري، قام Hottel and Woertz 1942 بإجراء أول تجربة للأداء الحراري للاقط المسطح واستنتج النموذج الرياضي له. اللاقط الأنبوبي المفرغ عرف أولاً من قبل Speyer 1965 [9]. ويتم تطويره بشكل متسارع. قام Fouad Kamel Abdalla بدراسة وتجريب لاقط هجين (انبوبي ومسطح) وضع اللاقط المسطح فوق اللاقط الأنبوبي ليعمل كمجمع رئيسي له ودرس منحنيات الأداء الحراري للاقط الهجين الجديد ومقارنته مع الانبوبي المسطح واستنتج ان الطاقة المكتسبة تتحسن في اللاقط الهجين و منحني المردود يقع ما بين الانبوبي و المسطح [10]، الشكل (1).



الشكل (1) لاقط مركب (هجين) حسب [10]

قام E. Zambolin *et al.* 2010 بدراسة تجريبية للأداء الحراري للاقط مسطح ولاقط انبوبي في الحالة المستقرة والحالة شبه ديناميكية وحالة العمل اليومي وجد أن المردود البصري للاقط المسطح أعلى من الانبوبي ولكن ميلان منحني المردود للاقط الانبوبي يكون أقل ، ينهار منحني مردود اللاقط المسطح بفعل الفقد الحراري عند درجات الحرارة العالية بينما يتمتع اللاقط الانبوبي بعبء استعراش منحني المردود بميلان أقل بسبب الفراغ بين الانبوبيين المؤدي الى تخفيض الضياع الحراري [12]. قام Munish Kainth بدراسة مرجعية للتقنيات المستخدمة في اللواقط الشمسية المسطحة والتصاميم المختلفة لها وتطورها في السنوات الاخيرة [6]. بين Zhangyuan Wang *et al.* 2015 التوجه المستقبلي لتطوير اللواقط الشمسية واستعرض تصاميم جديدة لتحسن الأداء الحراري وتخفيض الكلفة [11].



الشكل (2) منحنيات المرود العظمى لأنواع مختلفة من اللواظ حسب [3]

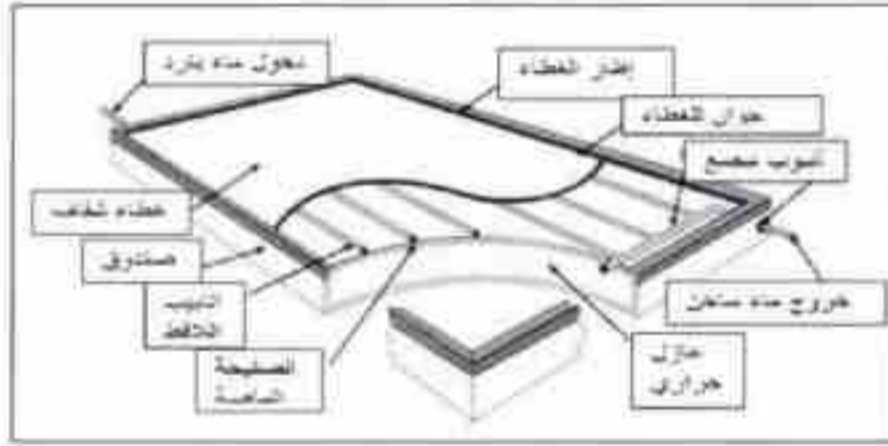
قام الباحث بدراسة تجريبية للأداء الحراري في الحالة المستقرة للاقط مسطح ولاقط أنبوبي لهما نفس المساحات المرجعية عند الشروط المناخية لمدينة دمشق، تبين أنه لكل نوع منهما مميزات حرارية مختلفة عن الآخر عندما يعملان في نفس الشروط المناخية. يمكن الاستفادة من المميزات الحرارية للنوعين معا وتداخلها في الظروف التشغيل المختلفة في نوع جديد هجين سمي اللاقط (المركب) [14].

ثانياً: تصميم وتصنيع اللاقط (المركب):

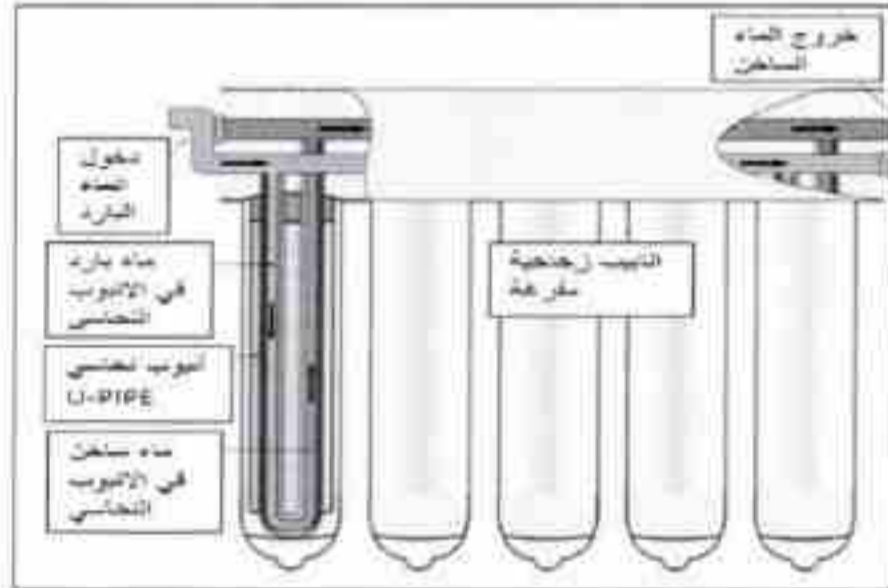
1- التعريف: هو لاقط شمسي حراري لتسخين المياه مؤلف من جزأين متصلين معاً على التسلسل: الأول لاقط مسطح كما في الشكل (3) والثاني لاقط أنبوبي مفرغ -U pipe كما في الشكل (4) يدخل الماء من أسفل اللاقط المسطح ويخرج من أعلى اللاقط الأنبوبي المساحات المرجعية للاقطين متساوية وهي مساحة الفتحة ومساحة السطح الماص المكشوفة للأشعة الشمسية والمساحة الاجمالية [13]. تم التصنيع كما يلي:

2- جزء اللاقط المسطح: الإطار الخارجي من الألمنيوم المؤكسد بدرجات حرارة عالية مطلي باللون البرونزي، السطح الخلفي من الصفيح المغلفن والمطلي حرارياً، العازل الحراري صوف زجاجي سماكة (3.5 سم) بكثافة ($38-40 \text{ kg/m}^3$) معامل التوصيل الحراري ($0.034 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$) شبكة الأنابيب الطولية من النحاس الأحمر (ASTM B88 TUBE) عددها 6 بقطر ($\frac{1}{2}$ انش) والأنبوب المجمع ($1 \frac{1}{8}$ انش) ملحومة مع

بعضها بلحام الفضة. الصفیحة الماصة من النحاس الأحمر سماكة (0.4 مم) مشكلة بطريقة الدرفلة، ثبتت شبكة الأنابيب النحاسية على الصفیحة الماصة النحاسية بواسطة نقاط لحام متلاحقة متقطعة تؤمن تلامس كامل بين الأنابيب والصفیحة الماصة، الطلاء أسود قائم مت من مواد كربونية. الغطاء لوح زجاجي بشفافية عالية بسماكة (5مم) والإطار المطاطي يعمل على إحكام اللوح الزجاجي مع جسم اللاقط المخارج والمداخل من الطرفين مصنعة من الفولاذ المغلقتن (ASME B 36) بقطر (1.174م) ومساحة الفتحة 1.043م² ومساحة السطح الماص المكشوف للأشعة الشمسية 0.903 م²، الشكل (16).



