

Modeling of a solar water heating system for a private hospital in Sana'a, Yemen using TRNSYS

Abduljalil Ali Al-Abidi

Sana'a Community College || Yemen

Abdulkarem A. Odhah

Jordan University of Science and Technology || Jordan

Abstract: The objective of the present work is to simulate and analysis the performance of a proposed solar water heating system for a 160-bed capacity private hospital in Sana'a City-Yemen. The systems consist of solar collectors, hot water circulation pump, a storage tank with an electrical heater, and identical auxiliary components. The simulation and the thermal performance analysis have been done using TRNSYS software. In addition, a comparison between the performance of evacuated tubes collectors and flat plate collectors was done to justify the selection of ETC for the designed. The thermal performance analysis shows that the evacuated tubes collectors have an annual contribution of 87.73 MWh with an annual average solar fraction of 63 percent and annual average installation efficiency of 68 percent.

Keywords: Solar thermal energy, Solar collector, TRNSYS, Thermal performance.

دراسة استخدام الطاقة الشمسية لإنتاج المياه الساخنة لمستشفى خاص في صنعاء باستخدام برنامج المحاكاة TRNSYS

عبد الجليل علي العبيدي

كلية المجتمع صنعاء || اليمن

عبد الكريم عبد الله عوضه

جامعة العلوم والتكنولوجيا الأردنية || الأردن

المستخلص: يعتبر الإشعاع الشمسي في الجمهورية اليمنية من ضمن أعلى معدلات الإشعاع في العالم نتيجة وقوع الدولة ضمن الحزام الشمسي للأرض ويتراوح متوسط الإشعاع الشمسي في اليوم ما بين 5.2 – 6.8 كيلووات ساعة لكل متر مربع، مع ساعات سطوع شمسي يومي يتراوح بين 7.3 إلى 9.1 ساعة على مدار العام. هدف هذا البحث إلى دراسة إمكانية استخدام الطاقة الشمسية لإنتاج المياه الساخنة المطلوبة لمستشفى خاص بسعة 160 سريرًا في مدينة صنعاء. تم إجراء المحاكاة وتحليل الأداء الحراري للنظام باستخدام برنامج المحاكاة TRNSYS. يتكون النظام من مجمعات شمسية، مضخة دوران الماء الساخن، وخزان مع سخان كهربائي، ومكونات مساعدة أخرى. تم إجراء مقارنة بين أداء المجمع الشمسي ذو الأنابيب المفرغة والمجمع الشمسي ذو الألواح المسطحة. أظهرت نتائج تحليل الأداء الحراري للمنظومة أن المجمع الشمسي ذو الأنابيب المفرغة أبدى أداءً أفضل من المجمع الشمسي ذو الألواح المسطحة حيث بلغت مساهمته السنوية مقدار 87.73 ميغاوات في الساعة بمتوسط سنوي يبلغ 64 % من إجمالي الطاقة المطلوبة لتسخين المياه في المستشفى.

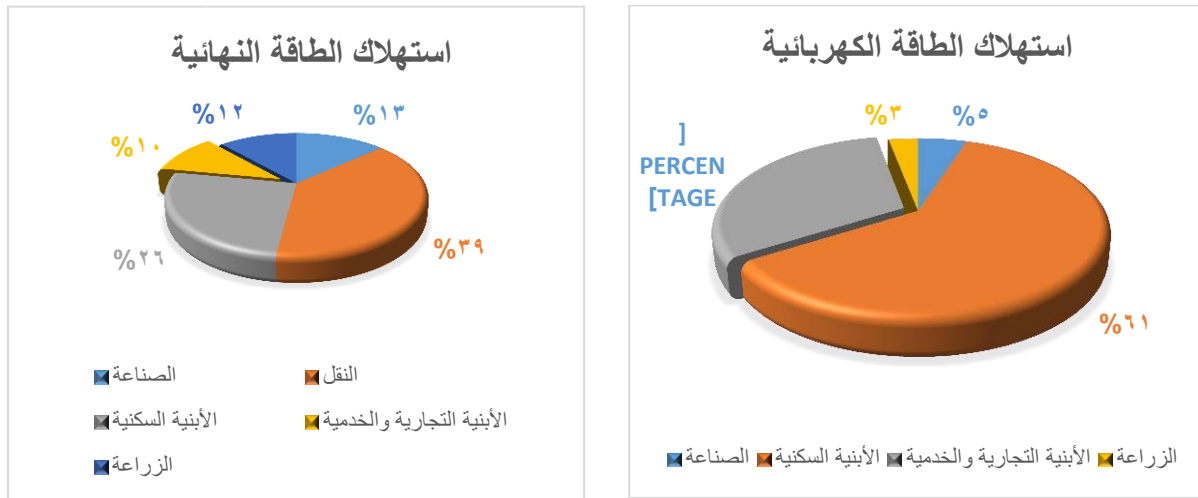
الكلمات المفتاحية: الطاقة الحرارية الشمسية، المجمع الشمسي، برنامج المحاكاة، الأداء الحراري

المقدمة.

تعد الطاقة الشمسية أحد أهم مصادر الطاقة المتجددة في العالم وأكثرها وفرة وقد تم استخدامها في عدة تطبيقات هندسية على نطاق واسع مثل توليد الطاقة الكهربائية، التدفئة، تنقية وتحلية المياه المالحة والراكدة، تكنولوجيا التبريد الشمسي، عمليات التجفيف، تدفئة أحواض السباحة، نظام تسخين المياه، والطباخة الشمسية على مدى العقود الماضية. يعتبر نظام التدفئة وإنتاج المياه الساخنة المنزلية من أكثر التطبيقات المثالية لاستخدامات الطاقة الشمسية من بين التطبيقات المختلفة لأنها تتطلب إنتاج الحرارة عند درجات حرارة منخفضة نسبياً (45-50 درجة مئوية) (Zhang, et al.,2018). بحسب الدراسات السابقة فإن تسخين المياه لأغراض التدفئة والاستخدام المنزلي من أكثر الأنظمة المستهلكة للطاقة مقارنة بالمهام المنزلية الأخرى في المباني التجارية والسكنية (Artur, et al.,2018). لذلك يعتبر تركيب المجمعات الشمسية لإنتاج المياه الساخنة من أكثر الإجراءات الفعالة لتقليل استهلاك الطاقة والحفاظ عليها وزيادة الفاعلية والكفاءة في المباني التجارية والمنزلية.

تعتمد تقنيات تسخين المياه على الوقود الأحفوري مثل المازوت والديزل والغاز المنزلي المسال أو الكهرباء في أغلب دول العالم الثالث بما فيها اليمن، كما يتم استخدام الكتلة الحيوية أيضاً مثل الخشب والفحم. وفقاً لوكالة الطاقة الدولية فإن استهلاك الطاقة للمباني التجارية والخدمية في اليمن يمثل 31% من استهلاك الطاقة الكهربائية و10% من إجمالي الطاقة النهائية المنتجة كما هو موضح بالشكل 1 (دليل الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة في الدول العربية، 2015). تعتبر الجمهورية اليمنية من الدول الأقل إنتاجاً للكهرباء في منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا حيث لا يحصل سوى 40% من السكان على الكهرباء (Alkadasi, et al.,2014, "policy note: Prospects of Solar Energy in Yemen". [http://www.undp.org/content/dam/yemen/E&E/Docs/UNDP-YEM-\(Prospects%20of%20Solar%20Energy%20in%20Yemen-%20Policy%20Note.pdf](http://www.undp.org/content/dam/yemen/E&E/Docs/UNDP-YEM-(Prospects%20of%20Solar%20Energy%20in%20Yemen-%20Policy%20Note.pdf))

لذا فإن معظم الاحتياجات التجارية والصناعية من المياه الساخنة في اليمن يتم تلبيتها بشكل رئيسي باستخدام أجهزة ومعدات تعمل بالوقود الأحفوري. يمر اليمن في الوقت الحالي بأزمة سياسية واقتصادية مما أدى إلى ارتفاع أسعار الوقود وأحياناً نقص التمويل في الأسواق المحلية مما خلق مشكلة كبيرة للاستثمارات خاصة في القطاعين التجاري والصناعي بما فيها المستشفيات. تبحث هذه الدراسة إمكانية استخدام الطاقة الشمسية لإنتاج المياه الساخنة لتلبية متطلبات مستشفى خاص في مدينة صنعاء لتقليل استهلاك الوقود المستخدم لتسخين المياه.



