

## تصميم واستنتاج النموذج الرياضي للاقط شمسي (مركب)

## الملخص

في تطبيقات الطاقة الشمسية التي لا تتجاوز فيها درجة حرارة السائل العامل داخل الاقط [120°C] تستخدم عادة نظم شمسية ذات لواقط مباشرة لا تحتاج الى تركيز الاشعة الشمسية حيث تلتقط الطاقة المحمولة مع الاتساع الشمسي من السطح الذي تسقط عليه مباشرة، واهم أنواعها اللواقط المسطحة والانبوية المفرغة. ولهذه اللواقط مستويات مختلفة من الأداء الحراري الذي يتعلق ببنيتهما من حيث الابعاد والعناصر والمواد المستخدمة ويتعلق بالإشعاع الشمسي المتاح والمعطيات المناخية للمنطقة المعنية وكذلك بطريقة وكفاءة استثمارها. ان رفع كفاءة الأداء للواقط الشمسية لايزال محط اهتمام الكثير من الباحثين وخاصة ما يتعلق منها باللواقط المفرغة والعزل الشفاف ورفع مستوى امتصاص الاشعة وخفض انعكاسها او انبعائها من السطوح الماصة. تم في هذا البحث تصميم واستنتاج النموذج الرياضي للاقط شمسي (مركب). ليساهم في الجهود المبذولة لرفع كفاءة واقتصادية النقاط الاشعة الشمسية وتحويلها الى طاقة حرارية من خلال الاستفادة من مميزات الأداء الحراري للواقط شمسية مختلفة في الاقط المركب عن طريق تطوير ربط تسلسلي للاقطين أحدهما مسطح يليه انبوي مفرغ حيث يبدأ عمل الثاني عند نقطة تقاطع خطوط المردود للاقطين ليستمر الاقط المركب بالعمل عند المردود الأعلى وصولاً الى كفاءة حرارية أعلى. يتضمن البحث في جانبه العملي وضع تصميم وتصنيع اللاقطين وطريقة ربطهما وصولاً الى تصميم وتصنيع الاقط المركب واستنتاج النموذج الرياضي له ومقارنته مع نتائج الاختبار واستخلاص النتائج.

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

## مقدمة:

تهدف الأبحاث المتعلقة باللواقط الشمسية لزيادة الطاقة التي يمكن استغلالها من الإشعاع الشمسي وتحويلها إلى طاقة حرارية مفيدة بأفضل أداء وأعلى مردود ممكن [1]. أجريت العديد من الأبحاث لتطوير تصاميم وتراكيب للواقط الشمسية لتحسين مواصفاتها واستنباط أنواع جديدة وهجينة وأخذت الأبحاث ثلاثة محاور رئيسية [1,2,3,4,5,6]. حيث يتناول المحور الأول تطوير بنية اللاقط من حيث الأبعاد والعناصر والمواد المستخدمة وتنوع الوسيط العامل وتطوير أنواع جديدة هجينة تستخدم لتطبيقات مختلفة [7]. ويتناول المحور الثاني دراسة مميزات الإشعاع الشمسي وكفاءة التقاطه والتوجيه المناسب وزوايا الميل وزوايا الورد وملاحقة الشمس [8]. ويتناول المحور الثالث الموائمة بين الالتقاط والاستثمار الأمثل للطاقة الناتجة من الإشعاع الشمسي وتخزينها وتطوير أساليب التشغيل والعزل والتحكم بمعدل التدفق ودرجات الحرارة العاملة [2]. ثم تصميم وتصنيع لاقطين مسطح وانبوبي مفرغ يتمتعان بنفس المساحات المرجعية حيث أظهرت نتائج اختبار الأداء الحراري التي تمت بدمشق عليهما تحت نفس الشروط المناخية ونفس شروط التشغيل [14] 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 (المركب) الذي يتألف من اللاقط المسطح واللاقظ الانبوبي المفرغ تم وصلهما على التسلسل ليعملان كلاقظ شمسي واحد بحيث تدخل المياه أولاً اللاقط المسطح ومنه إلى اللاقط الانبوبي المفرغ ومنه إلى الخزان أو الاستخدام النهائي. ثم أجريت على اللاقط (المركب) الاختبارات الميكانيكية وفق متطلبات المتانة والوثوقية والأمان بنجاح، واختبارات الأداء الحراري في الحالة المستقرة عند الشروط المناخية لمدينة دمشق [19] واستنتجت الثوابت الحرارية له. أظهرت النتائج تحسن مؤشرات الأداء الحراري للاقط (المركب) مقارنة مع النوعين المكونين له، وأظهرت المقارنة بين قيم الثوابت الحرارية التجريبية للاقط (المركب) وقيمها في النموذج الرياضي المقترح تطابقاً جيداً.

### أولاً: دراسة مرجعية:

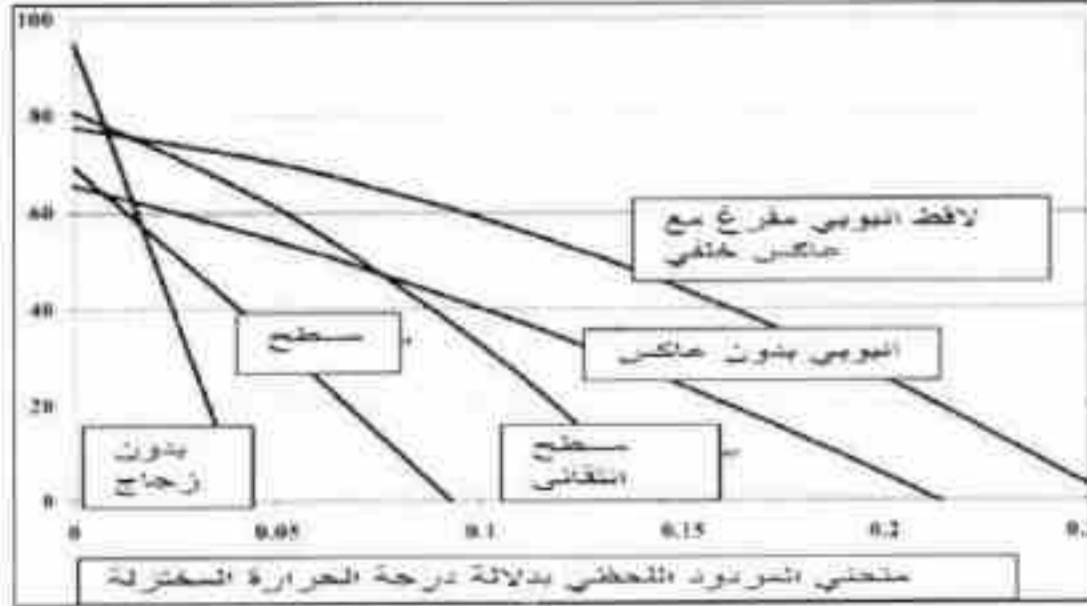
عُرف اللاقط المسطح منذ بدايات القرن العشرين، قام Hottel & Willier بتطويره ونمذجته رياضياً في الخمسينيات من القرن العشرين ثم أجريت عليه الكثير من التحسينات لرفع الأداء الحراري وقام Woertz & Hottel 1942 بإجراء أول تجربة للأداء الحراري للاقط المسطح واستنتج النموذج الرياضي له، أما اللاقط الأنبوبي المفرغ فقد عُرف أولاً من قبل Speyer 1965 [9]. ويتم تطويره بشكل متسارع. دراسة تجريبية قام بها Fouad Kamel Abdalla 2005 للاقط هجين (انبوبي ومسطح) حيث وضع اللاقط المسطح فوق اللاقط الأنبوبي ليعمل كمجمع له ودرس منحنيات الأداء الحراري للاقط الهجين الجديد ومقارنته مع الانبوبي المسطح واستنتج ان الطاقة المنتجة تتحسن في اللاقط الهجين و منحني المردود يقع ما بين الانبوبي و المسطح [10]، الشكل (1).