الشكل (3) رسم توضیحي لللاقط المسطح



الشكل (4) رسم توضیحي لللاقط شمسي أنبوبي مفرغ من نوع U-PIPE

3- جزء اللاقط الانبوبي المفرغ: U-PIPE يتألف من سبعة انابيب زجاجية مفرغة [17]. بداخلها انابيب من النحاس الاحمر بقطر ($\frac{3}{8}$ انش) موصولة مع مجمعين نحاسيين بقطر ($\frac{1}{8}$ انش)، (ASTM B88 TUBE) أحيط كل أنبوب نحاسي بحاضن من مادة الألمنيوم لزيادة الناقلية الحرارية بسماكة (1 ملم) وطول (1000 ملم)، وضع الأنبوب النحاسي وحاضن الألمنيوم ضمن أنبوب زجاجي مفرغ (طول 1800 ملم) قطر داخلي (47 ملم) وقطر خارجي (58 ملم) نوع Tree target vacuum tube الطلاء انتقائي ثلاثي الطبقات: CU/SS-ALN(H)/SS-ALN(L)/ALN يدخل الماء إلى مجمع نحاسي في أعلى اللاقط بقطر ($\frac{1}{8}$ انش) وتوزع منه على الأنابيب النحاسية ويخرج الماء الساخن منها إلى مجمع نحاسي آخر في أعلى اللاقط بقطر ($\frac{1}{8}$ انش) المجمعين متوازيين ضمن غلاف محاط بعازل حراري من الفوم (بولي ريثان) سماكة (5 سم) كثافة (30 kg/m³) ومعامل التوصيل الحراري (0.025 W/m.^oc) وضع خلف الأنابيب الزجاجية ثلاثة قطع من عواكس ستانلس ستيل سماكة 1 ملم وارتفاع 40 سم وعرض 58 سم لكل منها، المساحة الاجمالية 1.174 م² ومساحة الفتحة 1.01675 م² ومساحة السطح الماص المكشوفة للأشعة الشمسية 0.9039 م² المسافة بين محاور الانابيب 83 ملم وطولها الفعال 1750 ملم، الشكل (17).

4- الشكل النهائي للاقط (التركيب): حسب الشكل (15)، والأبعاد في الجدول (1):

الجدول (1) ابعاد اللاقط التركيب

الأبعاد	جزء مسطح	جزء انبوبي	لاقط تركيب
مساحة الفتحة (م ²)	1.043	1.01675	2.0897
السطح الماص المكشوف للأشعة الشمسية (م ²)	0.903	0.9039	1.8069
مساحة كلية (م ²)	1.174	1.174	2.4676*
الارتفاع (سم)	199	199	199
العرض (سم)	59	59	124**

*المساحة الكلية بما فيها الوصلة بين الجزأين (JIS B 2301) ، **الجزأين مثبتين على إطار واحد من الألمنيوم (ISO 4019). تم التصميم الهندسي والتصنيع للاقط (المركب) من قبل الباحث وتمت الاختبارات في شروط الحالة المستقرة في مركز الاختبارات والأبحاث الصناعية بدمشق. صنّع وفقا للمواد المتوفرة في السوق المحلية.

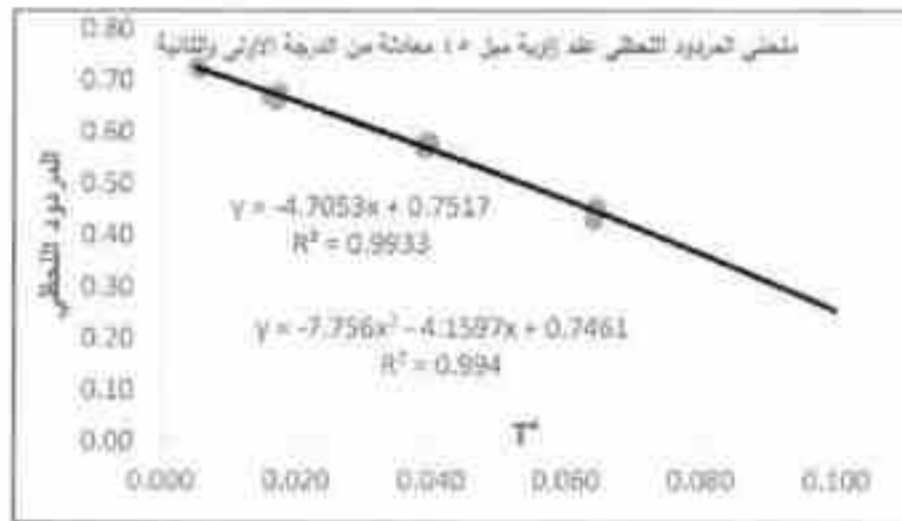
ثالثا: الاختبارات: أجريت على اللاقط (المركب) الاختبارات الميكانيكية وفق متطلبات المتانة والوثوقية والأمان بنجاح [18]. كما أختبر الأداء الحراري للجزء المسطح والجزء الالبيبي المكونان للاقط (المركب) بشكل منفصل عند الشروط المناخية لمدينة دمشق في الحالة المستقرة حسب [16]، [14] ثم وصل الجزأين لتكوين اللاقط (المركب) وأختبر بنفس دارة الاختبار في الحالة المستقرة [16]، [19]. حسب الشكل (5) .



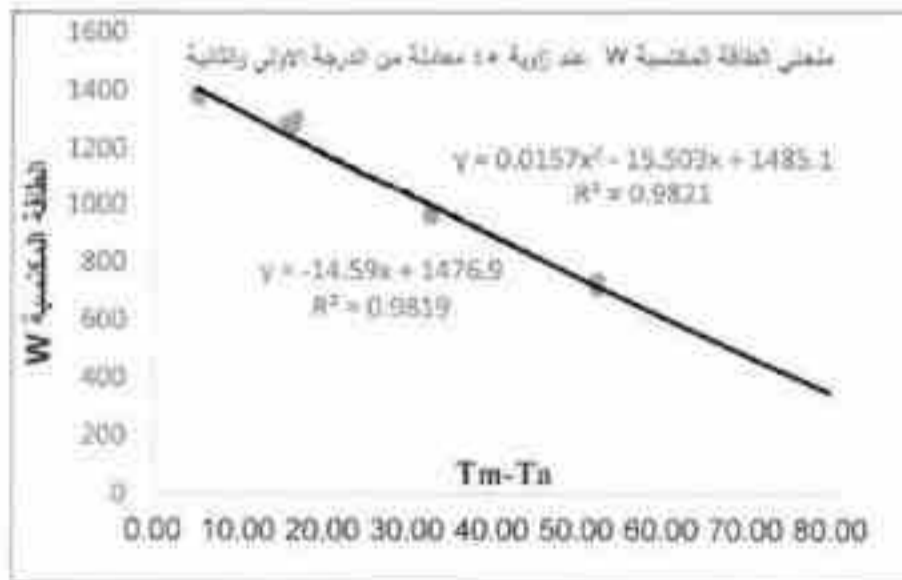
الشكل (5) اللاقط (المركب) على منصة الاختبار

نتائج الاختبارات: لوحظ أن السلوك الحراري للاقط (المركب) يشابه السلوك الحراري لأي لاقط آخر من حيث قيم الثوابت (η_0 و β_1 و β_2). وتأثرها بالمساحة المرجعية وزاوية الميل عن الأفق وشدة الإشعاع الشمسي الواردة عليه. وتناقص المردود بزيادة قيمة درجة الحرارة المختزلة كما في الشكل (6) وتناقص الطاقة المكتسبة مع زيادة فرق درجات

