

تأثير التبريد على أداء الأنظمة الفوتوفولتية

الدكتورة لانا كنجو*

تاريخ الإيداع 5 / 12 / 2011. قُبل للنشر في 3 / 4 / 2012

□ ملخص □

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير تبريد اللواظ الشمسية الفوتوفولتية على أدائها، وقد تم ذلك باستخدام برنامج المحاكاة (TRNSYS). حيث تمت نمذجة نظامين فوتوفولتيين ضمن هذا البرنامج أحدهما يمثل نظاماً تقليدياً غير مبرّد (نظام PV) والآخر نظاماً مبرّداً يمثله نظام مدمج فوتوفولتي - حراري (PV/T)، وأجريت المقارنة بينهما من حيث الأداء الذي يعبر عنه المردود الكهربائي والقدرة الكهربائية لتلك الأنظمة. أمكن الاستفادة من تبريد اللواظ الفوتوفولتية في النظام المدمج في هدف آخر وهو استثمار الحرارة المسحوبة من تلك اللواظ في تسخين الماء لاستخدامه في تطبيقات متعددة. أظهرت نتائج المحاكاة، المنجزة في هذا البحث لمدة عام كامل بخطوة زمنية قدرها ساعة واحدة للنظام التقليدي (PV) و المدمج (PV/T)، أن المقادير الكهربائية (القدرة والمردود) الوسطية اليومية السنوية للنظام المبرّد بالمقارنة مع النظام غير المبرّد قد ازدادت بحوالي (1542 - 370) Wh/day للقدرة الكهربائية من أجل مساحة متغيرة للاقط الفوتوفولتي (5 - 2) m²، وكانت الزيادة في المردود الكهربائي من حوالي (3 %) عند مساحة قدرها (2 m²) إلى (6 %) عند مساحة قدرها (5 m²)، كما بلغت كمية الطاقة الحرارية الوسطية اليومية السنوية المسحوبة من اللاقط المبرّد حوالي (10445 - 3535) Wh/day من أجل مساحة متغيرة للاقط الفوتوفولتي من (5 - 1) m² والتي أستخدمت لتسخين الماء المار عبر دائرة التبريد للنظام المدمج.

الكلمات المفتاحية: الأنظمة الفوتوفولتية- تحسين الأداء- الأنظمة الفوتوفولتية المدمجة- الطاقة الشمسية- الدراسة النمذجية والمحاكاة.

* مدرّسة-قسم هندسة القوى الميكانيكية- كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية- جامعة تشرين - اللاذقية- سورية

Influence Of Cooling On Performance Of The Photovoltaic Systems

Dr. Lana KENJO*

(Received 5 / 12 / 2011. Accepted 3 / 4 / 2012)

□ ABSTRACT □

This research aims to study the influence of cooling the panels of photovoltaic systems on their performance, where this has been done by using simulation program (TRNSYS). Two photovoltaic systems have been modeled within this program. One of them was a traditional system with no-cooling (PV system). The other one was a system with cooling represented by a combined system (thermal – photovoltaic system PV/T). Then, a comparison between them has been done in terms of performance, which has been expressed by electrical power and electrical efficiency. It could exploit the cooling of photovoltaic panels in the combined system. Another objective is to benefit from the heat extracted in water heating for using in many applications.

Results of simulations in this research, which have been done for one year by one hour as a step time on the (PV) and (PV/T) systems, showed that the median quotidian annual electrical values for (PV/T) system compared with (PV) system had increased by about (370 – 1542) Wh/day for electrical power at an a variable area of the photovoltaic panel (2 – 5) m², and the increase in electrical efficiency was from about (3 %) at an area of (2 m²) to about (6 %) at an area (5 m²), also the median quotidian annual thermal energy that had been extracted from the cooling panel reached to (3535 – 10445) Wh/day, at a various area of the electrical panel (1 – 5) m², which used for heating the water passing through the cooling circuit of the (PV/T) system.

Keywords: Photovoltaic Systems, Improving of Performance, Combined Photovoltaic Systems, Solar Energy, Modeling Study and Simulation.

* Assistant Professor, Mechanical Power Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تحول الخلايا الشمسية الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية بمردود منخفض نسبياً أقل من 20 %، فحوالي أكثر من 80 % من الطاقة الممتصة تضيع بأشكال مختلفة.

يمكن تحسين كفاءة الأنظمة الفوتوفولتية بطرق عدة منها ما يتعلق ببنية الخلايا الفوتوفولتية (مادة السطح، بنية منطقة الاتصال (P-n)، المتصل المعدني الأمامي والخلفي، المنطقة المانعة للانعكاس... الخ) [1]، والأخرى باستخدام مركّزات شمسية [2]، أو باستخدام وسائل لخفض درجة حرارة سطح اللواقط الشمسية الفوتوفولتية لما لها من آثار سلبية على كفاءتها.

أُنجزت الكثير من الأبحاث العالمية، منذ سنوات عدة، بهدف تحسين الكفاءة لتلك الأنظمة، فعلى صعيد الأبحاث التي تركّزت على بنية الخلايا الفوتوفولتية فقد تم استخدام أساليب عدة لتحسين متغيرات تلك الخلايا، وذلك باستخدام صفائح متبلورة ملونة، أو باستخدام أغشية رقيقة ذات طبقات متعددة متوضعة فوق بعضها البعض، ومختلفة في حساسيتها لالتقاط الطيف الشمسي، أو باستخدام الأنظمة المتعددة الفجوات، أو غيرها من الأساليب. وعلى الصعيد نفسه تم استخدام تقنيات متمثلة بخلايا ذات حساسية صبغية شمسية، أو ما يسمى بالخلايا الفوتوالكتروكيميائية، وتقنية الخلايا الهجينة التي تجمع بين خلايا شمسية بلورية تقليدية وخلايا شمسية ذات طبقات رقيقة (Hetero - junction (HIT) with Intrinsic Thin layer) [1]، كما أُنجزت بعض الأبحاث على السطح العلوي للخلايا للتقليل من الضياعات البصرية التي سببها الانعكاس على ذلك السطح [3]. أما على صعيد الأبحاث المنجزة لدراسة تأثير درجة حرارة عمل الخلايا الفوتوفولتية على مردودها، فقد تمت أبحاث عدة أظهرت أن كلاً من جهد الدارة المفتوحة واستطاعة الخرج الكهربائية والمردود الكهربائي للخلية تتخفض مع ارتفاع درجة حرارتها [4 - 5]. كما أظهرت أبحاث أخرى في السياق نفسه حلاً للحد من ارتفاع درجة حرارة سطح الخلايا، وذلك عن طريق التبريد إما برش الماء على شكل رذاذ فوق سطح اللواقط الفوتوفولتية [6]، أو عن طريق نظام مدمج فوتوفولتي - حراري (PV/T) [7-14] يُدمج فيه اللاقط الفوتوفولتي مع لاقط حراري موصول بدارة مغلقة يتم تدوير الماء عبرها، وبالتالي يساهم الماء من جهة في تخفيض درجة حرارة سطح الخلايا الفوتوفولتية ومن جهة أخرى في استخدام الحرارة المسحوبة في تسخين الماء الذي يمكن استخدامه في تطبيقات متعددة.

