

# Numerical Modeling of the Thermal Performance of Asphalt Solar Collector and Experimental Verification

Dr. Haytham Hasan\*

Fahd Alabbas\*\*

(Received 15 / 5 / 2024. Accepted 22 / 7 / 2024)

## □ ABSTRACT □

In this research, an asphalt solar collector was numerically modeled using computational fluid dynamics (CFD) techniques and the validity of the simulated model was verified experimentally. In this research, circular-section metal pipes were used, wrapped in a U-shape, with a length of 3.42 m and placed inside an asphalt collector with a surface area of  $0.52 \text{ m}^2$ . This collector was buried in the ground, where heat is transferred to the adjacent soil in order to match the real conditions. The experiment was conducted in Al-Mukharram region belonging to Homs Governorate in the outdoor environment during the hot summer months, specifically on August 20 and 31. Water was passed through the collector pipes at a flow of 0.25 L/min, from 10:30 a.m. to 5 p.m.

The results showed that The maximum thermal efficiency reached 69%, the maximum temperature difference is  $12.63 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , and the maximum hourly heat energy reached 800 kJ/h. The results also showed that the daily efficiency is not directly affected by the decrease in solar radiation in the last hours of the day, and this is considered an additional advantage for these collectors, which encourages the actual application of this technology within Syrian cities and for various areas of use.

**Keywords:** Asphalt solar collector, thermal performance, numerical modeling.

**Copyright**



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

---

\*Professor, Mechanical Power Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria. Email: [haythamhasan33@gmail.com](mailto:haythamhasan33@gmail.com)

\*\*Postgraduate student(Master), Mechanical Power Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Al-Baath University, Homs, Syria. Email: [fahdalabbas0@gmail.com](mailto:fahdalabbas0@gmail.com)

## النمذجة العددية للأداء الحراري للمجمع الشمسي الإسفلتي والتحقق تجريبياً

د. هيثم حسن\*

فهد العباس\*\*

(تاريخ الإبداع 15 / 5 / 2024. قُبل للنشر في 22 / 7 / 2024)

### □ ملخص □

تم في هذا البحث النمذجة العددية لمجمع شمسي إسفلتي، باستخدام تقنيات ديناميكية الموائع الحسابية والتحقق من صحة النموذج المحاكى تجريبياً.

تم في هذا البحث استخدام أنابيب معدنية دائرية المقطع ملفوفة على شكل حرف U بطول 3.42 m ووضعت داخل مجمع أسفلتي بمساحة سطح  $0.52 \text{ m}^2$  وتم طمر هذا المجمع في الأرض، حيث تنتقل الحرارة إلى التربة الملاصقة بهدف مماثلة الشروط الحقيقية. أجريت التجربة في منطقة المخزم التابعة لمحافظة حمص في الوسط الخارجي في أشهر الصيف الحارة على وجه التحديد يومي 20 و31 آب، وتم تمرير الماء خلال انابيب المجمع بتدفق 0.25 l/min ، اعتباراً من الساعة العاشرة والنصف صباحاً إلى الساعة الخامسة مساءً.

بينت النتائج أن الكفاءة الحرارية الأعظمية بلغت % 69، وفرق درجة الحرارة الأعظمي  $12.63 \text{ }^\circ\text{C}$  ، وبلغت الطاقة الحرارية الساعية الأعظمية 800 kJ/h. كما بينت النتائج أن الكفاءة اليومية لا تتأثر مباشرة بانخفاض الإشعاع الشمسي في الساعات الأخيرة من اليوم، ويعتبر ذلك ميزة إضافية لهذه المجمعات، مما يشجع الى التطبيق الفعلي لهذه التقنية ضمن المدن السورية ولمختلف مجالات الاستخدام.

الكلمات المفتاحية: المجمع الشمسي الإسفلتي، الأداء الحراري، نمذجة عددية.

حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص



CC BY-NC-SA 04

\* أستاذ - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

[haythamhasan33@gmail.com](mailto:haythamhasan33@gmail.com)

\*\* طالب دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث - حمص - سورية.

[fahdalabbas0@gmail.com](mailto:fahdalabbas0@gmail.com)

**مقدمة:**

إن عدد سكان الأرض في تزايد وكذلك الطلب على الطاقة، بينما مصادر الوقود الأحفوري محدودة، والآثار الجانبية السلبية لاستخدام الوقود الأحفوري تشكل مخاوف خطيرة كالاختباس الحراري وتلوث الهواء الناتجة عن تزايد معدل انبعاثات الغازات الدفيئة.

يمكن الاعتماد على الطاقات المتجددة كحل لهذه المشاكل، حيث تستقبل الأرض كمية كبيرة من الطاقة القادمة من الشمس يومياً والتي يمكن أن تصل إلى  $40 \text{ MJ/m}^2$  [1]، ركزت العديد من الدراسات على طرق جديدة ومختلفة لاستخدام الطاقة الشمسية مثل الخلايا الفولط ضوئية [3]، ومحطات الطاقة الشمسية [4]، وسخانات المياه والهواء الشمسية [5]، ومؤخراً مجمعات الرصيف [2]، وغيرها ... بالإضافة إلى العديد من الأبحاث المتعلقة بسخانات المياه الشمسية (Solar Water Heaters) [6] والمجمعات الشمسية الإسفلتية (Asphalt Solar Collectors(ASCs)) [7] التي سيتم التطرق إليها في بحثنا الحالي. يمكن في أيام الصيف للإشعاع الشمسي تسخين ASCs إلى درجات حرارة عالية نسبياً ( $50^\circ\text{C}$ ) [8]، لذلك تم توظيفها لالتقاط جزء من الإشعاع الشمسي باستخدام توصيلات أنابيب مختلفة وموائع تشغيل متعددة، ونظراً لما تتميز به من البساطة وسهولة التنفيذ والتطبيق فقد حظيت المجمعات الشمسية المكونة من مواد الرصيف بالكثير من الإهتمام.

تم في البحث [1] دراسة الأداء الحراري لمجمع شمسي إسفلتي بطبقتي إسفلت مختلفتين، وأنابيب نحاسية ذات الشكل الأفعواني من خلال محاكاة عددية تم التحقق من صحتها تجريبياً، بناءً على هذا البحث تبين أن البارامترات الأكثر تأثيراً على أداء ASC هي الموصلية الحرارية للإسفلت والامتصاصية السطحية وعمق الأنبوب. ويعد دمج ثلاثة مجمعات مكونة من خرسانة اسمنتية مع أنابيب مصنوعة من الألمنيوم نظاماً فعالاً لتأمين الماء الساخن المنزلي [9]، وذلك بدون استخدام أي زجاج في الأعلى، أو أي عازل في الجزء الخلفي من المجمع، ويمكن تثبيت هذا النظام على السطح ويمكنه توفير مياه بدرجة حرارة متوسطة تتراوح ضمن المجال من  $36^\circ\text{C}$  إلى  $58^\circ\text{C}$ . ومن الممكن أيضاً استغلال الطاقة الشمسية باستخدام مجمعات حرارية في واجهة المبنى [10]، حيث تم إجراء دراسة بارامترية عددية حول البارامترات المؤثرة على فعالية هذه المجمعات، إذ لوحظ أن البارامترات الأكثر أهمية لتحسين الكفاءة هي مواد الامتصاص البديلة (مثل السيراميك والبوليمر والخرسانة) والطلاء اللوني، كما أن لامتصاصية السطح ومعدل التدفق ومساحة المجمع وطول الأنبوب تأثيرات كبيرة على فعالية المجمعات الشمسية المصنوعة من الخرسانة. وللحد من درجات الحرارة العالية للأرصفة تبين أن تركيب أنبوب بصف واحد يؤدي إلى خفض درجة الحرارة بمقدار  $5.5^\circ\text{C}$  [11]. تم في الدراسة [12] إجراء تحليل حراري للأرصفة المبردة لتقييم تأثيرها على البيئة الخارجية لمدينة لوس أنجلوس خلال ثلث مساحة المدينة مما أدى إلى التوقع بأنه يمكن عن طريق خفض درجة حرارة الهواء بمقدار  $1.5^\circ\text{C}$  أن ينخفض طلب المدينة على الكهرباء اللازمة للتكييف بما يقارب 100 ميغا وات ساعي.

وفقاً للمرجع [13] يمكن للمجمعات الشمسية المدمجة بالسقف أن تنتج كميات كبيرة من الماء الساخن والذي يعود بمنافع اقتصادية. يتضح من [14] أن الطاقة المحصول عليها من مجمع شمسي إسفلتي يستخدم الهواء كمائع عمل تستطيع تدوير عتفة رحيحة صغيرة الحجم وأعتبر فرق درجات الحرارة وحجم الهواء داخل الأنابيب أنها البارامترات الأساسية المؤثرة على الطاقة المولدة. أظهرت نتائج الدراسة [15] أن استخدام الأنابيب المتوازية في المجمع الشمسي الإسفلتي يؤدي إلى تسخين الماء حتى  $43^\circ\text{C}$  و  $21^\circ\text{C}$  في الصيف والشتاء على التوالي. أجري تحليلاً للتكلفة من قبل [16] حول إمكانية الحصول على الطاقة الحرارية من ASC وأثبتوا أن العوامل الرئيسية التي ينطوي عليها أداء ASC

تشمل عمق الأنبوب ودرجة حرارة سائل العمل. وللتقليل من تأثير الجزر الحرارية الحضرية (Urban Heat Island(UHI)) ومن خلال دراسة قطر الأنبوب وسرعة الماء الداخل كبارامترات أساسية لـ ASC تبين أنه يمكن خفض درجة الحرارة بمقدار 5 K [17]. في الدراسة [18] قُدِّمَ تنبؤ تحليلي بدرجات الحرارة عند أعماق مختلفة من الأرصفة الإسفلتية بالإضافة لتقديم حلول للتخفيف من UHI.