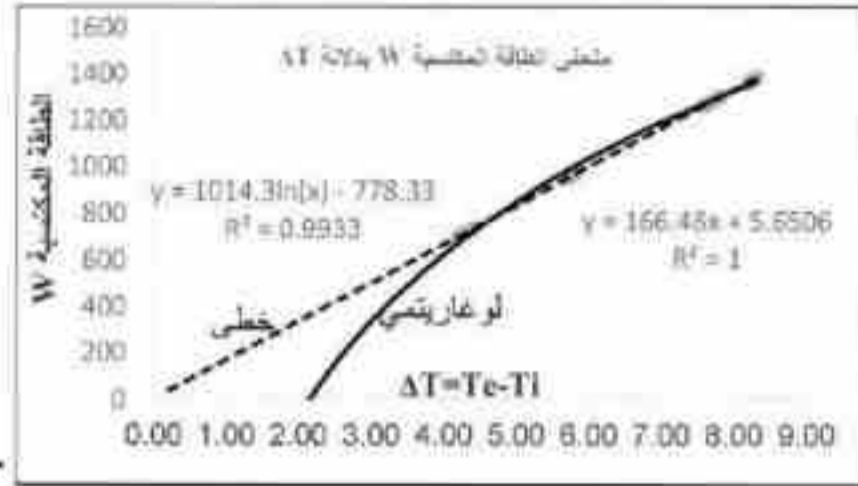
الحرارة ($T_m - T_a$) كما في الشكل (7) وتزايدها مع فرق درجات الحرارة بين مدخل ومخرج اللاقط (ΔT) كما في الشكل (8). تم التوصل الى ان الشكل العام لمنحنيات الأداء الحراري للاقط (المركب) تشابه الشكل العام لمنحنيات اللاقط المسطح والانبوبي. موضح في الشكل (9) منحنيات المردود اللحظي للواقط الثلاثة بدلالة درجة الحرارة المختزلة (T^*). يلاحظ عند نقطة تلاقي منحنى الانبوبي مع المسطح عند ($T^* = 0.035$) تكون قيمة المردود لكل منهما ($\eta = 0.52$) أما (المركب) فيكون مردوده عند نفس النقطة ($\eta = 0.61$) أي بزيادة مقدارها 17% (للمركب) في هذه النقطة.



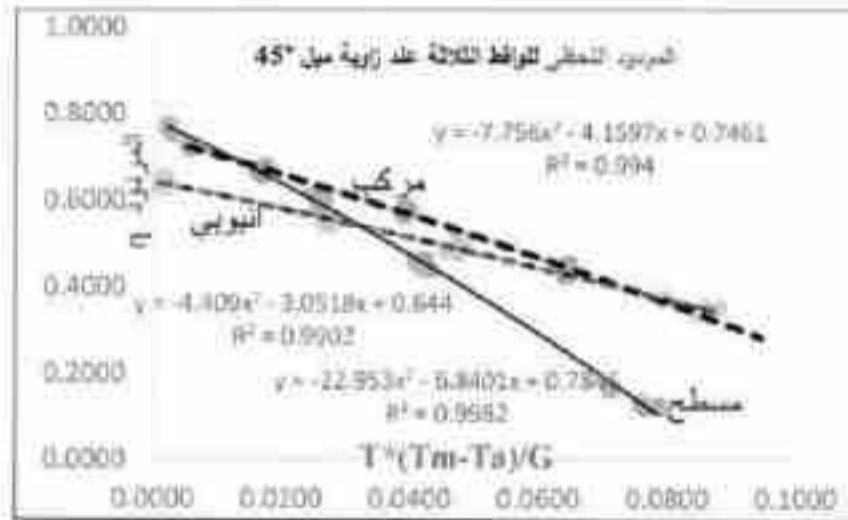
الشكل (6) منحنى المردود اللحظي للاقط (مركب) عند زاوية ميل 45°



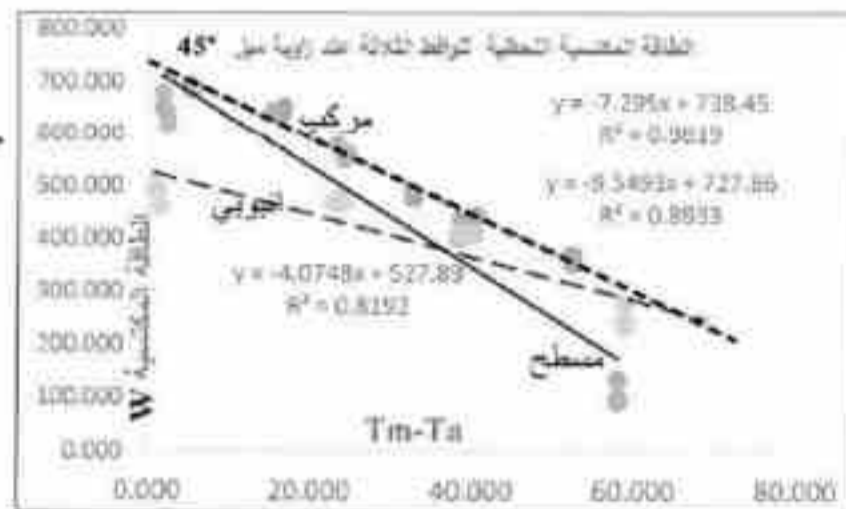
الشكل (7) منحنى الطاقة المكتسبة بدلالة لاقط ($T_m - T_a$) (مركب)



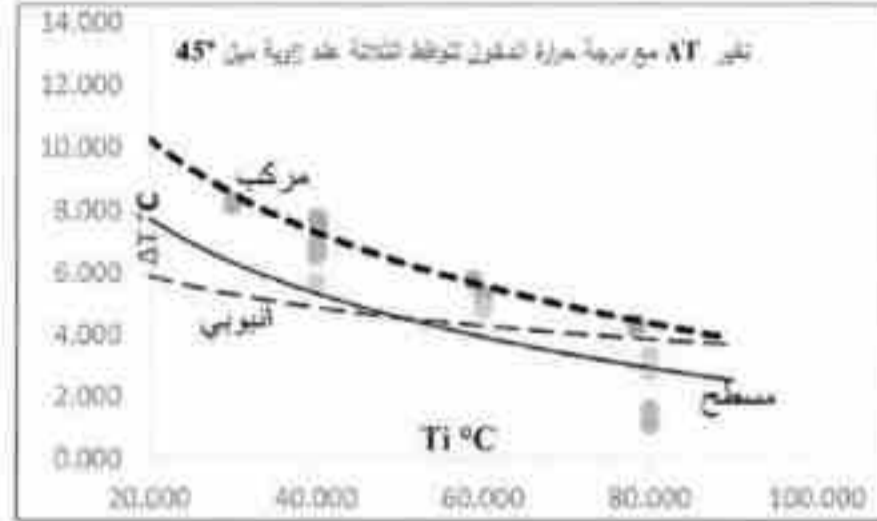
الشكل (8) منحنى الطاقة المكتسبة بدلالة (ΔT) لاقط (مركب)