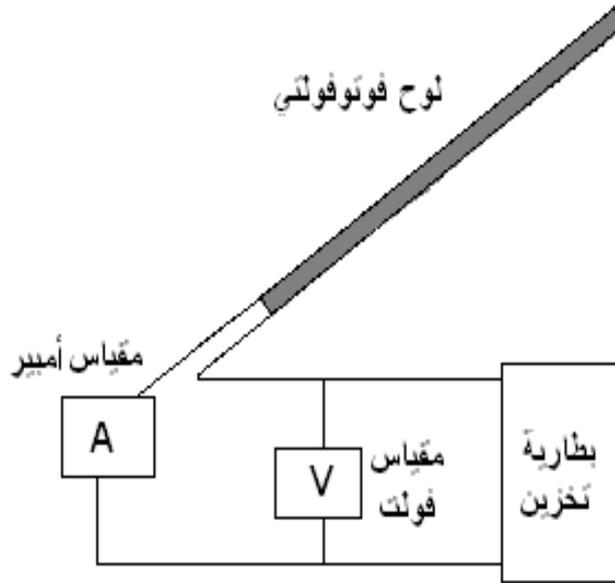
يظهر هذا البحث تأثير التبريد لسطح اللواقط الشمسية الفوتوفولتية المستخدمة في منظومة فوتوفولتية على أدائها. أُستخدم لهذه الغاية نظامان أحدهما مدمج فوتوفولتي - حراري (PV/T) والآخر فوتوفولتي فقط (فوتوفولتي تقليدي (PV)، حيث تمت نمذجتهما في برنامج المحاكاة (TRNSYS) [15] ومن ثم أُجريت المحاكاة (Simulation) عليهما لمدة عام بعد استخدام القيم المبيّنة في الجداول (1) و (2) لكلا النظامين. تم ذلك من أجل منزل سكني لعائلة مؤلفة من أربعة أشخاص يُستخدم فيه هذان النظامان ويقع في مدينة اللاذقية ذات خط العرض 35.5° ، بحيث يكون ميل كل من اللواقط الفوتوفولتية (التقليدية والمدمجة) بزاوية مساوية لزاوية خط العرض. أُجريت بعدها مقارنة للنتائج التي تعبر عن الأداء الكهربائي كمقادير وسطية يومية سنوية (قدرة الخرج الكهربائية والمردود الكهربائي لكلا النظامين). كما أُجريت دراسة أخرى على النظام المدمج فقط (النظام التقليدي غير معني بهذه الدراسة لأنه غير مبرّد) لمعرفة تأثير تغيير بعض المقادير المتعلقة بدارة التبريد لذلك النظام (حجم الخزان الحراري، تدفق المائع) على الأداء الحراري والكهربائي له. إضافةً إلى ذلك تم إجراء دراسة أخرى على النظام المدمج فقط تتمثل بحالتين: الأولى يتم فيها تدوير

الماء في دارة التبريد (يُعتبر النظام في هذه الحالة مبرّد)، أما الثانية فيتم فيها إيقاف تدوير الماء عبر تلك الدارة (يُعتبر النظام في هذه الحالة غير مبرّد)، ومن ثم أُجريت مقارنة بين نتائج الحالتين على صعيد الأداء الكهربائي للنظام المدمج (القدرة والمردود). كانت الغاية من الدراسة الأخيرة المنجزة هي معرفة أثر التبريد على هذا النظام، ومدى الاختلاف في ذلك عن الحالة في المقارنة بين النظام المدمج المبرّد والتقليدي غير المبرّد.

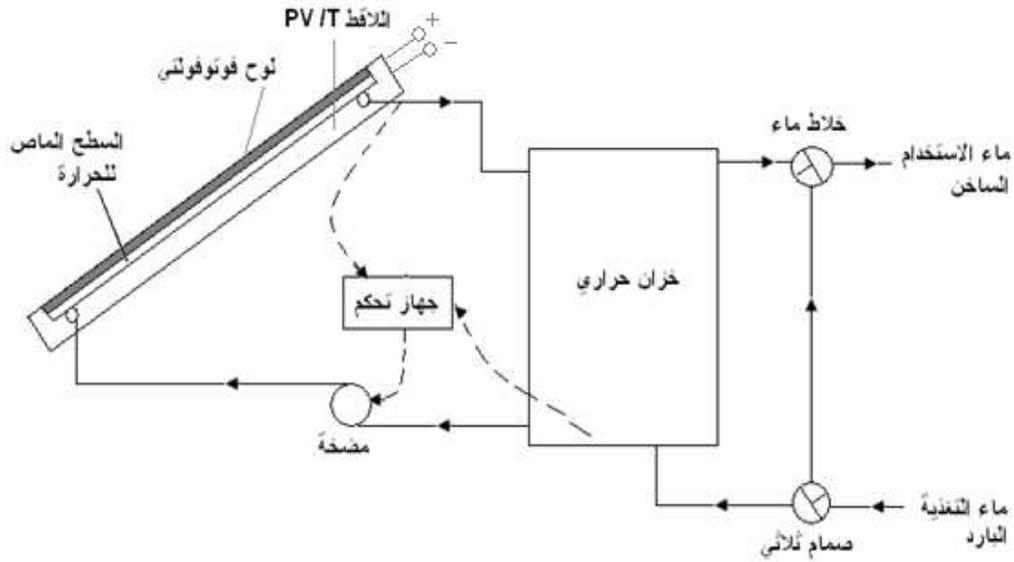
2. وصف الأنظمة الفوتوفولتية المدروسة:

اعتمدنا في هذه الدراسة على استخدام نظامين فوتوفولتيين، أحدهما تقليدي مكوّن من لاقط فوتوفولتي (Module) غير مبرّد كما في الشكل (1)، أما النظام الآخر الذي يظهره الشكل (2) فهو عبارة عن نظام مدمج (فوتوفولتي - حراري PV/T) ويتألف من لاقط فوتوفولتي مدمج مع لاقط شمسي حراري ممثّل بصفيحة ماصة وأنايبب لمرور سائل التبريد (الماء في حالتنا). يتصل اللاقط الشمسي بخزان حراري عن طريق مجموعة من الأنابيب مشكلاً دارة مغلقة، حيث يتم تخزين الماء الذي تم تسخينه عن طريق اللاقط المدمج مع اللوح الفوتوفولتي في الخزان الحراري. يتم تدوير الماء في الدارة المغلقة لهذا النظام عن طريق مضخة يتم التحكم بعملها بواسطة جهاز يعمل على المبدأ التفاضلي، فعندما يزداد فرق درجات الحرارة بين الماء الخارج من اللاقط الشمسي الحراري، والماء الموجود في أسفل الخزان الحراري عن قيمة محددة، فإن جهاز التحكم يسمح للمضخة بالعمل، وبالتالي تدوير الماء من خلال اللاقط الشمسي إلى الخزان الحراري، وإذا كان الفرق أقل من قيمة معينة يضع جهاز التحكم المضخة في حالة التوقف عن العمل.

