مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية
المجلد42 العدد (3) – 2026: 192- 206

Damascus University Journal for engineering sciences
Vo 42 number (3) -2026: 192-206

تحليل وتقييم الأداء الحراري لنظام تثاقلي لتسخين المياه بالطاقة الشمسية في مدينة دمشق

ثناء حسن[1*]

*[1]. مدرس، دكتور، مهندس، قسم هندسة الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، دكتوراه في علم الطاقة والبيئة.
t.hassan@damascusuniversity.sy.edu

الملخص:

تعد أنظمة تسخين المياه بالطاقة الشمسية ذات الدوران الطبيعي (التثاقلية) الخيار الأنسب لتأمين المياه الساخنة اللازمة للاستخدام المنزلي. في الأنظمة التثاقلية يتوضع الخزان أعلى المجمع الشمسي ويدور الوسيط الناقل للحرارة بين المجمع والخزان بتأثير الطفو الحراري، وبذلك يمكن الاستغناء عن المضخة وما يرافقها من مشاكل في الصيانة وفي تأمين الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيلها. يهدف البحث الى تحليل وتقييم أداء نظام تسخين شمسي تثاقلي يعمل وفق الشروط المناخية لمدينة دمشق وعلى مدار عام كامل. من أجل تحقيق ذلك اعتمدنا على طريقتين. الأولى حسابية باستخدام الطريقة المطورة عن طريقة F-chart التي تناسب عمل نظام التسخين الشمسي التثاقلي ذو التدفق المتغير، وتتيح هذه الطريقة حساب المساحة المثلى للواقط الشمسية المسطحة من أجل حمل مياه ساخنة محدد. والطريقة الثانية هي محاكاة النظام في بيئة TRNSYS الذي يتيح دراسة الأداء الحراري للنظام عند تغيرات مناخية ساعية على مدار العام. بينت النتائج أن المساحة المثلى للمجمعات الشمسية التي تغطي حمل مياه ساخنة منزلية مقداره (300 L/day) ودرجة حرارته 60 ˚C تساوي ($4\ m^2$). النظام الشمسي التثاقلي يستطيع تأمين حوالي (50 – 98 %) من حمل التسخين المنزلي المطلوب في مدينة دمشق حسب الشهر المدروس، وبلغ معامل التغطية الشمسية السنوي وسطياً (80 %) والكفاءة الحرارية للمجمع الشمسي بحدود 50 %. كما بينت النتائج أن النظام التثاقلي يؤمن استقرار درجات الحرارة في الخزان الحراري لأطول فترة زمنية ممكنة مما يرفع من كفاءة النظام. كما قمنا بإجراء مقارنة نتائج الطريقة الحسابية مع نتائج المحاكاة وكانت نسبة الخطأ في معامل التغطية في حدود مقبولة إجمالا لكل الأشهر على مدار العام.

الكلمات المفتاحية: تسخين المياه بالطاقة الشمسية، النظام التثاقلي، المحاكاة، TRNSYS، F-chart، معامل التغطية الشمسية.

تاريخ الإيداع: 2023/9/9
تاريخ القبول: 2023/12/11

حقوق النشر: جامعة دمشق – سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب **CC BY-NC-SA**

Thermal Performance Analysis and Assessment of Thermosyphon Solar Water Heater in Damascus

Thana Hassan*[1]

*[1] Assistant professor, Dr, General Mechanics Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus university, Energy and Environment. .

t.hassan@damascusuniversity.sy

Received: 9/9/2023
Accepted: 11/12/2023

Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a
CC BY- NC-SA

Abstract:

Natural circulation system (Thermosyphon) solar water heating systems are the most suitable option for securing domestic hot water. In thermosyphon systems, the tank is located above the solar collector, and the heat transfer medium circulates between the collector and the tank by thermal buoyancy, eliminating the need for the pump and problems associated with maintenance and securing the required electrical energy for its operation. The research aims to analyze and evaluate the performance of a thermosyphon solar heating system in Damascus. In order to achieve that, we adopted two methods. The first is a modified form of the computational F-chart method that is suitable for a thermosyphon solar heating system with variable flow, and this method allows calculating the optimal area of the flat solar collectors for a specific hot water load. The second method is simulating the system in TRNSYS environment, which allows studying the thermal performance of system at hourly climate changes throughout the year. Results showed that the optimal area for the solar collectors securing a domestic hot water load of (300 L/day) with a temperature of 60 ˚C is (4 m^2). The thermosyphon solar system can secure about (50-98%) of the required domestic heating load in Damascus according to the month studied, the annual solar fraction averaged (80%) and the thermal efficiency of the solar collector is about 50%. The results also showed that the thermosyphon system ensures the stability of temperatures in thermal storage tank for a long period of time, which increases the efficiency of system. We also made a comparison of the results of computational method with the results of simulation, and the percentage of error in the solar fraction was within acceptable limits for all months throughout the year.

Key words: Solar water heating, Thermosyphon system, Simulation, F-chart, TRNSYS, Solar fraction.

المقدمة:

في ظل أزمة الطاقة التي يشـــهدها العالم من ارتفاع اســـعارها وعدم توفرها وبالتحديد على الصـعيد المحلي، أصـبحت الحاجة إلى تبني بديل مستدام وفعال لمصـادر الطاقة التقليدية ضـرورة ملحة. وتعد الطاقة الشمسية من أكثر مصادر الطاقات المتجددة انتشـاراً وتؤمن قسـماً كبيراً من الطاقة اللازمة لأغراض التدفئة وتأمين المياه السـاخنة للاسـتخدام المنزلي وتوليد الكهرباء. تعد سـخانات المياه المنزلية ذات الدوران الطبيعي (التثاقلية) الخيار الأنسـب للاسـتخدام في القطاع السـكني فهي تحول الطاقة الشـمسـية مباشـرة إلى حرارة والتي يتم تخزينها في خزان تخزين المياه السـاخنة لحين الحاجة. تعتمد الانظمة التثاقلية على مبدأ الطفو الحراري حيث أنه بتغير درجة الحرارة سوف تتغير الكثافة وبذلك المائع ذو درجة الحرارة الأعلى أي الأقل كثافة سـوف يطفو فوق المائع البارد أي أننا لانحتاج لوجود مضـخة لذلك يتوضـع الخزان في هذه الانظمة أعلى المجمع الشـمسـي. كي نضـمن درجة الحرارة المطلوبة يتم وضـع عنصـر تسـخين كهربائي مسـاعد في خزان التخزين الحراري مهمته تأمين الحمل الحراري المطلوب في حال عجز النظام الشـمسـي عن تغطيته أوقات الذروة أو في حال غياب الاشعاع الشمسي. وكلما كانت الطاقة المساعدة اللازمة أقل كانت كفاءة النظام الشمسي أعلى. يهدف البحث إلى تحليل وتقييم أداء نظام تسخين شمسي تثاقلي يعمل وفق الشـروط المناخية لمدينة دمشـق وعلى مدار عام كـامـل. من أجـل تحقيق ذلـك اعتمـدنـا على طريقتين. الأولى حسـابية باسـتخدام طريقة مطورة عن طريقة f-chart تناسـب عمل نظام التسخين الشمسي التثاقلي ذو التدفق المتغير، حيث أن الطريقة التقليدية ل f-chart تناسـب الأنظمة القسـرية فقط ذات التدفق الثابت، وتتيح هذه الطريقة حساب المساحة المثلى للواقط الشـمسـية المسـطحة من أجل حمل مياه سـاخنة محدد. والطريقة الثانية هي محاكاة النظام في بيئة TRNSYS الذي يتيح دراسـة الأداء الحراري للنظام عند تغيرات مناخية سـاعية على مدار العام. كما سـيتم اجراء مقارنة بين الطريقتين وتعليل سبب الاختلاف.