الشكل (1) لاقط مرَّجَّب (هجين) حسب [10]

قام E. Zambolin *et al.* 2010 بدراسة تجريبية للأداء الحراري للاقط مسطح و انبوبي في الحالة المستقرة والحالة شبه ديناميكية وحالة العمل اليومي وجد أن المردود البصري للاقط المسطح أعلى من الانبوبي ولكن ميلان منحني المردود للاقط الأنبوبي يكون أقل، وينهار منحني مردود اللاقط المسطح بفعل الفقد الحراري عند درجات الحرارة العالية بينما يتمتع اللاقط الأنبوبي بميزة استمرار منحني المردود بميلان أقل بسبب الفراغ بين الأنبوبين المؤدي الى تخفيض الضياع الحراري [12]. قام Munish Kainth 2014 بدراسة مرجعية لتقنيات وأنواع اللواقط المسطحة والتصاميم المختلفة لها وتطويرها في

السنوات الاخيرة [6]. بين Zhangyuan Wang *et al.*2015 التوجه المستقبلي لتطوير اللواقط الشمسية وتصاميم جديدة لتحسين الأداء الحراري وتخفيض الكلفة [11].



الشكل (2) منحنيات المردود اللحظي لأنواع مختلفة من اللواقط حسب [3]

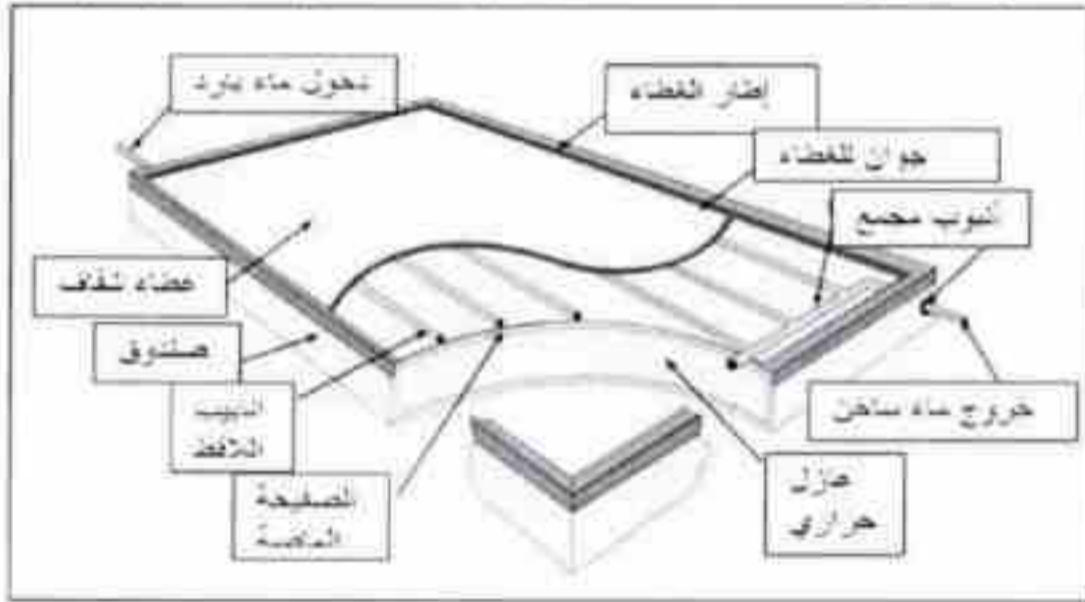
قام الباحث بدراسة تجريبية للأداء الحراري في الحالة المستقرة للاقط مسطح ولاقط انبوبي لهما نفس المساحات المرجعية عند الشروط المناخية لمدينة دمشق، تبين أنه لكل نوع منهما مميزات حرارية مختلفة عن الآخر عندما يعملان في نفس الشروط المناخية. وتم الاستنتاج انه يمكن الاستفادة من المميزات الحرارية للوعين معا وتداخلها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

### ثانياً: تصميم وتصنيع اللاقط (المركب):\*

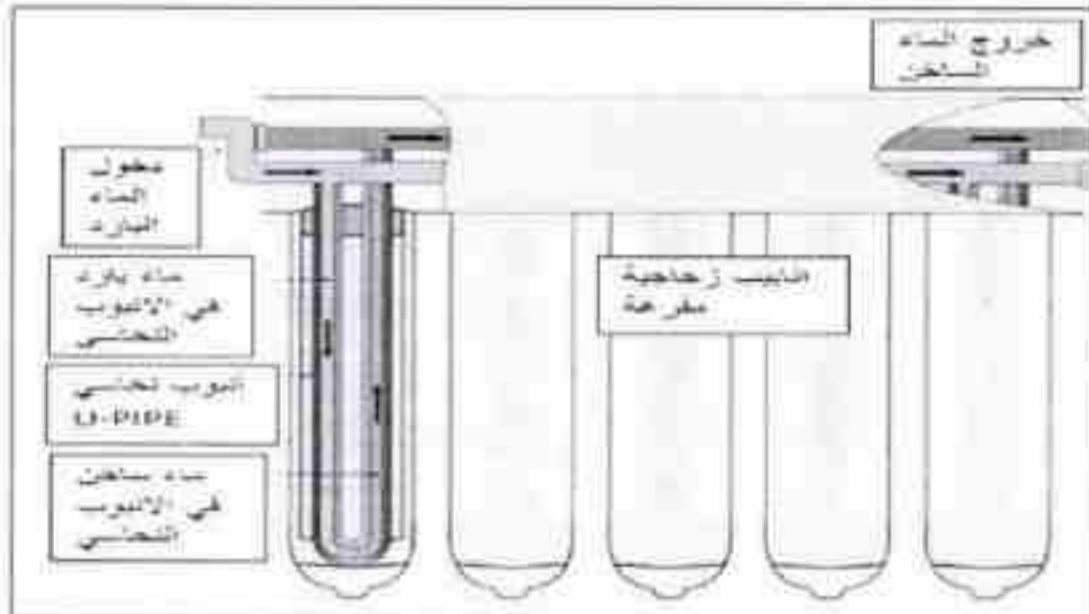
1-التعريف: هو لاقط شمسي حراري لتسخين المياه مؤلف من جزأين متصلين على التسلسل الأول لاقط مسطح كما في الشكل (3) والثاني لاقط أنبوبي مفرغ U-pipe كما في الشكل (4) يدخل الماء من أسفل اللاقط المسطح ويخرج من أعلى اللاقط الأنبوبي المساحات المرجعية للاقطين متساوية وهي مساحة الفتحة ومساحة السطح الماص المكشوفة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

2- اللاقط المسطح: الإطار الخارجي من الألمنيوم النقي والمؤكسد بدرجات حرارة عالية منعا لتأثره بالظروف الجوية الخارجية ومطلي باللون البرونزي، السطح السفلي من الصفيح المغلفن والمطلي حرارياً، العازل لأسفل وجوانب اللاقط من الصوف الزجاجي، شبكة الأنابيب الطولية وعددها ستة والمجمع العلوي والسفلي من النحاس

الأحمر وفقا (ASTM B88 TUBE) وملحومة مع بعضها بلحام الفضة، الصفيحة الماصة من النحاس الأحمر مشكلة بطريقة الدرفلة وثبتت شبكة الأنابيب النحاسية على الصفيحة الماصة النحاسية بواسطة نقاط لحام متلاحقة متقطعة تؤمن تلامس جيد بين الأنابيب والصفيحة الماصة، الطلاء أسود قائم مت من مواد كربونية وشبه فحمية. الغطاء لوح زجاجي بشفافية عالية، الإطار المطاطي لا يتأثر بالعوامل الجوية ويعمل على إحكام اللوح الزجاجي مع جسم اللاقط ويمنع دخول الأمطار والغبار، المخارج والمداخل من الطرفين مصنعة من الفولاذ المغلفن وفقا (ASME B 36) ملحومة على المجمع العلوي والسفلي، التفاصيل التصميمية في الجدول (1) والشكل (15).



الشكل (3) رسم توضيحي للاقط مسطح



الشكل (4) رسم توضيحي للاقط شمسي انبوبي مطرغ من نوع U-PIPE

الجنول (1)® الابعاد التصميمية الاساسية للاقط المسطح.