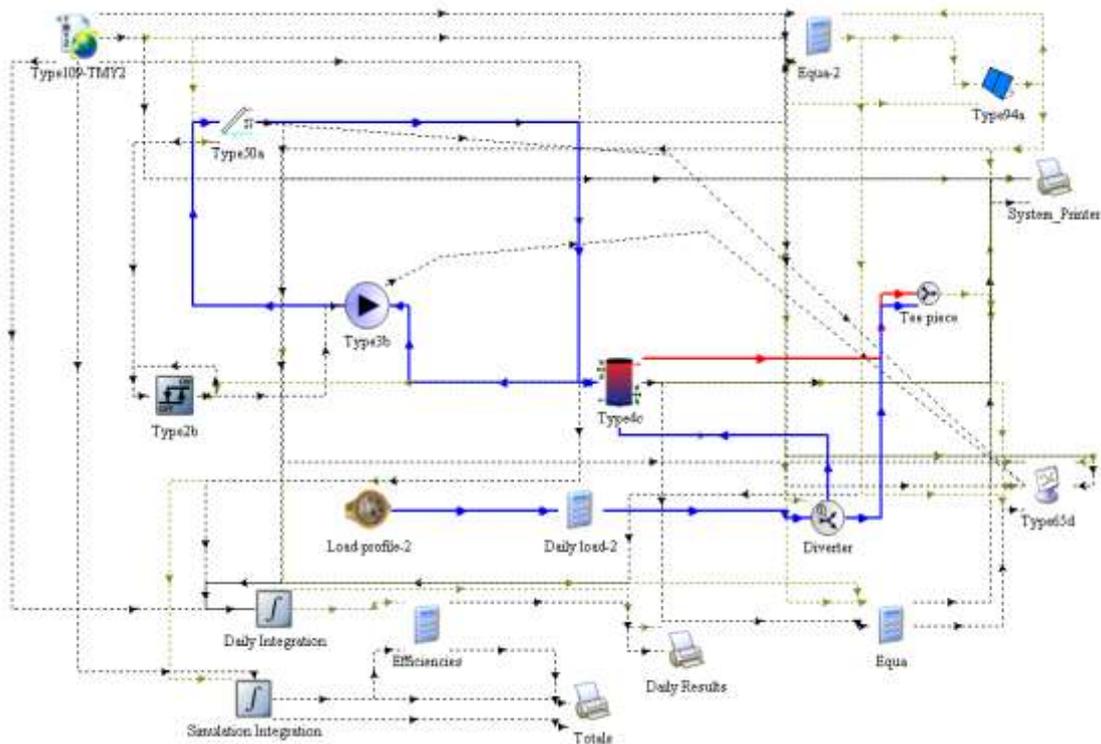
يظهر الشكل (3) المخطط التمثيلي للنظامين المدروسين وفق برنامج المحاكاة (TRNSYS)، حيث يبيّن كافة المكونات لهذين النظامين وعملية الربط بينها.



الشكل (1) النظام الفوتوفولتي التقليدي.



الشكل (2) النظام المدمج الفوتوفولتي - الحراري (PV/T).



الشكل (3) مخطط النظامين الفوتوفولتيين المدروسين وفق برنامج المحاكاة TRNSYS.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمّن أهمية هذا البحث، في ضرورة تحسين أداء الأنظمة الفوتوفولتية باستخدام طرق غير معقّدة يمكن إجراؤها في بلدان غير متطورة في الأبحاث المتعلقة ببنية الخلايا الفوتوفولتية كبلدنا. يمثل تبريد الألواح الفوتوفولتية إحدى

هذه الطرق التي يمكن استخدامها في بلدنا، لعدم تعقيدها من جهة ولدورها الفعال في تحسين كفاءة تلك الأنظمة من جهة أخرى، حيث يساهم الماء في استخلاص الحرارة الناتجة عن ارتفاع درجة حرارة سطح اللواقط الشمسية الفوتوفولتية بعد عملية تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية، وبذلك يساهم في رفع الكفاءة وهذا ما سيتم إظهاره من خلال نتائج هذا البحث. أما الأهمية الأخرى للبحث فهي الإضاءة على إمكانية الاستفادة من الحرارة المستخلصة من سطح اللواقط الفوتوفولتية في تسخين الماء والذي يمكن أن يكون له تطبيقات متنوعة، حيث يمكن لنتائج هذا البحث أن تعطي فكرة عن كميات الحرارة المستفاد منها.

يهدف البحث إلى نمذجة نظامين فوتوفولتيين، ضمن برنامج TRNSYS، أحدهما تقليدي بدون تبريد (PV) والآخر يستخدم التبريد، يتمثل بنظام حراري فوتوفولتي مدمج (PV/T)، ومن ثم إجراء المحاكاة (Simulation) لهذين النظامين بغية المقارنة بين نتائجهما المعبرة عن الأداء الكهربائي من خلال المقادير الوسطية اليومية السنوية (القدرة الكهربائية والمردود الكهربائي) لإظهار أثر التبريد على ذلك. كما يهدف البحث إلى دراسة تأثير بعض المتغيرات ذات الصلة بدارة التبريد في النظام المدمج وتأثيرها على الأداء الكهربائي والحراري لذلك النظام، ومن ثم مقارنة الأداء الكهربائي لذلك النظام نتيجة هذه المتغيرات بالأداء الكهربائي للنظام التقليدي الذي ليس له علاقة بهذه المتغيرات لعدم احتوائه على دارة تبريد.

طرائق البحث ومواده:

يتميز العمل التجريبي بأهميته من حيث التطبيق المباشر على المواضيع البحثية التي يراد دراستها ووضع الحلول لمشاكلها، ولكن في كثير من الأحيان يصعب تجريبياً الإحاطة بكافة جوانب المشكلة المراد إيجاد الحلول لها (دراسة كافة المتغيرات) لأن ذلك يتطلب تكلفة كبيرة. لذلك يمكن اللجوء في كثير من الدراسات البحثية إلى النمذجة والمحاكاة، لسهولة تنفيذها، وإمكانية التحكم بالعديد من المتغيرات من جهة ولقلة تكاليفها من جهة أخرى.

بغية إنجاز هذا البحث استخدمنا برنامج المحاكاة (TRNSYS)، والذي يُعدّ من برامج المحاكاة الأكثر انتشاراً في العديد من مراكز الأبحاث والجامعات العالمية. يسمح البرنامج بنمذجة ومحاكاة أنظمة الطاقة الشمسية الحرارية والكهربائية وغيرها، ومن ثم تقييم أداء تلك الأنظمة خلال فترات زمنية معينة (يوم، شهر، سنة). كما يمكن البرنامج من دراسة الكثير من المتغيرات التي تؤثر على الأداء، ومن ثم نستطيع التوصل إلى نتائج لتجاوز بعض المشاكل التصميمية لتلك الأنظمة.