1- الدراسات المرجعية:

تُعد أنظمة تسخين المياه ذات الدوارن الطبيعي الأكثر استخداماً في القطاع السكني وبما أن دوران المياه في هذه الأنظمة يعتمد على مبدأ الطفو الحراري مما يجعل لها تدفق متغير لحظياً مع الزمن ويتبع لشـدة الاشـعاع الشـمسـي، فقد تناولت العديد من الدراسات السابقة تحليل وتقييم الأداء الحراري لهذه الانظمة بما يتوافق مع الشـــروط المنـاخيـة المحيطـة. قـام البـاحـث Ekanayakeوآخرون (2020) باســـتخدام مجموعة بيانات تجريبية على ســـخان مياه بالطاقة الشـــمســـية يعمل بالدوران الطبيعي (مسـاحة اللاقط $2.16\ m^2$ ويواجه الجنوب بزاوية ميل قدرها $14°$ وخزان تخزين 150 ليتر) لنمذجة ومحاكاة الأداء السـنوي للنظام وفق الشـروط المناخية لمدينة في تايلاند. بينت نتائج المحاكاة السـنوية أن كفاءة اللاقط السـنوية بلغت 49 % ودرجة حرارة خرج اللاقط وسـطياً $48\ °C$ ودرجة حرارة التخزين الوسـطية بلغت $47\ °C$. قام الباحث Freegahوآخرون (2019) باجراء دراسـة عددية وتجريبية على سـخان ماء شـمسـي يعمل بالنمط التثاقلي ويتدفق سـائل نقل الحرارة من المجمع الشـمسـي في حلقة مغلقة إلى مبادل حراري مغمور داخل خزان المياه. تم تطبيق تدفق حراري ثابت على اللاقط بمعدل $500\ [W/m^2]$ من اربعة مصـابيح هالوجين اصـطناعية لمدة خمس سـاعات كبديل عن الاشـــعاع الشـــمســـي. واما الدراســـة العددية فقد أجريت باســـتخدام طريقة الفروق المنتهية CFD والبرامج الحاســـوبية. توصـل الباحثون إلى أن الخزان وصـل إلى درجة حرارة قصـوى قدرها $34\ °C$ في نهاية الاختبار عند معدل تدفق كتلي ثابت تقريباً قدره $0.0035\ kg/s$. كما توصـــل الباحث Siqueira وآخرون (2020) لمجموعة من المعادلات الرياضـية التي تحدد متوسـط الكفاءة الشـهرية السـنوية لنظام تسـخين المياه بالطاقة الشمسية ذي الدوران الطبيعي للمياه يتوافق مع الشروط المناخية

للبرازيل. تم التوصل لهذه المعادلات من خلال اجراء عدد كبير من عمليات المحاكاة باستخدام برنامج TRNSYS للسلوك الحراري لأنظمة تسخين المياه بالطاقة الشمسية التثاقلية والأكثر شيوعاً في البرازيل. وتم ملاحظة أن النظام يتأثر بشكل كبير بمجموعة من البارامترات مثل نسبة حجم الخزان إلى مساحة اللاقط، وحمل المياه الساخنة المطلوب ودرجة حرارة المياه الساخنة المطلوبة والشروط المناخية بالاضافة إلى البارامترات المميزة للاقط : F_RU_L و$F_R(\tau\alpha)$. قام الباحث Abdunnabi وآخرون (2021) بإجراء محاكاة لعدة أنظمة شمسية تثاقلية مهمتها تزويد العائلات الليبية بنمط حمل مياه ساخنة محدد وبدرجة حرارة مطلوبة تتراوح ضمن المجال (45 – 60 ˚C)، وبينت النتائج أن نسبة حجم الخزان إلى مساحة اللاقط المثلى التي تتوافق مع الشروط المناخية لمدينة طرابلس في ليبيا تتراوح ضمن المجال (49 – 60 Lit/m^2). قام الباحث Sami وآخرون (2016) بإجراء نمذجة ومحاكاة لسخان مياه شمسي تثاقلي. تمت كتابة معادلات حفظ الطاقة لتدفق مائع نقل الحرارة وخزان التخزين بصيغة الفروق المنتهية، وتم حلها للحصول على مميزات النظام عند معدلات اشعاع شمسي مختلفة ومعدلات تدفق كتلية متغيرة ودرجات حرارة مختلفة للمياه. وأظهرت المقارنة بين البيانات التجريبية والنمذجة العددية تقارباً كبيراً. يهدف هذا البحث إلى تحليل الاداء الحراري طويل الأمد لسخانات المياه الشمسية ذات الدوران الطبيعي في مدينة دمشق حسابياً وعددياً، وتحديد كمية الطاقة المساعدة الشهرية والسنوية الضرورية لتلبية الحمل المطلوب من المياه الساخنة للاستخدام المنزلي. بالاضافة الى المقارنة بين الطريقتين الحسابية والعددية.

2- مواد البحث وطرائقه:

1.2. طريقة F-CHART المستخدمة في حساب الانظمة التثاقلية

إن المؤشر الأهم في معرفة كفاءة أنظمة التسخين الشمسي المنزلية DHW هو تحديد معامل التغطية الشمسي الشهري والسنوي والذي يعبر عن مقدار حمل المياه الساخنة الذي يمكن تغطيته بواسطة الطاقة الشمسية على مدار العام، لأن العجز في نظام التسخين الشمسي في تغطية الحمل المطلوب سوف يتم تعويضه بواسطة نظام تسخين تقليدي مثل المراجل أو سخانات كهربائية والذي ينعكس بدوره على جدوى النظام بيئياً واقتصادياً.

ولحساب التغطية على طول الفترة المدروسة لأنظمة التسخين الشمسية ظهرت طرق حسابية مثل طريقة F-chart الأكثر استخداماً، ولكنها تقيم أداء الأنظمة القسرية ذات التدفق الثابت وخزان بحالة مزج كامل (فارس، 2016) و (Duffie et al, 2006). وبما أن أنظمة التسخين الشمسية التثاقلية لها تدفق متغير لحظياً مع الزمن ويتبع لشدة الإشعاع الشمسي، والتدفق في النظام التثاقلي يعد ضمن نطاق التدفق المنخفض، فقد تم استخدام الطريقة المطورة عن طريقة F-CHART الأصلية للانظمة القسرية لتلائم عمل الأنظمة التثاقلية ذات التدفق المتغير وحالة الخزان المنضد حرارياً (Malkin, 1985).