الشكل (1) استهلاك المباني التجارية والخدمية من الطاقة الكهربائية والطاقة النهائية في اليمن

أهمية البحث:

يعتبر الإشعاع الشمسي في الجمهورية اليمنية من أعلى معدلات الإشعاع في العالم نتيجة وقوع الدولة ضمن الحزام الشمسي للأرض ويتراوح معدل الإشعاع الشمسي في اليوم ما بين 18-26 ميغا جول/ م² مع ساعات سطوع شمسي يومي يتراوح بين 7.3 إلى 9.1 ساعة على مدار العام كما أن عدد ساعات شروق الشمس فتقدر بأكثر من 3000 ساعة سنويا (Hadwan & Alkholidi, 2016). يتحقق الحد الأعلى للإشعاع الشمسي في اليمن في فصل الشتاء ومتوسط معدل السطوع الشمسي اليومي أكثر من 8 ساعات مما يجعل الية انتاج المياه الساخنة ذو قيمة جيدة في الأشهر الباردة في البلد (أكتوبر - فبراير) (Al-Ashwal, 2005). تعتبر دراسة استخدام مصادر بديلة لنظام تسخين المياه مساهمة قيمة للمجتمع اليمني وتشجيع لبقية القطاعات المختلفة لاستخدامه في مختلف الخدمات الصناعية والتجارية والمنزلية.

الدراسات السابقة:

أجريت العديد من الدراسات النظرية والعملية محليا وإقليميا لبحث الأداء الحراري لنظام تسخين المياه بالطاقة الشمسية. تم تصنيع مجمع شمسي طبيعي حر (سيفون حراري) لإنتاج المياه الساخنة في مدينة عدن اليمن بواسطة (Mukbel & Bin Gadhi, 1999)، تتكون المنظومة من اللاقط الشمسي ذو السطح المستوى مساحته 1.15 متر مربع واسطوانة تخزين سعة 90 لتر فوق المجمع الشمسي. وقد اظهرت نتائج الدراسة أن متوسط درجة حرارة المياه في الخزان الحراري كانت 60 درجة مئوية خلال النهار من الساعة 11 صباحا إلى الساعة 04 عصرا مع معدل استخدام للمياه الساخنة بمقداره 50 لتر.

كما تم دراسة كفاءة لاقط شمسي ذو السطح المستوى في مدينة مصراته دولة ليبيا (المطردي، وآخرون، 2017). تم تغيير زاوية السمات وزاوية ميل السطح خمس مرات في اليوم من الشروق حتى الغروب وتسجيل القراءات لكل من درجة حرارة دخول مائع التشغيل إلى اللاقط الشمسي، درجة حرارة خروج مائع التشغيل من اللاقط الشمسي، درجة حرارة في منتصف سطح اللاقط الشمسي، ومعدل تدفق مائع التشغيل خلال اللاقط الشمسي، وقيمة الإشعاع الساقط على اللاقط الشمسي كل اثنتا عشرة دقيقة خلال 8 أشهر. لخصت الدراسة نتائج أهمها أن أعلى كفاءة للاقط الشمسي هي 55.59% تم الحصول عليها عند زاوية سمت مقدارها 0 درجة وزاوية ميل لسطح اللاقط الشمسي 47 درجة كما سجلت أعلى درجة حرارة لخروج الماء من اللاقط الشمسي بمقدار 45.5 درجة مئوية بينما كان أعلى معدل اشعاع شمسي ساقط هو 1265 وات لكل متر مربع.

تم اختبار سخانان للمياه الشمسية من النوع التي تعمل بطريقة التدوير الطبيعي في مدينة البصرة - العراق (خضير، والاسدي، 2012)، يتكون السخان الاول من اربعة جوانب زجاجية هي الجانب العلوي والامامي والجانب الأيمن واليسر بينما الجانب الخلفي والسفلي من الخشب، جميع الأوجه من الخشب في السخان الثاني ماعدا الجانب الامامي من الزجاج. تشير النتائج إلى افضلية الأداء للسخان ذي الوجه الزجاجي الواحد على السخان ذي الأوجه الزجاجية الأربعة حيث تراوحت الكفاءة للسخان الشمسي ذو الوجه الزجاجي الواحد بين (49%-67%) بينما كفاءة السخان الشمسي ذو الأربعة اوجه (38%-44%).

تم دراسة أداء أربع أنواع من اللواقط الكهرو حرارية (photovoltaic thermal) باستخدام برنامج المحاكاة Trnsys تحت الظروف المناخية لمدينة طرابلس - ليبيا (الكشيري، والعائب، 2017)، تم مقارنة النتائج العددية للواقط الكهرو حرارية مع اللواقط الشمسية ذو السطح المستوي الاعتيادية ولواقط الخلايا الكهروضوئية التي تمتلك نفس المواصفات الفنية. اظهرت النتائج أن كفاءة اللواقط الكهرو حرارية أفضل من نظيرتها الاعتيادية الحرارية

والكهروضوئية نتيجة حدوث عملية التبريد في للواقط الكهرو حرارية مع تحقيق نسبة مساهمة شمسية تزيد عن 90% من الاحتياجات المياه الساخنة.

تم استخدام برنامج المحاكاة Trnsys لتحليل الأداء الحراري لنظام تسخين المياه بواسطة لاقط شمسي طبيعي حروف الظروف المناخية لمدينة اللاذقية سوريا (جورج، 2011). يتكون النظام من لاقط شمسي ذو السطح المستوي، خزان حراري، وسخان مساعد لتغطية احتياج استهلاك المياه الساخنة لأسرة مكونة من 4 افراد. تم دراسة تأثير المتغيرات التالية: حجم الخزان الحراري، شكل الخزان الحراري، مساحة اللاقط الشمسي، موضع السخان المساعد في الخزان الحراري على كفاءة اللاقط الشمسي وعلى معامل التغطية الشمسية للنظام. أظهرت النتائج انه لا يوجد تأثير ملموس لشكل الخزان الحراري سواء الافقي او الراسي على كفاءة اللاقط الشمسي مهما كان حجم الخزان بينما تراوح الفرق في معامل التغطية الشمسية إلى حوالي 2%. حين بينت النتائج أن كفاءة اللاقط الشمسي ومعامل التغطية الشمسية ازدادت بنسبة 3.6% و 6% على التوالي عند وضع السخان المساعد في الربع العلوي للخزان عن الربع السفلي للخزان.

منهجية البحث.

يوضح الشكل 2 رسمًا تخطيطيًا لمنظومة تسخين المياه بالطاقة الشمسية، تتكون المنظومة من اللاقط الشمسي، ومضخة تدوير المياه بين اللاقط والخزان، واسطوانة تخزين المياه مع سخان كهربائي، مضخة تغذية المياه الساخنة، وسخان كهربائي مساعد في خط تغذية المياه الساخنة إلى المستشفى.