اسم الجزء	القياسات	الواحدات
العازل الحراري من الصوف الزجاجي، سماكة	35	[mm]
العازل الحراري، كثافة	38~40	[Kg/m <sup>3</sup> ]
العازل الحراري، عامل التوصيل الحراري	0.045	[W/m.K]
الأنبوب النحاسي الطولي، قطر داخلي، (خارجي)	11.3, (12.7)	[mm]
المسافة بين محوري انبويين نحاسيين متتاليين	75	[mm]
الانبوب النحاسي المجمع، قطر داخلي، (خارجي)	26, (28.5)	[mm]
الصفيحة الماصة من النحاس، سماكة	0.4	[mm]
اللوح الزجاجي، سماكة	40	[mm]
الفراغ بين الصفيحة الماصة وأسفل اللوح الزجاجي	24	[mm]
المخارج والمداخل فولاذ مغلفن، قطر داخلي،(خارجي)	25.4,(33)	[mm]
الارتفاع الكلي للاقط، (العرض الكلي)	1990,(590)	[mm]
المساحة الإجمالية للاقط	1.174	[m <sup>2</sup> ]
مساحة التعرض، مساحة الفتحة	1.043	[m <sup>2</sup> ]
مساحة السطح الماص المكثوف للأشعة الشمسية	0.903	[m <sup>2</sup> ]

3- اللاقط الانبوبي المفرغ: يتألف من سبعة انابيب زجاجية مفرغة بداخلها الأنابيب U-PIPE مصنوعة من النحاس الأحمر، وصلت هذه الأنابيب إلى مجمعين نحاسيين بارد وساخن في اعلى اللاقط وفقا (ASTM B88 TUBE) ، أحيط كل أنبوب نحاسي بصفيحة رقيقة من الألمنيوم لزيادة الناقلية الحرارية ووضع ضمن أنبوب زجاجي مفرغ مضاعف نوع Tree target vacuum tube الطلاء الماص على القطر الخارجي للأنبوب الزجاجي الداخلي انتقائي ثلاثي الطبقات: CU/SS-ALN(H)/SS-ALN(L)/ALN، يدخل الماء إلى المجمع البارد في أعلى اللاقط وتتوزع منه على الأنابيب النحاسية U-PIPE ويخرج الماء الساخن منها إلى المجمع الساخن في أعلى اللاقط ومنه الى خارج اللاقط، المجمعين متوازيين ضمن غلاف محاط بعازل حراري

من الفوم (بولي ريثان ) المحقون وضع خلف الأنابيب الزجاجية ثلاثة عواكس ستانلس ستيل. التفاصيل التصميمية في الجدول (2) والشكل (16).  
الجدول (2)® الأبعاد التصميمية الأساسية للاقط الانبوبي المفرغ.

اسم الجزء	القياسات	الوحدات
العازل الحراري من البولي ريثان المحقون، سماكة	50	[mm]
العازل الحراري، كثافة	30	[Kg/m <sup>3</sup> ]
العازل الحراري، عامل التوصيل الحراري	0.025	[W/m.K]
الأنبوب النحاسي بشكل U، قطر داخلي، (خارجي)	8.3,(9.5)	[mm]
الانبوب النحاسي المجمع، قطر داخلي، (خارجي)	26,(29.5)	[mm]
صفحة المنيوم المحيطة بالانبوب النحاسي، سماكة	1	[mm]
صفحة المنيوم المحيطة بالانبوب النحاسي، طول	1000	[mm]
الانبوب الزجاجي المفرغ، طول، (طول فعال)	1800,(1750)	[mm]
الانبوب الزجاجي المفرغ، قطر داخلي، (خارجي)	47,(58)	[mm]
المسافة بين محوري انبوبيين زجاجيين متتاليين	83	[mm]
المخارج والمداخل فولاذ مغلف، قطر داخلي، (خارجي)	25.4,(33)	[mm]
عاكس خلفي ستانلس ستيل، عرض، (ارتفاع)، سماكة	580,(400), 1	[mm]
الارتفاع الكلي للاقط، (العرض الكلي)	1990,(590)	[mm]
المساحة الإجمالية للاقط	1.174	[m <sup>2</sup> ]
مساحة التعرض، مساحة الفتحة	1.01675	[m <sup>2</sup> ]
مساحة السطح العاص المكشوف للأشعة الشمسية	0.9039	[m <sup>2</sup> ]

4- الشكل النهائي للاقط (المركب)®: حسب الشكل (14)، والأبعاد في الجدول (3):

(1) المساحة الكلية بما فيها الوصلة بين الجزئين وفقا (JIS B 2301).

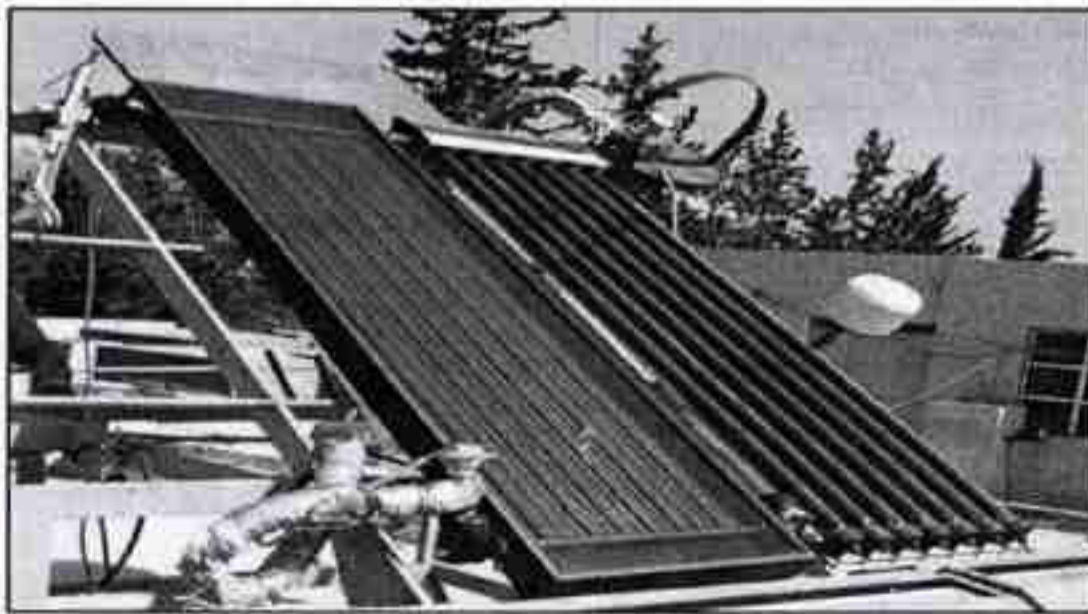
(2) الجزئين مثبتين على إطار واحد من الالمنيوم وفقا (ISO 4019).

تم التصميم الهندسي والتصنيع للاقط (المركب) واللواظ المسطح والانبوبي المكونين له بالمواصفات والقياسات والمواد المعينة بالأشكال (5,14,15,16) والجداول (1,2,3,4) من قبل الباحث وصنع وفقا للمواد المتوفرة في السوق المحلية. الجدول (3) الأبعاد التصميمية الأساسية للاقط المركب.

الأبعاد	مسطح	انبوبي	لاقط مركب
مساحة الفتحة [m <sup>2</sup> ]	1.043	1.01675	2.0897
المسطح الماص المكثوف للأشعة الشمسية	0.903	0.9039	1.8069
مساحة كلية [m <sup>2</sup> ]	1.174	1.174	2.4676 <sup>(1)</sup>
الارتفاع [mm]	1990	1990	1990
العرض [mm]	590	590	1240 <sup>(2)</sup>
سعة اللاقط من الماء [liter]	2	2	4

### ثالثا: الاختبارات:

أجريت على اللاقط (المركب) الاختبارات الميكانيكية وفق متطلبات المتانة والوثوقية والأمان بنجاح [18]. و أختبر الأداء الحراري للاقط المسطح واللاقط الانبوبي المكونان للاقط (المركب) بشكل منفصل عند الشروط المناخية لمدينة دمشق في الحالة المستقرة في مركز الاختبارات والأبحاث الصناعية بدمشق حسب [16]، [14]. ثم تم وصلهما لتكوين اللاقط (المركب) وأختبر بنفس دارة الاختبار في الحالة المستقرة [16]، [19].