يُحسب معامل التغطية الشمسية الشهري من العلاقة (1)، أما معامل التغطية السنوي (F) فيتبع لمعامل التغطية الشهري fi وحمل المياه الساخنة الشهري Li ويحسب من العلاقة (2). أما حمل المياه الساخنة الشهري فيحسب من العلاقة (3).

$$fi = 1.029y - 0.065x - 0.245y^2 + 0.0018x^2 + 0.0215y^3 \quad (1)$$

$$F = \frac{\Sigma f_i L_i}{\Sigma L_i} \quad (2)$$

$$Li = V * \rho * C_P * (T_{set} - T_{mains}) \quad (3)$$

حيث:

L: إجمالي حمل التسخين الشهري المطلوب [MJ/month].

V: الاستهلاك الحجمي من المياه بالشهر [m^3]

ρ: الكثافة [kg/ m^3].

Cp: السعة الحرارية النوعية [kJ/kg.k].

T_{set}: درجة حرارة المياه الساخنة المطلوبة لتغذية الحمل وتحدد من التطبيق الهندسي المراد تزويده بالطاقة [C°].

T_{mains}: درجة حرارة المياه الباردة الوسطية الشهرية التعويضية [C°].

تعبر X عن نسبة الطاقة المفقودة من المجمع عند درجة الحرارة المرجعية إلى حمل التسخين، وتعبر Y عن نسبة الطاقة الشمسية الممتصة إلى حمل التسخين. تحسب X و Y من أجل الخزان بحالة المزج الكامل من العلاقتين 4 و 5.

$$X_{mix} = F_R U_L \frac{F'_R}{F_R} (T_{ref} - T_a)\,\Delta t \frac{A_C}{L} \quad (4)$$

$$Y_{mix} = F_R(\tau\alpha)_n \frac{F'_R}{F_R}\left[\frac{\overline{(\tau\alpha)}}{(\tau\alpha)_n}\right]\overline{H_t}\, N \frac{A_c}{L} \quad (5)$$

حيث F_R : معامل ازالة الحرارة من اللاقط

U_L: معامل الضياع الحراري الكلي من اللاقط [W/m^2 K]

$\frac{F'_R}{F_R}$: معامل تصحيح أداء المجمع الشمسي (في حال عدم وجود مبادل حراري تكون مساوية الواحد)

T_{ref}: درجة الحرارة المرجعية [C°]. و Ta: درجة حرارة الوسط المحيط [C°].

A_c: مساحة المجمع الشمسي [m^2]، و Δt: عدد الثواني في الشهر

$(\tau\alpha)_n$: حاصل ضرب معامل النفاذية لغطاء المجمع بمعامل امتصاصية السطح الماص عند الورود الناظمي للاشعة الشمسية.

$\left[\frac{\overline{(\tau\alpha)}}{(\tau\alpha)_n}\right]$: معامل التصحيح الناتج عن تغير زاوية ورود الاشعة الشمسية على سطح المجمع.

$\overline{H_t}$: المتوسط الشهري للاشعاع الشمسي اليومي الوارد على سطح المجمع الشمسي [J/m^2-day] .

N: عدد أيام الشهر

تبين المعادلة (6) العلاقة بين البارامترين X و Y في حالة المزج الكامل للخزان (X_{mix}, Y_{mix}) وحالة التطبق الحراري لنفس الخزان (X_{str},Y_{str}).

$$\frac{\Delta X}{\Delta X_{\max}} = \frac{X_{\text{mix}} - X_{\text{str}}}{X_{\text{mix}}} = \frac{Y_{\text{str}} - Y_{\text{mix}}}{Y_{\max} - Y_{\text{mix}}} \quad (6)$$

($F_R = 1$ عندما Y_{max})

وبإيجاد النسبة $\frac{\Delta X}{\Delta X_{\max}}$ من العلاقة (7) يمكن تحديد البارامترين Y_{str} و X_{str}.

$$\frac{\Delta X}{\Delta X_{\max}} = \frac{C_1(\frac{\overline{M_C}}{M_L})}{[C_2.(\frac{\overline{M_C}}{M_L}) + C_3.F + C_4.F^2]^2 + 1} \quad (7)$$

حيث C_1, C_2, C_3, C_4 ثوابت (Malkin, 1985). و Y_{max} تحسب من العلاقة (8)، ويتم تحديد النسبة $\frac{\overline{M_C}}{M_L}$ من المعادلة (9):

$$Y_{\max} = \frac{A_C.(\overline{\tau\alpha}).\overline{H_T}.N}{L} \quad (8)$$

$$\frac{\overline{M_C}}{M_L} = \frac{\frac{\dot{m}_{USE}}{A_C} * \overline{N}_p}{\frac{V_L}{A_C}} \quad (9)$$

حيث أن:

$\overline{M_c}$: المتوسط الشهري لمعدل التدفق اليومي في اللاقط [$\frac{kg}{day}$]

M_L: معدل تدفق الحمل [$\frac{kg}{day}$]

$\dot{m}_{USE}$: التدفق الابتدائي المستخدم في الطريقة الحسابية [$\frac{kg}{h}$]

V_L : كمية الحمل اليومية [$\frac{kg}{day}$]

لحساب المتوسط الشهري المكافئ لزمن عمل المضخة في دارة المجمع $\overline{N}_p$ تستخدم المعادلة (10):

$$\overline{N}_p = -\overline{H}_T(A + 2B.\overline{I}_c) \quad (10)$$

حيث A و B ثوابت تتعلق بمعامل الوضوح الشهري، و $\overline{I}_c$ هو المتوسط الشهري للاشعاع الحرج.

يتم حساب المتوسط الشهري لدرجة حرارة الخزان ($\overline{T}_{tank}$) من العلاقة (11):

$$\frac{\overline{T}_{\text{tank}} - T_{\text{mains}}}{T_{\text{set}} - T_{\text{mains}}} = 0.117F + 0.356F^2 + 0.424F^3 \quad (11)$$

وأما المتوسط الشهري لدرجة حرارة الماء الخارج من المجمع فيحسب من العلاقة (12):

$$\overline{T}_o = \overline{T}_i + \frac{A_C}{\dot{m}.C_P.\overline{N}_P}[\overline{H}_T.F_R(\overline{\tau\alpha}) - F_R U_L(\overline{N}_P)(\overline{T}_i - \overline{T}_a)] \quad (12)$$

حيث $\bar{T}_i$: المتوسط الشهري لدرجة الحرارة الداخلة للمجمع الشمسي [°C].

إن تدفق الوسيط الناقل للحرارة ضمن اللاقط ($\dot{m}_{USE}$) هو البارامتر الأهم والأصعب عند تصميم الأنظمة التثاقلية كونه متغيراً حسب شدة الاشعاع الشمسي، ويتم تقديره بـ " تدفق مكافئ " ثابت كما في الانظمة القسرية وذلك لكل شهر من اشهر السنة. حيث يتم تخمين قيمة أولية لتدفق المائع ضمن النظام التثاقلي، وباستخدام الطريقة العددية التكرارية يتم التوصل إلى التدفق الحدي الذي يبدأ عنده السائل بالتدفق في الدارة وهو التدفق الذي يوازن قوة الطفو الناتجة عن فرق الكثافة (الضاغط التثاقلي) مع ضياعات الاحتكاك في أجزاء النظام أي يجعل الفرق بين الضاغط التثاقلي وضاغط هبوط الضغط بحدود 1%. ويتم اعتماد "التدفق المكافئ الشهري" كتدفق ابتدائي للشهر الذي يليه.