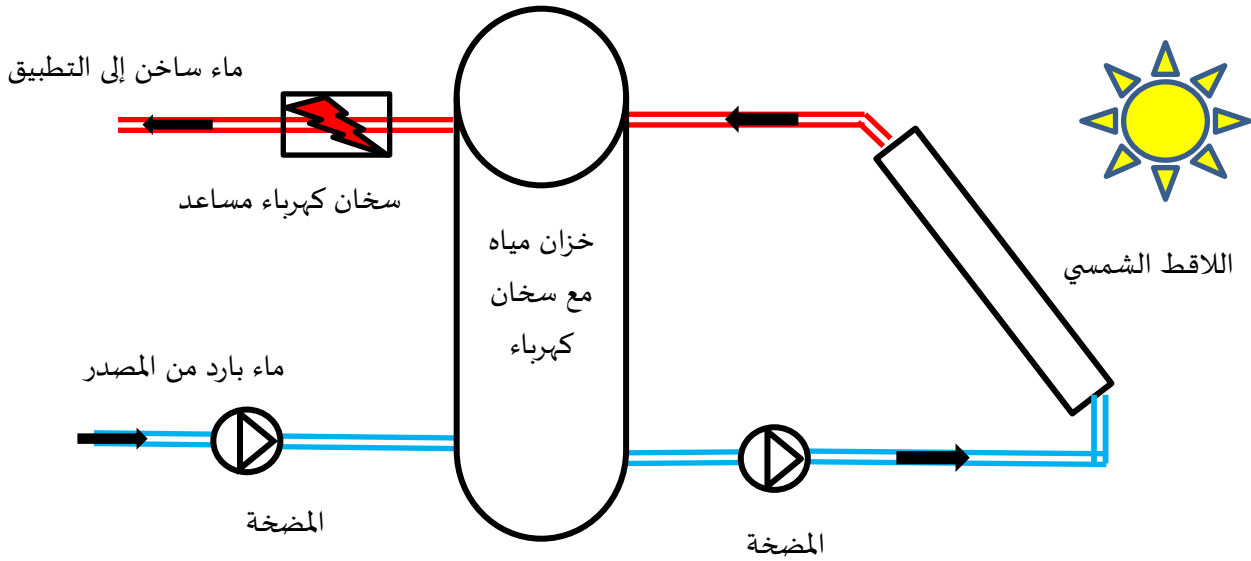
النموذج الرياضي

تقدير حمل تسخين المياه

يمكن تقدير استهلاك المياه الساخنة في المستشفى للسبرير الواحد كما هو موضح بالجدول رقم 1

Taylor,2006, Solar Thermal Technology & Applications [https://www.solarthermalworld.org/story/solar-](https://www.solarthermalworld.org/story/solar-thermal-technology-applications-2006)

(thermal-technology-applications-2006). كما يوضح استهلاك المياه الساخنة في أنواع مختلفة من المباني.



الشكل (2) مخطط منظومة انتاج المياه الساخنة للمستشفى

يقدر الطلب اليومي على الماء الساخن بواسطة المعادلة التالية

$$D_{h,w} = n \times C_c \times O \quad (1)$$

حيث أن $(D_{h,w})$ هو الحمل اليومي للمياه الساخنة بوحدة لتر لكل سرير، (n) هو عدد الاسرة في المستشفى، (C_c) هو الاستهلاك اليومي لكل شخص بوحدة لتر لكل سرير، (O) هو معدل الاشغال للأسرة وقد تم تقدير معدل الاشغال بنسبة 65% حسب المعلومات التي تم الحصول عليها خلال الزيارة الميدانية للمستشفى، لذلك يمكن حساب كمية التدفق \dot{m} بوحدة كيلوجرام لكل ثانية خلال اليوم بالمعادلة التالية

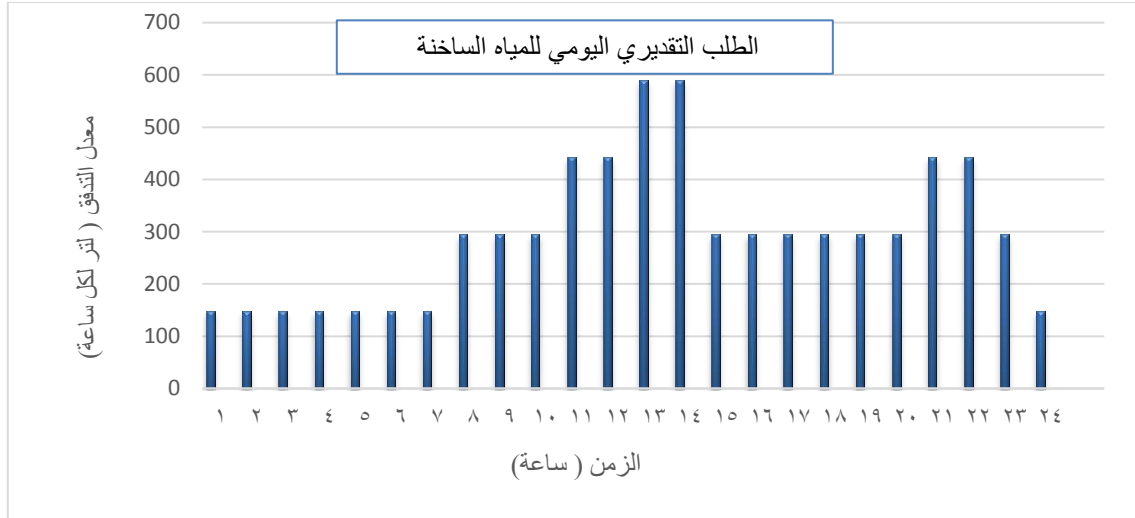
$$\dot{m} = \frac{\rho \cdot D_{h,w}}{1000 \cdot 3600} \quad (2)$$

حيث أن ρ هي كثافة المياه بالكيلوجرام لكل متر مكعب ويمكن اعتبارها 1000 كيلوجرام لكل متر مكعب

الجدول (1) استهلاك المياه الساخنة في المباني

نوع المبنى	الاستهلاك لكل شاغل
السكن الاسري	13 جالون يوميا للشخص الواحد
الفندق	15 جالون في اليوم لكل وحدة
مستشفى	18 جالون في اليوم لكل سرير
المساكن الجامعي	40 جالون لكل شخص
المدرسة	1.8 جالون يوميا لكل طالب

يوضح الشكل 3 الطلب التقديري للمياه الساخنة للمستشفى خلال اليوم حيث تم تقديره باستخدام قاعدة بيانات TSOL وبعض البيانات الإرشاد [16].



الشكل (3) الطلب اليومي للماء الساخن المتوقع

ويمكن حساب الحمل الحراري اللازم لإنتاج المياه الساخنة (Load) للمستشفى باستخدام المعادلة التالية

$$Q_{load} = \dot{m}_{load} \times C_p \times (T_d - T_i) \quad (3)$$

حيث T_d درجة حرارة المياه التصميمية المطلوبة 60 درجة مئوية، T_i درجة حرارة المياه الابتدائية 15 درجة مئوية، C_p الحرارة النوعية للماء كيلو جول لكل كيلوجرام كلفن.

ويمكن حساب مساحة اللاقط الشمسي لمواجهة الحمل الحراري من خلال العلاقة التالية (Walker,)

: (2013)

$$A_c = \frac{Q_{load}}{(I_{c,Max} \mu_{Solar})} \quad (4)$$

حيث أن A_c مساحة اللاقط الشمسي متر مربع، Q_{load} هو الحمل الحراري اليومي لتسخين المياه المطلوبة، μ_{Solar} هو متوسط كفاءة المنظومة الشمسية خلال اليوم، $I_{c,max}$ هو أقصى اشعاع شمسي يومي ساقط على اللاقط الشمسي خلال العام بوحدة ميغاواط. ساعي ويمكن اعتبار أن متوسط الكفاءة للمنظومة الشمسية اليومية خلال السنة ما بين 45% إلى 50% للاقط ذو الأنابيب المفرغة و45% إلى 58% للاقط الشبي المسطح (Qiu et al., 2015). وقد تم اعتماد متوسط كفاءة شمسية في دراساتنا الحالية بمقدار 52.5%.