لتحقيق الهدف قمنا بنمذجة نظامين فوتوفولتيين (تقليدي و مدمج) كما ذكرنا سابقاً، حيث يظهر الشكل (3) المخطط التمثيلي للنظامين في برنامج المحاكاة (TRNSYS) وكيفية تمثيل كل مكون من مكوناتها بعنصر يسمى (Type) وآلية الربط بين هذه العناصر كما هو في النظام الحقيقي. يمثل الـ (Type) في برنامج (TRNSYS) واجهة لبرنامج جزئي خاص بذلك المكون يتم استدعاؤه من مكتبة البرامج عند إجراء المحاكاة، ويُستخدم لتمييز العناصر المسماة (Types) عن بعضها بعضاً رقم خاص بكل منها (مثلاً Type4c يمثل الخزان الحراري، Type3 يمثل مضخة تسريع... الخ) ويُضاف للرقم حرف عند تشابه العناصر في الوظيفة ولكن الاختلاف في بعض التفاصيل (مثلاً Type4a للخزان الحراري ذي المدخل الثابت و Type4c للخزان الحراري ذي المداخل المتعددة). أما العناصر (Types) المكونة للنظامين المدروسين والممثلين بالشكل (3) فهي: Type50a ويمثل النظام المدمج الفوتوفولتي - الحراري ذي اللاقط المسطح، و Type94a ويمثل لاقط فوتوفولتي بلوري تقليدي، و Type4c ويمثل الخزان الحراري

متعدد المداخل، و Type2b ويمثل جهاز تحكم، و Type3b ويمثل مضخة تسريع، و Type109-TMY2 ويمثل العنصر الذي يقوم بحساب شدة الإشعاع الشمسي الساقط على سطح مائل (لاقط شمسي، لوح فوتوفولتي،... الخ) وذلك بعد قراءة المعطيات المناخية للمنطقة المدروسة والمعطاة من أجل سطح أفقي، و Type65d ويمثل أداة إظهار النتائج على شكل منحنيات بيانية بدلالة الزمن والتي يتم الحصول عليها من البرنامج بعد إدخال الثوابت والمتغيرات المتعلقة بكل مكون، واستخدمت أيضاً عناصر أخرى متممة. تم الحصول على المعطيات المناخية للموقع المدروس في بحثنا (محافظة اللاذقية) باستخدام برنامج (Meteonorm) [16]، حيث يتم الحصول على ملف تلك المعطيات المناخية بطريقة التنسيق المعياري (TMY).

5. تقييم أداء الأنظمة المدروسة:

تم تقييم أداء النظام الفوتوفولتي التقليدي من خلال الاستطاعة الكهربائية والمردود الكهربائي، حيث يُعبّر عن المردود الكهربائي للنظام (η_e) بالعلاقة بين الاستطاعة العظمى للاقط الفوتوفولتي إلى كمية الإشعاع الشمسي الساقط على اللوح ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$\eta_e = \frac{P_{MPP}}{A_M \cdot H_t} \quad [\%] \quad (1)$$

حيث:

P_{MPP} : استطاعة اللاقط الفوتوفولتي عند نقطة الاستطاعة العظمى [W].

H_t : شدة الإشعاع الشمسي الساقط على اللاقط الفوتوفولتي المائل [W/m^2].

A_M : مساحة اللاقط الفوتوفولتي [m^2].

أما النظام الثاني المدروس والمُمثل بالنظام المدمج (الفوتوفولتي - الحراري (PV/T))، فقد تم تقييم أداءه من الناحية الكهربائية والحرارية. فمن الناحية الكهربائية وبشكل مماثل للنظام الفوتوفولتي التقليدي يُعبّر عن الأداء من خلال الاستطاعة الكهربائية والمردود الكهربائي، حيث يُعطى المردود الكهربائي بالعلاقة (1) نفسها. أما التعبير عن الأداء من الناحية الحرارية فيتم من خلال المردود الحراري ل اللاقط (η_t) ومن خلال كمية الطاقة الحرارية المفيدة المقدّمة من اللاقط الشمسي الحراري (Q_u) ومن خلال نسبة التغطية الشمسية (F_{sol}). يُعبّر عن المردود الحراري للنظام بالعلاقة بين كمية الطاقة الحرارية المفيدة المزودة من اللاقط الشمسي الحراري إلى كمية الإشعاع الشمسي الساقط على اللاقط ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$\eta_t = \frac{Q_u}{A_c \cdot H_t} \quad [\%] \quad (2)$$

حيث:

Q_u : كمية الطاقة الحرارية المفيدة المقدمة من اللاقط الشمسي الحراري [W].

H_t : شدة الإشعاع الشمسي الساقط على اللاقط الشمسي المائل [W/m^2].

A_c : مساحة اللاقط الشمسي الحراري [m^2].

أما نسبة التغطية الشمسية، تعبر عن مساهمة الطاقة الشمسية في تأمين الحمل الحراري بالعلاقة الآتية:

$$F_{sol} = \frac{Q_{w,s}}{Q_{w,L}} = 1 - \frac{Q_{aux}}{Q_{w,L}} \quad [\%] \quad (3)$$

حيث:

- $Q_{w,s}$: حمل الماء الساخن المزود من نظام الطاقة الشمسية [W].
- $Q_{w,L}$: حمل الماء الساخن المطلوب [W].
- Q_{aux} : الحمل المقدّم للنظام من مصدر الطاقة المساعدة [W].

النتائج والمناقشة:

المقارنة بين النظامين الفوتوفولتيين المدمج المبرّد (PV/T) والتقليدي غير المبرّد (PV):

استخدمنا في دراستنا للنظامين الفوتوفولتيين (التقليدي و المدمج)، واللذين تمت نمذجتهما في برنامج المحاكاة TRNSYS، القيم العددية التي تظهرها الجداول (1) و (2).

أجريت المحاكاة للنظامين لسنة كاملة من أجل مساحات مختلفة للواقط الشمسية الفوتوفولتية، وتم حساب المردود الكهربائي السنوي لكل من النظام التقليدي غير المبرّد (η_e no cold) وللنظام المدمج المبرّد (η_e cold) والفرق بين هذه المراديد ($\Delta\eta_e = \eta_e \text{ cold} - \eta_e \text{ no cold}$). كما تم حساب القدرة الكهربائية الوسطية اليومية السنوية عند نقطة عمل الاستطاعة العظمى لكل من النظام التقليدي (P_{MPP} no cold) وللنظام المدمج (P_{MPP} cold) والفرق بينهما ($\Delta P_{MPP} = P_{MPP} \text{ cold} - P_{MPP} \text{ no cold}$). تم أيضاً حساب المردود الحراري (η_t) ونسبة التغطية الشمسية (F_{soi}) السنويين وكمية الطاقة الحرارية المفيدة السنوية المقدّمة من اللاقط الشمسي (Q_u) للنظام المدمج. يظهر الجدول (3) الرموز أو المصطلحات المستخدمة في الأشكال الممثلة لنتائج هذا البحث.

الجدول (1) القيم العددية للثوابت المعتمدة في محاكاة النظام الفوتوفولتي المدمج (PV/T).

الواحدة	القيمة	الثابت
-	0.96	معامل مردود اللاقط
$W/m^2 K$	4.5	معامل الفقد الحراري للاقط
lit/m^2	75	حجم الخزان الحراري
$lit/h m^2$	15	تدفق المائع عبر اللاقط الشمسي
$lit /day. erson$	50	كمية الماء الساخن المطلوبة للشخص
$W/m^2 K$	0.7	معامل الفقد الحراري للخزان
$^{\circ}C$	11	درجة حرارة ماء التغذية
$^{\circ}C$	50	درجة حرارة الماء الساخن المطلوبة
-	0.0032	معامل درجة الحرارة لمردود اللاقط الفوتوفولتي
-	1	نسبة سطح اللوح الفوتوفولتي إلى سطح الامتصاص الحراري

الجدول (2) القيم العددية للثوابت المعتمدة في محاكاة النظام الفوتوفولتي التقليدي (PV).