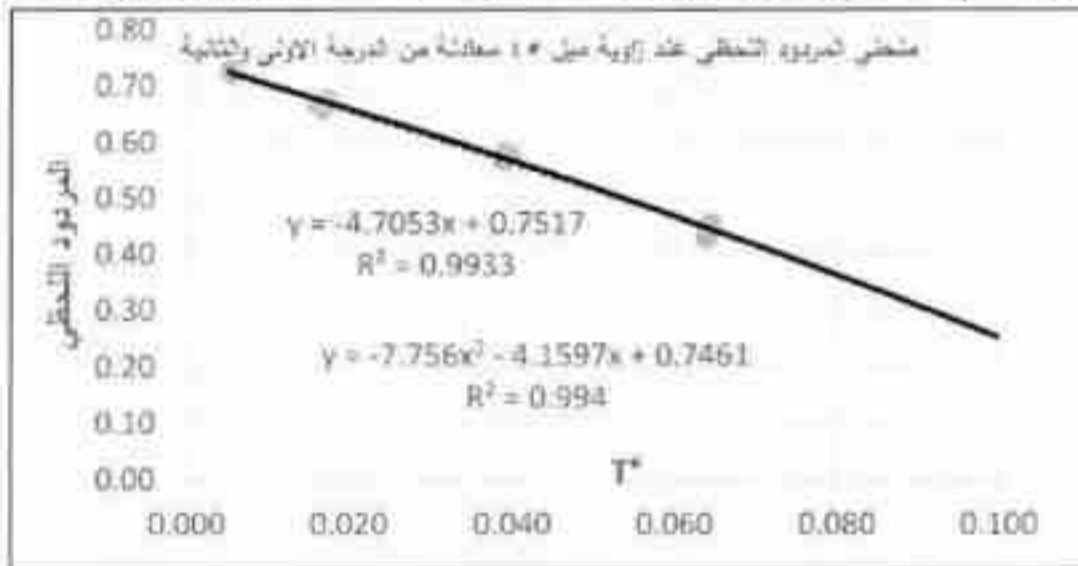


الشكل (5) اللاقط (المركب) على منصة الاختبار

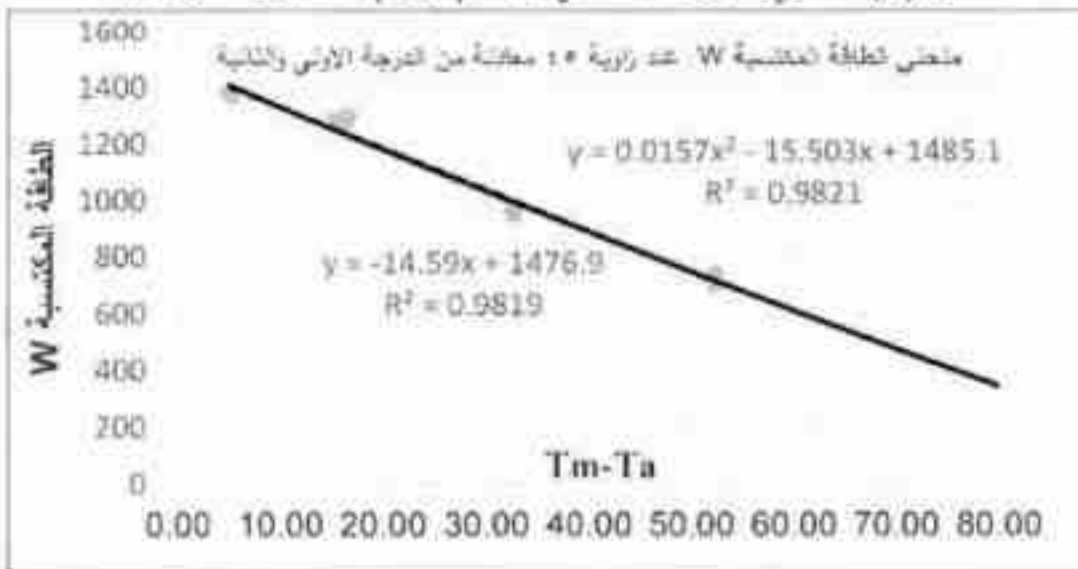


### نتائج الاختبارات:

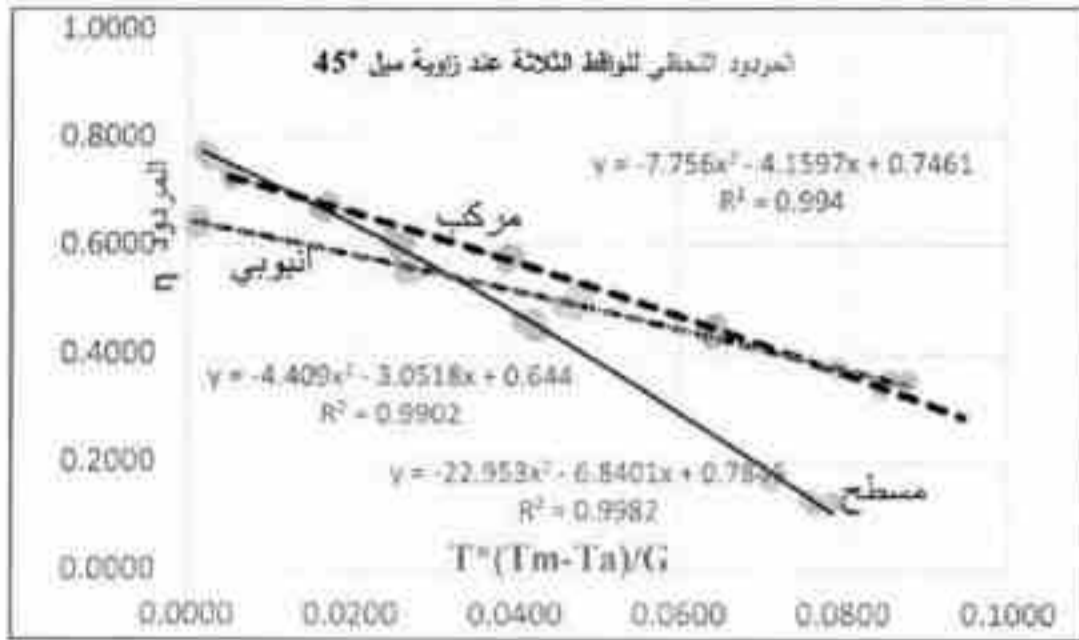
لوحظ أن السلوك الحراري للاقط (المركب) يشابه السلوك الحراري لأي لاقط آخر من حيث قيم الثوابت ( $\eta_0$  و  $a_1$  و  $a_2$ ). وتأثيرها بالمساحة المرجعية وزاوية الميل عن الأفق وشدة الاشعاع الشمسي الواردة عليه. وتناقص المردود بزيادة قيمة درجة الحرارة المختزلة كما في الشكل (6) وتناقص الطاقة المكتسبة مع زيادة فرق درجات الحرارة ( $T_m - T_a$ ) كما في الشكل (7). أي ان الشكل العام لمنحنيات الأداء الحراري للاقط (المركب) تشابه الشكل العام لمنحنيات اللاقط المسطح والانبوبي. موضح في الشكل (8) 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 17%.



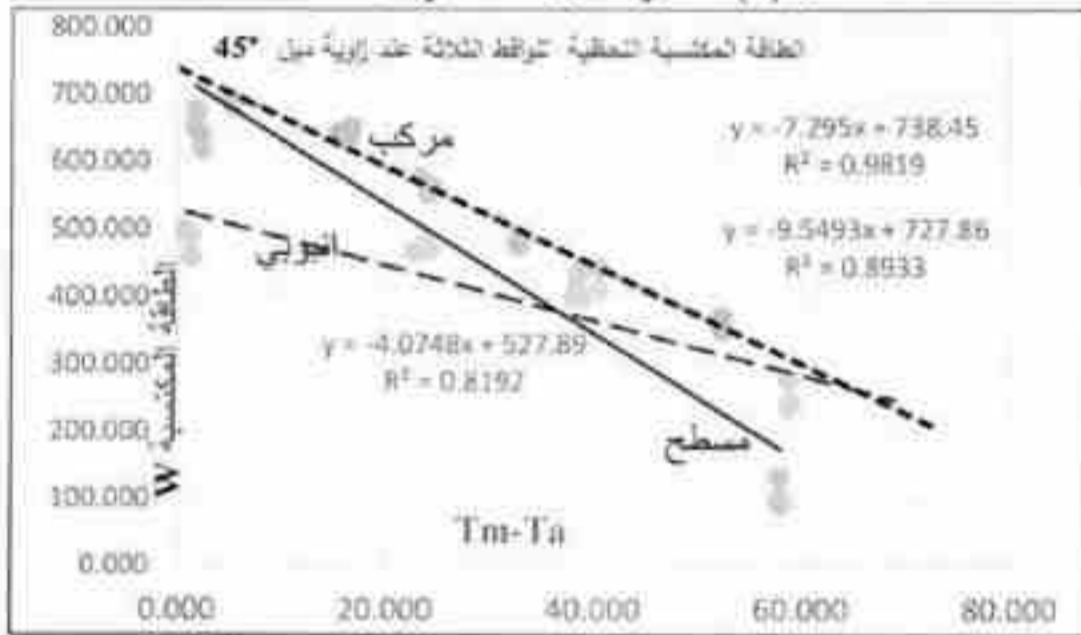
الشكل (6) منحنى المردود اللحظي لاقط (مركب) عند زاوية ميل  $45^\circ$