### أهمية البحث وأهدافه:

يهتم البحث الحالي في دراسة الأداء الحراري لمجمع شمسي اسفلتي منخفض التكلفة، وسهل التنفيذ في ظل غياب الدراسات المتعلقة بهذا النوع من المجمعات الشمسية محلياً. إذ يمكن استخدام هذا المجمع في مواقف السيارات أو أرصفة الشوارع ولا يتطلب أي زجاج أو عازل. بالإضافة لذلك يمتلك هذا المجمع تطبيقات أخرى لا تقتصر فقط على تأمين الماء الساخن، إذ يعتبر أحد الحلول المقترحة للحد من تأثير الجزر الحرارية الحضرية ويستخدم أيضاً كنظام لتدوير الجليد.

تم الاعتماد في هذا البحث على الدراسة العددية والتجريبية للمجمع الشمسي الاسفلتي لتحديد الكفاءة اليومية للمجمع، وكمية الطاقة الحرارية التي من الممكن الحصول عليها، بالإضافة إلى توزيع درجات الحرارة، مع الأخذ بعين الاعتبار تأثير التربة المجاورة والذي تم اهماله في الدراسات السابقة.

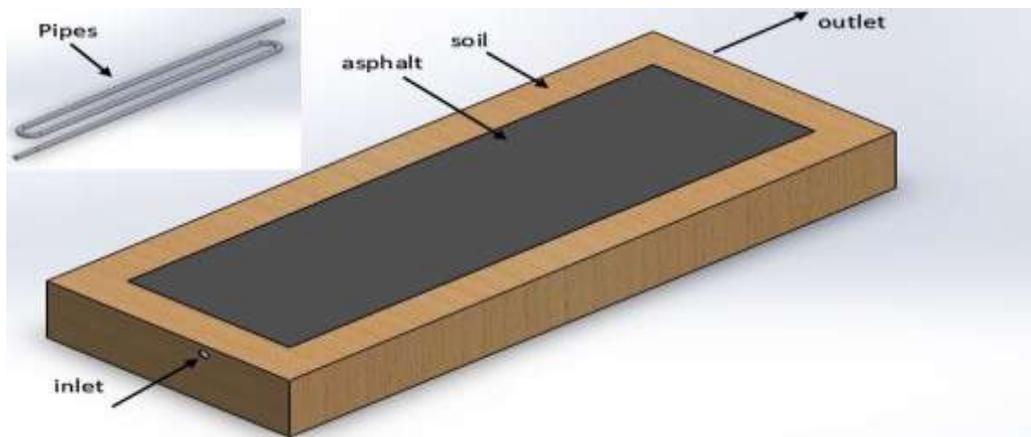
### طرائق البحث ومواده:

تم اجراء نمذجة عددية ثلاثية الأبعاد للمجمع الإسفلتي باستخدام برنامج Ansys Fluent 2020 والذي يُستخدم لإجراء محاكاة ديناميكية الموائع الحسابية (CFD Simulation) والمعتمد على طريقة الحجم المنتهية (Finite Volume Method)، ومن ثم تم التحقق من صحة النموذج تجريبياً.

#### 1. النمذجة العددية:

##### 1-1 تصميم النموذج:

من اجل التصميم الهندسي الذي يعتبر الخطوة الأولى، تم باستخدام برنامج التصميم الميكانيكي Solidworks، نلاحظ إن التصميم يأخذ بعين الاعتبار مجاورة التربة للإسفلت وهذا ما أشرنا إليه سابقاً، بناءً على ذلك فإن سطح المجمع فقط يتعرض للهواء المحيط. كما يظهر في الشكل (1).



الشكل (1): تصميم ومكونات المجمع.

بسبب عدم ثبات الإشعاع الشمسي، تم حل المشكلة في الوضع العابر (transient). حيث يتم حل جميع بارامترات التدفق وكمية الحرارة في نفس الوقت، دون افتراض التبسيط في طرق الحل، والنقطة المهمة هنا تكمن في أن الجدران الجانبية للمجمع لا تعتبر جدران أدياباتيكية كونها تتبادل الحرارة مع التربة المجاورة.

يبلغ طول المجمع 130 cm، العرض 40 cm، بمساحة سطح  $0.52 m^2$ ، أما بالنسبة للإرتفاع فقد تم مراعاة ارتفاع عينة مارشال والبالغ (6.35 cm) 2.5". طول الأنابيب 3.42 m، القطر الداخلي (3/4") 1.9 cm، القطر الخارجي 2.3 cm، عمق الأنابيب (المسافة بين مركز الأنابيب والسطح العلوي للمجمع) 2.5 cm، التباعد بين الأنابيب 6 cm. مائع العمل داخل الأنابيب هو الماء بمعدل تدفق 0.25 l/min.

يمكن بشكل عام تقسيم المجال الحسابي إلى منطقتين: منطقة صلبة ومنطقة سائلة. المنطقة الصلبة تتضمن اللوح الإسفلتي والأنابيب والتربة، والمنطقة السائلة المحتوية على الماء المتدفق الذي يعمل على امتصاص الطاقة الحرارية.

### 1-2 خصائص المواد:

إن التحقق من خصائص المواد، يعد أمراً مهماً جداً للنمذجة الناجحة، تتراوح امتصاصية الاسفلت ضمن المجال (0.7-0.94) [18]، ويعتمد هذا الاختلاف على بنية وأنواع الاسفلت وعلى تقادم ولون سطح الاسفلت أيضاً. و يبلغ معامل التوصيل الحراري للإسفلت بحدود [W/m.K] (0.74-2.89) [1].

تعتمد الموصلية الحرارية للتربة على تكوين جزيئاتها، وعلى مقدار تشبعها بالماء، والتربة المستخدمة في هذا البحث عبارة عن مزيج من التريتيتين الحمراء والكلسية مع نسبة منخفضة الرطوبة، تتراوح الموصلية الحرارية لهذه التربة بين [W/m.K] (0.47-2.56) بناءً على رطوبتها وكثافتها [19]، تتراوح الإمتصاصية السطحية للتربة بين (-0.05-0.6) [20]، كما إنها تعتمد على محتواها من الرطوبة وتكوينها وطول موجة الإشعاع المتلقى.

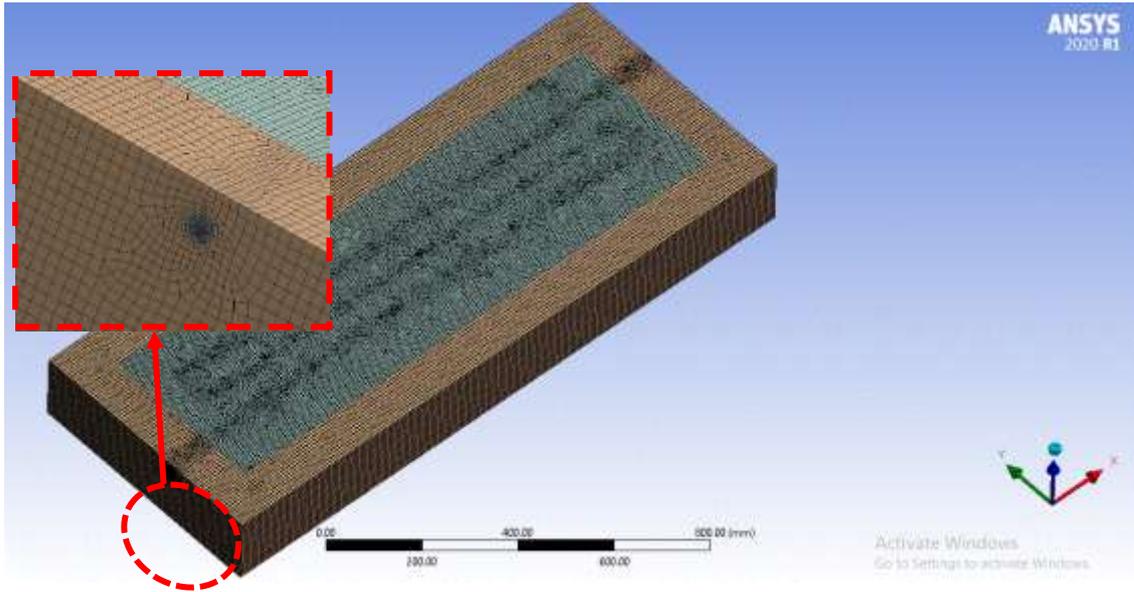
تم افتراض أن التربة والاسفلت مادتين متجانستين وأن خصائصهما ثابتة ضمن كامل المجال، كما تم افتراض أن خصائص المواد التي تعتمد على درجة الحرارة، تعتبر ثابتة مثل الكثافة والسعة الحرارية النوعية، نظراً لأن فرق درجة الحرارة ليس مرتفعاً ويمكن إهمال تباين هذه الخصائص. الأنابيب مصنوعة من الفولاذ المغلفن بطبقة من الزنك لمنع التآكل والصدأ، وهي شائعة الاستعمال في تمديدات المياه. جميع خصائص المواد المستخدمة في هذا البحث موضحة في الجدول 1.