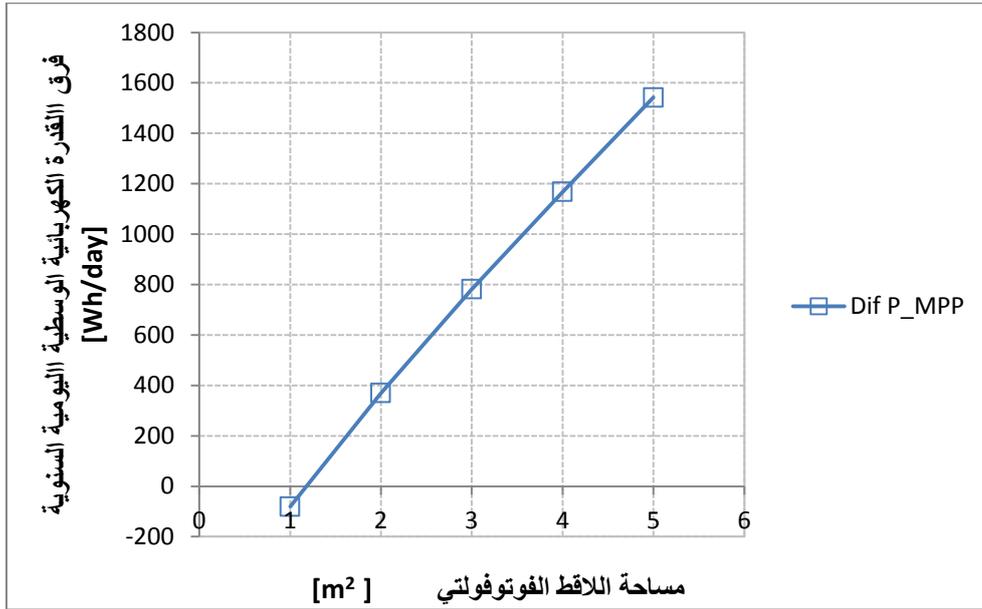
الواحدة	القيمة	الثابت
-	0.96	جداء الامتصاصية والنفاذية
-	1	عدد الألواح المستخدمة
-	36	عدد الخلايا المربوطة على التسلسل
A	6.5	تيار دائرة القصر للوح عند شروط الاختبار
V	21.6	جهد الدارة المفتوحة للوح عند شروط الاختبار
W/m ²	1000	شدة الإشعاع الشمسي عند شروط الاختبار
A	6.5	تيار دائرة القصر عند نقطة الاستطاعة العظمى وعند شروط الاختبار
V	17	جهد الدارة المفتوحة عند نقطة الاستطاعة العظمى وعند شروط الاختبار

الجدول (3) الرموز والمصطلحات المستخدمة في الأشكال المعبرة عن نتائج البحث.

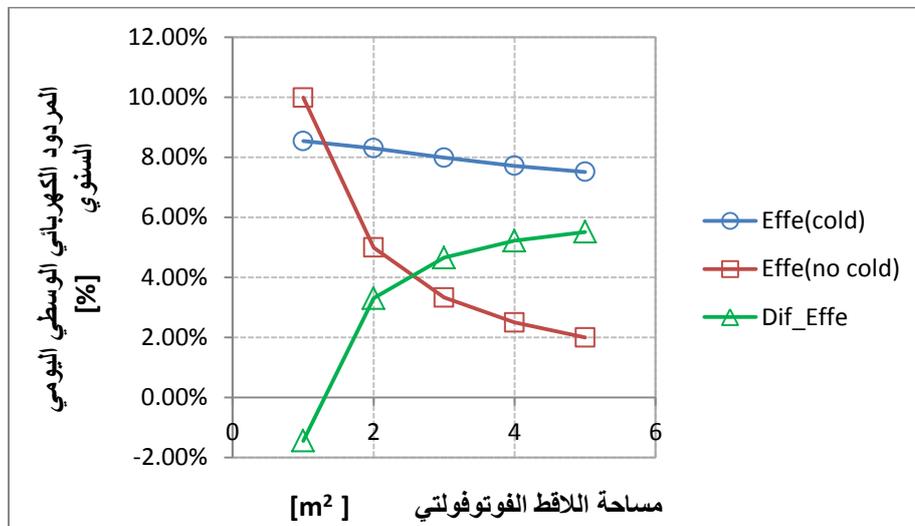
الواحدة	الرمز
Wh/da y	DifP_MPP: الفرق في القدرة الكهربائية الوسطية اليومية السنوية عند نقطة الاستطاعة العظمى بين النظام المدمج المبرّد (PV/T) والنظام التقليدي (PV) غير المبرّد.
Wh/da y	DifP_MPP(PVT): الفرق في القدرة الكهربائية الوسطية اليومية السنوية عند نقطة الاستطاعة العظمى بين النظام المدمج المبرّد (PV/T) والنظام المدمج عند استخدامه كنظام غير مبرّد (عدم تدوير الماء ضمن دائرة التبريد للنظام).
-	Effe (cold): المردود الكهربائي للنظام المدمج (PV/T) المبرّد
-	Effe (no cold): المردود الكهربائي للنظام الفوتوفولتي التقليدي (PV) غير المبرّد
-	Effe (no cold)PVT: المردود الكهربائي للنظام الفوتوفولتي المدمج (PV/T) عند استخدامه كنظام غير مبرّد (عدم تدوير الماء ضمن دائرة التبريد للنظام)
-	Dif_Effe: الفرق في المردود الكهربائي بين النظام المدمج المبرّد (PV/T) والنظام التقليدي (PV) غير المبرّد، أو الفرق بين المردودين الكهربائيين للنظام المدمج بين حالة تدوير السائل في دائرة التبريد (النظام مبرّد) وحالة عدم تدوير السائل عبر دائرة التبريد (النظام غير مبرّد).
-	Eff_th: المردود الحراري للنظام المدمج (PV/T) المبرّد
-	Fsol: نسبة التغطية الشمسية للنظام المدمج (PV/T) المبرّد
Wh/da y	Qu: كمية الطاقة الحرارية المفيدة الوسطية اليومية السنوية المقدمة من اللاقط الشمسي الحراري الخاص بالنظام المدمج.

تم تقييم أثر التبريد على الأداء الكهربائي للأنظمة الفوتوفولتية من خلال المقارنة بين النتائج المتعلقة بالأثر الكهربائي كقيم وسطية يومية سنوية (القدرة الكهربائية والمردود الكهربائي) لكل من النظام المدمج المبرّد والتقليدي غير

المبرّد. يظهر الشكل (1) الزيادة في القدرة الكهربائية الوسطية اليومية السنوية للاقط الفوتوفولتي المبرّد عن اللاقط غير المبرّد بمقدار (370 – 1542) Wh/day من أجل مساحة متغيرة للاقط المستخدم (2 – 5) m²، ولكن من أجل مساحة قدرها (1 m²) تكون استطاعة اللاقط الفوتوفولتي غير المبرّد أعلى من استطاعة اللاقط الفوتوفولتي المبرّد بمقدار (80 Wh/day) ويمكن تفسير ذلك بعدم التأثير الفعّال للتبريد في رفع القدرة الكهربائية بشكل كاف للاقط في النظام المدمج. كما يبيّن الشكل (2) زيادة في المردود الكهربائي الوسطي اليومي السنوي للاقط الفوتوفولتي في النظام المدمج عن النظام التقليدي من حوالي (3 %) عند مساحة للاقط قدرها (2 m²) إلى حوالي (6 %) عند مساحة للاقط قدرها (5 m²)، ولكن من أجل مساحة قدرها (1 m²) يكون المردود في النظام التقليدي أعلى من النظام المدمج بمقدار (1.4 %).