وتُحسب القوة المحركة للنظام التثاقلي والناتجة عن فرق الكثافة للسائل بين مدخل ومخرج اللاقط بالعلاقة (Malkin, 1985) :(13)

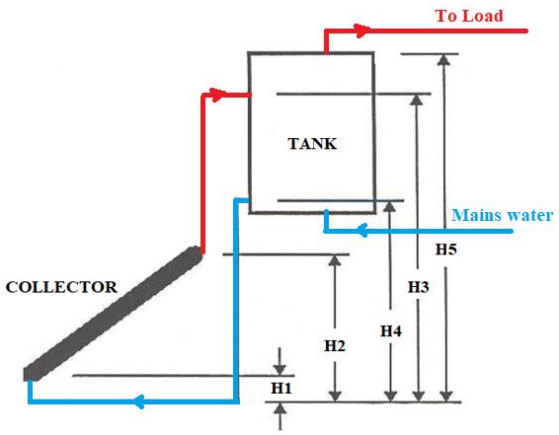
$$h_T = \frac{1}{2}(S_i - S_o)\left[2(H_3 - H_1) - (H_2 - H_1) - \frac{(H_3 - H_4)^2}{(H_5 - H_4)}\right] \quad \textbf{(13)}$$

حيث:

S_i: الجاذبية النوعية للسائل عند مدخل اللاقط.

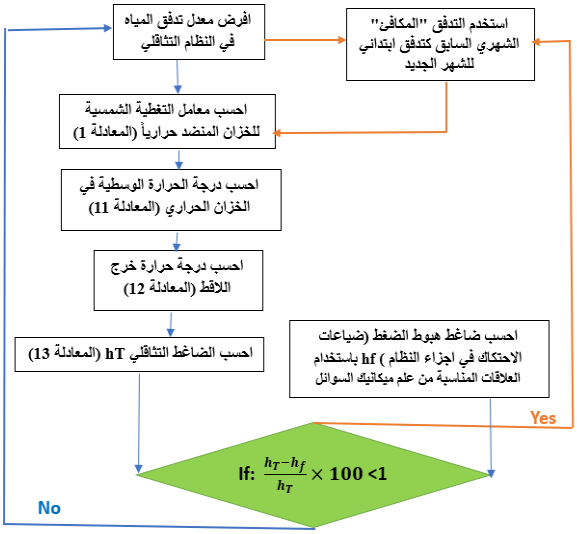
S_o: الجاذبية النوعية للسائل عند مخرج اللاقط.

$H_1 - H_5$: ارتفاعات تتعلق بتركيب النظام الشمسي [m]، وموضحة بالشكل 1.



الشكل (1) النظام الشمسي التثاقلي والارتفاعات المميزة له

بعد حساب القوة المحركة الناتجة عن فرق الكثافة لنظام التسخين الشمسي التثاقلي وضياعات الاحتكاك في الدارة وايجاد نسبة الفرق بينهما، فإذا كانت هذه النسبة أكبر من 1% نقوم باستخدام تدفق جديد ونعوضه في الطريقة الحسابية المتبعة بدلا من التدفق الابتدائي المخمن، ونقوم باستخدام طريقة التكرار وتعويض التدفق الجديد في الطريقة الحسابية إلى أن يصبح الفرق في حدود 1% الشكل (2).



الشكل (2) المخطط الانسيابي للطريقة التكرارية المعتمدة في حسابات النظام التثاقلي

كي يكون النظام فعالاً من الناحية الحرارية يجب أن يحقق معامل تغطية مرتفع وطاقة انتاجية مرتفعة. وتكون المساحة

المثلى للواقط الشمسية المحققة لهذين الشرطين ($A_{optimal}$) موافقة للقيمة العظمى لجدائهما (العلاقة 14) (فارس، 2016) و (Duffie et al, 2006).:

$$(F * P)max = Aoptimal \qquad (\mathbf{14})$$

حيث تعرف الطاقة الانتاجية بأنها الطاقة المفيدة الناتجة من كل متر مربع من اللواقط وتعطى بالعلاقة التالية :

$$P = \frac{\Sigma(L_i f_i)}{A_c} \qquad (\mathbf{15})$$

طورت طريقة F-CHART لأجل قدرة تخزين [L/m^2] 75 من الماء المخزن لكل [m^2]1 من مساحة اللواقط. في حال كانت السعة التخزينية مختلفة عن القيمة القياسية فيجب القيام بتصحيح للبارمتر X خاص بسعة التخزين كالتالي (فارس، 2016) و (Duffie et al, 2006).:

$$\frac{X_c}{X} = \left[\frac{M_{w,a}}{M_{w,s}}\right] \qquad (\mathbf{16})$$

Xc: قيمة البارمتر X المصححة.

Mw,a: سعة التخزين الحقيقية لكل متر مربع من مساحة اللواقط [L/m^2].

Mw,s: سعة التخزين القياسية لكل متر مربع من مساحة اللواقط [L/m^2].

2.3. مواصفات نظام تسخين المياه الشمسي التثاقلي الذي تمت عليه الدراسة:

النظام المدروس مهمته تأمين المياه الساخنة المنزلية لعائلة مؤلفة من أربعة أشخاص. وبفرض كل شخص يحتاج 75 ليتر من المياه االساخنة يومياً (ودرجة الحرارة المطلوبة 60 °C)، فيكون حمل المياه الساخنة اليومي 300 ليتر. يبين الشكل (3) معدل الاستهلاك الساعي للمياه الساخنة على مدار اليوم (Joseph, 2011).

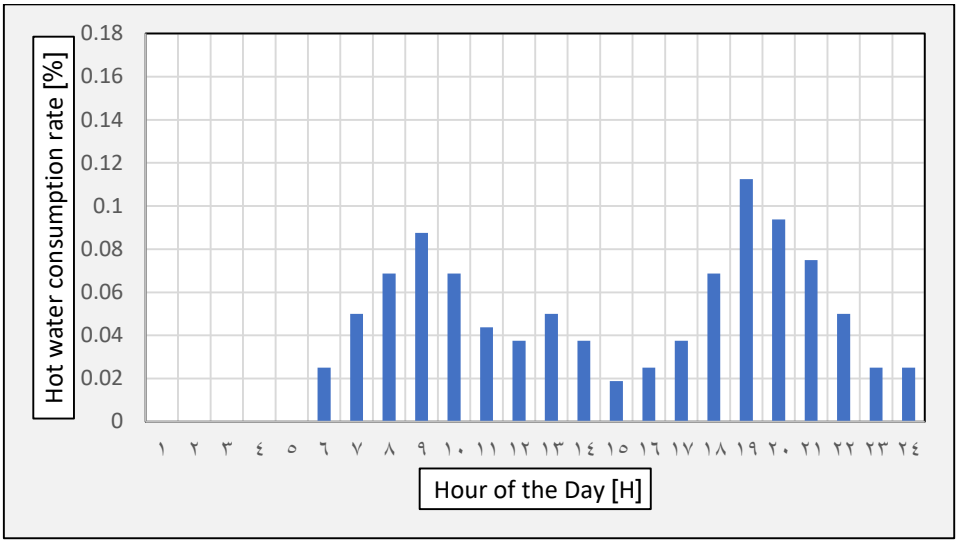
اللاقط الشمسي من النوع المسطح يميل عن الأفق بزاوية 45 درجة وموجه نحو الجنوب. البارامترات الرئيسية المميزة للاقط المسطح المستخدم:

($F_RU_L = 7.2$ [$W/m^2.°C$], $F_R(\tau\alpha)_n = 0.74$, $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$ = 0.96) وتم الحصول عليها من اختبار اللاقط المسطح وفق الشروط المناخية لمدينة دمشق (الجوهري وآخرون، 2017).