الجدول (1) خصائص المواد المستخدمة في المحاكاة.

المادة	K(W/m.k)	$\rho(\frac{kg}{m^3})$	Cp(J/kg.K)	$\alpha$
إسفلت [1]	1.8	2238	920	0.83
تربة [19,20]	1	1500	1300	0.3
فولاذ مغلفن [21]	60.2	7849	460	-

### 1-3 إنشاء التقطيعات:

يجب أن يكون النموذج الهندسي مقطع وموزع إلى عناصر صغيرة قبل حل المعادلات، ويعد تقدير التقطيع للمجال الهندسي أمراً بالغ الأهمية لتحقيق نتائج موثوقة. تم استخدام عنصر سداسي السطوح (hexahedral) لتغطية المناطق بأكملها بشكل مناسب، الشكل (2). يحتوي النموذج على 1161568 عنصراً.



الشكل (2): تقطيع المجمع الى العناصر المنتهية.

#### 4-1 المعادلات الحاكمة:

يوجد عدد قليل من المعادلات الفيزيائية التي تصف ASC، وتعد معادلات انتقال الحرارة وتدفق المائع هي المعادلات الحاكمة، ومعادلة تدفق المائع هي معادلة الاستمرار (continuity) (1) وقوة الدفع هي معادلة نافيه-ستوكس (Navier-Stokes momentum) (2). وباعتبار تدفق الماء الثابت وغير قابل للانضغاط تختصر المعادلات إلى:

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad i = 1,2,3 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu \left( \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j^2} \right) \quad i = 1,2,3 \text{ \& } j = 1,2,3 \quad (2)$$

حيث أن:

$\mu$ : اللزوجة الديناميكية  $[\frac{kg}{m.s}]$ .

P: الضغط [pa].

U: سرعة المائع  $[\frac{m}{s}]$ .

t: الزمن [s].

X: البعد المكاني [m].

$\rho$ : الكثافة  $[\frac{kg}{m^3}]$ .

تعتبر معادلة الطاقة معادلة رئيسية أيضاً، لأن انتقال الحرارة يحدث بعدة أشكال، يحدث التوصيل الحراري بين الأنابيب والاسفلت وأيضاً بين الاسفلت والترية، ويحدث الحمل الحراري بين سطح الاسفلت والهواء وبين جدران الأنابيب والماء، بالإضافة للإشعاع على سطح الاسفلت والترية. ومن أجل التحليل الحراري للمجمع والتنبؤ بتوزيع درجات الحرارة تم حل معادلة الطاقة من أجل كامل المجال، وتعطى معادلة الطاقة بالشكل التالي:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} + U_j \left( \frac{\partial T_i}{\partial x_j} \right) = \frac{k}{\rho C_p} \left( \frac{\partial^2 T_i}{\partial x_j^2} \right) \quad (3)$$

حيث أن:

$$C_p: \text{السعة الحرارية بثبات الضغط } \left[ \frac{J}{kg.K} \right].$$

T: درجة الحرارة [K].

$$k: \text{عامل التوصيل الحراري } \left[ \frac{W}{m.K} \right].$$

$$\rho: \text{الكثافة } \left[ \frac{kg}{m^3} \right].$$

### 1-5 الشروط الحدية :

هناك عدة شروط حدية معروفة فيما يتعلق بمناطق المدخل والمخرج وأيضاً جدار الاتصال بين الماء والأنابيب. والطاقة وقوة الدفع والكتلة للحدود من أجل حل المعادلات (3)، (2)، (1) موضحة في الجدول (2).

الجدول (2): الشروط الحدية لجدران المجمع ومدخل ومخرج الماء.

الحد	الكتلة وقوة الدفع	الطاقة
مدخل الماء	$u_{in} = U_0$	$=T_0$
$T_{in}$		
مخرج الماء	$P_{out} = P_{atm}$	-
سطح الاسفلت، سطح التربة	جدار غير منزلق (No-slip wall)	$I = I(t)$
الجدران الخارجية للأنابيب	سطح بيني (interface)	تدفق حراري (Heat flux)
الجدران الجانبية للاسفلت	سطح بيني (interface)	تدفق حراري (Heat flux)
الجدران الداخلية للأنابيب	جدار غير منزلق (No-slip wall)	تدفق حراري (Heat flux)
الجدران الجانبية للتربة	جدار غير منزلق (No-slip wall)	درجة حرارة
ثابتة (adiabatic)		

### 1-5-1 السطح العلوي للمجمع:

تحدث جميع أشكال انتقال الحرارة على سطح المجمع، حيث يتلقى السطح إشعاع طويل الموجة وقصير الموجة من الشمس والغلاف الجوي، ويوجد الهواء وهبوب الرياح على سطح المجمع فتنتقل الطاقة بالحمل الحراري الحر او القسري، وتنتقل الحرارة بالتوصيل من الاسفلت الى الانابيب والى التربة المحيطة بالمجمع.

انتقال الحرارة بالإشعاع هو من النوع قصير الموجة، بالرغم من أن سطح المجمع أسود إلا أنه لا يمكن اعتباره جسم أسوداً مثالياً، فعندما يصل الإشعاع الشمسي إلى سطح المجمع ينعكس جزء منه والنسبة العالية يتم امتصاصها، بسبب الامتصاصية المرتفعة للاسفلت ويعطى التدفق الحراري بالإشعاع بالعلاقة:

$$q_I = I_{rr} \cdot \alpha \quad (4)$$

حيث:

$$I_{rr}: \text{مقدار الإشعاع الشمسي } \left[ \frac{W}{m^2} \right].$$

$\alpha$ : امتصاصية السطح

$$q: \text{التدفق الحراري بالإشعاع } \left[ \frac{W}{m^2} \right].$$

من اجل محاكاة الإشعاع الشمسي تم استخدام نموذج الحمل الشمسي (solar load model) الموجود في برنامج الـ Ansys Fluent، والذي يسمح بتقدير الاشعاع الشمسي المباشر والمبعثر وفقاً للموقع العالمي ( التاريخ، الوقت، شروط الطقس، توجيه المجمع، خط الطول، خط العرض)، موقع العمل هو المخزم الفوقاني، حمص، سوريا. الإحداثيات الهندسية لموقع العمل: خط الطول = 37.1981953، وخط العرض = 34.8062095. وتمت محاكاة الاشعاع الشمسي الساقط لصيف عام 2022، يوم 20 آب ويوم 31 آب، من الساعة 6 A.M الى الساعة 5 P.M. يبعث سطح المجمع إشعاع طويل الموجة بالاعتماد على درجة حرارته والذي يدعى بالإشعاع طويل الموجة المنصرف (outgoing longwave radiation) [22]. وهذا الإشعاع الطاقى يتم وصفه من قبل قانون ستيفان . بولتزمان:

$$q_{olr} = \varepsilon \sigma T_{surf}^4 \quad (5)$$

حيث:

$\varepsilon$ : انبعاثية الاسفلت.

$\sigma$ : ثابت ستيفان . بولتزمان ( $\sigma = 5.68 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ )

$T_{surf}$ : درجة حرارة السطح [K].

إن الغلاف الجوي يمتص ويبعث الإشعاع مرة أخرى إلى الأرض، عن طريق ما يسمى بالإشعاع طويل الموجة المنحدر من الغلاف الجوي (atmospheric downwelling longwave radiation) [22] والذي يحسب من العلاقة (6):

$$q_{dtr} = \varepsilon \sigma T_{sky}^4 \quad (6)$$

توجد عدة نماذج لحساب  $T_{sky}$  مثل اعتبارها أقل بـ 6 درجات من درجة حرارة الهواء الجاف ( $T_{db}$ ) [23]، وافترض بعض الباحثين أن  $T_{sky} = T_{air}$  [22] وهذا ما تم افتراضه في هذا البحث.

بجمع المعادلتين (5) و (6) سيكون صافي انتقال الحرارة بالإشعاع من وإلى المجمع:

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{surf}^4 - T_{sky}^4) \quad (7)$$

يعبر عن انتقال الحرارة بالحمل بسبب هبوب الريح على سطح المجمع والتربة بالمعادلة (8):

$$q_{conv} = h_{conv} (T_{surf} - T_{air}) \quad (8)$$

لحساب معامل الحمل الحراري نستخدم نموذج بينز للحمل المختلط [1],[23]:

$$\text{If } v \leq 5 \text{ m/s} \quad h_{conv} = 5.6 + 4v$$

$$\text{If } v > 5 \text{ m/s} \quad h_{conv} = 7.2v^{0.78}$$

حيث أن  $v$  سرعة الرياح.

معدل الحرارة المنقلة بالتوصيل الحراري لأسفل المجمع نستطيع حسابه وفقاً لقانون فورييه:

$$q_{cond} = k \frac{T_{surf} - T_d}{d} \quad (9)$$

حيث:

$d$ : العمق [m].