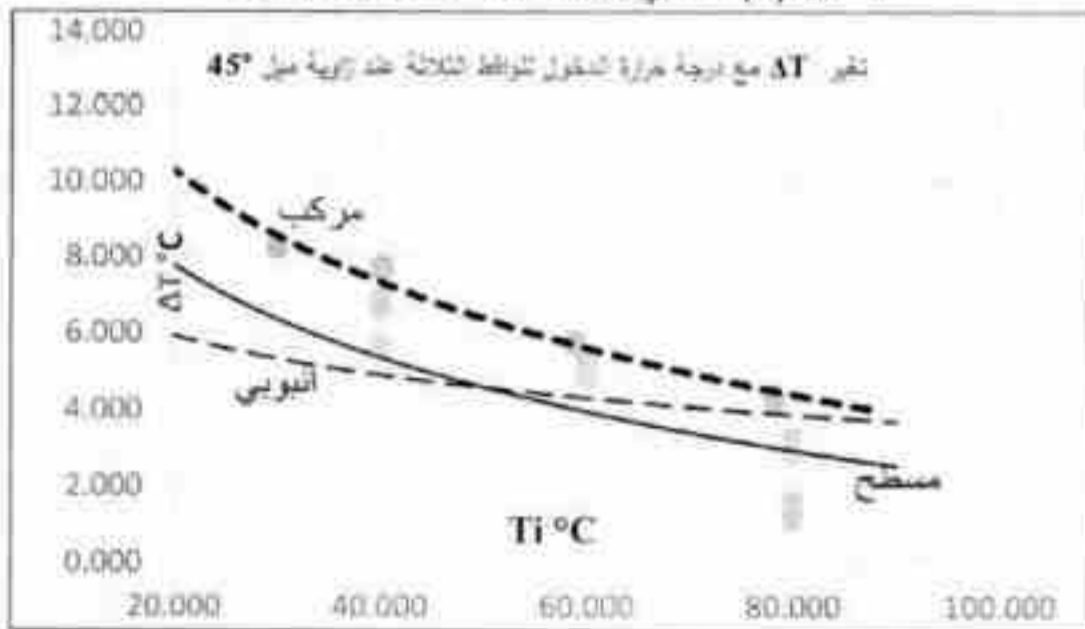
الشكل (7) منحنى الطاقة المكتسبة بدلالة ( $T_m - T_a$ ) لاقط (مركب)



الشكل (8) منحني المردود التحظي للواقظ الثلاثة



الشكل (9) منحني الطاقة المكتسبة للواقظ الثلاثة



الشكل (10) منحني تغير  $\Delta T$  مع تغير درجة حرارة الدخول  $T_i$  للواقظ الثلاثة

في الشكل (9) مقارنة لمنحنيات الطاقة المكتسبة للواقط الثلاثة بدلالة فرق درجات الحرارة  $(T_m - T_a)$ . يلاحظ عند نقطة تلاقي منحنى الانبوبي مع المسطح عند  $(T_m - T_a = 35^\circ\text{C})$  تكون قيمة الطاقة المكتسب لكل منهما (380W) أما (المركب) فتكون قيمة الطاقة المكتسبة لنفس النقطة (470W) أي بزيادة مقدارها 23% (للمركب) في هذه النقطة. في الشكل (10) منحنيات لوغاريتمية لتغير  $(\Delta T)$  بدلالة تغير درجة حرارة الدخول  $T_i$  للواقط الثلاثة. يلاحظ عند نقطة تلاقي منحنى الانبوبي مع المسطح عند  $(T_i = 50^\circ\text{C})$  تكون قيمة  $(\Delta T)$  لكل منهما  $(5.3^\circ\text{C})$  أما (المركب) فتكون قيمة  $(\Delta T)$  لنفس النقطة  $(6.2^\circ\text{C})$  أي بزيادة مقدارها 17% (للمركب) في هذه النقطة [19].

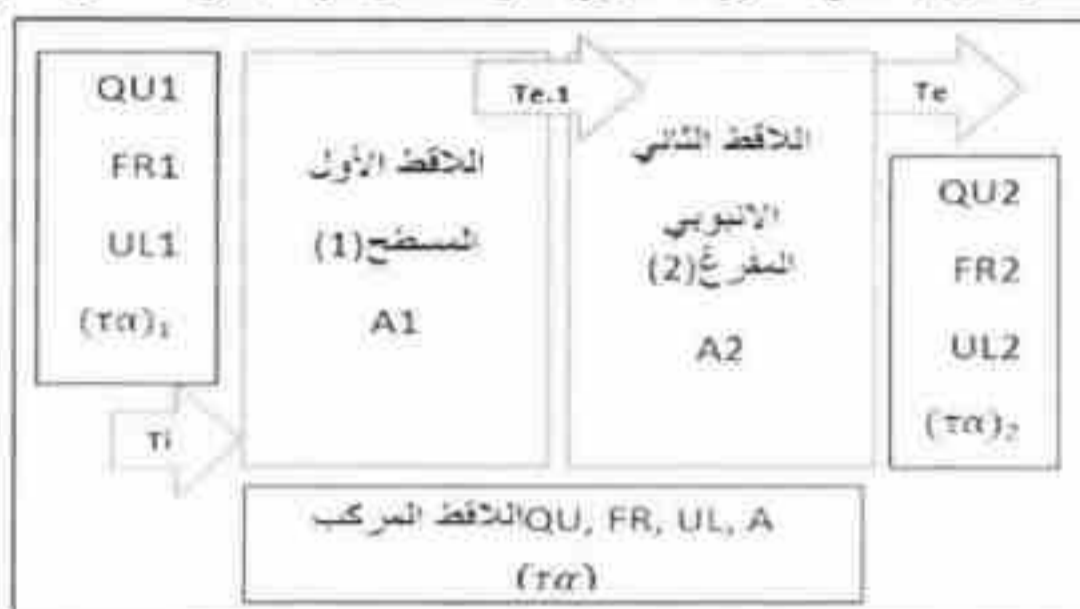
الجدول (4) الثوابت الحرارية للاقط المركب

مركب	انبوبي	مسطح	الثوابت الحرارية	
0.7517	0.6484	0.8047	$\eta_0$	معادلة خطية
4.7053	3.4392	8.6763	$a_1$	
0.7461	0.644	0.7846	$\eta_0$	معادلة من الدرجة الثانية
4.1597	3.0518	6.8401	$a_1$	
0.007756	0.004409	0.022953	$a_2$	

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 لمثل 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 افرادي، وخصوصاً أن درجة حرارة الماء الداخلة الى اللاقط الثاني ستكون مرتفعة بعد خروجها من اللاقط الأول  $T_{e1}$ . العامل المهم هو عامل التغيير  $k$  المبين بالمعادلة (17) ولتحديده يجب معرفة الثوابت الحرارية للواقط الموصولة بمعرفة التدفق المار بها.



الشكل (11) 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  $\eta_0$  و معامل ضياع الحرارة الصغرى  $a_1$  و معامل ضياع الحرارة كتابع لدرجة الحرارة  $a_2$ . يبين الجدول (4) قيم هذه الثوابت لمساحة الفتحة وزاوية ميل  $45^\circ$  [19]. اقترح [9] استخدام المعادلات من (13 الى 19) لمعرفة النموذج الرياضي للاقط الجديد الموصول على التسلسل بين لاقطين مختلفين في التصميم وهذه المعادلات مكتوبة حسب طريقة [15]. باستخدام الثوابت  $F_R U_L \cdot F_R (\tau\alpha)$ . 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  $1[m^2]$  ومساحة الفتحة للاقط (المركب) هي مجموعهما أي  $2[m^2]$  والتدفق المار عبر اللاقط أثناء الاختبار ثابت  $0.02[kg/m^2]$  ومتوسط السعة الحرارية للماء داخل اللاقط  $4180[J/kg.K]$  نجد معادلات النموذج الرياضي

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

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

وتكتب بدلالة الفرق بين وسطي درجة حرارة الماء في اللاقط  $T_f$  و درجة 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  $FR$ :

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

و تكتب بدلالة الفرق بين وسطي درجة حرارة الماء في اللاقط  $T_f$  و درجة حرارة مدخل اللاقط  $T_i$ ، حيث تم ادخال عامل تدفق اللاقط  $F''$ :