مساحة اللواقط الشمسية: 4 متر مربع (تم الحصول عليها بالاعتماد على طريقة F-chart المشروحة سابقاً).

الخزان الحراري اسطواني الشكل حجمه 360 ليتر وارتفاعه متر واحد. ويتوضع أعلى اللاقط الشمسي ويحتوي على سخان مساعد يعمل في حال عجز النظام الشمسي عن تأمين درجة الحرارة المطلوبة. الارتفاعات المميزة لتركيب النظام الشمسي والمبينة بالشكل (1) هي: ($H_1 = 0$, $H_2 = 0.98$, $H_3 = 1.78$, $H_4 = 0.98$, $H_5 = 1.98$ m).

– تمت الدراسة وفقاً للظروف المناخية لمدينة دمشق.



الشكل (3) معدل الاستهلاك الساعي للمياه الساخنة على مدار اليوم

3.3. محاكاة النظام التثاقلي في بيئة TRNSYS

برنامج TRNSYS (Transient System Simulation Program) هو بيئة متكاملة لمحاكاة الأنظمة الحرارية المتغيرة مع الزمن. يضم النظام الشمسي عدة مكونات موصولة مع بعضها لكي تؤدي مهمة محددة مثل تزويد المياه الساخنة. يحاكي برنامج TRNSYS هذا النظام بربط المكونات مع بعضها تماماً كما يتم في النظام الفيزيائي الحقيقي، وكل مكون هو عبارة عن برنامج جزئي Subroutine يدعى Type. Type 45 هو النموذج المتضمن في مكتبة برنامج المحاكاة TRNSYS والذي يحاكي الأداء الحراري للاقط والخزان معاً في النظام التثاقلي. يُقسم الخزان في هذا النموذج الى عقد حرارية (مجموع سماكاتها يساوي ارتفاع الخزان) وتحدد من قبل المستخدم. وتُطبق معادلة توازن الطاقة على كل عقدة في الخزان (المعادلة 17) (Klein et al, 2004):

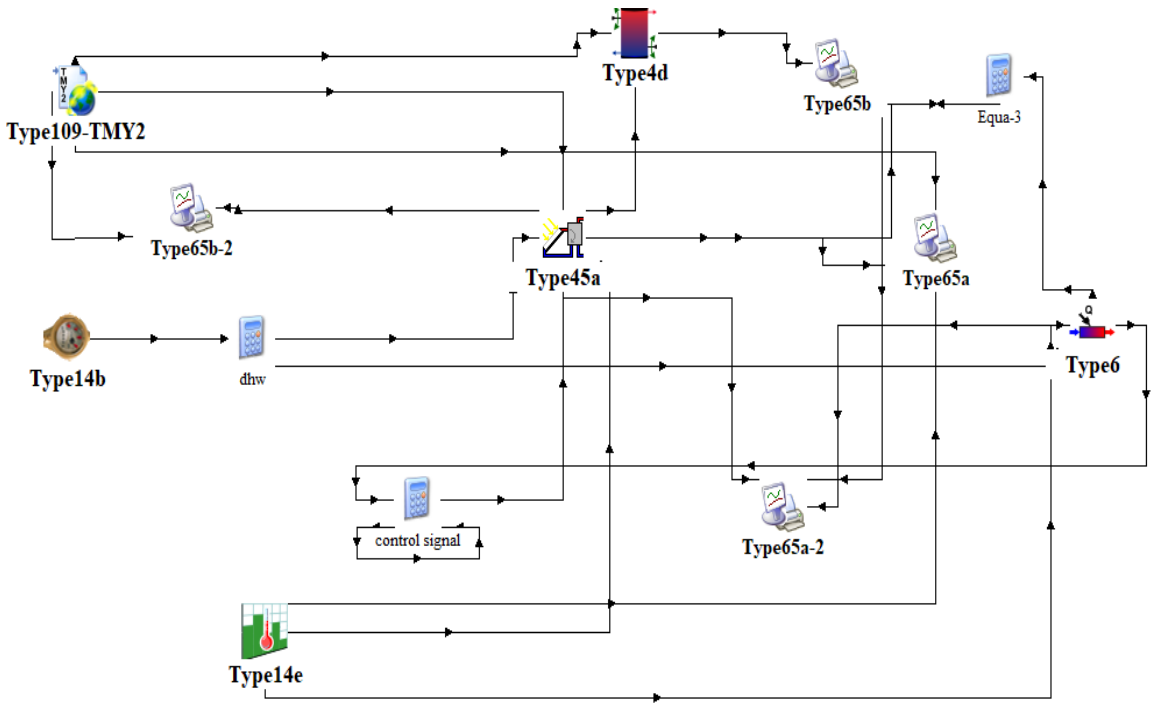
$$\frac{dE_{sys}}{dt} = M_i\, C_{pf}\, \frac{dT_i}{dt} = \dot{m}_h\, C_{pf}\,(T_h - T_i) + \dot{m}_L\, C_{pf}\,(T_L - T_i) + U\, A_i\,(T_{env} - T_i) + \dot{Q}_i \qquad (17)$$

حيث Mi: كتلة السائل في العقدة i. Cpf– الحرارة النوعية لسائل الخزان. Ti: درجة حرارة العقدة i. t: الزمن. T_h: درجة حرارة السائل المتدفق من اللاقط للخزان. T_L: درجة حرارة السائل المتدفق من الخزان للحمل. $\dot{m}_L$: معدل التدفق الكتلي للسائل المتدفق للحمل. $\dot{m}_h$: معدل التدفق الكتلي للسائل المتدفق من اللاقط للخزان. Ai: مساحة سطح العقدة i. U: معامل الضياع الحراري من الخزان للوسط المحيط. T_{env}: درجة حرارة البيئة المحيطة بالخزان. و $\dot{Q}_i$: معدل الطاقة الداخلة من قبل السخان المساعد للعقدة i. ويتم حل المعادلة (17) من أجل خطوة زمنية (Δt) يحددها المستخدم، بالتالي تتغير الطاقة الكلية للمجموعة من الحالة الأولية (E_i) إلى الحالة النهائية (E_f) خلال الخطوة الزمنية المعتبرة، أي:

$$\frac{dE_{sys}}{dt} = \Delta \dot{E}_{sys} \approx \frac{\Delta E_{sys}}{\Delta t} = \frac{E_f - E_i}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta t}\, M_i\, C_{pf}\,(T_{i,f} - T_{i,i}) \qquad (18)$$

حيث $T_{i,f}$ و $T_{i,i}$: درجة حرارة العقدة i عند نهاية وبداية الخطوة الزمنية بالترتيب.