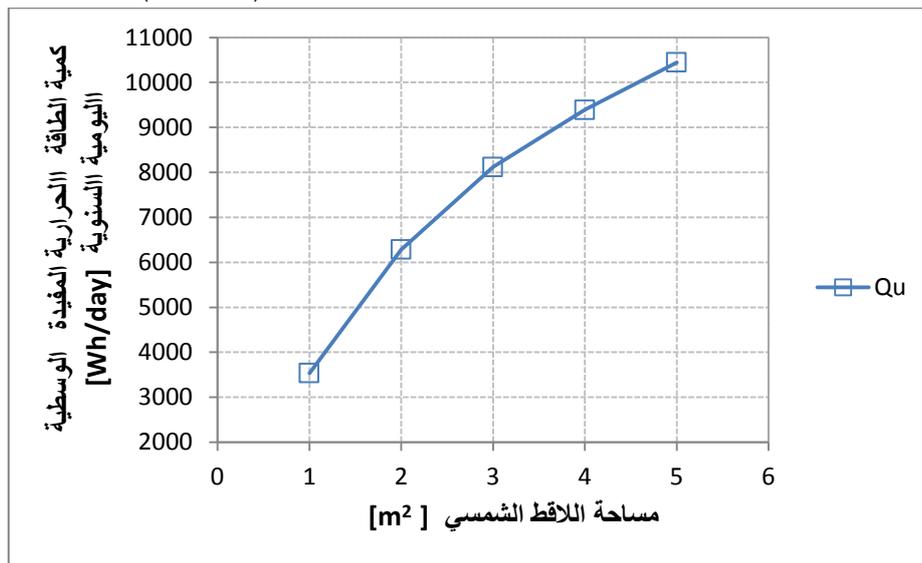


الشكل (1) فرق القدرة الكهربائية الوسطية اليومية السنوية للاقط الفوتوفولتي بين النظامين المدمج والتقليدي من أجل مساحات مختلفة للاقط.

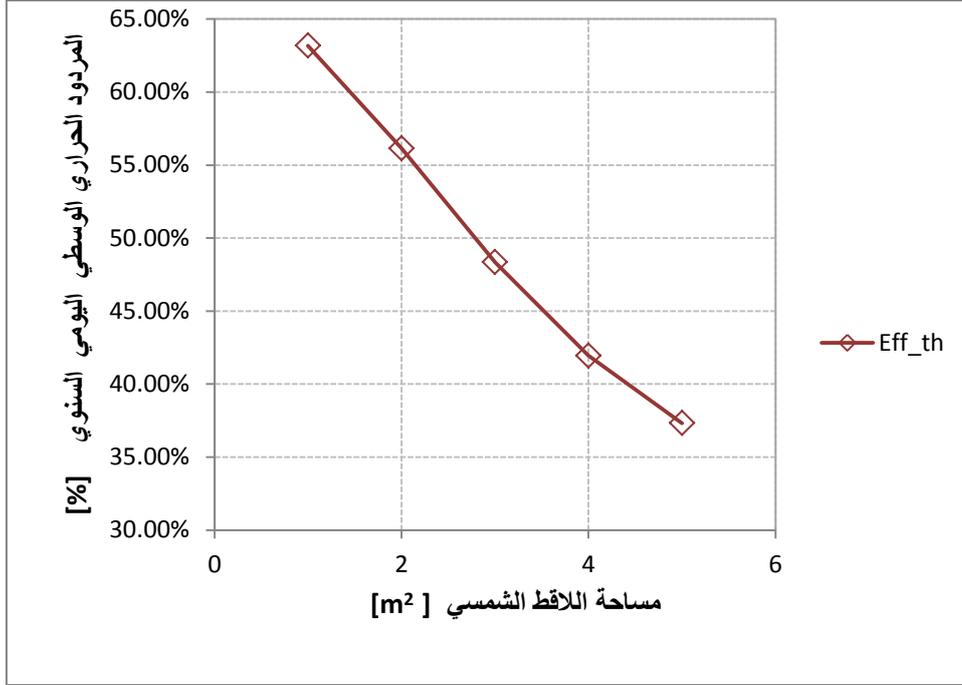


الشكل (2) المراتب الكهربائية الوسطية اليومية السنوية للوح الفوتوفولتي للنظامين المدمج والتقليدي والفرق بينهما من أجل مساحات مختلفة للاقط.

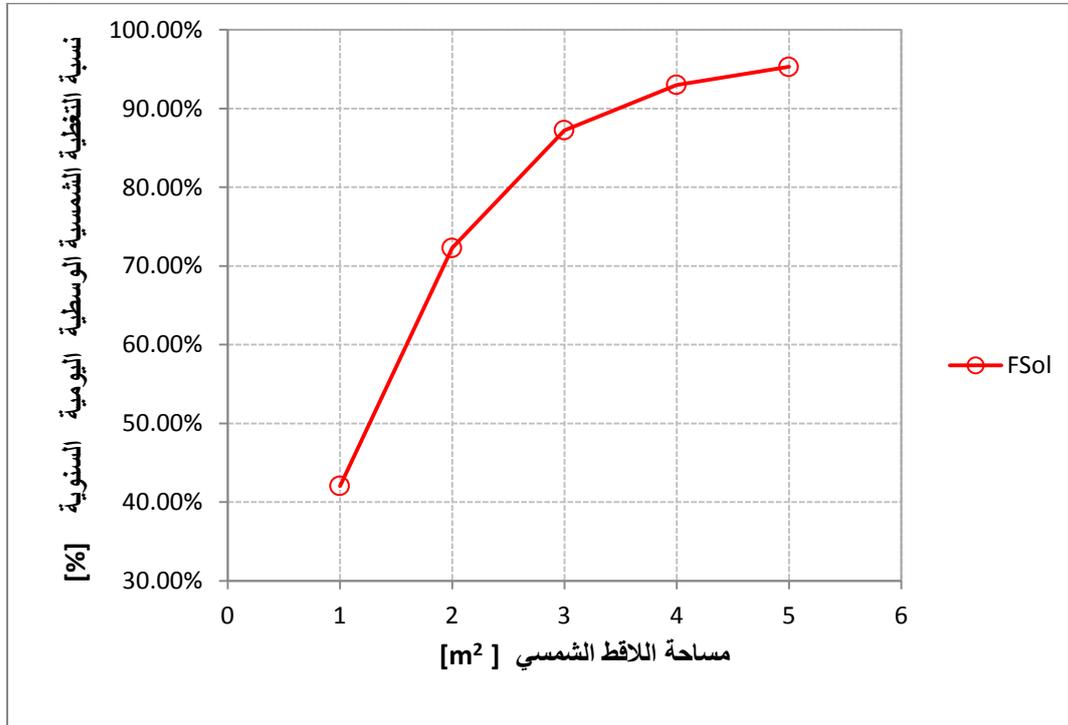
تم إظهار الفائدة الأخرى للتبريد في النظام المدمج (تسخين الماء المار في دارة التبريد بواسطة الحرارة المسحوبة من سطح اللاقط الفوتوفولتي) من خلال تقييم الأداء الحراري للنظام الذي يمثله كمية الطاقة الحرارية المسحوبة من سطح اللاقط الفوتوفولتي والمردود الحراري ونسبة التغطية الشمسية له. يظهر الشكل (3) كمية الطاقة الحرارية المفيدة (Q_{U1}) الوسطية اليومية السنوية المقدّمة من اللاقط الشمسي الحراري للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط، حيث بلغت قيمة هذه الطاقة (10445 – 3535) Wh/day من أجل مساحة متغيرة للاقط المستخدم من 1 m^2 – (5). أما الشكل (4) فيظهر المردود الحراري الوسطي اليومي السنوي للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط، حيث بلغت قيمة هذا المردود % (37 – 63). بينما يظهر الشكل (5) نسبة التغطية الشمسية الوسطية اليومية السنوية للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط، حيث بلغت قيمة هذه النسبة % (42 – 95).