$T_d$ : درجة الحرارة عند العمق  $d$  [°C].

أخيراً إذا تم تلخيص جميع معادلات الشروط الحدية يمكننا وصف انتقال الحرارة الكلي لسطح المجمع بإحدى العلاقتين:

$$q_{ASC,surf} = q_I - q_{rad} - q_{conv} - q_{cond} \quad (10)$$

$$q_{ASC,surf} = I_{rr} \cdot \alpha - \varepsilon \sigma (T_{surf}^4 - T_{sky}^4) - h_{conv} (T_{surf} - T_{air}) - k \frac{T_{surf} - T_d}{d} \quad (11)$$

### 1-5-2 سطح التربة:

يملك سطح التربة شروطاً مشابهاً تماماً لشروط سطح المجمع مع اختلاف وحيد تمت يتمثل في أن التربة تملك امتصاصية منخفضة، مما يعني أن نسبة عالية من الإشعاع الشمسي ستعكس مرة أخرى إلى الغلاف الجوي.

### 1-6 الشرط الابتدائي:

يخضع المجمع لظروف حرارية مختلفة طوال اليوم وتتنخفض درجة الحرارة في الليل بسبب عدم وجود اشعاع شمسي، وقبل شروق الشمس، يمكن تقدير درجة حرارة السطح الدنيا اليومية والتي يمكن صياغتها بناءً على درجة الحرارة الدنيا للهواء المحيط. وللحصول على بروفائل درجة حرارة الخرسانة الاسفلتية تم اعتماد مجموعة المعادلات التجريبية [16] التالية:

$$T_{surf(min)} = 0.89T_{air(min)} + 5.2 \quad (12)$$

حيث أن  $T_{surf}$ : درجة حرارة سطح الاسفلت [K].

تعطى درجة حرارة الاسفلت عند أعماق مختلفة قبل تدفق الماء في الأنابيب [20] باستخدام درجة الحرارة الدنيا للسطح والتي يمكن التعبير عنها على النحو التالي:

$$T_{depth} = T_{surf(min)} + 3.7 \times 10^2 d - 6.29 \times 10^{-5} d^2 \quad (13)$$

حيث  $d$ : عمق النقطة المطلوبة [m].

تم اعتماد هاتين المعادلتين التجريبتين كشرط أولي حراري للنمذجة العددية ثلاثية الأبعاد لـ ASC.

### 1-7 أداء المجمع الشمسي الإسفلتي:

إن فرق درجة حرارة الماء عبر المجمع هو أحد البارامترات الرئيسية لتقييم أداء المجمع، ويوجد هذه القيمة يتم حساب الطاقة الممتصة في واحدة الزمن من واحدة المساحة بالعلاقة الآتية:

$$\dot{q}_{harv} = \dot{m} C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (14)$$

حيث:

$\dot{m}$ : معدل التدفق الكتلي  $[\frac{kg}{s}]$ .

$C_p$ : السعة الحرارية النوعية للمياه تحت ضغط ثابت  $[\frac{J}{kg.K}]$ .

$(T_{out} - T_{in})$ : فرق درجات الحرارة بين دخول وخروج الماء الى انابيب المجمع.

تعد الكفاءة الحرارية معلمة رئيسية للتحقق من أداء ASC بالإضافة إلى توزيع درجة الحرارة، يتم الحصول على الكفاءة الحرارية كنسبة كمية الطاقة الممتصة  $\dot{q}_{har}$  إلى الكمية الإجمالية للإشعاع الشمسي المستلم:

$$\eta = \frac{\dot{q}_{harv}}{I_{rr} \cdot A_c} \quad (15)$$

حيث:

$I_{rr}$ : الإشعاع الشمسي  $[\frac{W}{m^2}]$ .

$A_c$ : مساحة سطح المجمع الاسفلتي  $[m^2]$ .

تم حساب الطاقة الممتصة  $q_{ha}$  والإشعاع الشمسي على فترات زمنية مدتها دقيقتين، وبالنسبة للكفاءة اليومية فإنها تعطى بالعلاقة التالية:

$$\eta_d = \frac{q_{harv,d}}{I_{rr,d} \cdot A_c} \quad (16)$$

## 2- الدراسة التجريبية والتحقق من صحة النموذج:

تم تصميم نموذج تجريبي مطابق من حيث الأبعاد والخصائص الهندسية للنموذج المحاكى وفيما يلي نبين المكونات وأجهزة القياس المستخدمة ومن ثم شروط التجربة:

### 1-2 المكونات وأجهزة القياس:

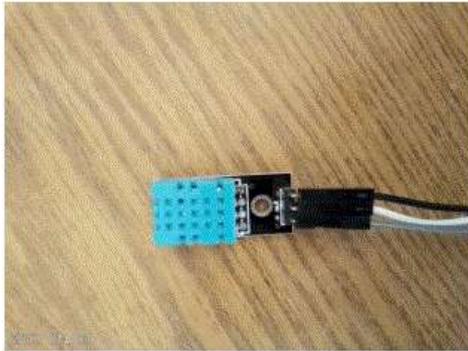
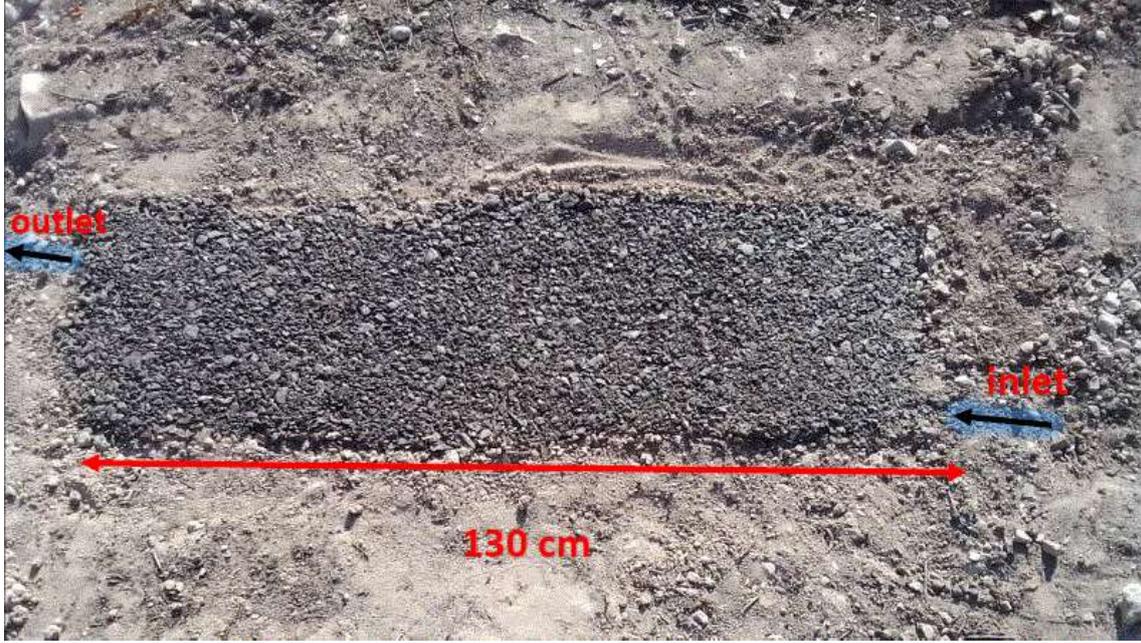
تم بداية تحضير التربة لتشكيل المجمع الإسفلتي ومن ثم وضع أنبوب أفعواني الشكل مصنوع من الحديد بطول 3.42 m. الشكل (3).

تم تحضير الإسفلت الساخن في الموقع حيث بلغت نسبة الرابط البيتوميني حوالي 6% من الحجم الكلي للخلطة الاسفلتية المستخدمة، والشكل (4) يوضح الشكل النهائي للمجمع، مع ملاحظة ان دارة الماء هي دارة مفتوحة والماء يخرج إلى من المجمع الى الضغط الجوي، ويتم تغذية المجمع بالماء عن طريق أنابيب بلاستيكية معزولة تحت الأرض.

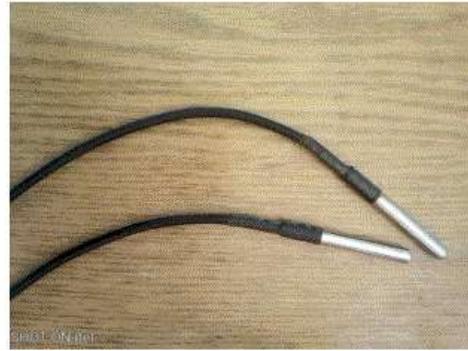


الشكل (3): الشكل العام للمجمع الاسفلتي مع توضع الانابيب.

تم وضع حساسي درجة حرارة من نوع DS18B20، عند مدخل ومخرج المجمع لقياس درجة حرارة دخول وخروج الماء، وتم استخدام حساس حرارة ثالث لقياس درجة حرارة الوسط المحيط من نوع DHT11 تم وضعه في منطقة مظلمة بالقرب من المجمع، وقياس وضبط تدفق الماء الداخل إلى المجمع تم استخدام حساس تدفق نوع YF-201. ولقراءة وتخزين القيم الواردة من الحساسات كل دقيقتين، تم استخدام متحكم صغري أردوينو أونو (Arduino Uno Micro Controller) وتم برمجة المتحكم بلغة C لتحقيق هذا الغرض، وتمت مراقبة العملية بالكامل بواسطة الكمبيوتر، والشكل (4) يوضح مكونات دارة التحكم وأجهزة القياس.