قمنا باجراء محاكاة للنظام التثاقلي المبين بالشكل (1) والذي يتمتع بالمواصفات المذكورة سابقاً باستخدام برنامج TRNSYS. ويبين الشكل (4) لوحة المحاكاة للنظام المدروس.



الشكل (4) لوحة المحاكاة للنظام الشمسي المدروس

النماذج المستخدمة في لوحة المحاكاة هي:

Type 45a (Thermosyphon Collector-Storage Subsystem): يحاكي أداء النظام التثاقلي ويدمج بين الخزان واللاقط معاً. وقد تم ادخال جميع البارامترات المميزة للاقط والخزان والتي استُخدمت أو تم الحصول عليها من طريقة F-chart. ومن خرج هذا النموذج يمكن الحصول على الطاقة المساعدة اللازمة Qaux.

Type 14b (Water draw): يستخدم لادخال بروفايل حمل الماء الساخن المبين في الشكل (3).

Type 14e (Mains water temp): تم في هذا النموذج ادخال درجات حرارة الماء البارد القادم من الشبكة إلى الخزان لكل شهر من أشهر السنة في مدينة دمشق.

Type 109-TMY2 (Weather data processor): يقرأ هذا النموذج بيانات الطقس للمدينة المدروسة وقد تم استيراد ملف الطقس الخاص بمدينة دمشق من مكتبة TRNSYS والذي يحتوي عى بيانات الطقس الوسطية لسنة نموذجية على مدار فترة زمنية تمتد لعشرات السنين مأخوذة من محطات الرصد العالمية.

Type 4d (Storage tank): تم استخدامه فقط لإظهار التطبق الحراري (Thermal stratification) في خزان النظام التثاقلي ولعدم إمكانية الحصول على شكل التطبق الحراري في النموذج Type 45a. تم تقسيم الخزان إلى أربع عقد حرارية بسماكات متساوية.

Type 6: تم إضافة هذا النموذج للحصول على معدل الطاقة اللازمة لتلبية الحمل (Qload).

Equa: تم استخدامه لادخال معادلة تربط تشغيل السخان المساعد بوجود استهلاك للمياه الساخنة بالشكل التالي:

$$\text{control signal}=Gt(Q_L,0)*Y_1+(1-Gt(Q_L,0))*Y_2$$

حيث Y_1: إشارة دخل (تساوي 1). وY_2: إشارة دخل (تساوي 0).

تُقرأ هذه المعادلة بالشكل التالي: اذا كانت Qload > 0 فإن إشارة التحكم تساوي Y_1 ، عدا ذلك فإن إشارة التحكم تساوي Y_2. وبالتالي في حال وُجد حمل استهلاك يتم تشغيل السخان

المساعد اذا دعت الحالة لتشغيله، وفي حال عدم وجود حمل استهلاك لايتم تشغيل السخان المساعد.

Type 65: يستخدم لاظهار النتائج.

بعد تشغيل المحاكاة يتم الحصول على كل من Qload و Qaux لكل شهر من أشهر السنة. وباستخدام المعادلة (19) يتم حساب معامل التغطية الشمسية الشهري fi:

$$fi = \frac{Qload - Qaux}{Qload} \qquad (19)$$

وتحسب الكفاءة الحرارية للاقط الشمسي (مردود اللاقط) من المعادلة (20):

$$\eta = \frac{\sum Q_u}{\sum H_t . A_c} \qquad (20)$$

حيث:

$\sum Q_c$: كمية الطاقة المفيدة الشهرية [kJ/month].

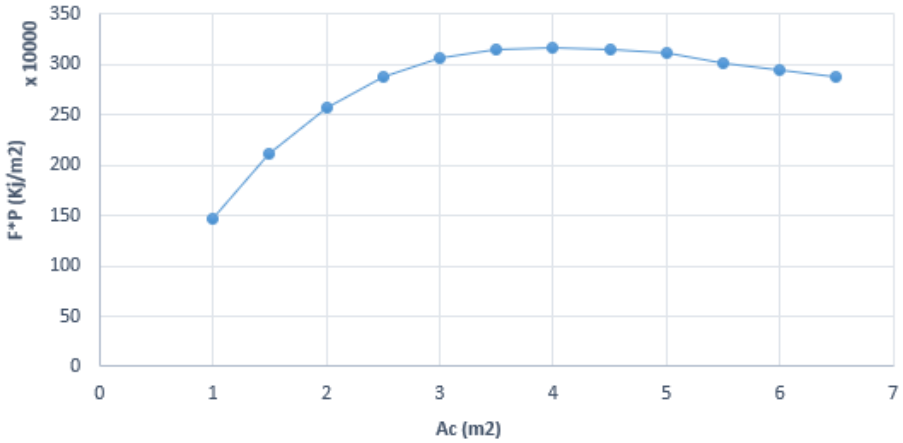
$\sum H_t$: شدة الاشعاع الشمسي الشهري الساقط على سطح اللاقط [MJ/m^2.month].

A_c: مساحة اللواقط الشمسية [m^2].

4. النتائج والمناقشة:

14. المساحة المثلى للواقط الشمسية المسطحة

بالاعتماد على الطريقة الحسابية F-chart وباستخدام طريقة التكرار على برنامج اكسل والمشروحة سابقاً تم حساب معامل التغطية الشمسية لأشهر السنة عند 12 قيمة مختلفة لمساحات اللواقط الشمسية المسطحة تبدأ من 1 m^2 حتى 6.5 m^2 وبفارق 0.5 m^2 بين كل قيمة والقيمة التي تليها، فتبين أن المساحة المثلى للواقط الشمسية المسطحة للنظام الشمسي المدروس في مدينة دمشق والتي تؤمن حمل المياه الساخنة المحدد وتحقق المعادلة (14) تساوي 4 m^2 (الشكل 5).



الشكل (5) ايجاد المساحة المثلى للواقط الشمسية المسطحة

4

..2. تحليل الأداء الطاقي للنظام الشمسي ومردود اللاقط:

يعرض الجدول (1) نتائج محاكاة النظام الشمسي المدروس وهي القيم الشهرية لكل من طاقة الحمل المطلوبة والطاقة المساعدة اللازمة وكمية الطاقة المفيدة ومعامل التغطية الشمسية ومردود اللاقط.