الشكل (3) كمية الطاقة الحرارية المفيدة الوسطية اليومية السنوية للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط الشمسي.



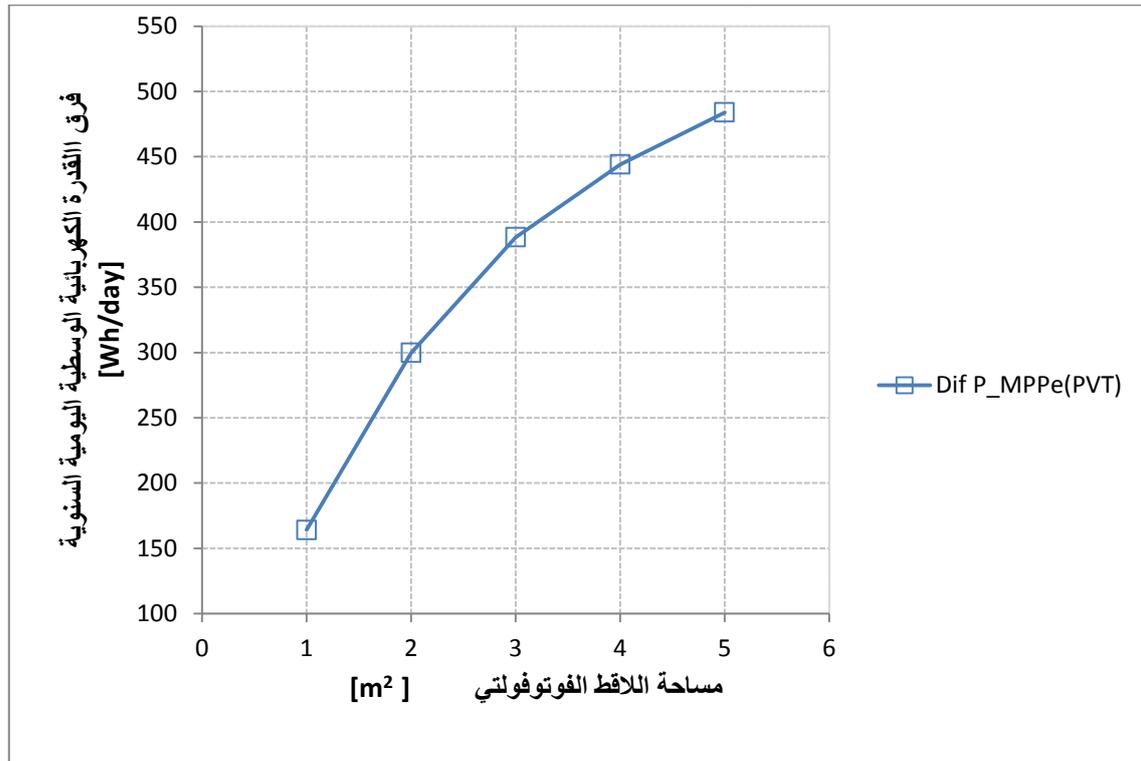
الشكل (4) المردود الحراري الوسيط اليومي السنوي للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط الشمسي.



الشكل (5) نسبة التغطية الشمسية الوسيطية اليومية السنوية للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط الشمسي.

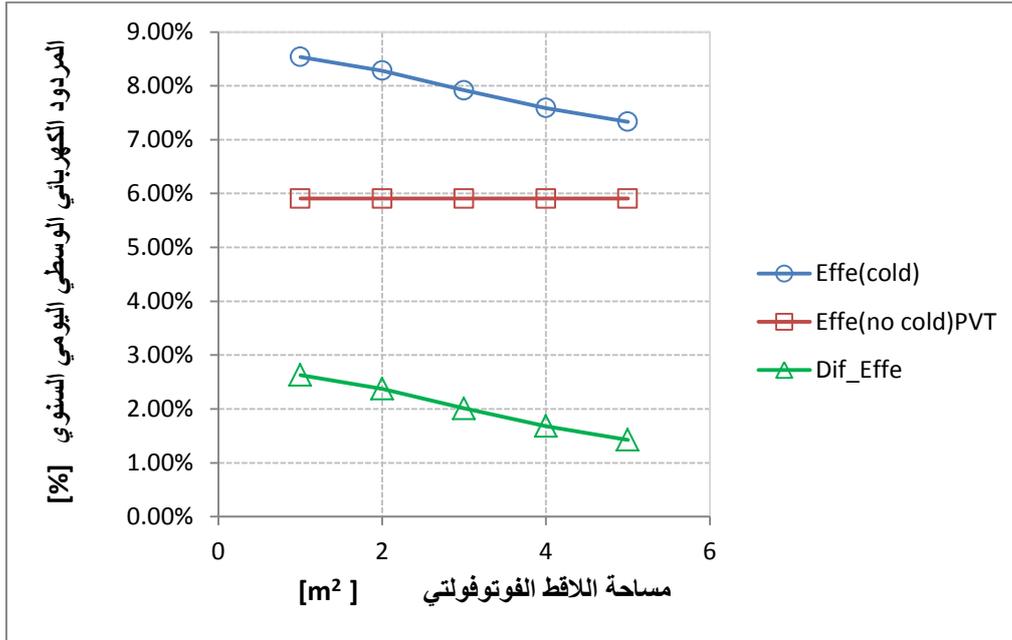
المقارنة بين حالتين للنظام الفوتوفولتي المدمج هما حالة تدوير السائل ضمن دائرة التبريد (النظام مبرّد) وحالة عدم تدوير السائل (النظام غير مبرّد):

لإظهار أثر التبريد على الأداء الكهربائي للأنظمة الفوتوفولتية تم أيضاً إجراء المحاكاة لسنة كاملة على النظام المدمج نفسه في حالتين: الأولى تتمثل بتدوير السائل ضمن دارة تبريد هذا النظام (النظام مبرّد) والثانية تتمثل بعدم تدوير السائل ضمن دارة هذا النظام (النظام غير مبرّد ويحاكي النظام التقليدي في المقارنة الأولى). بعد ذلك تمت المقارنة بينهما على مستوى المقادير الوسطية اليومية السنوية (القدرة الكهربائية والمردود الكهربائي) من أجل مساحات مختلفة للاقط الفوتوفولتي. يوضّح الشكل (6) الزيادة في القدرة الكهربائية الوسطية اليومية السنوية للاقط الفوتوفولتي نتيجة التبريد في ذلك النظام، حيث بلغت (164 – 484) Wh/day من أجل مساحة متغيرة للاقط المستخدم 5 m^2 - (1). يقود ذلك إلى الاستنتاج بأن الزيادة في الاستطاعة نتيجة تبريد النظام في هذه المقارنة هي أقل من الزيادة في المقارنة الأولى (بين استخدام النظام المدمج المبرّد والنظام التقليدي غير المبرّد).