(b)



(a)



(d)

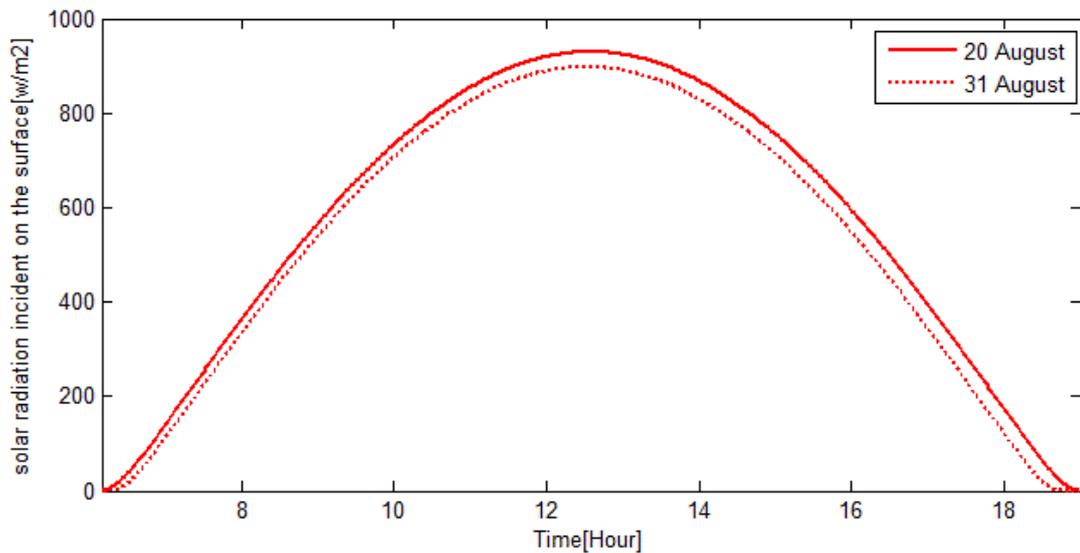


(c)

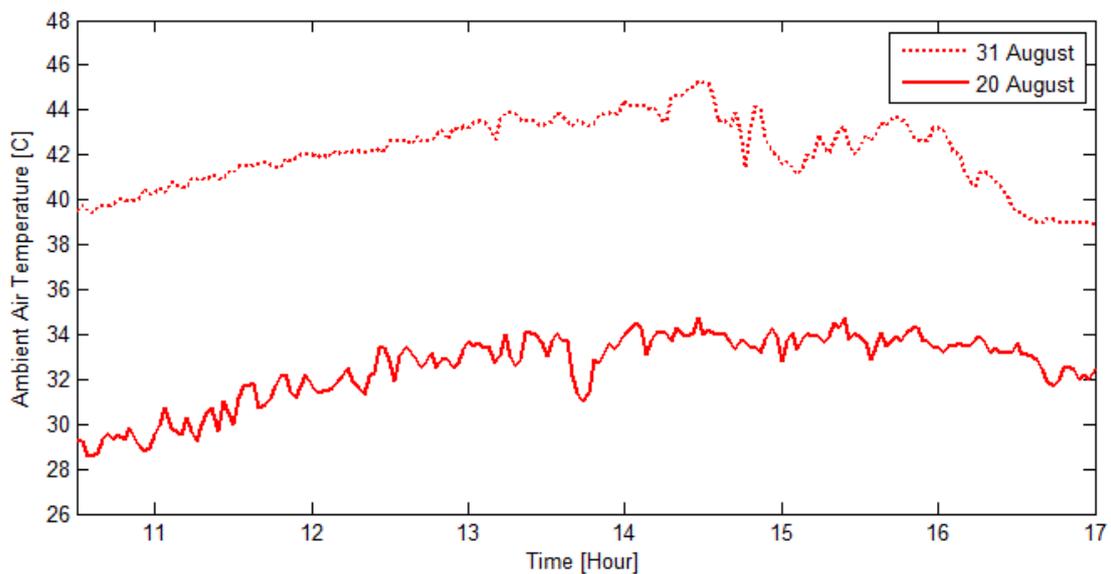
الشكل(4): النموذج التجريبي و مكونات دائرة التحكم: (a) حساسات DS18B20 (b) حساس DHT11 (c) حساس YF-201 (d) المتحكم الصغري أردوينو أونو.

**2-2 شروط التجربة:**

تم إختيار موقع المجمع بحيث يمكنه استقبال الإشعاع الشمسي خلال ساعات النهار، وأجريت التجربة في الوسط الخارجي يومي 20 و 31 آب، حيث تم تغذية المجمع بالماء بمعدل تدفق ثابت 0.25 l/min طيلة فترة الاختبار من الساعة 10:30 A.M إلى الساعة 5 P.M، وللمحافظة على درجة حرارة ثابتة قدر الإمكان للماء الداخل فقد تم عزل خزان الماء باستخدام عازل حراري، سعة الخزان المستخدم 250 لتر وتم وضعه في غرفة المراقبة، سرعة الرياح الوسطية 2.77 m/s بناء على بيانات الأرصاد الجوية لموقع العمل. تم الاعتماد على القيم التي يوفرها نموذج الحمل الشمسي في برنامج المحاكاة الشكل (6) لقياس شدة الإشعاع الشمسي، وتم قياس درجة حرارة الوسط المحيط خلال فترة الاختبار تم قياسها باستخدام الحساس المذكور سابقاً كما في الشكل (7).



الشكل (6): شدة الإشعاع الشمسي ليومي 20 و 31 آب.



الشكل (7): درجة حرارة الهواء المحيط المقاسة أثناء التجربة.

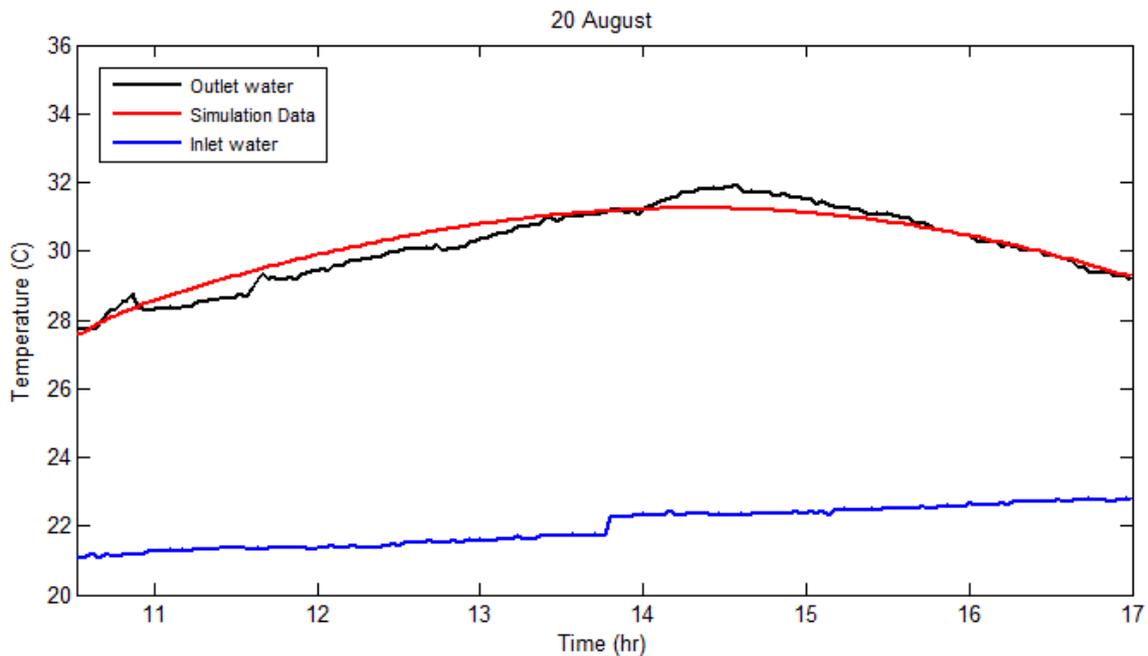
بالرغم من أن شدة الاشعاع الشمسي متقاربة ولكن نلاحظ وجود فرق كبير بدرجات الحرارة (حوالي 10 درجات مئوية)، وسبب ذلك هو المرتفع الجوي الذي كان سائداً يوم 31 آب، ويتضح ذلك من سرعة الرياح ونسبة الرطوبة لكلا اليومين:

20 آب: سرعة الرياح الوسطية 28 Km/h الرطوبة 45%

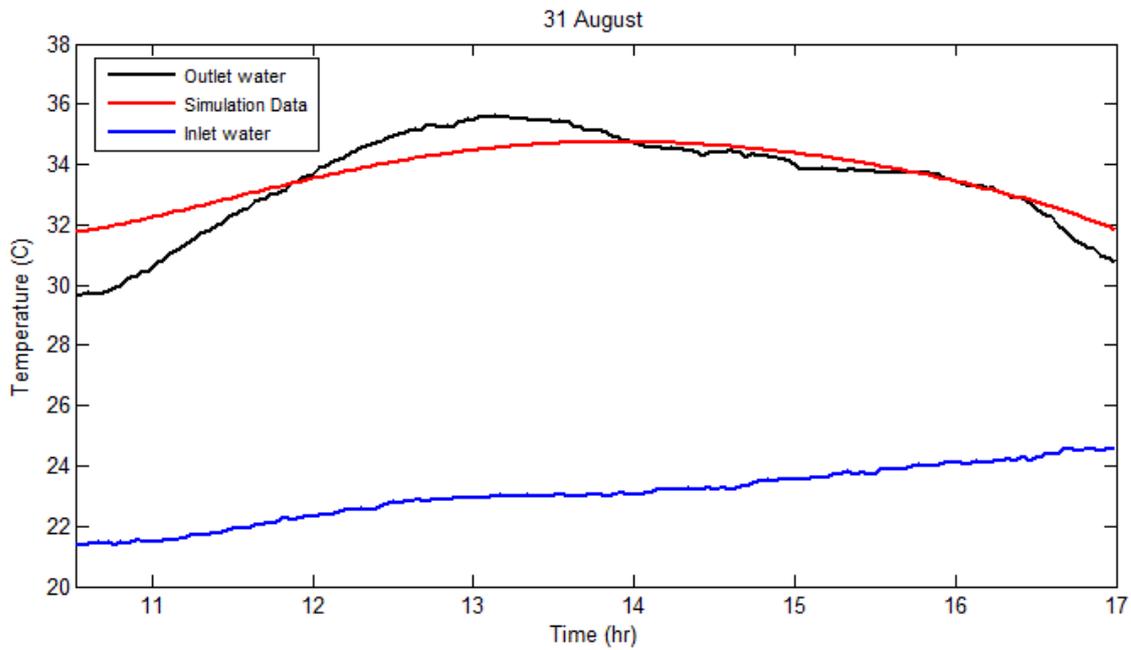
31 آب: سرعة الرياح الوسطية 10 Km/h الرطوبة 10%

### النتائج والمناقشة:

يبين الشكلين (8) و (9) تغير درجة حرارة دخول وخروج الماء عبر المجمع تبعاً للزمن تجريبياً، ومقارنتها مع نتائج المحاكاة، تظهر النتائج ازدياد درجة حرارة دخول الماء بمقدار  $1.75^{\circ}\text{C}$ ,  $3.25^{\circ}\text{C}$  خلال فترة التجربة يومي 20 و 31 آب على التوالي، وتعتبر هذه الزيادة مقبولة إذا ما أخذنا بعين ارتفاع درجة حرارة الهواء المحيط. أما بالنسبة لدرجة حرارة خروج الماء فتبين أنها تتطابق تقريباً مع قيم المحاكاة، وهذا يدل على الإختيار الصحيح للخصائص الحرارية للمواد. بلغت القيمة العظمى لدرجة حرارة خروج المياه  $31.94^{\circ}\text{C}$  ليوم 20 آب وبفارق  $9.63^{\circ}\text{C}$  والقيمة العظمى يوم 31 آب  $35.63^{\circ}\text{C}$  وبفارق  $12.63^{\circ}\text{C}$ .

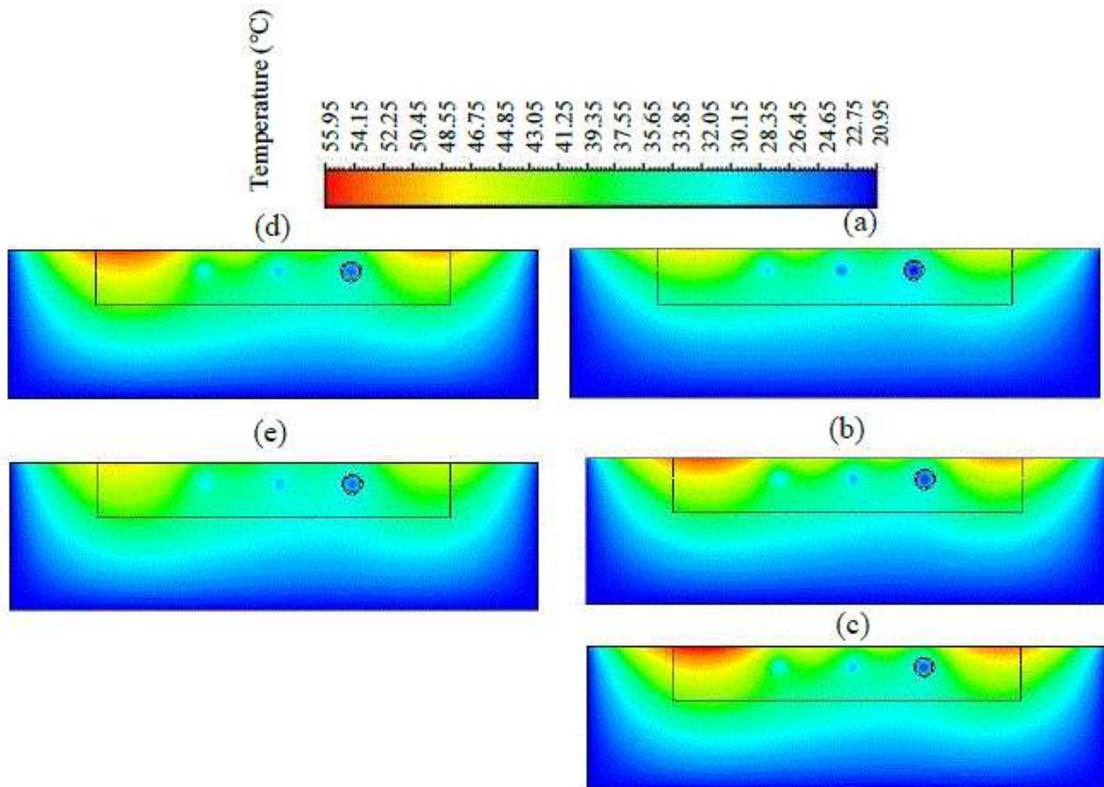


الشكل (8): تغير درجة حرارة دخول وخروج الماء مع الزمن ليوم 20 آب.



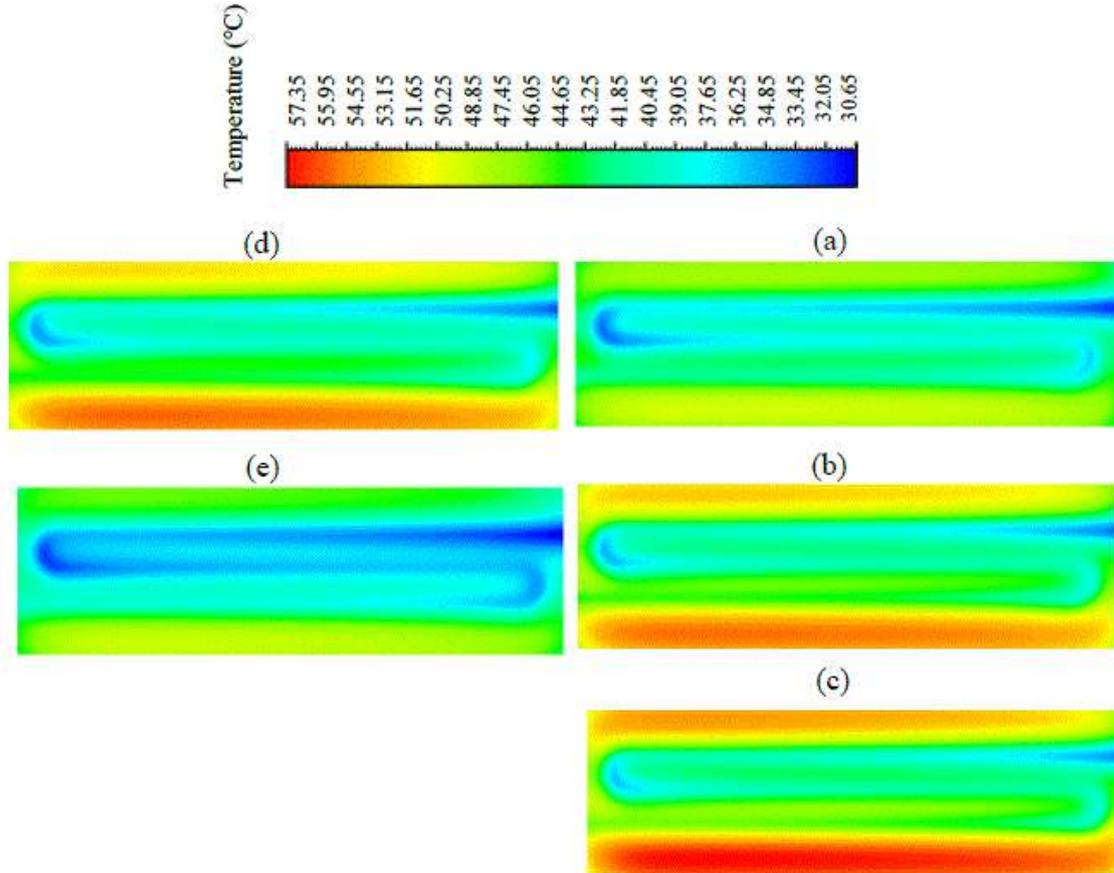
الشكل (9): تغير درجة حرارة دخول وخروج الماء مع الزمن ليوم 31 آب.