الجدول (1) نتائج محاكاة النظام الشمسي

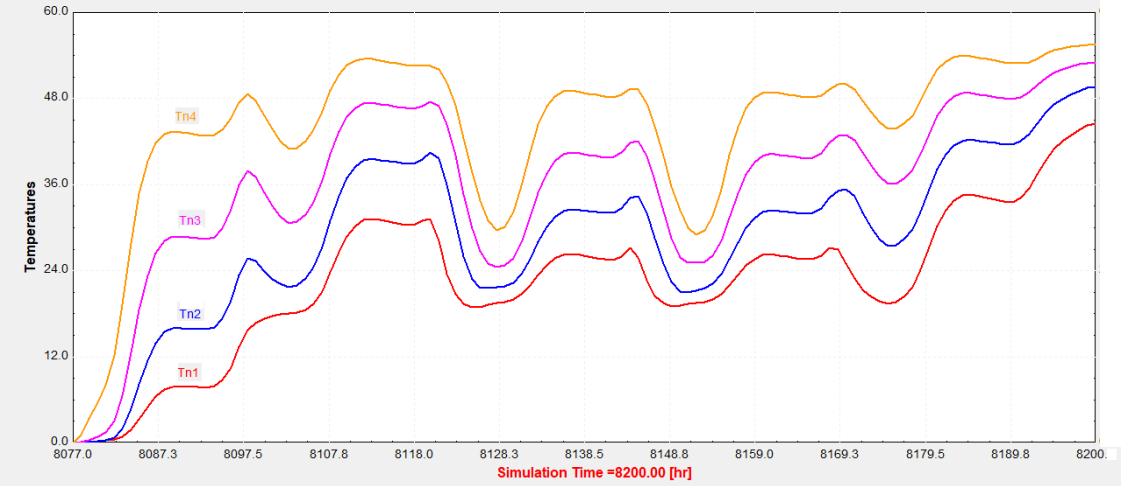
Month	Qload [GJ/month]	Qaux [GJ/month]	f (TRNSYS)	Qu (MJ/Month)	η
Jan	1.68	0.73	0.57	999	44.52%
Feb	1.57	0.69	0.56	1055.6	45.98%
Mar	1.71	0.37	0.78	1388.8	47.46%
Apr	1.58	0.31	0.8	1305	47.70%
May	1.52	0.21	0.86	1376.4	48.26%
Jun	1.36	0.11	0.92	1365	48.61%
Jul	1.33	0.06	0.96	1475.6	49.58%
Aug	1.31	0.03	0.98	1543.8	49.80%
Sep	1.29	0.04	0.97	1524	49.22%
Oct	1.41	0.12	0.92	1478.7	49.07%
Nov	1.47	0.24	0.83	1296	47.16%
Dec	1.64	0.84	0.49	846.3	42.66%

يتضح من الجدول (1) أن النظام الشمسي التثاقلي يمكن أن يزود حمل التسخين المنزلي المطلوب في مدينة دمشق بنسبة 50 % تقريباً في اشهر الشتاء (Jan-Dec-Feb)، وفي باقي الأشهر يستطيع النظام تأمين حوالي 78 الى 98 بالمئة من حمل التسخين المطلوب حسب الشهر. وكلما كان معامل التغطية الشمسية أكبر، نقصت الطاقة المساعدة اللازمة والتي يتم تأمينها بواسطة أحد مصادر الطاقة التقليدية. وأما الكفاءة الحرارية للاقط الشمسي فكانت بحدود الـ 50 بالمئة.

.34. التنضيد الحراري (Thermal stratification) في الخزان

يعرض الشكل (6) التنضيد أو التطبق الحراري في الخزان للنظام المدروس على مدار خمسة أيام من شهر كانون الأول.

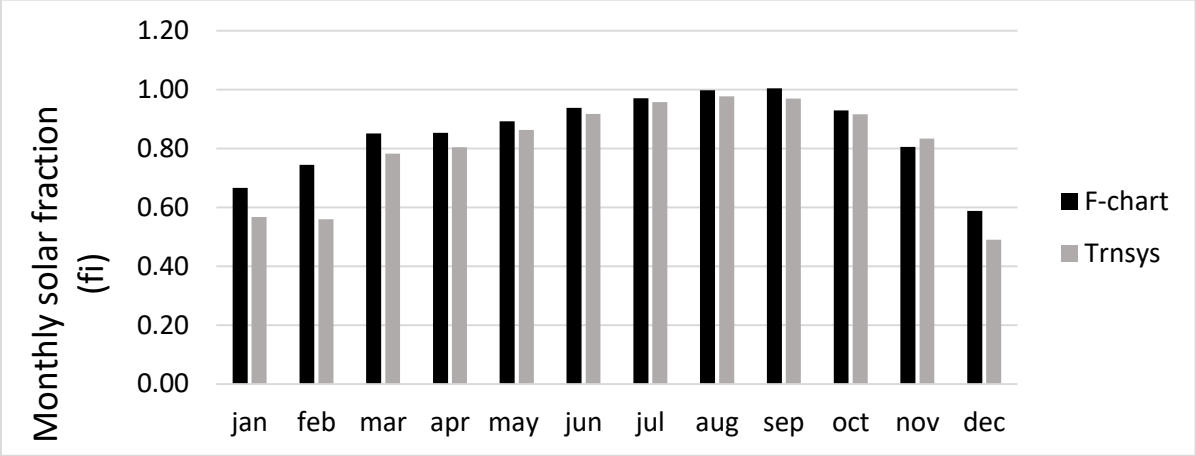
حيث تمثل (Tn_4) درجة حرارة العقدة (أو الطبقة) الحرارية العليا في الخزان و (Tn_1) درجة حرارة الطبقة الحرارية الأدنى في الخزان. الجريان في النظام التثاقلي هو تابع للإشعاع الشمسي وبما أن التدفق في النظام التثاقلي يعد ضمن نطاق التدفق المنخفض، فإن هذا بدوره يؤدي إلى كون خزان النظام التثاقلي منضد حرارياً (كما يتضح من الشكل 6) مما ينتج عنه استقرار في درجات الحرارة في الخزان لأطول فترة زمنية ممكنة وبالتالي الحصول على درجات حرارة مناسبة للسحب والتفريغ وتحسين أداء النظام.



الشكل (6) التطبق الحراري في الخزان

4.4. مقارنة نتائج الطريقة الحسابية مع نتائج المحاكاة:

تم تصميم النظام التثاقلي لتسخين المياه المنزلية وفق الظروف المناخية لمدينة دمشق وذلك باستخدام الطريقة الحسابية F-chart والمحاكاة في بيئة TRNSYS. يوضح الشكل (7) المقارنة بين قيم معامل التغطية الشمسية الشهري المحسوبة بطريقة F-chart وباستخدام المحاكاة. ويعرض الجدول (2) قيم معامل التغطية الشمسية الشهري والسنوي ومقدار الاختلاف بين الطريقتين كنسبة مئوية. بمقارنة النتائج التي حصلنا عليها نجد أن معامل التغطية الشمسية الشهرية (f) المحسوبة وفق طريقة (F-chart) يتمتع بقيم أعلى من معامل التغطية الشمسية الشهرية التي حصلنا عليها من محاكاة النظام المدروس بنسب تقع ضمن المجال (1 – 8 %) لمعظم أشهر السنة، ماعدا ثلاثة اشهر تراوحت النسبة بين 14 و 25 %. وأما معامل التغطية الشمسية السنوية (F) فقد كانت المحسوبة أكبر من التي حصلنا عليها بالمحاكاة بنسبة 6% تقريباً.