الشكل (9) منحنى المردود المحظي للواقط الثلاثة



الشكل (10) منحنى الطاقة المكتسبة للواقط الثلاثة

الشكل (11) منحنى تغير ΔT مع تغير درجة حرارة الدخول T_i للواقط الثلاثة

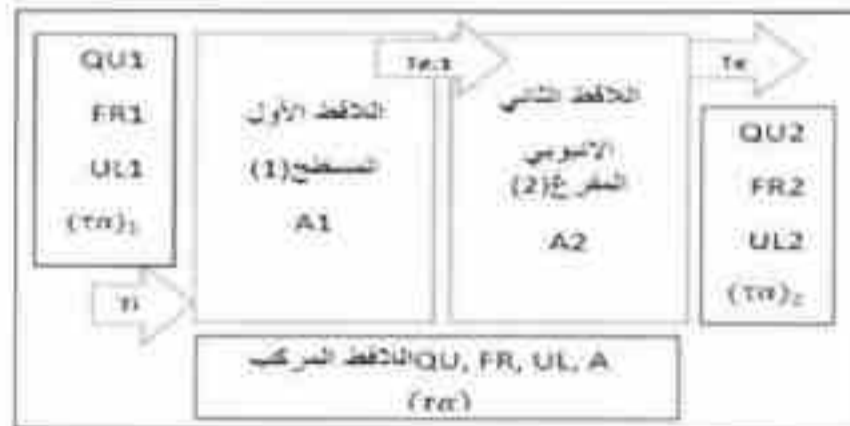
يوضح الشكل (10) مقارنة لمنحنيات الطاقة المكتسبة للواقط الثلاثة بدلالة فرق درجات الحرارة $(T_m - T_a)$. يلاحظ عند نقطة تلاقي منحنى الأليافي مع المسطح عند $(T_m - T_a)$ تكون قيمة الطاقة المكتسب لكل منهما (380W) أما (المركب) فتكون قيمة الطاقة المكتسبة عند نفس النقطة (470W) أي بزيادة مقدارها 23% (للمركب) في هذه النقطة. ويوضح الشكل (11) منحنيات تغير (ΔT) بدلالة تغير درجة حرارة الدخول T_i للواقط الثلاثة (منحنيات لوغاريتمية). يلاحظ عند نقطة تلاقي منحنى الأليافي مع المسطح عند $(T_i = 50^\circ\text{C})$ تكون قيمة (ΔT) لكل منهما (5.3°C) أما (المركب) فتكون قيمة (ΔT) عند نفس النقطة (6.2°C) أي بزيادة مقدارها 17% (للمركب) في هذه النقطة، [19].

الجدول (2) الثوابت الحرارية للاقط المركب

الثوابت الحرارية		جزء مسطح	جزء أليافي	لاقط مركب
معادلة خطية	η_0	0.8047	0.6484	0.7517
	a_1	8.6763	3.4392	4.7053
معادلة من الدرجة الثانية	η_0	0.7846	0.644	0.7461
	a_1	6.841	3.0518	4.1597
	a_2	0.02295	0.004409	0.007756

رابعاً: استنتاج النموذج الرياضي للاقط (المركب):

1-تمهيد: اللاقط (المركب) مؤلف من لاقطين متصلين على التسلسل مختلفين في التصميم لهما نفس المساحة ونفس معدل التدفق ودرجة حرارة مخرج الأول تكون درجة حرارة مدخل الثاني. بالاعتماد على طريقة الصندوق الأسود لاستنتاج النموذج الرياضي حسب الشكل (12). بين Duffie & Beckman 1980 [9] طريقة نمذجة مؤشرات الأداء الحراري تمثل هذا اللاقط لاستنتاج النموذج الرياضي كما يلي: إذا كان اللاقطين الموصولين على التسلسل متشابهين في التصميم ولهما نفس قيم الثوابت الحرارية $UL, F', FR, (\tau\alpha)_e$ فلا يوجد اختلاف ملموس في الأداء الحراري لهما. أما بوجود فرق بين قيم هذه الثوابت الحرارية أي أن تصميم اللواقط مختلف (وهذه الحالة التي نناقشها في اللاقط المركب). فإن الأداء الحراري للاقط الجديد (المركب) المؤلف من اللاقطين المختلفين بالتصميم الموصولين على التسلسل لن يكون نفسه لكلا اللاقطين بشكل فرادي، وخصوصاً أن درجة حرارة الماء الداخلة إلى اللاقط الثاني ستكون مرتفعة بعد خروجها من اللاقط الأول T_{e1} . العامل المهم هو ثابت التخفيض k المعادلة (17)، ولتحديده يجب معرفة الثوابت الحرارية للواقط الموصولة بمعرفة التدفق المار بها.



الشكل (12) مخطط رمزي للاقط (المركب) لاستنتاج النموذج الرياضي حسب [9]

2-الثوابت الحرارية: بما أن الاختبارات تمت وفق طريقة [16] فإن الثوابت الحرارية الناتجة هي: المردود البصري η_0 و معامل ضياع الحرارة الصفري a_1 ومعامل ضياع الحرارة كتابع لدرجة الحرارة a_2 . يبين الجدول (2) قيم هذه الثوابت لمساحة الفتحة

وزاوية ميل 45° [19]. اقترح [9] استخدام المعادلات من (13 إلى 19) لمعرفة النموذج الرياضي للاقط الجديد الموصول على التسلسل بين لاقطين مختلفين في التصميم وهذه المعادلات مكتوبة حسب طريقة [15]. باستخدام الثوابت $F_R, U_L, F_R(\tau\alpha)$. وبما أنه تمت الاختبارات واستنتاج الثوابت الحرارية حسب [16]. كان لابد من التحويل بين الثوابت لكلا الطريقتين. تم في [20] اقتراح معاملات لتحويل نتائج الاختبارات ما بين طريقة [15] و [16] بالمعادلات (20, 21, 22). وباعتبار أن مساحة الفتحة المرجعية متساوية للاقط المسطح والانبوبي 1 م^2 . ومساحة الفتحة للاقط (المركب) هي مجموعها 2 م^2 والتدفق المار عبر اللاقط أثناء الاختبار ثابت (0.02 كغ/ثانية م^2) ومتوسط السعة الحرارية للماء داخل اللاقط (4180 جول/كغ. كالفن). نجد معادلات النموذج الرياضي

1- حسب [9], [15]: معادلة المردود اللحظي بدلالة الفرق بين درجة حرارة السطح الماص T_p ودرجة حرارة الجو المحيط T_a :

$$\eta_{(p,a)} = \left((\tau\alpha)_e - UL \cdot \frac{T_p - T_a}{G} \right) \quad (1)$$

وتكتب بدلالة الفرق بين وسطي درجة حرارة الماء في اللاقط T_f ودرجة حرارة الجو المحيط T_a ، حيث تم ادخال عامل كفاءة اللاقط F' :

$$\eta_{(f,a)} = F' \left((\tau\alpha)_e - UL \cdot \frac{T_f - T_a}{G} \right) \quad (2)$$

وتكتب بدلالة الفرق بين درجة حرارة الماء الداخل الى اللاقط T_i ودرجة حرارة الجو المحيط T_a ، حيث تم ادخال عامل إزاحة الحرارة من اللاقط FR :

$$\eta_{(i,a)} = FR \left((\tau\alpha)_e - UL \cdot \frac{T_i - T_a}{G} \right) \quad (3)$$

وتكتب بدلالة الفرق بين وسطي درجة حرارة الماء في اللاقط T_f ودرجة حرارة مدخل اللاقط T_i ، حيث تم ادخال عامل تكفق اللاقط F^* :

$$\eta_{(f,i)} = F^* \left((\tau\alpha)_e - UL \cdot \frac{T_f - T_i}{G} \right) \quad (4)$$