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

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

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

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:

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

ودرجة الحرارة المختزلة تحسب بالمعادلة:

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

وبالنسبة 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):

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

بإجراء التحويل بين قيم الثوابت الحرارية للواقظ مأخوذة من المعادلة الخطية من الجدول (4) ما بين [15] و [16] نجد الجدول (5):

الجدول (5) قيم الثوابت الحرارية بعد تحويلها حسب طريقة [15]

مركب		انبوي		مسطح	
$\eta_o$	0.7517	$\eta_{o2}$	0.6484	$\eta_{o1}$	0.8047
$\Rightarrow F_R(\tau\alpha)_{expe}$	0.7311	$\Rightarrow F_{R2}(\tau\alpha)_2$	0.6354	$\Rightarrow F_{R1}(\tau\alpha)_1$	0.765
$a_i$	4.7053	$a_{12}$	3.4392	$a_{11}$	8.6763
$\Rightarrow F_R U_L expe$	4.565	$\Rightarrow F_{R2} U_{L2}$	3.3701	$\Rightarrow F_{R1} U_{L1}$	8.2501

تم التأكد من صلاحية معادلات التحويل (20,21,22) وذلك بإعادة رسم منحنى المردود للواقظ الثلاثة المبينة بالشكل (8) المرسوم بدلالة  $T^* = T_m - T_a/G$  وفق طريقة [16] ورسمه بالشكل (13) بدلالة  $T^* = T_i - T_a/G$  وفق طريقة [15]. بتطبيق المعادلات (17,18,19) نجد قيم الثوابت الحرارية حسب [9] بالجدول (6):

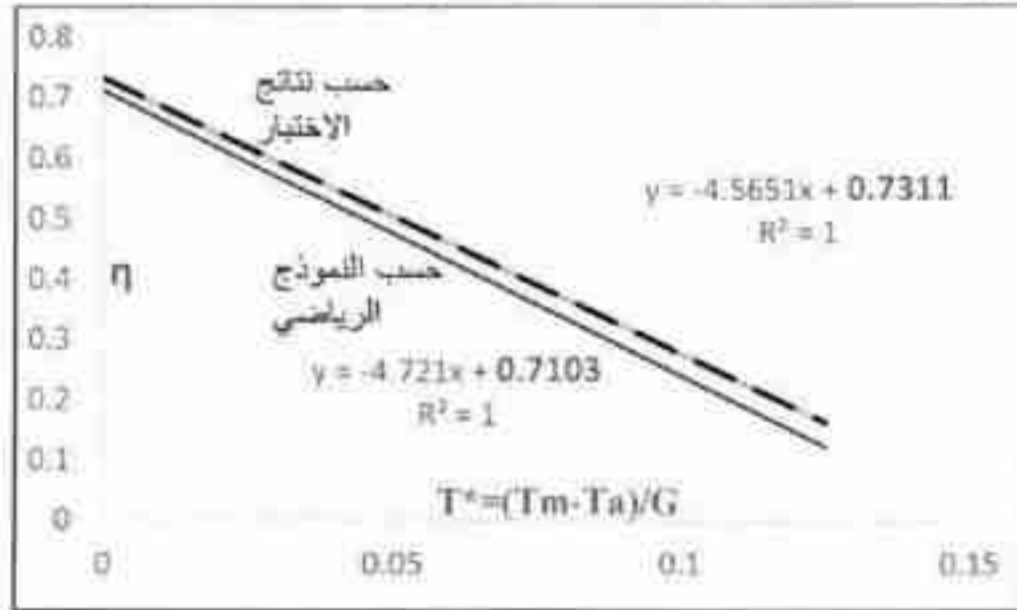
$F_R(\tau\alpha) modeling$	0.7103	$F_R(\tau\alpha) expe$	0.7311
$F_R U_L modeling$	4.72105	$F_R U_L expe$	4.5653

5- النتيجة: للاقط (المركب) نسبة الفرق بين قيمة  $F_R(\tau\alpha) expe$  وقيمة  $F_R(\tau\alpha) modeling$  تساوي 2.8% و نسبة الفرق بين قيمة  $F_R U_L expe$  وقيمة  $F_R U_L modeling$  تساوي 3.4%. ويظهر ذلك في الشكل (12).

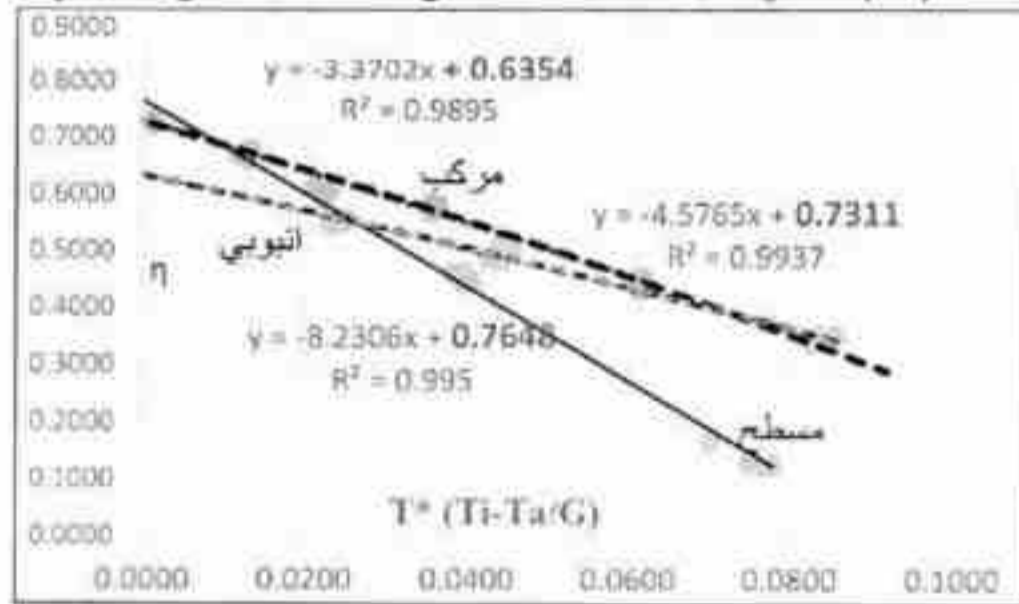
خامسا: النتائج:

للاقط (المركب) المبتكر أداء حراري أعلى من اللاقطين المكونين له لاستفادته من المميزات الحرارية لكل منهما في نفس الشروط المناخية وتداخل هذه المميزات في شروط

التشغيل المختلفة حيث أظهر كل لاقط لوحده تميزاً عن الآخر عند بعض الشروط المناخية وشروط تشغيل واللاقط (المركب) يجمع بين هذه المميزات [19]. يتمتع اللاقط الانبوبي المفرغ بقيمة منخفضة لعامل التغير  $k$  بسبب فقده الحراري الأقل  $F_{R2} U_{L2}$  بالرغم من استقباله ماء بدرجات حرارة عالية قادمة من اللاقط المسطح وهذه الميزة التي تتعلق بتصميم اللاقط الانبوبي المفرغ [12] تساهم في 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 المخازن الشمسية.