يجب أن يكون الخزان بحجم مناسب لتخزين الطاقة الحرارية من الشمس خلال النهار ويمكن حسب حجم الخزان بالمتر المكعب للتطبيقات التي فيها طلب مستمر للمياه الساخنة مثل المستشفيات من خلال العلاقة التالية (Walker, 2013):

$$M_{storage} = \frac{\left((A_c I_{c,max} \mu_{solar}) - sunhours * m_{load} c_p (T_d - T_i) \right)}{c_p \Delta T_{storage}} \quad (5)$$

حيث $M_{storage}$ هي حجم الخزان بالمتر المكعب، $\Delta T_{storage}$ فرق درجات الحرارة التخزينية وهي 20 درجة مئوية حسب (Walker, 2013)، $sunhours$ متوسط السطوع الشمسي 8 ساعات باليوم. ويمكن حساب الحرارة اللازمة لتسخين المياه باستخدام المنظومة (Q_{Ext}) بوحدة ميغاواط ساعي خلال العام من المعادلة التالية (Hazami et al., 2013)

$$Q_{Ext} = Q_{Aux} + [Q_C - Q_{lost}] \quad (6)$$

حيث أن (Q_C) هي الحرارة المكتسبة في اللاقط الشمسي، (Q_{Aux}) هي الحرارة المساعدة من سخان كهربائي والذي يتم استخدامه في حالة وجود عجز في المنظومة الشمسية او انخفاض درجة حرارة مياه التغذية عن الدرجة المطلوبة، (Q_{lost}) هي الحرارة المفقودة من المنظومة. ويمكن حساب الحرارة المكتسبة في اللاقط الشمسي باستخدام المعادلة التالية ايوي

$$Q_C = m_i * C_p (T_{c,ou} - T_{c,in}) \quad (7)$$

حيث $T_{c,ou}$ درجة حرارة خروج المياه من اللاقط الشمسي، $T_{c,in}$ درجة حرارة دخول المياه إلى اللاقط الشمسي، C_p الحرارة النوعية للماء كيلو جول لكل كيلوجرام كلفن كما يمكن حساب معامل التغطية الشمسية للاقط الشمسي (solar fraction) من خلال المعادلة التالي (Hazami et al., 2013)

$$SF = \frac{Q_{Ext} - Q_{Aux}}{Q_{Ext}} \quad (8)$$

ويعرف معامل التغطية الشمسية على أنه النسبة المئوية لحمل التسخين الذي يتم توفيره بواسطة الطاقة الشمسية إلى حمل التسخين الكلي المطلوب للتطبيق خلال فترة زمنية محددة. ويمكن حساب الكفاءة المتوقعة لتركيبة المجمعات الشمسية باستخدام المعادلة التالية

$$\mu_c = \frac{Q_c}{AI_i} \quad (9)$$

حيث μ_c هو الإشعاع الساقط على المجمع الشمسي بوحدة ميغاواط. ساعي

الأداء الحراري للمنظومة في بيئة برنامج المحاكاة

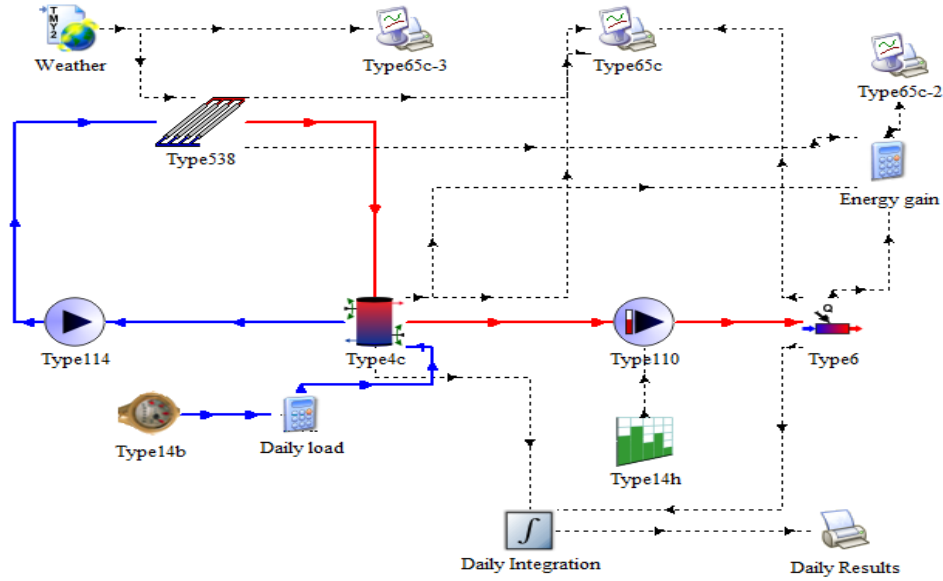
يستخدم برنامج المحاكاة TRNSYS معادلة الكفاءة من الدرجة الثانية لنموذج اللاقط الشمسي باستخدام المعادلة التالية

$$\eta = \eta_0 - a_1 \frac{T_c - T_{am}}{I} - a_2 \left(\frac{T_c - T_{am}}{I} \right)^2 \quad (10)$$

كفاءة المجمع الشمسي η_0 ، a_1 معامل الفقد من الدرجة الأولى للكفاءة، a_2 معامل الفقد من الدرجة الثانية وقد تم اخذ هذه القيم من مواصفات المجمع الشمسي ذو الأنابيب المفرغة التابع لشركة Apercus؛ T_c هي عبارة عن متوسط درجة حرارة المياه خلال اللاقط الشمسي و T_{am} درجة حرارة الهواء الخارجي (Hazami et al. 2013). يتم إدخال قيم المدخلات والمواصفات المختلفة للمكونات المختلفة للمنظومة التي تمت حسابها من المعادلات السابقة ومن مواصفات اللاقط الشمسي الذي تم اختياره، وتشغيل برنامج المحاكاة على مدار العام لتقدير احتياجات الطاقة المقترحة في ظل ظروف بيئية مختلفة (شمس وغائم وممطر). ووفقاً لذلك تسمح محاكاة TRNSYS بتقييم الأداء السنوي للمنظومة المقترحة من خلال تقديم بيانات الأرصاد الجوية النموذجية لمدينة صنعاء، اليمن.

نموذج المحاكاة باستخدام برنامج TRNSYS

تم استخدام برنامج TRNSYS لتحليل نظام تسخين المياه بالطاقة الشمسية، يتضمن TRNSYS واجهة رسومية ومحرك محاكاة ومكتبة تحتوي العديد من المكونات والأجهزة الهندسية للطاقة المتجددة، وكذلك البيانات المناخية والإشعاعية لعدد كبير من المدن والمناطق حول العالم. يمكن إنشاء مكونات وأجهزة جديدة غير متوفرة في المكتبة الخاصة ببرنامج TRNSYS بجميع لغات البرمجة الشائعة كما يمكنه الارتباط بسهولة مع هذه البرامج، يتم تجميع هذه الوحدات مع بعضها لتكوين نموذج لأي منظومة هندسية حيث يمكن أن يكون الإخراج من نوع ما مدخلاً إلى آخر في النموذج. وهناك العديد من الدراسات والأبحاث التي تم نشرها باستخدام البرنامج وتم مقارنة النتائج العملية مع مخرجات البرنامج، وقد أظهرت توافق جيد جد (Ayompe, et al., 2011). تم استخدام برنامج TRNSYS 16 لبناء نموذج النظام حيث تم توصيل المكونات المختلفة للمنظومة كما هو موضح بالشكل 4، يتكون المخطط من الأجزاء التالية: مجمع الطاقة الشمسية ذو الأنابيب المفرغ (النوع 538)، مضخة سرعة واحدة (النوع 114)، مضخة سرعة متغيرة (النوع 110)، خزان تخزين الماء الساخن (النوع 4 ج) ويحتوي على سخانين كهربائيين علوي وسفلي، سخان مساعد (النوع 6). المدخلات وحمل المياه الساخنة (النوع 14 ب) معالج البيانات الإشعاعية (النوع 109 - TMY2)، محركات الإخراج راسمة عبر الإنترنت (النوع 65)، مدمج الكمية (النوع 24)، الطباعة (النوع 25). يعطى جدول 4، 3، 2 قيم المعلومات والمواصفات لمجمع الطاقة الشمسية وخزان التخزين ومضخة تدوير الماء الساخن في التخطيط المنظومة المستخدمة في محاكاة TRNSYS