2- حسب [16]: معادلة المردود اللحظي بدلالة الفرق بين وسطي درجة حرارة الماء في اللاقط $T_f = T_m$ ودرجة حرارة الجو المحيط:

$$\eta = \eta_0 - a_1 T_m^* - a_2 G (T_m^*)^2 \quad (5)$$

وكمية الطاقة الفعلية المفيدة المستخرجة من اللاقط تحسب بالمعادلة:

$$Q_U = m' \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (6)$$

$$Q_U = A \cdot G \cdot \eta \quad (7)$$

ومردود اللاقط يحسب بدلالة المعادلات (6) و (7) كما يلي:

$$\eta = \frac{m' \cdot C_p \cdot \Delta T}{A \cdot G} \quad (8)$$

وسطي درجة الحرارة للماء داخل اللاقط تحسب بالمعادلة:

$$t_m = t_m + \frac{\Delta T}{2} \quad (9)$$

ودرجة الحرارة المختزلة تُحسب بالمعادلة:

$$T_m^* = \frac{t_m - t_a}{G} \quad (10)$$

وبالتالي يمكن كتابة المعادلة (5) على الشكل التالي:

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{t_m - t_a}{G} - a_2 G \left(\frac{t_m - t_a}{G} \right)^2 \quad (11)$$

وتكتب استطاعة خرج اللاقط بالتعويض في المعادلات (6) و (7) و (11) :

$$Q_U = A \cdot G \left[\eta_0 - a_1 \frac{(t_m - t_a)}{G} - a_2 \frac{(t_m - t_a)^2}{G} \right] \quad (12)$$

3- معادلات النموذج الرياضي حسب [9] مكتوبة بطريقة [15]:

$$Q_{U,1} + Q_{U,2} = A_1 F_{R1} [(\tau\alpha)_1 G - U_{L1} (T_l - T_a)] + A_2 F_{R2} [(\tau\alpha)_2 G - U_{L2} (T_{e,1} - T_a)] \quad (13)$$

$$T_{e,1} = T_l + \frac{Q_{U,1}}{m' C_p} \quad (14)$$

$$Q_{U,1+2} = [A_1 F_{R1} (\tau\alpha)_1 (1 - K) + A_2 F_{R2} (\tau\alpha)_2] G - [A_1 F_{R1} U_{L1} (1 - K) + A_2 F_{R2} U_{L2}] (T_i - T_a) \quad (15)$$

$$A = A_1 + A_2 \quad (16)$$

$$K = \frac{A_2 F_{R2} U_{L2}}{m' C_p} \quad (17)$$

$$F_R(\tau\alpha) = \frac{A_1 F_{R1} (\tau\alpha)_1 (1 - K) + A_2 F_{R2} (\tau\alpha)_2}{A} \quad (18)$$

$$F_R U_L = \frac{A_1 F_{R1} U_{L1} (1 - K) + A_2 F_{R2} U_{L2}}{A} \quad (19)$$

4- معادلات التحويل حسب [20] ما بين [15] و [16]:

$$\eta_{(T_m - T_a)} = \eta_{(T_m - T_a)} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + \frac{U_{(T_m - T_a)}}{2}} \right) \quad (20)$$

$$U_{(T_m - T_a)} = U_{(T_m - T_a)} \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon + \frac{U_{(T_m - T_a)}}{2}} \right) \quad (21)$$

$$\varepsilon = \frac{m' \cdot C_p}{A} = \frac{0.04 \cdot 4180}{2} = 83.6 \quad (22)$$

بإجراء التحويل بين قيم الثوابت الحرارية للواقف مأخوذة من المعادلة الخطية من الجدول (2) ما بين [15] و [16] نجد:

مسطح		انبوبي		مركب	
η_{01}	0.8047	η_{02}	0.6484	η_{01}	0.7517
$\Rightarrow F_{R1} (\tau\alpha)_1$	0.765	$\Rightarrow F_{R2} (\tau\alpha)_2$	0.6353	$\Rightarrow F_R (\tau\alpha)_{expe}$	0.7311
a_{11}	8.6763	a_{12}	3.4392	a_i	4.7053
$\Rightarrow F_{R1} U_{L1}$	8.2488	$\Rightarrow F_{R2} U_{L2}$	3.3691	$\Rightarrow F_R U_L_{expe}$	4.565

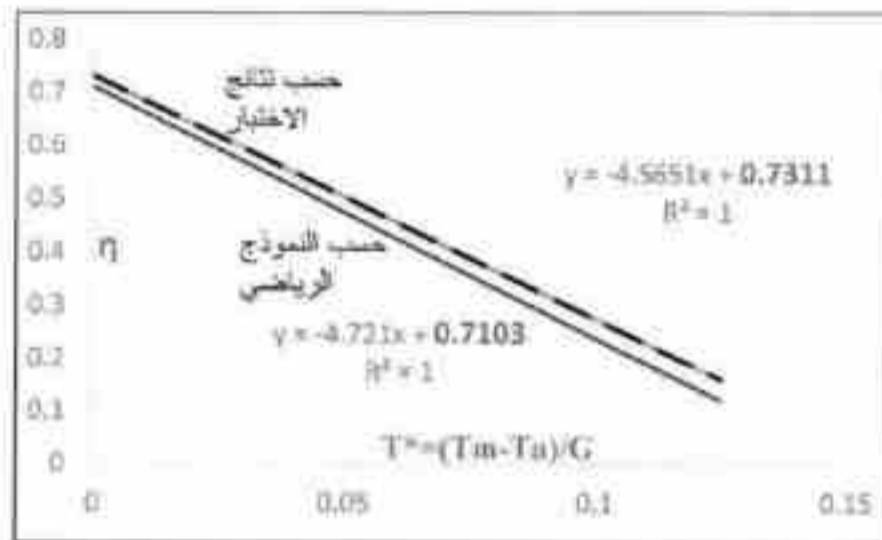
تم التأكد من صلاحية معادلات التحويل (20)، (21)، (22) وذلك بإعادة رسم منحنى المرود للواقف الثلاثة المبينة بالشكل (9) المرسوم بدلالة $T^* = \frac{T_m - T_a}{G}$ وفق

طريقة [16] ورسمه بالشكل (14) بدلالة $T^* = \frac{t_1 - t_2}{G}$ وفق طريقة [15]. بتطبيق

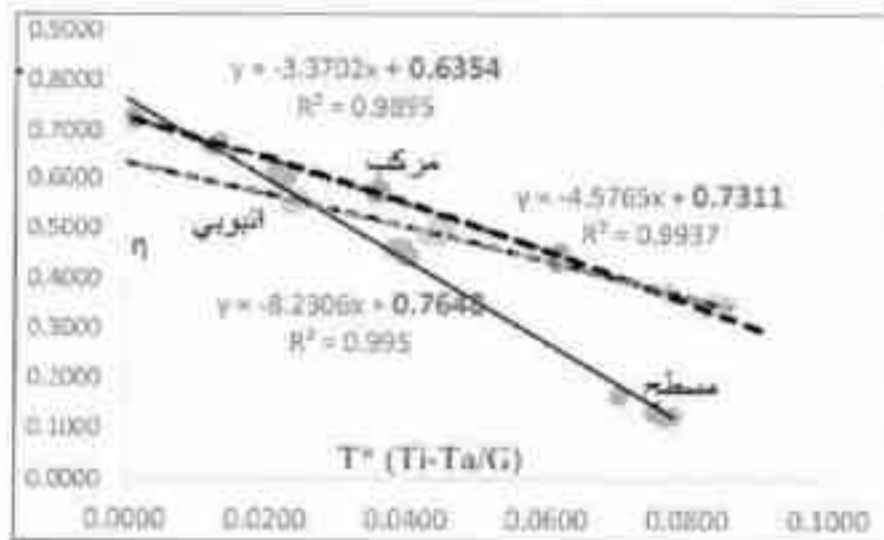
المعادلات (17)، (18)، (19) نجد قيم الثوابت الحرارية حسب [9]:

$F_R(\tau\alpha)$ modeling	0.71027	$F_R(\tau\alpha)$ expe	0.7311
$F_R U_L$ modeling	4.72105	$F_R U_L$ expe	4.565

5- النتيجة: للاقط (المركب) نسبة الفرق بين قيمة $F_R(\tau\alpha)$ expe وقيمة $F_R(\tau\alpha)$ model تساوي 2.8%. ونسبة الفرق بين قيمة $F_R U_L$ expe وقيمة $F_R U_L$ model تساوي 3.4%. ويظهر ذلك في الشكل (13).