الشكل (7) معامل التغطية الشمسية الشهري بالطريقة الحسابية والمحاكاة

الجدول (2) معامل التغطية الشمسية الشهرية (f) والسنوية (F) الناتج بالطريقة الحسابية والمحاكاة

Month	f (F-chart)	f (TRNSYS)	Δf (F-chart)-TRNSYS))
Jan	0.67	0.57	14.92%
Feb	0.75	0.56	25.33%
Mar	0.85	0.78	8.00%
Apr	0.85	0.8	5.88%
May	0.89	0.86	3.37%
Jun	0.94	0.92	2.12%
Jul	0.97	0.96	1.00%
Aug	1.00	0.98	2.00%
Sep	1.00	0.97	3.00%
Oct	0.93	0.92	1.07%
Nov	0.81	0.83	-2.47%
Dec	0.59	0.49	16.94%
	F (F-chart)	F (TRNSYS)	ΔF((F-chart)-TRNSYS)
	0.84	0.79	5.9 %

ويمكن أن نفسر هذا الاختلاف بين الطريقتين إلى طبيعة بيانات الدخل وطريقة الحساب المستخدمة في كل منهما:

1-يتم حساب معامل التغطية في طريقة F-chart من العلاقة (1) والتي تعتمد على المعاملين اللابعديين X و Y. بينما باستخدام برنامج TRNSYS نحصل على الطاقة المساعدة الضرورية لتلبية الحمل وطاقة الحمل ومن ثم نقوم بحساب معامل التغطية. فبعد أن يتم تقسيم الخزان من قبل المستخدم في أول المحاكاة إلى عقد ويحدد عددها وموضعها وحجم كل منها، يستخدم برنامج TRNSYS معادلة توازن الطاقة من أجل حساب درجة حرارة كل عقدة في نهاية كل خطوة زمنية.

2 -بيانات الدخل المطلوبة في طريقة F-Chart هي المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي اليومي ودرجة حرارة الوسط المحيط الوسطية والحمل الشهري المطلوب وبارامترات أداء اللاقط المستخدم والتي يتم الحصول عليها من اختبارات اللاقط القياسية. بينما برنامج TRNSYS يحاكي سلوك النظام الشمسي بجميع مكوناته و أجزائه وتأثير كل مكون على أداء المكونات الأخرى والنظام ككل.

3 -يوجد اختلاف في الطريقتين من حيث حساب الطاقة المطلوبة للحمل أو أحمال المياه الساخنة. نجد أن طريقة F-Chart لا تأخذ بالحسبان بروفايل سحب المياه الساخنة، بينما برنامج TRNSYS يأخذه بالحسبان والذي يمكن أن يؤدي الى طاقة مساعدة مختلفة عن الطاقة المساعدة التي نحصل عليها من F-Chart .

4- تفترض طريقة F-chart ان النظام الشمسي مصمم بشكل مثالي وأن خزانات المياه الساخنة معزولة بشكل جيد ولا يوجد ضياعات في النظام، و هذا مخالف للواقع مما يؤدي الى سوء تقدير الأداء.

مما سبق يمكن القول أن المحاكاة أكثر دقة من الطريقة الحسابية F-chart.

الخاتمة:

تم في هذا البحث تقييم وتحليل الأداء الحراري لنظام شمسي تثاقلي يعمل وفق الشروط المناخية لمدينة دمشق. قمنا بحساب المساحة المثلى للواقط الشمسية المسطحة التي تغذي حمل مياه ساخنة محدد باستخدام طريقة F-chart المطورة التي تناسب النظام الشمسي ذو الدوران الطبيعي للمياه والتدفق المتغير. كما قمنا بالتنبؤ بالاداء الطاقي للنظام عن طريق محاكاة النظام الشمسي باستخدام برنامج TRNSYS. ومن ثم مقارنة الطريقتين وتعليل سبب الاختلاف.

أهم ما توصلت اليه النتائج:

المساحة المثلى للمجمعات الشمسية لسخان شمسي تثاقلي في مدينة دمشق والتي تغطي حمل مياه ساخنة منزلية مقداره (300 L/day) ودرجة حرارته 60 °C تساوي (4 m^2).

يمكن للنظام الشمسي التثاقلي في مدينة دمشق تأمين سنوياً حوالي (80 %) من حمل التسخين المنزلي المطلوب، وهذا بدوره يقلل من الطاقة اللازمة التي يتم تأمينها بواسطة أحد مصادر الطاقة التقليدية وينعكس بالتالي على جدوى النظام بيئياً واقتصادياً ولا سيما أنه باستخدام السخان الشمسي التثاقلي يمكن الاستغناء عن المضخة وما يرافقها من مشاكل في الصيانة وفي تأمين الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيلها.

معامل التغطية الشمسية المحسوب بطريقة المحاكاة أكثر دقة من المحسوب بطريقة F-chart.

يمكن في المستقبل استخدام النموذج الذي تم بناؤه في هذا البحث في بيئة TRNSYS لتحسين أداء النظام ورفع معامل التغطية الشمسية من خلال تغيير البارامترات لمكونات النظام الشمسي والتوصل للتصميم الأمثل له.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

References:

[1] الجوهري، صادق، وياسين، نصر. (2017). دراسة تجريبية للاقط شمسي مسطح في مدينة دمشق، مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، 33 (2).

[2] فارس، أمينة. (2016). أنظمة التسخين الشمسي 1. منشورات جامعة دمشق.

[3] Abdunnabi, M, Loveday, D and Wright, J. (2021). Optimum values of tank volume to collector area ratios of thermosyphon solar water heaters for Libyan families, Journal of Solar Energy and Sustainable Development, 9 (8).

[4] Duffie, J and Beckman, W. (2006). Solar engineering of the thermal processes, 3rd ed.; John Wiley & Sons Inc.: New York, NY, USA.

[5] Ekanayake E.; Limmeechokchai B. (2020, October 20-22). A Year around system simulation for an experimental set-up of a thermosyphon solar water heater in Thailand, Proceedings of International Conference and Utility Exhibition on Energy, Environment and Climate Change (ICUE), Thailand.

[6] Freegah B., Al-Tabbakh A. (2019). Experimental and numerical analysis of a thermosyphon solar water heater for domestic applications. UPB Scientific Bulletin, Series D: Mechanical Engineering 81(1), 117-132.

[7] Joseph E. (2011). Monitoring and modeling hot water consumption in hotels for solar thermal water heating system optimization, M. S. thesis, Appalachian State University, North Carolina.

[8] Klein, S.A., Duffie J., Mitchell J., Kummer J., Thornton J., Beckman W., Duffie N., Braun J., Urban R., Blair N., Bradley D., Mitchell J., Freeman T., Evans B., Fiksel A., and Williams P. (2004). TRNSYS 16—A TRaNsient SYstem Simulation program, User Manual. Madison: University of Wisconsin-Madison, Solar Energy Laboratory.

[9] Malkin P. (1985). Design of thermosyphon solar domestic hot water systems. M. S. thesis, University of Wisconsin- Madison, USA. 125.

[10] Sami S., Marwin E. and Rivera J. (2016). Numerical analysis of thermosyphon solar water heaters. International Journal of Energy and Power Engineering 5(2):83, ISSN 2326–960X.

[11] Siqueira A., Gurgel A., Zeji G., Colque F. and Silva G. (2020). A new model for sizing thermosiphon solar heating systems. Research, Society and Development, 9 (8), ISSN 2525-3409.