الشكل (4) مخطط مكونات المنظومة في بيئة برنامج المحاكاة TRNSYS
الجدول (2) معاملات المجمع الشمسي ذو الانبوب المفرغ

المعامل	الوحدة	اللاقط الشمسي ذو الأنابيب المفرغة	اللاقط الشمسي المسطح
التوصيل على التوالي	-	5	6
مساحة المجمع الماصة	m ²	88	88
الحرارة النوعية للماء	kJ/kg.K	4.190	4.190
كمية التدفق الاختبارية	kg/hr. m ²	50	50
كفاءة اللاقط الشمسي النظري ($= (\tau\alpha)_n F_R \eta_0$)	%	0.687	0.700
معامل الفقد من الدرجة الأولى ($a_1 = U_L F_R$)	W/ m ² .K	1.505	3.00
معامل الفقد من الدرجة الثانية ($a_2 = \frac{U_L F_R}{T}$)	W/ m ² .K	0.01	0.007
زاوية ميل المجمع β	degrees	19	19
زاوية السميت	degrees	0	0

الجدول (3) معاملات خزان تخزين المياه الساخنة

المعامل	الوحدة	القيمة
موضع دخول	-	2
حجم الخزان	m ³	3
الحرارة النوعية للمائع	kJ/kg.K	4.190
كثافة المائع	kg/ m ³	1000.0
معامل الفقد الحراري للخزان	kJ/hr. m ² .K	2.5
درجة حرارة الضبط للسخان 1	°C	60
القدرة العظمى للسخان 1	kJ/hr	9000

القيمة	الوحدة	المعامل
60	°C	درجة حرارة التحكم للسخان 2
9000	kJ/hr	القدرة العظوى للسخان 2
100	°C	درجة الغليان

الجدول (4) معاملات مضخة تدوير المياه الساخنة

القيمة	الوحدة	المعامل
3600	kg/hr	كمية التدفق القصوى
4.190	kJ/kg.K	الحرارة النوعية للمائع
357	W	القدرة القصوى

النتائج والمناقشة العددية

الحمل الحراري للمستشفى

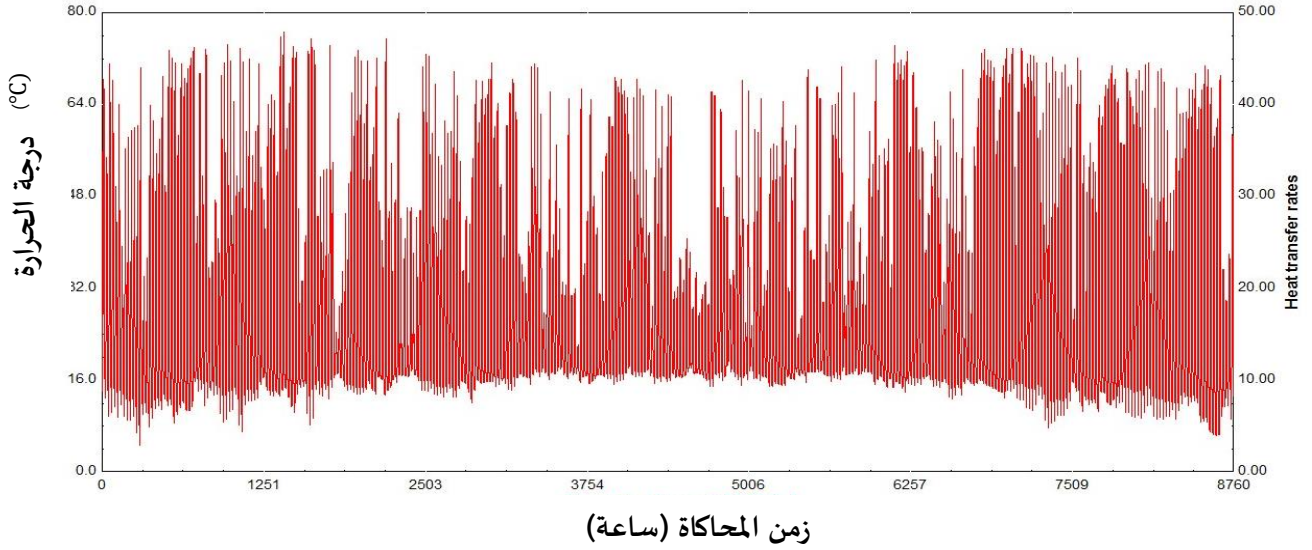
يوضح الجدول رقم 5 الحمل الحراري اليومي والمساحة اللازمة للاقط الشمسي وحجم الخزان المطلوب حيث بتطبيق المعادلات 1 الى 5 فقد بلغ الحمل الحراري اليومي 370 كيلوواط. ساعي لكل متر مربع، والمساحة الإجمالية للمجمعات الشمسية ذو الأنابيب المفرغة 88 مترًا مربعًا وحجم الخزان الحراري 3 م³ حين أن أقصى إشعاع شمسي يبلغ 8.0 كيلوواط ساعة / م² / يوم.

جدول (5) مواصفات نظام تسخين المياه بالطاقة الشمسية المقترح

عدد الاسرة	160
معدل الاشغال	65%
استهلاك المياه الساخنة لكل شخص	68 l/bed/day
كمية المياه المستهلكة الكلية اليومية	7072 l/day
الحمل الحراري اليومي	370 kWh/day
اقصى إشعاع شمسي	8.0 kWh/day/m ²
كفاءة اللاقط الشمسي	0.525
المساحة الكلية للمجمع الشمسي	88m ²
حجم الخزان	3m ³