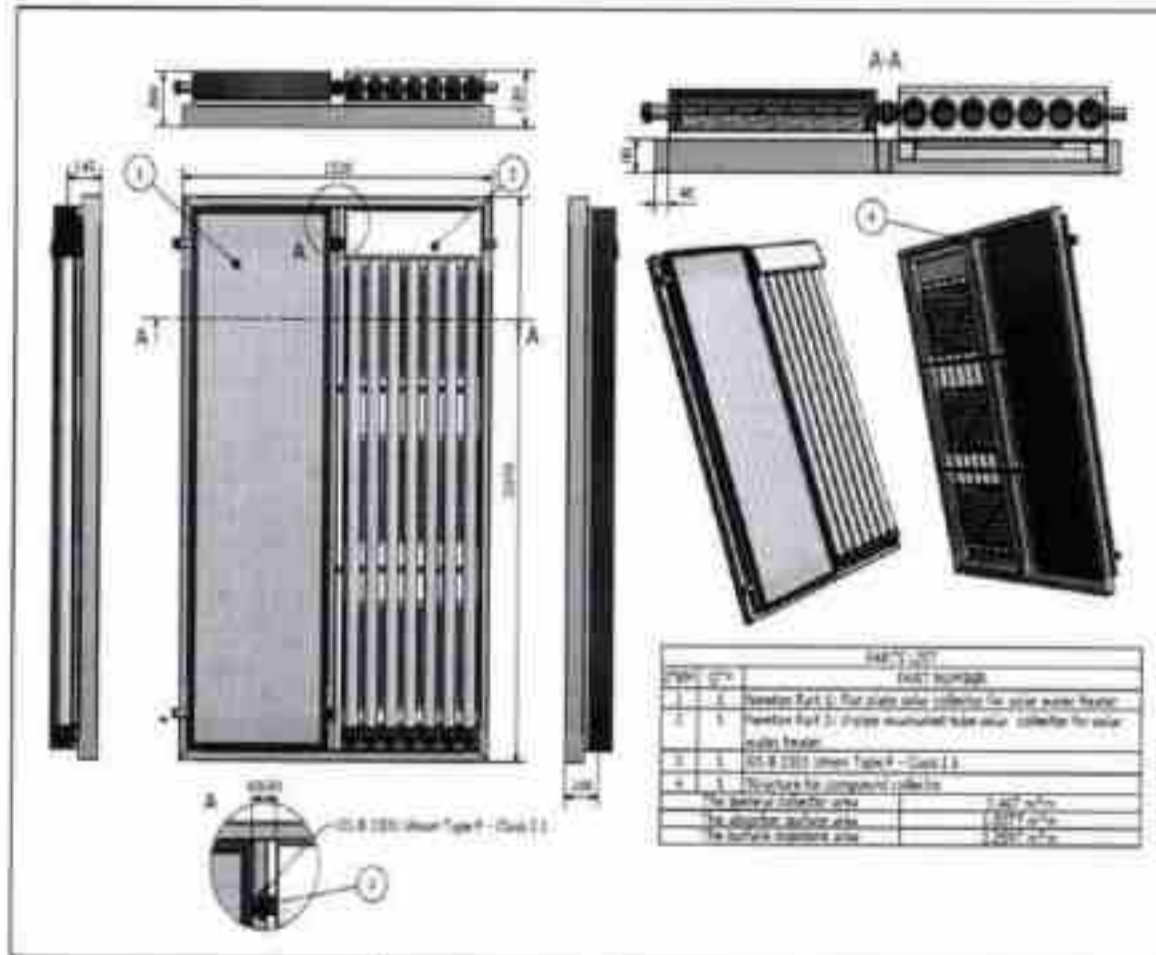


الشكل (13) منحنى المردود مقارنة بين نتائج الاختبار والنموذج الرياضي

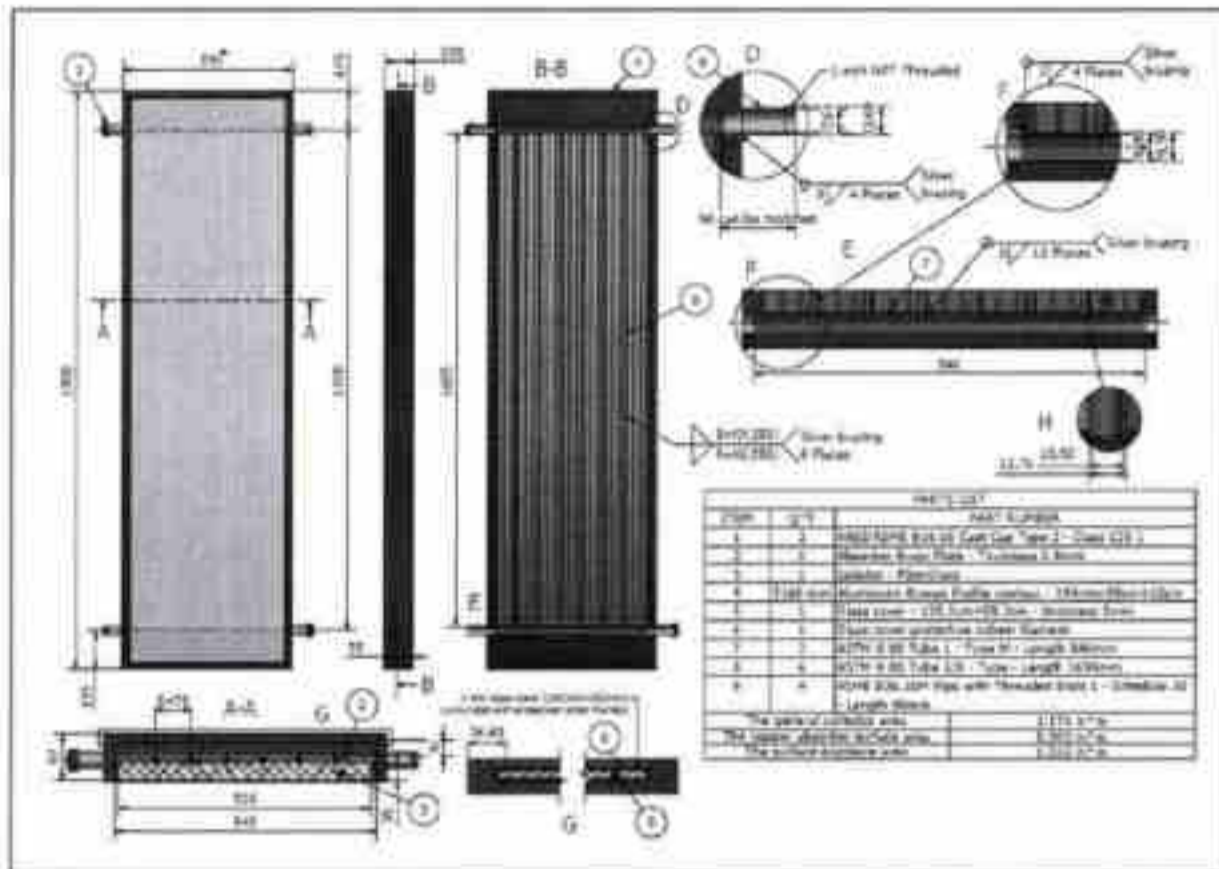


الشكل (14) منحنى المردود اللحظي لنقاط الثلاثة بدلالة $(T_i - T_a)/G$

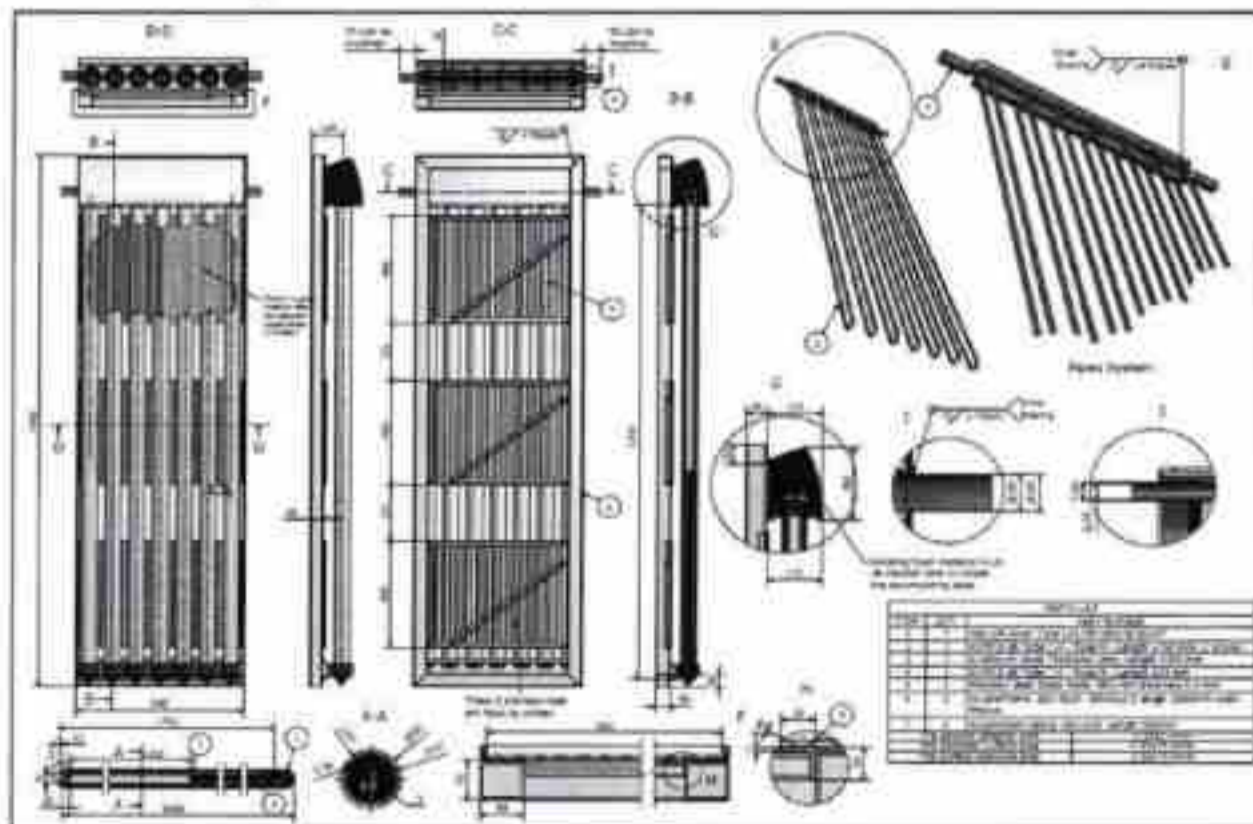
خامسا: النتائج: للاقط (المركب) أداء حراري أعلى من اللاقطين المكونين له حيث استفاد من المميزات الحرارية لكل منهما في نفس الشروط المناخية وتداخل هذه المميزات في شروط التشغيل المختلفة. أظهر كل لاقط لوحده تميزاً عن الآخر عند بعض الشروط المناخية وشروط تشغيل واللاقط (المركب) يجمع بين هذه المميزات [19]. يتمتع اللاقط الانبوي المفرغ بقيمة منخفضة لثابت التخفيض k بسبب فقدته الحرارية الأقل $F_{R2} U_{L2}$ بالرغم من استقباله ماء بدرجات حرارة عالية قادمة من اللاقط المسطح وهذه الميزة التي تتعلق بتصميم اللاقط الانبوي المفرغ [12]. هي التي تحسن الأداء الحراري للاقط (المركب). النموذج الرياضي المستنتج للاقط (المركب) أظهر تقارباً مع نتائج الاختبارات في الحالة المستقرة والفروقات البسيطة قد تعود لحالات عدم دقة القياس. اللاقط (المركب) يؤدي الى تحسن الأداء الحراري دون زيادة الكلفة ويمكن أن يساهم بالاعتماد على الصناعة المحلية للمساهمة بانتشار سخانات الشمسية.