يختلف توزيع درجات الحرارة في ساعات مختلفة من التجربة، يوضح الشكل (10) بروفائل درجة الحرارة لخمس ساعات مختلفة، نلاحظ أن أقصى تدفق حراري للإشعاع الشمسي يحدث بين الساعة 12 و 2 حيث درجة الحرارة العظمى تتبع المجال المحاكى بأكمله. وكما هو متوقع في الساعات التالية، يمكن رؤية انخفاض في درجة الحرارة في الساعات المتأخرة من اليوم بسبب انخفاض شدة الإشعاع الشمسي لكن المياه المتدفقة لاتزال تمتص الحرارة المخزنة في الاسفلت والتربة.



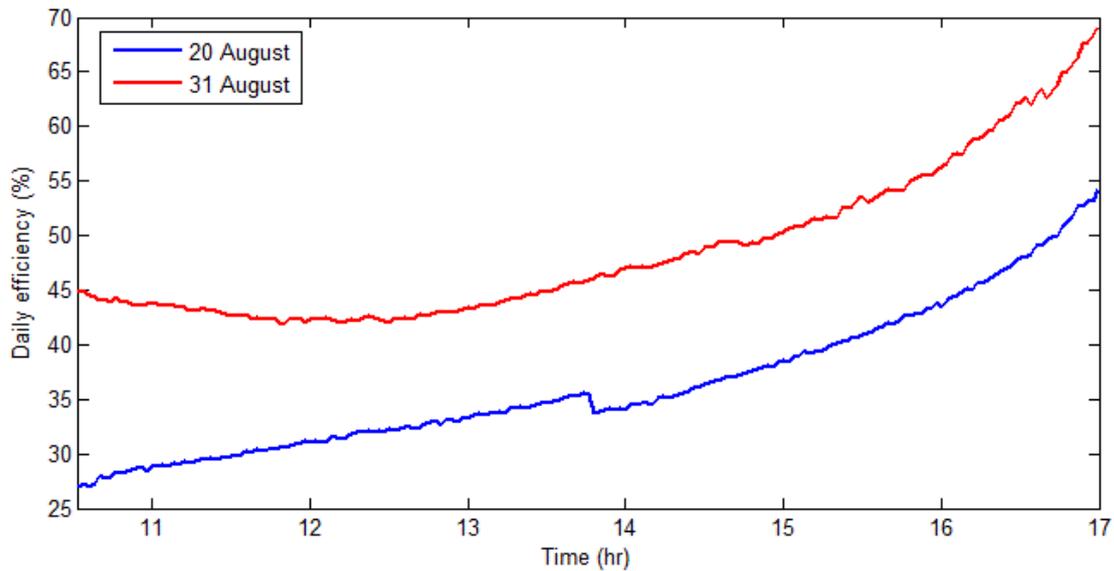
الشكل (10): بروفائل درجة حرارة النموذج: (a) 10:30 hr (b) 12:00 hr (c) 13:30 hr (d) 15:00 hr (e) 16:30 hr.

يبين الشكل (11) بروفائيل درجة حرارة سطح المجمع لخمس ساعات مختلفة أيضاً، نلاحظ اختلاف توزيع درجات الحرارة مع الزمن وسبب ذلك اختلاف شدة الإشعاع الشمسي الساقط على سطح المجمع، يمكننا أن نرى بوضوح أثر التبريد الحاصل من منطقة الدخول الى منطقة الخروج وكيف أنه يتناقص بالاقتراب من منطقة الخروج وسبب ذلك ارتفاع درجة حرارة الماء تدريجياً كلما اقترب من هذا المنطقة نتيجة للتبادل الحراري الحاصل مع الاسفلت. بالرغم من التبريد الحاصل الا أن درجة حرارة سطح المجمع في بعض المناطق بلغت حوالي  $58^{\circ}\text{C}$  (الشكل 11-ع) ويعود السبب إلى انخفاض معامل التوصيل الحراري للإسفلت.



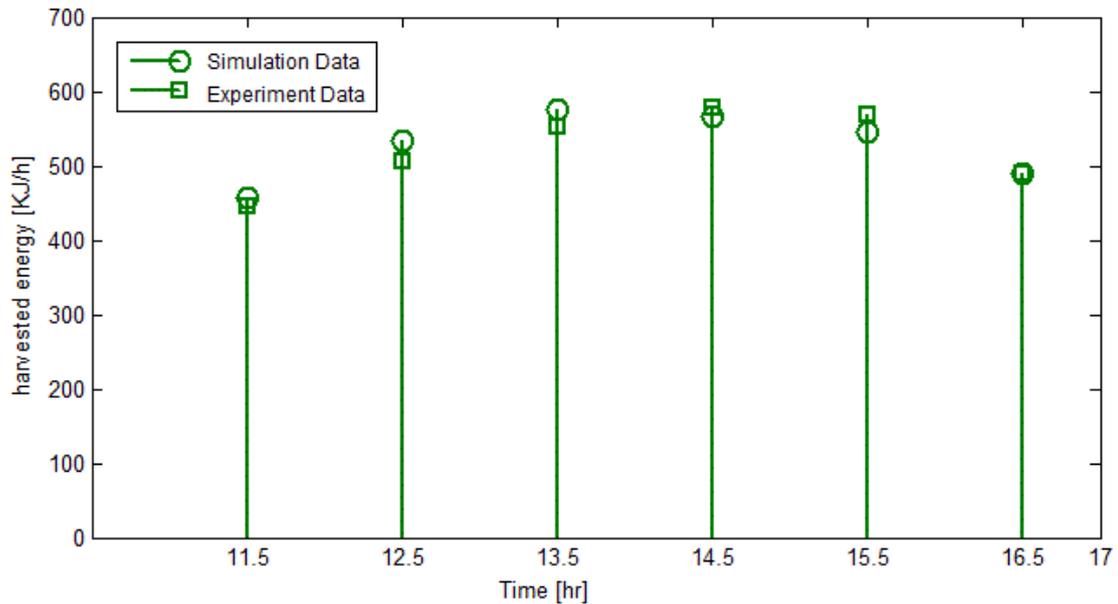
الشكل (11): بروفائيل درجة حرارة سطح المجمع: (a) 10:30 hr (b) 12:00 hr (c) 13:30 hr (d) 15:00 hr (e) 16:30 hr.

يبين الشكل (12) الكفاءة اليومية للمجمع كتابع للزمن، إذ نرى بوضوح تزايد الكفاءة مع مرور الوقت خلال النهار كما نلاحظ أن الكفاءة لا تتأثر مباشرة بانخفاض الإشعاع الشمسي في الساعات الأخيرة من النهار، ويعود سبب ذلك إلى أن درجة حرارة الماء عند مخرج المجمع لا تتخفف مباشرة لأنه لا يزال هناك حرارة مخزنة في الاسفلت والتربة، الذين يشكلان خزان حراري ويبرهن ذلك ما نراه في الشكل (10-ع). بلغت الكفاءة اليومية الأعظمية % 65.37 و % 69 ليومي 20 و 31 آب على التوالي، عند الساعة الخامسة مساءً، وهي ميزة إضافية لهذه المجمعات.

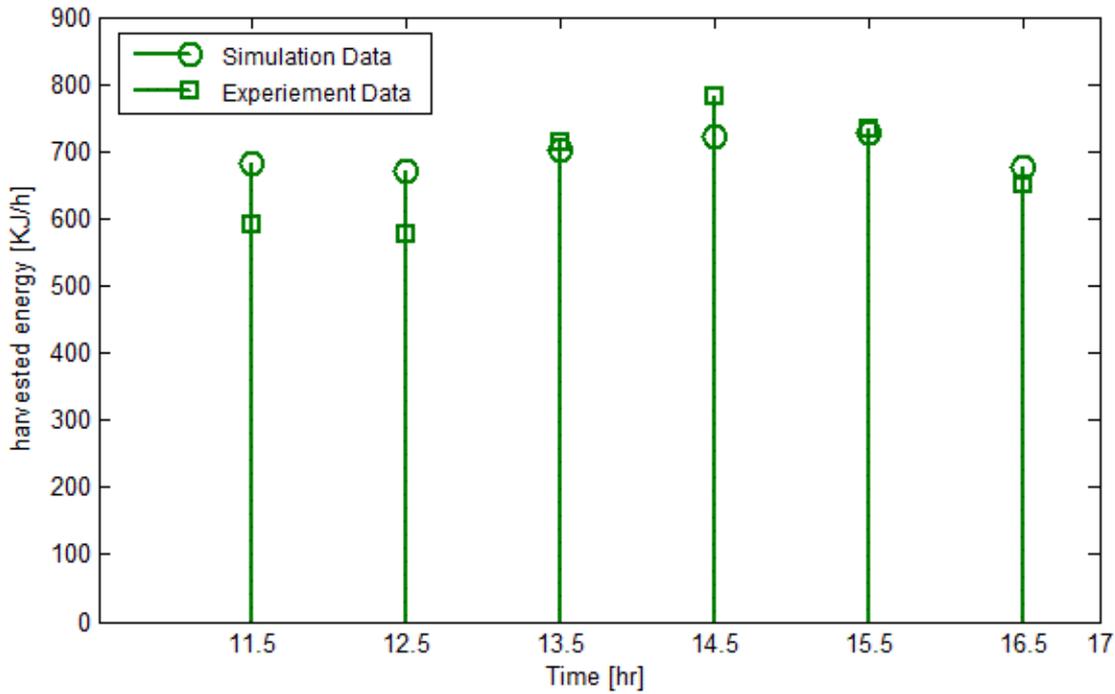


الشكل (12): الكفاءة الساعية واليومية للمجمع كتابع للزمن.