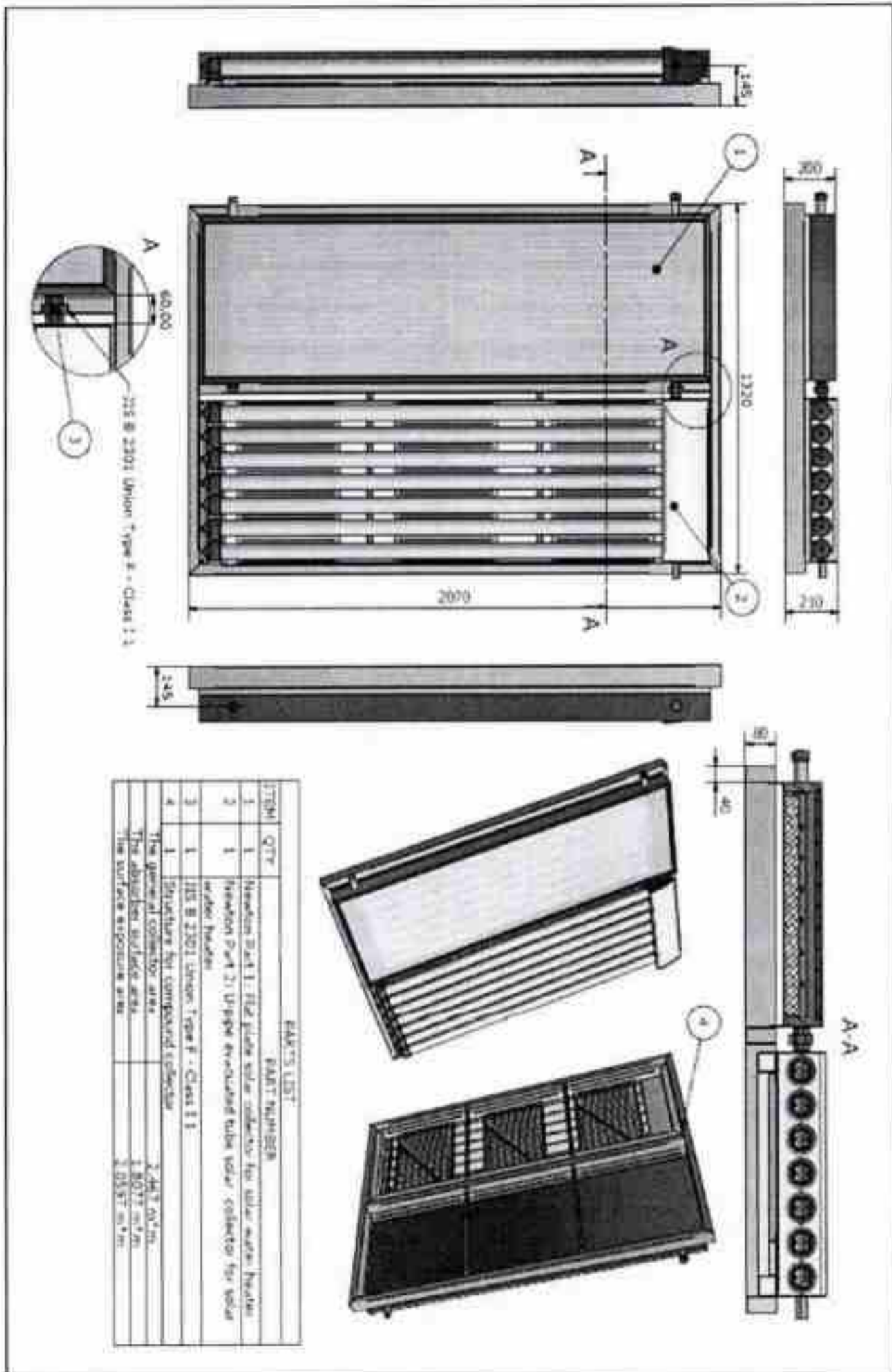


الشكل (12) منحنى المردود مقارنة بين نتائج الاختبار والنموذج الرياضي

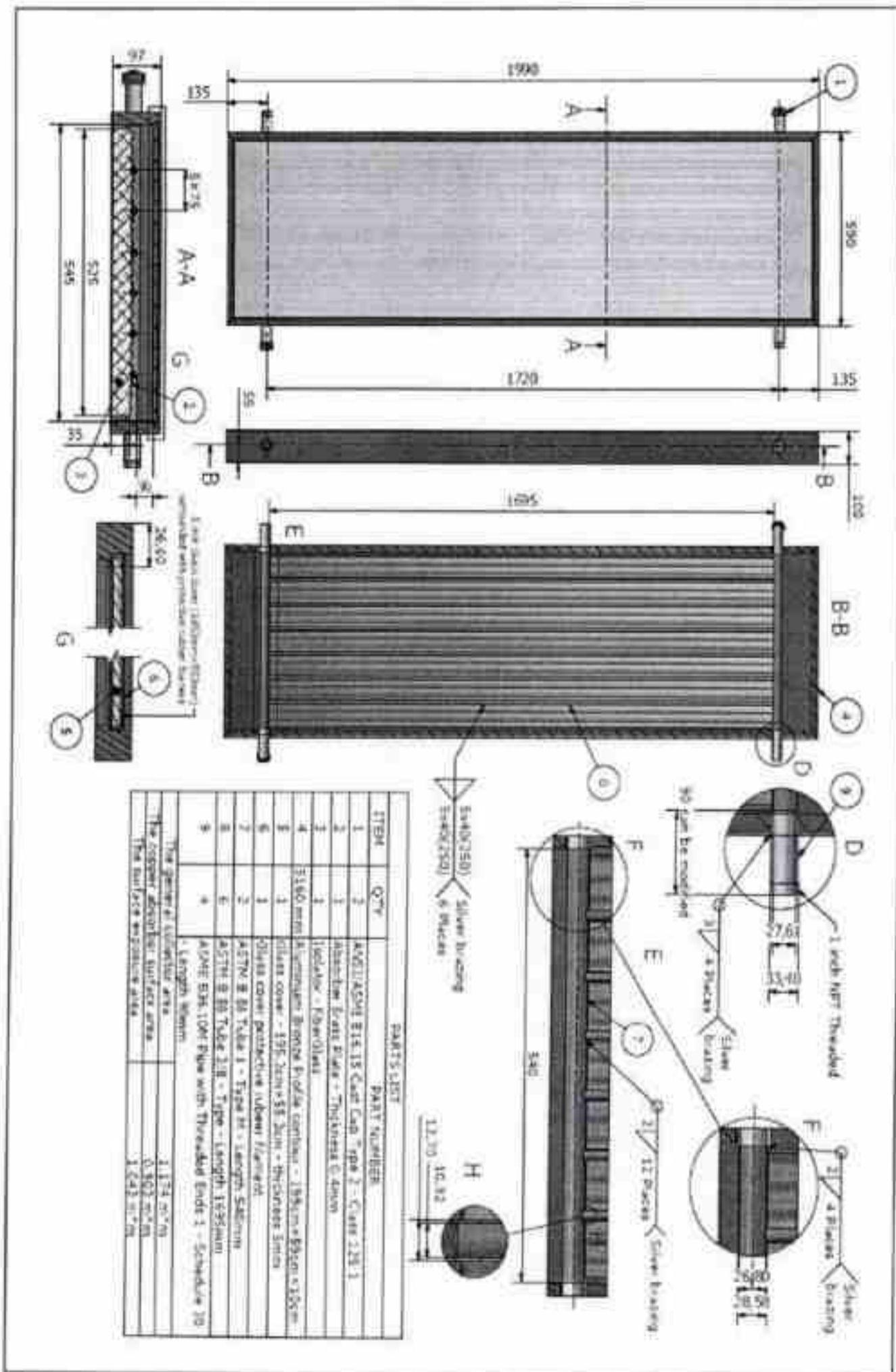


الشكل (13) منحنى المردود النظري للنقاط الثلاثة بدلالة  $(Ti-Ta)/G$

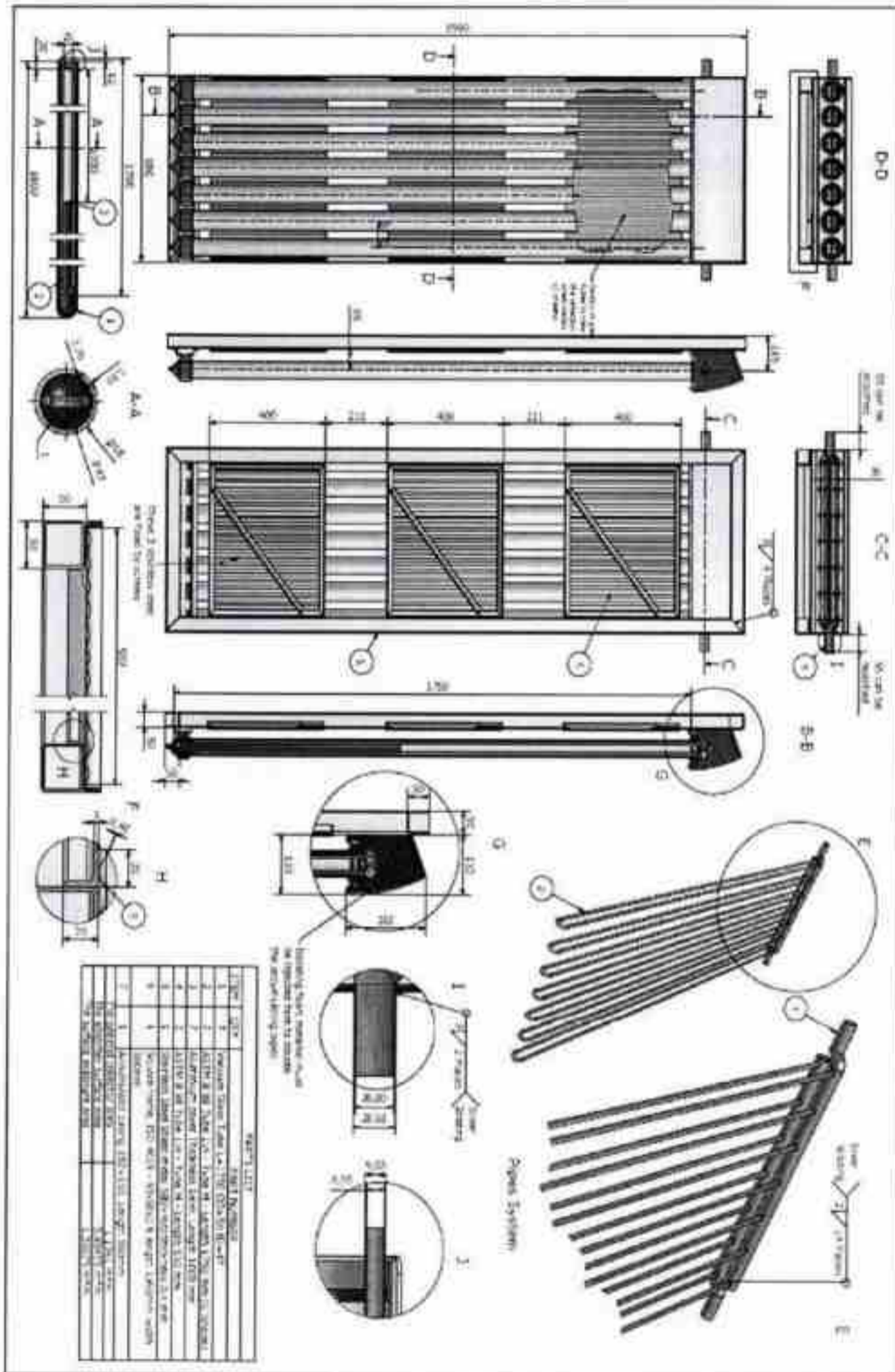




الشكل (14) التصميم الهندسي للاقط المرئيب



الشكل (15) التصميم الهندسي للاقط المسطح



الشكل (16) التصميم الهندسي للاقطع الانبوبي المفرغ

الرموز والواحدات

الرمز	الشرح	الوحدات
$a_1$	معامل ضياع الحرارة الصفري عند $0=(T_m-T_a)$	$W/m^2.K$
$a_{11}$	للاقط المسطح $a_{12}$ للاقط الانبوبي	$W/m^2.K$
$a_2$	معامل ضياع الحرارة كتابع لدرجة الحرارة	$W/m^2.K^2$
$a_{21}$	للاقط المسطح $a_{22}$ للاقط الانبوبي	$W/m^2.K^2$
$A$	المساحة المرجعية المعتمدة بالاختبار	$m^2$
$A_1$	للاقط المسطح $A_2$ للاقط الانبوبي	$m^2$
$G$	شدة الإشعاع الشمسي الكلي الوارد	$W/m^2$
$m'$	معدل التدفق الكلي للماء في الاقط	$kg/s$
$Q_U$	الاستطاعة المفيدة المستخلصة من الاقط	$W$
$Q_{U1}$	للاقط المسطح $Q_{U2}$ للاقط الانبوبي	$W$
$T_a$	درجة حرارة الهواء المحيط	$^{\circ}C$
$T_p$	درجة حرارة السطح الماص	$^{\circ}C$
$T_e$	درجة حرارة (مخرج الاقط)	$^{\circ}C$
$T_{e1}$	درجة حرارة مخرج الاقط المسطح و مدخل الاقط الانبوبي	$^{\circ}C$
$T_i, T_{in}$	درجة حرارة (مدخل الاقط)	$^{\circ}C$
$T_f, T_m$	متوسط درجة حرارة الماء في الاقط	$^{\circ}C$
$T_m^*$	درجة الحرارة المختزلة $T^* = (T_m - T_a)/G$	$m^2.K/w$
$C_p$	متوسط السعة الحرارية للماء المار بالاقط	$J/kg.K$
$\Delta T'$	فرق درجات حرارة الماء بين مخرج و مدخل الاقط $T_e - T_i$	$K$
$F'$	عامل كفاءة الاقط ويساوي كمية الطاقة المسحوبة من الاقط بواسطة الماء مقسوما على كمية الطاقة الممكن سحبها فيما لو كانت درجة حرارة السطح الماص تساوي وسطي درجة حرارة الماء داخل الاقط	

			عامل إزاحة الحرارة من اللاقط ويساوي كمية الطاقة المسحوبة من اللاقط بواسطة الماء مقسوما على كمية الطاقة الممكن سحبها فيما لو كانت درجة حرارة السطح الماص تساوي درجة حرارة دخول الماء الى اللاقط	$FR$
	للاقط المسطح	$FR2$	للاقط الانبوبي	$FR1$
			عامل تدفق اللاقط ويساوي كمية الطاقة المسحوبة من اللاقط بواسطة الماء مقسوما على كمية الطاقة الممكن سحبها فيما لو كانت وسطي درجة حرارة الماء داخل اللاقط تساوي درجة حرارة دخول الماء الى اللاقط	$F^*$
			حاصل الجداء الفعال للنقوتية بالامتصاصية	$(\tau\alpha)_e$
	للاقط المسطح	$(\tau\alpha)_2$	للاقط الانبوبي	$(\tau\alpha)_1$
$W/m^2.K$			معامل ضياع الحرارة الكلي للاقط بالحمل والاشعاع والتوصيل	$UL$
$W/m^2.K$	للاقط المسطح	$UL2$	للاقط الانبوبي	$UL1$
$W/m^2.K$			كتابع للفرق بين درجة حرارة المدخل والجو المحيط	$U_{(\tau_m-\tau_a)}$
			عامل التغير يتعلق بمواصفات اللاقط الثاني	$k$
$W/m^2.K$			معدل السعة الحرارية لوحد المساحة	$\epsilon$
			مردود اللاقط هو نسبة الطاقة المنقولة بواسطة الماء خلال فترة زمنية محددة مقسوما إلى ناتج جداء مساحة اللاقط بشدة الإشعاع الشمسي الساقط في مستوى ميلان اللاقط في حالة الاستقرار	$\eta$