الشكل (15) التصميم الهندسي للاقط المركب



الشكل (16) التصميم الهندسي للائط المسطح



الشكل (17) التصميم الهندسي للائط الانبوي المفرغ

الرموز والواحدات

الرمز	الشرح	الوحدات
a_1	معامل ضياع الحرارة الصفري عند $0=(T_m-T_0)$	$W/m^2.K$
a_{11}	للاقط المسطح	$W/m^2.K$
a_{12}	للاقط الانبوبي	$W/m^2.K$
a_2	معامل ضياع الحرارة كتابع لدرجة الحرارة	$W/m^2.K^2$
a_{21}	للاقط المسطح	$W/m^2.K^2$
a_{22}	للاقط الانبوبي	$W/m^2.K^2$
A	المساحة المرجعية المعتمدة بالاختيار	m^2
A_1	للاقط المسطح	m^2
A_2	للاقط الانبوبي	m^2
G	شدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد	W/m^2
m'	معدل التدفق الكلي للماء في اللاقط	kg/s
Q_U	الاستطاعة المفيدة المستخلصة من اللاقط	W
Q_{U1}	للاقط المسطح	W
Q_{U2}	للاقط الانبوبي	W
t_a	درجة حرارة الهواء المحيط	$^{\circ}C$
T_p	درجة حرارة السطح الماص	$^{\circ}C$
t_c	درجة حرارة (مخرج اللاقط)	$^{\circ}C$
T_{e1}	درجة حرارة مخرج اللاقط المسطح و مدخل اللاقط الانبوبي	$^{\circ}C$
$(T_i)t_{in}$	درجة حرارة (مدخل اللاقط)	$^{\circ}C$
$(T_f)t_m$	متوسط درجة حرارة الماء في اللاقط	$^{\circ}C$