درجة حرارة خروج الماء من المجمع الشمسي

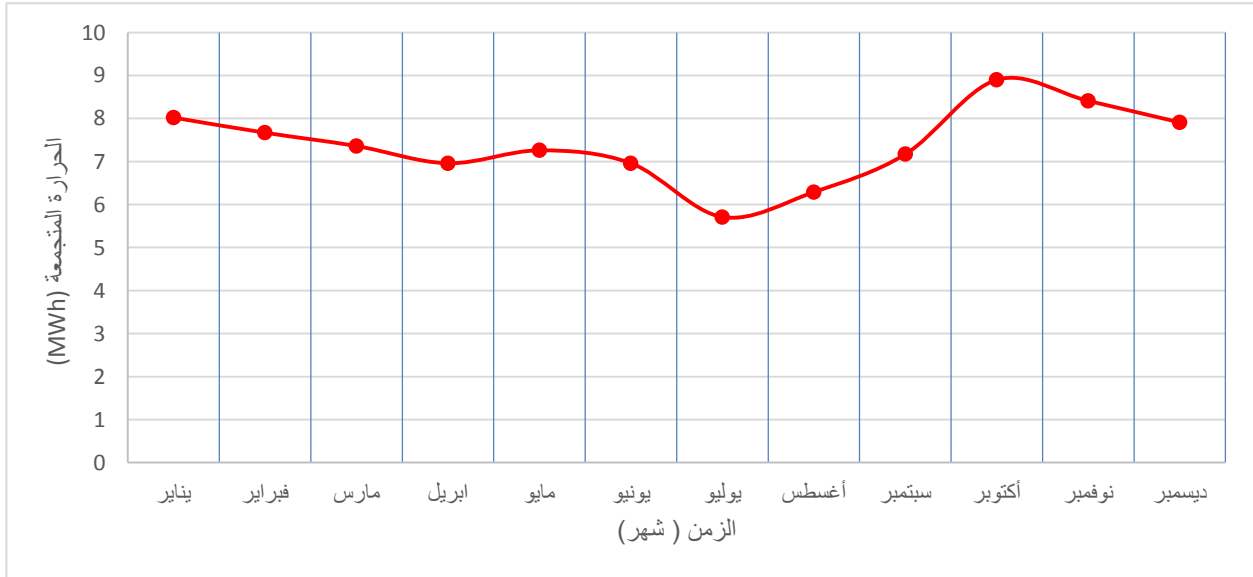
يوضح شكل 5 التغير اليومي لدرجة حرارة الماء الخارج من المجمع الشمسي خلال عام كامل لمدة 8760 ساعة ويبين أن درجة الحرارة القصوى للماء الخارج من المجمع الشمسي كانت 74 درجة مئوية وهو أكثر بمقدار 14 درجة عن درجة الحرارة التصميمية للمياه الساخنة بالمستشفى بينما الحد الأدنى لدرجة حرارة الماء الخارج من المجمع هي 8 درجات مئوية، وهو ما يتطلب تشغيل الطاقة الكهربائية لتزويد المستشفى بالمياه الساخنة المطلوبة.



الشكل (5) التغير اليومي لدرجة حرارة الماء الخارج من المجمع الشمسي خلال عام كامل

الطاقة المكتسبة في المجمع الشمسي

يوضح الشكل 6 متوسط الطاقة المكتسبة الشهرية في المجمع الشمسي (QC) للنظام المقترح خلال العام وتظهر النتائج أن أقصى طاقة تم اكتسابها بواسطة المجمع الشمسي هو 8.9 ميغاوات. ساعة في شهر أكتوبر وأقل طاقة مكتسبة 5.71 ميغاوات. ساعة في شهر يوليو حيث أن الإشعاع الشمسي انخفض خلال هذا الشهر إلى نتيجة أن اليمن يتميز بجو ممطر وغائم جزئياً في أشهر الصيف وقد بلغ المتوسط لسنوات للطاقة المجمعة مقدار 88.62 ميغاوات. ساعة.



الشكل (6) المتوسط الشهري للطاقة المكتسبة من المجمع الشمسي ذو الأنابيب

الأداء الحراري للمنظومة

يوضح الجدول رقم 6 الأداء الحراري للمنظومة خلال العام على التوالي (الطاقة الشهرية للإشعاع الشمسي، الطاقة المستخدمة في المنظومة، الطاقة المكتسبة في المجمع الشمسي، والطاقة المساعدة لمصدر كهربائي لتسخين

المياه المطلوبة) حيث بلغ معدل الطاقة المستخدمة السنوية في المنظومة 137.82 ميغاوات. ساعة حين بلغ معدل الاشعاع الشمسي السنوي 129.85 ميغاوات. ساعة شاركت فيه الحرارة المكتسبة في المجمع الشمسي بمقدار 88.62 ميغاوات. ساعة بنسبة 64.35% من الطاقة المستخدمة في المنظومة بينما بلغت الطاقة الكهربائية المساعدة 49.2 ميغاوات. ساعة وهو ما يمثل 50% من الطاقة المكتسبة في المجمع الشمسي و35.65% من إجمالي الطاقة المستخدمة في إنتاج المياه الساخنة خلال العام، كما أن الطاقة الكهربائية المساعدة بلغت 100% مع الطاقة المكتسبة في المجمع الشمسي في شهر يوليو نتيجة انخفاض الاشعاع الشمسي في هذا الشهر وحقت اقل مشاركة للطاقة الكهربائية المساعدة في الحمل الحراري للمنظومة في شهر نوفمبر بمقدار 3.12 ميغاوات. ساعة وبينما بلغت اقل نسبة مشاركة في شهر أكتوبر بنسبة 35.7% من إجمالي الطاقة المكتسبة في المجمع الشمسي.

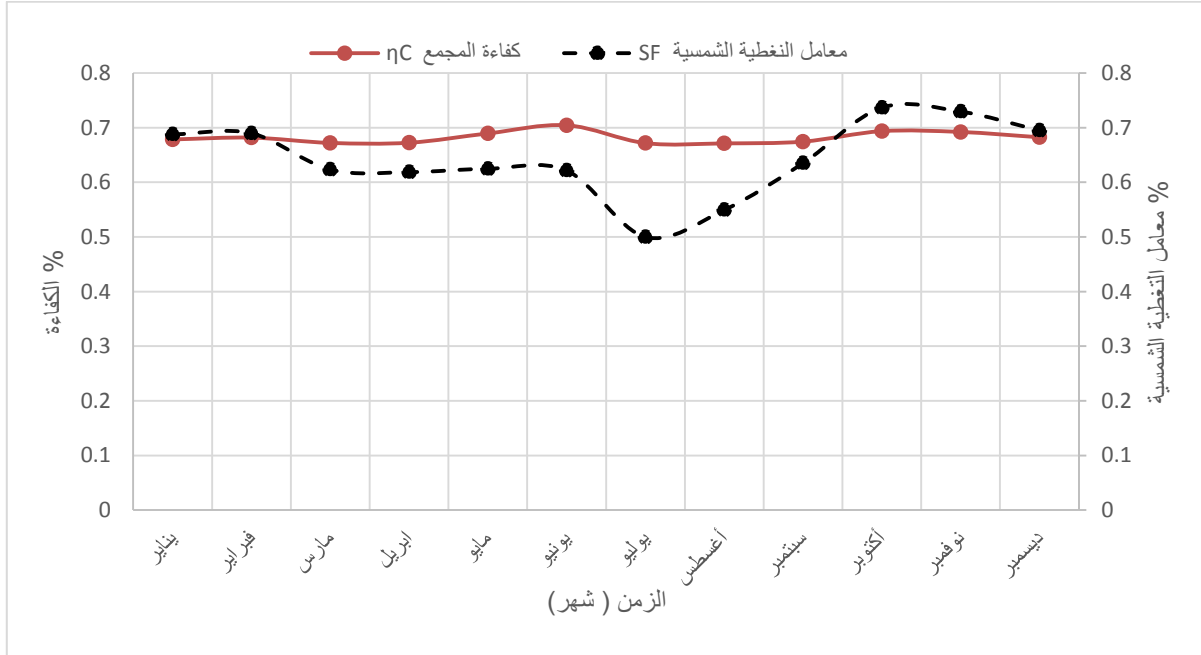
الجدول (6) الاشعاع الشمسي، الطاقة المستخدمة، الطاقة المكتسبة في المجمع والطاقة المساعدة في المياه الساخنة للمنظومة بوحدة ميغاوات. ساعة

الشهر	الاشعاع الشمسي (I)	الحرارة المستخدمة في المنظومة (Qext)	الحرارة المكتسبة في المجمع الشمسي (Qc)	الحرارة المساعدة (Qaux)
يناير	11.82	11.66	8.02	3.64
فبراير	11.25	11.12	7.67	3.45
مارس	10.95	11.81	7.36	4.45
ابريل	10.35	11.25	6.96	4.29
مايو	10.53	11.62	7.26	4.36
يونيو	9.88	11.2	6.96	4.24
يوليو	8.5	11.43	5.71	5.72
أغسطس	9.37	11.45	6.29	5.16
سبتمبر	10.63	11.29	7.17	4.12
أكتوبر	12.83	12.08	8.9	3.18
نوفمبر	12.15	11.53	8.41	3.12
ديسمبر	11.59	11.38	7.91	3.47
المجموع	129.85	137.82	88.62	49.2