			المردود البصري للاقط هو مردود اللاقط عندما تكون وسطي درجة حرارة الماء في اللاقط أو درجة الحرارة عند الدخول تساوي درجة حرارة الهواء المحيط	$\eta_o$
			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 Upsaliensis.*
- [9]- DUFFIE, J. &BECKMAN, W., 1980-**Solar engineering of thermal processes.** 2<sup>nd</sup> 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]- The Author., 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]- The Author., 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](http://WWW.standardsproposals.bsigroup.com/Home/getPDF/718).

---

---

## **Design and derive mathematical model of (Compound) solar collector**

### **Abstract**

In solar energy applications, in which the temperature of the working fluid inside the collector does not exceed 120 [°C], usually a solar systems with direct collectors are used. There is no need to concentrate the solar radiation since it collect the energy carried of solar radiation from the surface directly. The most important types are the flat plate collectors and the evacuated tube collectors. These collectors have different levels of thermal performance that relates to their structure, dimensions, elements, and materials. Also related to the available solar radiation and the climatic data of the concerned area as well as the method and efficiency of its operation. The enhancement of the performance efficiency of solar collectors is still under the attention of many researchers, especially those related to evacuated tube collectors, transparent insulation, raising the level of radiation absorption, and reducing radiation reflection or emission from the absorbent surfaces. In this research, we designed and concluded the mathematical model of a (compound) solar collector. so it contributes to the efforts of raising the economics and the efficiency of collecting solar radiation and convert it into thermal energy by utilizing the characteristics of thermal performance of different solar collectors in the (compound) collector through the development of a serial link of a two collectors, the first one is a flat plat collector followed by evacuated tube collector. Where the work of the second one begins at efficiency intersection point of the two collectors and then the compound collector continues to work at the highest efficiency reaching a higher thermal efficiency. The practical part of the research includes the create of the design and manufacture of the flat plate collector and the evacuated tube collector, as well as the method of correlating them to create the design and the manufacture of the (compound) collector then concluding the mathematical model and compare it with test results and drawing conclusions.

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