$m^2.K/w$	درجة الحرارة المختزلة = $(t_m - t_0)/G$	T_m^*
$J/kg.K$	متوسط السعة الحرارية للماء المار باللاقط	C_p
K	فرق درجات حرارة الماء بين مدخل و مخرج اللاقط $t_0 - t_m$	ΔT
	عامل كفاءة اللاقط ويساوي كمية الطاقة المسحوبة من اللاقط بواسطة الماء / كمية الطاقة الممكن سحبها فيما لو كانت درجة حرارة السطح العاص تساوي وسطي درجة حرارة الماء داخل اللاقط	F'
	عامل إزاحة الحرارة من اللاقط ويساوي كمية الطاقة المسحوبة من اللاقط بواسطة الماء / كمية الطاقة الممكن سحبها فيما لو كانت درجة حرارة السطح العاص تساوي درجة حرارة دخول الماء الى اللاقط	FR
	لاقط المسطح F_{R2} للاقط الانبوبي	F_{R1}
	عامل تدفق اللاقط ويساوي كمية الطاقة المسحوبة من اللاقط بواسطة الماء / كمية الطاقة الممكن سحبها فيما لو كانت وسطي درجة حرارة الماء داخل اللاقط تساوي درجة حرارة دخول الماء الى اللاقط	F^*
	حاصل الجداء الفعال للنفاذية بالامتصاصية	$(\tau\alpha)_e$
	لاقط المسطح $(\tau\alpha)_2$ للاقط الانبوبي	$(\tau\alpha)_1$
$W/m^2.K$	معامل ضياع الحرارة الكلي للاقط بالحمل والاشعاع والتوصيل	UL
$W/m^2.K$	لاقط المسطح U_{L2} للاقط الانبوبي	U_{L1}
$W/m^2.K$	كتابع للفرق بين درجة حرارة المدخل والجو المحيط	$U(\tau_m - \tau_a)$
	ثابت تخفيض يتعلق بمواصفات اللاقط الثاني	k
$W/m^2.K$	معدل السعة الحرارية لوأحدة المساحة	ε
	مردود اللاقط هو نسبة الطاقة المنقولة بواسطة الماء خلال فترة زمنية محددة إلى ناتج جداء مساحة اللاقط بشدة الإشعاع الشمسي الساقط في سنوي ميلان اللاقط في حالة الاستقرار	η
	المردود البصري للاقط هو مردود اللاقط عندما تكون وسطي درجة حرارة العانع أو درجة الحرارة عند الدخول تساوي درجة حرارة الهواء المحيط	η_0
	مردود اللاقط كتابع للفرق بين درجة حرارة المدخل والجو المحيط	$\eta(\tau_m - \tau_a)$

References

المراجع

- [1]- SOTERIS, A. Kalogiroum., 2004- **Solar thermal collectors and applications.** *Progress in Energy and Combustion Science*, (30) 231–295.
- [2]-HERALD, D. *et al.*, 2005- **New Generation of Solar Thermal Systems–EU Project, (estec 2005).** *Freiburg.*
- [3]- MIRCEA, B. *et al.*, 2012 -**Performance of solar collector under low temperature conditions Measurements and simulations results.** *HEIG-VD, LESBAT, Switzerland.*
- [4]- NIRMAL, G. *et al.*, 2013- **Analysis of Parameters of Locally Manufactured Flat Tube Solar Water Heater to Increase the Efficiency.** *Rentech Symposium Compendium*, (3), September 2013.
- [5]- ROSLI, M. *et al.*, 2014- **Parametric Analysis on Heat Removal Factor for a Flat Plate Solar Collector of Serpentine Tube.** *World Applied Sciences Journal*, 29 (2): 184-187.
- [6]-MUNISH, K., 2014- **Latest Evolutions in Flat Plate Solar Collectors Technology.** *International Journal of Mechanical Engineering*, (1), Issue 1.
- [7]- PIKE, C. *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 KatherineHarper Hall Boone, NC 28608.*
- [8]- ADSTEN, M., 2002- **Solar Thermal Collectors at High Latitudes.** *Acta University Upsallensis.*
- [9]- DUFFIE, J. &BECKMAN,W.,1980- **Solar engineering of thermal processes.**2nd edition, *John Wiley &Sonce, INC.*
- [10]- ABDALLA, F. K., 2005-**Modeling and Assessment of an Experimental Combined Evacuated-Tubes-Direct-Flat-Plate Solar Heater.** *Advanced Energy Centre, Bryndwr, Christchurch, New Zealand.*
- [11]- Wang, Z., *et al.*, 2015- **Solar water heating: From theory, application, marketing and research.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41 (2015) 68–84 .

[12]- ZMBOLIN,E., *et al.*,2010- **Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions**, *Solar Energy*, (84) ,1382–1396.

[13]- IS/ISO 9488., 1999- **solar energy–vocabulary**, *bureau of Indian standard*, April 2010. SASMO Organization, Damascus, NO: 3381-2008.

[14]-JOUHARI, S., *et al.*,2014- **Thermal performance test of two types of solar collectors and compare them under climatic conditions of the city of Damascus**. *Damascus University, Journal for engineering science*, paper approved for publishing (1574), 14-9-2014.

[15]- ASHRAE Standard 93-1986., **solar collectors, Method of testing to determine the thermal performance of solar collector**.

[16]- EN12975-2-2006., **thermal solar systems and components, solar collector part 2: test methods**. SASMO Organization, Damascus, NO: 3432-2-2009.

[17]- GB/T 17049-2005., **Chinese standard for technical specifications, testing methods and testing rules, for all-glass evacuated solar collector tubes**.

[18]-EN12975-1- 2006., **thermal solar systems and components, solar collector part1: general requirements**. SASMO Organization: Damascus, NO: 3432-1-2009.

[19]- JOUHARI, S., *et al.*, 2014- **Thermal performance evaluation of (compound) solar collector for solar water heating under climate condition of Damascus**. *Damascus University, Journal for engineering science*. Paper approved for publishing (1632), 21-9-2014

[20]- ISO TC 180/SC N 165.,2010- **Solar energy- Test method for solar collectors Part 1: Thermal performance of glazed liquid heating collectors including pressure drop**. *ISO/WD 9806-1*, WWW.standardsproposals.bsigroup.com/Home/getPDF/718.

Design, manufacture and derive mathematical model of (Compound) solar collector for solar water heating

Eng. M. Sadek Jouhari¹, Dr. Sinjar Touhmeh², Dr. Nadeem Moukhayber³

¹ Ph.D. student- ² Professor in the Department of mechanics at the Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.

³ Researcher at the National Energy Research Centre Damascus.

Abstract

Solar collectors used to heat water for domestic and industrial applications to temperatures up to 100 ° C classified under two main types: flat plat and evacuated tube collectors. Thermal performance test results showed that each type has different thermal features from the other. The comparison result showed that it could take advantage of the different thermal characteristics of the two types when work together in the same climatic conditions and the overlap of these thermal features at their work in the different operation conditions in the (compound) solar collector. The (compound) solar collector used for solar water heating, consisting of part of flat plate collector and part of evacuated tube collector (with equal reference areas), connected with each other to work as one (compound) solar collector. Water enters the first flat part and then to the tubular part and finally to the tank or end-use.

In this paper: design, manufacture and study of (compound) solar collector and derive a mathematical model.

Mechanical tests carried out successfully in accordance with the requirements of durability, reliability, and safety. Thermal performance tests carried in steady state in the climatic conditions of the city of Damascus, and derived the thermal constant for. Results showed improvement of thermal performance for (compound) collector compared with the two type's components it. Comparison between the values of the experimental thermal constant and values derived according to the mathematical model showed a good agreement. Where values of the optical efficiency different up to 2.8% and the values of the zero thermal loss coefficient different up to 3.4%.

Key words: compound solar collector, evacuated tube collector, flat plate collector, mathematical model.