الكفاءة ومعامل التغطية الشمسية للمنظومة

يوضح الشكل 7 منحنيات الكفاءة ومعامل التغطية الشمسية للمنظومة خلال أشهر السنة من يناير إلى ديسمبر حيث تراوحت كفاءة المجمع الشمسي بين 67.1% في شهر أغسطس إلى 70.1% في شهر يونيو ومتوسط كفاءة المجمع الشمسي 68.2% في حين تراوحت كفاءة النظام بين 66.4% في أغسطس و 68.6% في شهر أكتوبر ومتوسط الكفاءة 67.5%، لا يوجد فرق مؤثر بين كفاءة المجمع الشمسي و المنظومة بشكل عام كما هو واضح من الشكل نتيجة أن الفواقد الحرارية في الخزان والشبكة صغيرة لا تتجاوز 1% من إجمالي الطاقة المطلوبة للمنظومة، كما يوضح الشكل معامل انتزاع الحرارة للنظام حيث بلغ اقصى قيمة له في شهر أكتوبر بمقدار 73.6% حيث شارك المجمع الشمسي بنسبة كبيرة في تزويد النظام بالحمل الحراري بينما بلغ معامل انتزاع الحرارة ادنى قيمة له في شهر يوليو بنسبة 50% فقط و تم تزويد الحمل المطلوب من الطاقة المساعدة كما تم توضيحه في الجزء السابق، و بلغ

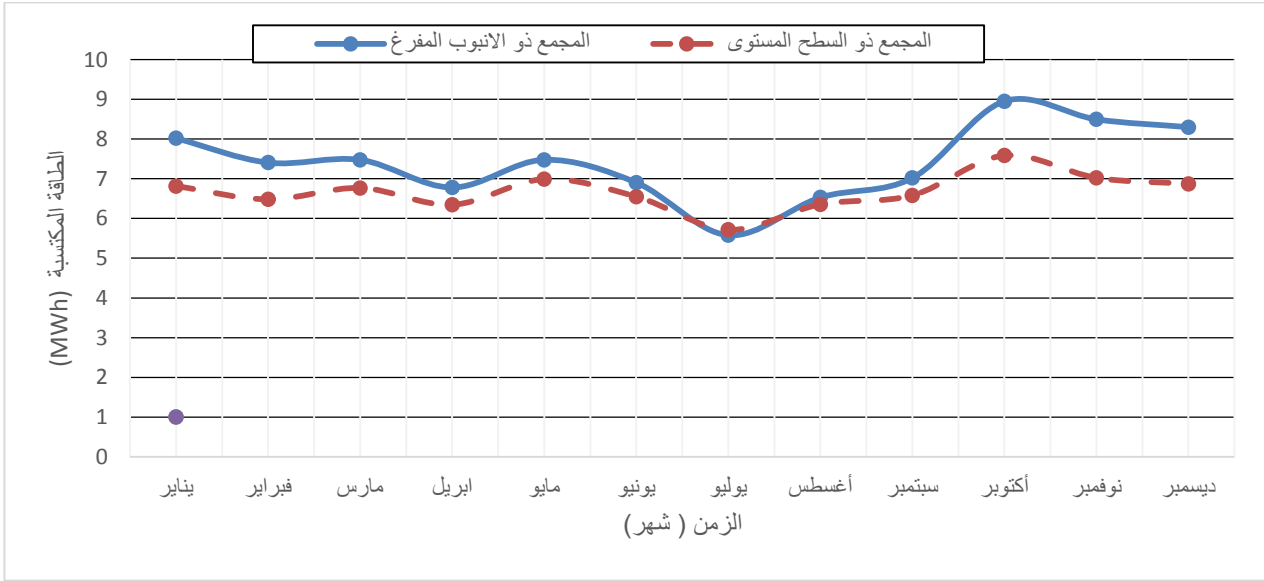
متوسط معامل انتزاع الحرارة 64.25% و هو ضمن الحد الموصى به في كثير من الدراسات و البحوث للحصول على فعالية لتركيب النظام الشمسي لإنتاج المياه الساخنة.



الشكل (7) منحنيات الكفاءة ومعامل انتزاع الحرارة للمنظومة المستخدمة في إنتاج المياه الساخنة

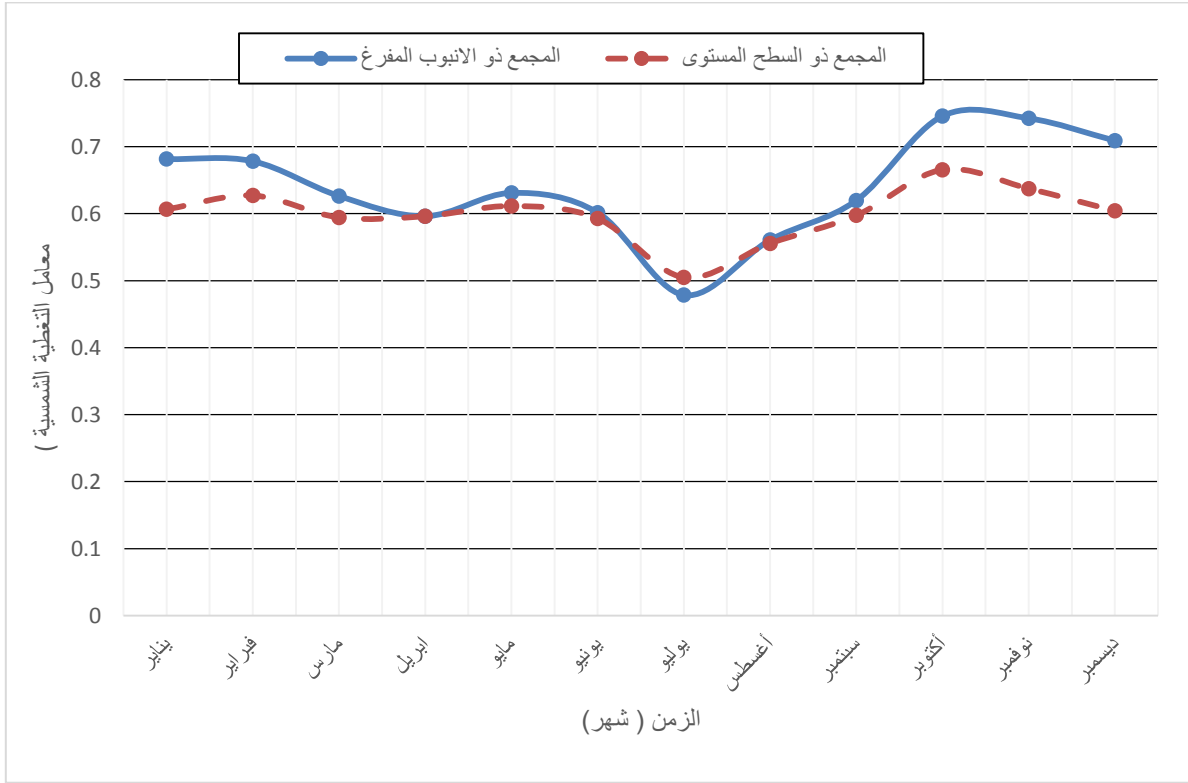
مقارنة أداء المجمع الشمسي ذو الأنابيب المفرغة وذو السطح المستوي

يوضح الشكل 8 الطاقة المكتسبه باستخدام اللاقط الشمسي ذو السطح المستوي و اللاقط الشمسي ذو الأنابيب المفرغة خلال العام، من الواضح أن الطاقة المكتسبه باستخدام اللاقط الشمسي ذو الأنابيب المفرغة أفضل من اللاقط الشمسي ذو السطح المستوي خاصة خلال أشهر الشتاء (أكتوبر – فبراير) حيث بلغ الفرق في الطاقة المجمعة السنوية لهما مقدار 8.48 ميغاوات ساعة، في حين لا يوجد فرق واضح في الطاقة المكتسبة خلال أشهر الصيف خاصة في شهر يوليو حيث أن مقدار الطاقة المكتسبة متساوية لكليهما وذلك بسبب انخفاض الإشعاع الشمسي فيه وبالتالي سوف يتم الاستعاضة بالطاقة الكهربائية المساعدة مما يسبب زيادة استهلاك الطاقة المساعدة وزيادة الانبعاثات الغازية الناتجة عنها وهو ما يبرر استخدام المجمع الشمسي ذو الأنابيب المفرغة.