تبين الأشكال (13) و (14) كمية الطاقة الحرارية الممتصة بوحدة الكيلو جول ساعي حيث تم حسابها خلال كل ساعة من التجربة ومقارنتها مع القيم الناتجة عن المحاكاة العددية. نلاحظ أن هناك فارق بسيط بين القيم التجريبية والقيم العددية، كمية الطاقة الحرارية الساعية الأعظمية بلغت 800 kJ/h والأصغرية 578 kJ/h و 444 kJ/h و 580 kJ/h ليومي 20 و 31 آب على التوالي.



الشكل (13): الطاقة الحرارية الممتصة كل ساعة ليوم 20 آب.



الشكل (14): الطاقة الحرارية الممتصة كل ساعة ليوم 31 آب.

إن التقلبات في النتائج التجريبية ناتجة عن الظروف التجريبية والخطأ في أجهزة القياس. توجد اختلافات صغيرة بين نتائج التجربة والمحاكاة التي ترجع إلى الافتراضات المبسطة ومع ذلك فإن الاتجاه المتوقع بواسطة نمذجة CFD يتبع القيم التجريبية، الافتراض التبسيطي الأول هو أن الإسفلت والتربة المجاورة تعتبر مواد متجانسة، ثانياً تعتبر الخصائص الحرارية للمواد مستقلة عن اختلاف درجات الحرارة، المصدر الآخر لهذا الاختلاف ناتج عن حساسات درجة الحرارة التي تقيس درجة حرارة نقطة واحدة في المجال، لكن في المحاكاة تحسب درجات الحرارة بتقنيات مختلفة، على سبيل المثال يتم قياس درجة حرارة المخرج من خلال طريقة متوسط المساحة التي تحدد متوسطات درجات حرارة المخرج بناء على مساحة عناصره. بشكل عام مع المقارنة تتحقق نتائج التجربة من صحة النموذج المحاكى بوضوح.

### الاستنتاجات والتوصيات:

تم التوصل من هذا البحث إلى الاستنتاجات الآتية:

1. تبين من خلال نتائج الدراسة العددية والتجريبية بصحة النموذج العددي، وأهمية النمذجة الحسابية لديناميكا الموائع كأداة دقيقة لمحاكاة عمليات انتقال الحرارة وتدفق الموائع في المجمعات الإسفلتية.
2. تم الحصول على فرق درجة حرارة أعظمي مقداره  $12.63^{\circ}\text{C}$  وطاقة حرارية مقدارها  $800 \text{ KJ/h}$  من مجمع شمسي إسفلتي بمساحة سطحية  $0.52 \text{ m}^2$ ، وبناءً على ذلك نوصي بالتطبيق الفعلي لفكرة المجمعات الإسفلتية على مساحات واسعة من أجل الحصول على كميات كبيرة من الطاقة الحرارية، التي يمكن الاستفادة منها في عدة تطبيقات: (الماء الساخن، إعادة شحن آبار جيوحرارية، تشغيل آلات التبريد الامتصاصية..).

3. اظهر منحني الكفاءة اليومية في الساعات الأخيرة، أن الاشعاع الشمسي ينخفض بينما المردود يزداد لأن درجة حرارة الماء الخارج لا تتأثر مباشرةً بانخفاض الاشعاع الشمسي، والسبب هو التخزين الحراري في الاسفلت والترتية، ويعتبر ذلك ميزة اضافية لهذه المجمعات.

#### التوصيات:

1. نوصي بدراسة الجدوى الاقتصادية من استخدام تقنية المجمعات الاسفلتية وفقاً للشروط المناخية لقطرنا.
2. نوصي بدراسة تأثير إدخال الأنابيب ضمن القميص الاسفلتي على الاجهادات الحرارية والميكانيكية التي يتعرض لها القميص الاسفلتي نتيجة الحمولات المطبقة عليه.

#### References:

1. Guldentops, G., Nejad, A.M., Vuye, C., Van den Bergh, W., Rahbar, N., *Performance of a pavement solar energy collector: Model development and validation*. Appl. Energy, 63, 2016, 180–189 .
2. Papadimitriou, C.N., Psomopoulos, C.S., Kehagia, F., *A review on the latest trend of solar pavements in urban environment*. Energy Proc, 157, 2018, 945–952.
3. Guo, Su, He, Yi, Pei, Huanjin, Wu, Shuyan, *The multi-objective capacity optimization of wind-photovoltaic-thermal energy storage hybrid power system with electric heater*. Sol. Energy ,195,2020, 138–149.
4. Benammar, S., Tee, K.F., *Structural reliability analysis of a heliostat under wind load for concentrating solar power*. Sol. Energy ,181, September 2018 , 43–52.
5. Esen, H., Ozgen, F., Esen, M., Sengur, A., *Artificial neural network and wavelet neural network approaches for modelling of a solar air heater*. Expert Syst. Appl, 36 (8), 2009, 11240–11248.
6. Touaba, O., Ait Cheikh, M.S., Slimani, M.E.A., Bouraiou, A., Ziane, A., Necaibia, A., Harmim, A., *Experimental investigation of solar water heater equipped with a solar collector using waste oil as absorber and working fluid*. Sol. Energy, 199, February 2020, 630–644.
7. Pascual-Munoz, P., Castro-Fresno, D., Serrano-Bravo, P., Alonso-Estebanez, A., *Thermal and hydraulic analysis of multilayered asphalt pavements as active solar collectors*. Appl. Energy, 111, 2013, 324–332.
8. Diefenderfer, B.K., Al-Qadi, I.L., Diefenderfer, S.D., *Model to predict pavement temperature profile: Development and validation*. J. Transp. Eng, 132 (2), 2006, 162–167.
9. Chaurasia, P.B.L., *Solar water heaters based on concrete collectors*. Energy, 25 (8), 2000, 703–716.
10. O’Hegarty, R., Kinnane, O., McCormack, S.J., *Parametric investigation of concrete solar collectors for facade integration*. Sol. Energy, 153, 2017, 396–413.
11. Chiarelli, A., Al-Mohammedawi, A., Dawson, A.R., Garcia, A., *Construction and configuration of convection-powered asphalt solar collectors for the reduction of urban temperatures*. Int. J. Therm. Sci, 112, 2017, 242.
12. Taha, H. *Climates and heat Islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat*. Energy Build, 25, 1997, 99–103.
13. Sarachitti, R., Chotetanorn, C., Lertsatitthanakorn, C., Rungsiyopas, M., *Thermal performance analysis and economic evaluation of roof-integrated solar concrete collector*. Energy Build, 43 (6), 2011, 1403–1408.
14. Garcia, A., Partl, M.N., *How to transform an asphalt concrete pavement into a solar turbine*. Appl. Energy, 119, 2014, 431–437.

15. Zaim, E.H., Farzan, H., Ameri, M., *Assessment of pipe configurations on heat dynamics and performance of pavement solar collectors: An experimental and numerical study*. Sustain. Energy Technol. Assess, 37, January 2020, 100635.
16. Mallick, R., Carelli, J., Albano, L., Bhowmick, S., Veeraragavan, A., *Evaluation of the potential of harvesting heat energy from asphalt pavements*. Int. J. Sustain. Eng, 4 (2), 2011,164–171.
17. Nasir, D.S.N.M., Hughes, B.R., Calautit, J.K., *A CFD analysis of several design parameters of a road pavement solar collector (RPSC) for urban application*. Appl.Energy, 186, 2017, 436–449.
18. Chen, J., Wang, H., Zhu, H., *Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect*. Appl. Therm. Eng, 113, 2017, 739–748.
19. Nikiforova, T., Savytskyi, M., Limam, K., Bosschaerts, W., Belarbi, R., *Methods and results of experimental researches of thermal conductivity of soils*. Energy Proc, 42, 2013, 775–783.
20. Weidong, L., Baret, F., Xingfa, G., Qingxi, T., Lanfen, Z., Bing, Z., *Relating soil surface moisture to reflectance*. Remote Sens. Environ, 81 (2–3),2002, 238–246.
21. Thermal Properties of Metals. [https:// www.engineersedge.com](https://www.engineersedge.com).
22. Hermansson, A., *Mathematical model for paved surface summer and winter temperature: Comparison of calculated and measured temperatures*. Cold Reg. Sci.Techno, 40 (1–2),2004, 1–17.
23. Hall, M.R., Dehdezi, P., Dawson, A., Grenfell, J., Isola, R., *Influence of the Thermophysical properties of pavement materials on the evolution of temperature depth profiles in different climatic regions*. J Mater. Civ. Eng, 24 (1), 2012, 32–47.