الشكل (8) الطاقة المكتسبة باستخدام المجمع الشمسي ذو السطح المستوى والمجمع الشمسي ذو الأنابيب المفرغة خلال العام

كما يوضح الشكل رقم 9 معامل التغطية الشمسية للاقط الشمسي ذو الأنابيب المفرغة واللاقط الشمسي ذو السطح المستوي خلال العام وبين الشكل أن معامل التغطية الشمسية للاقط الشمسي ذو الأنابيب المفرغة أعلى من اللاقط الشمسي ذو السطح المستوي في جميع أشهر السنة ماعدا شهر يوليو وفيه يقل الطلب على المياه الساخنة حين يزداد في أشهر الشتاء. وقد بلغ أقصى قيمة لمعامل التغطية الشمسية مقدار 0.745 في شهر أكتوبر وأقل قيمة في شهر يوليو بمقدار 0.48 حين بلغت أقصى معامل التغطية الشمسية للاقط الشمسي ذو السطح المستوي مقدار 0.665 في شهر أكتوبر وأقل قيمة 0.50 في شهر يوليو. هذا وقد بلغ المتوسط السنوي لمعامل التغطية الشمسية للاقط الشمسي ذو الأنابيب المفرغة واللاقط الشمسي ذو السطح المستوي 0.64 و0.60 على التوالي



الشكل (9) معامل التغطية الشمسية باستخدام اللاقط الشمسي ذو السطح المستوي واللاقط الشمسي ذو الأنابيب المفرغة خلال العام

الخلاصة والتوصيات.

تبحث هذه الدراسة إمكانية الحد من استهلاك الطاقة المطلوبة لتسخين المياه في مستشفى خاص في صنعاء، يتم استخدام برنامج المحاكاة TRNSYS لدراسة الأداء الحراري للنظام المقترح على مدار العام. ويمكن تلخيص أهم النتائج التي خرجت به الدراسة بالنقاط التالية:

- إجمالي الطاقة المستفاد منها باستخدام الطاقة الشمسية في تسخين المياه هي 87.76 ميغاوات. ساعة سنويا بنسبة 64 % من إجمالي الطاقة المطلوبة لتسخين المياه بالنظام الأساسي
- الطاقة المساعدة السنوية المستهلكة حوالي 49.2 ميغاوات في الساعة لمواجهة الحمل الحراري للمستشفى.
- المجمعات الشمسية ذو الأنابيب المفرغة أفضل من المجمعات الشمسية ذو السطح المستوي
- يمكن استنتاج أن استخدام أنظمة الطاقة الشمسية فعالة وأكثر صدقية للبيئة لذلك يفضل استخدامها ما أمكن من أجل تحقيق مستقبل مستدام

قائمة المراجع.

أولاً- المراجع بالعربية:

- جامعة الدول العربية-القطاع الاقتصادي إدارة الطاقة -أمانة المجلس الوزاري العربي للكهرباء (2015). دليل الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة في الدول العربية.

- جورج، رامي. (2011). "تحليل الأداء الحراري لنظام تسخين الماء الشمسي الحر". مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية - سلسلة العلوم الهندسية. 82-69:(1)33.
- خضير، علاء. الاسدي، جاسم. (2012). "حساب الكفاءة الحرارية لتصميمين مختلفين من السخانات الشمسية". مجلة أبحاث البصرة (العمليات)، 13(ب1):11-14.
- الكشريو، نوري. العائب، مصطفى. (2017). "دراسة أداء مجمعات شمسية كهرو حرارة تحت الظروف المناخية لمدينة طرابلس باستخدام برنامج المحاكاة TRNSYS". المجلة الدولية المحكمة للعلوم الهندسية وتقنية المعلومات، 13-8:(2)3.
- المطردي، علي. الغزيلي، محمد. الجاهوي، مصعب. (2017). "دراسة وتحليل أداء مجمع شمسي مسطح عمليا حسب الظروف الجوية لمدينة مصراته". المجلة الدولية المحكمة للعلوم الهندسية وتقنية المعلومات، 46-40:(1)4.

ثانياً- المراجع بالإنجليزية:

- AL-Ashwal, Ali. (2005). "All Renewable Energy Applications in Yemen are Best Practice". ISECO Science and Technology Vision.1:45-50.
- Alkadasi, Walid. Fuad. Khoday, Kishan. (2014) "policy note: Prospects of Solar Energy in Yemen". United Nations development program, environment and energy:1-16. <http://www.undp.org/content/dam/yemen/E&E/Docs/UNDP-YEM-Prospects%20of%20Solar%20Energy%20in%20Yemen-%20Policy%20Note.pdf>.
- Artur, Célia. Diana, Neves. Boaventura, Cuamba, António, Leão. (2018). "Comparison of two dynamic approaches to modelling solar thermal systems for domestic hot water". Sustainable Energy Technologies and Assessments.30:292-303.
- Ayompe, L. Duffy, A. McCormack, S. Conlon, M. (2011). "Validated TRNSYS model for forced circulation solar water heating systems with flat plate and heat pipe evacuated tube collectors". Applied Thermal Engineering.31(8-9):1536-1542.
- Hazami, Majdi. Kooli, Sami. Naili, Nabiha. Farhat, Abdelhamid. (2013)." Long-term performances prediction of an evacuated tube solar water heating system used for single-family households under typical Nord-African climate (Tunisia)". Solar Energy.94:283-298.
- Hazami, Majdi. Naili, Nabiha. Attar, Issam. Farhat, Abdelhamid.(2013)." Solar water heating systems feasibility for domestic requests in Tunisia: Thermal potential and economic analysis". Energy Conversion and Management.76:599-608.
- Morshed, Hadwan. Abdulsalam, Alkholidi. (2016). "Solar power energy solutions for Yemeni rural villages and desert communities".Renewable and Sustainable Energy Reviews.57:838-849.
- Mukbel, M. Bin Gadhi, Salem. (1999). "Potential of Solar Thermal Processes in Yemen-Case study of Solar Water Heater and solar Still". Journal of Science and Technology.4:15-22.

- Qiu, Shoufeng. Ruth, Matthias. Ghosh, Sanchari (2015). "Evacuated tube collectors: A notable driver behind the solar water heater industry in China". Renewable and Sustainable Energy Reviews. 47:580-588.
- R, Taylor. (2006). "Solar thermal technology and applications" in: National Renewable Energy Laboratory, briefing slides for NAEMI, Solar Electric and Thermal Training Workshop. <https://www.solarthermalworld.org/story/solar-thermal-technology-applications-2006>.
- TSOL Expert, 4.3 The program for the simulation and design of solar thermal systems, Germany: Valentin Energy Software, (2006).
- Walker, Andy, "Solar Energy technologies and project delivery for building ", 2013, John Wiley&Sons
- Zhang, Ruixiaoxiao. Shen, Geoffrey. Ni, Meng. Wong, Johnny (2018). "Techno-economic feasibility of solar water heating system: Overview and meta-analysis". Sustainable Energy Technologies and Assessments.30:164-173.