الشكل (6) فرق القدرة الكهربائية الوسطية اليومية السنوية للاقط الفوتوفولتي للنظام المدمج في حالي التبريد وعدم التبريد من أجل مساحات مختلفة للاقط.

أما الشكل (7)، فيظهر أن المردود الكهربائي الوسطي السنوي في حالة عدم التبريد يبقى ثابت على الرغم من تغيير مساحة اللاقط الفوتوفولتي، بينما يتناقص المردود في حالة التبريد عند تغيير مساحة اللاقط. ومن ثم تكون الزيادة في المردود للوح الفوتوفولتي لذلك النظام في حالة التبريد عن حالة عدم التبريد متغيرة من (2.6 % عند المساحة 1 m^2) إلى (1.4 % عند المساحة 5 m^2).



الشكل (7) المراديد الكهربائية اليومية السنوية للاقط الفوتوفولتي للنظام المدمج في حالة التبريد وعدم التبريد والفرق بينهما من أجل مساحات مختلفة للوح.

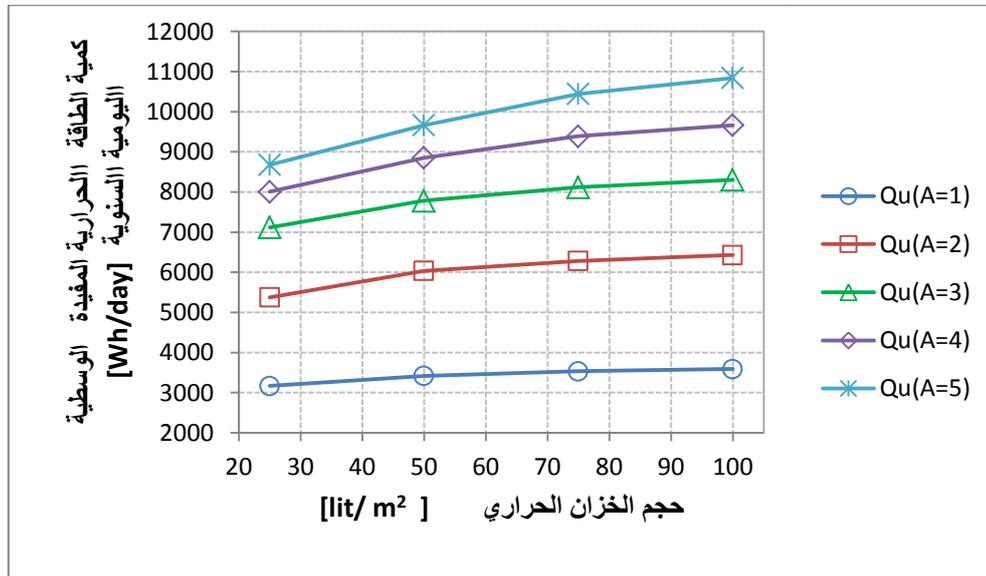
. دراسة تأثير بعض المتغيرات المتعلقة بدارة التبريد للنظام المدمج على أدائه:

1. تأثير حجم الخزان الحراري على أداء النظام المدمج:

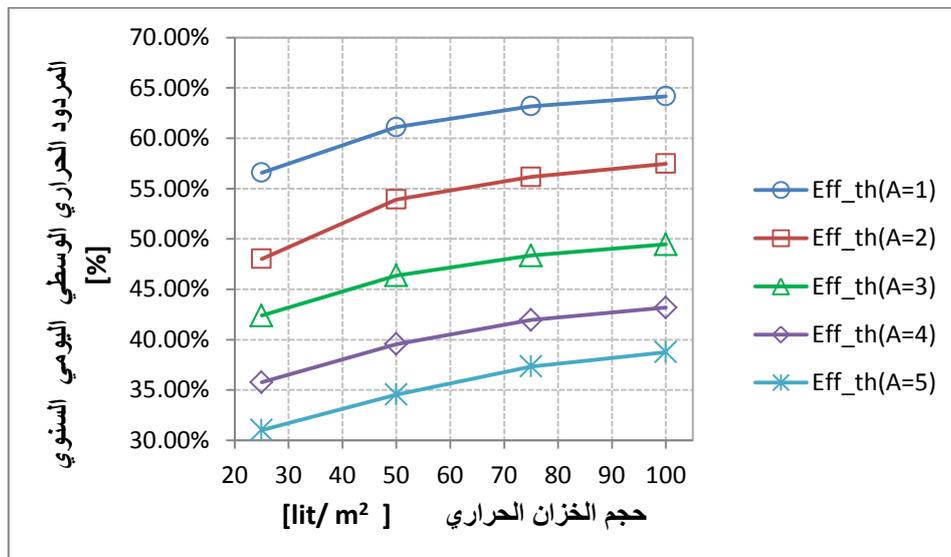
بغية دراسة تأثير حجم الخزان الحراري على أداء النظام المدمج (الكهربي والحراري)، فقد أجريت المحاكاة لسنة كاملة على ذلك النظام باستخدام تدفق للمائع عبر اللاقط قدره (15 lit/h m²) من أجل حجوم مختلفة للخزان الحراري من (15 lit/m²) إلى (100 lit/m²) مع مساحات متغيرة للاقط الشمسي من (1 m²) إلى (5 m²) لكل حجم مدروس.

تظهر الأشكال (8) و (9) و (10) أنه مهما كانت مساحة اللاقط فإن كمية الطاقة الحرارية المفيدة الوسطية اليومية السنوية المقدمة من اللاقط والمردود الحراري السنوي ونسبة التغطية الشمسية السنوية للنظام، تزداد مع ازدياد حجم الخزان الحراري حتى الوصول إلى حجم (75 lit/m²) (أكبر زيادة نسبية في كمية الحرارة هي حوالي 11% و أكبر زيادة في المردود الحراري هي حوالي 6% وأكبر زيادة في نسبة التغطية الشمسية هي حوالي 7%). يمكن إرجاع ذلك إلى أن الزيادة في حجم الخزان تساعد على الزيادة في تحقق التدرج الحراري ضمنه، مما يتيح إمداد اللاقط الشمسي الحراري بماء أكثر برودة الأمر الذي يؤدي إلى زيادة الأداء الحراري له. تصبح الزيادة في تلك المقادير بعد ذلك الحجم (75 lit/m²) صغيرة (زيادة نسبية في كمية الحرارة هي حوالي 3% وزيادة في المردود الحراري هي حوالي 1% وزيادة في نسبة التغطية الشمسية هي حوالي 0.9%) مما يجعل هذا الحجم هو الأفضل للاستخدام دون الحاجة إلى حجم أكبر ذي تكلفة أكبر. أما الأشكال (11) و (12) فتظهر المقارنة بين المقادير الوسطية اليومية السنوية الخاصة بالأداء الكهربي (القدرة الكهربائية والمردود الكهربي) للنظامين المدمج والتقليدي عند حجوم مختلفة للخزان الحراري مع مساحات متغيرة للاقط الشمسي لكل حجم مدروس، حيث يكون التغيير في حجم الخزان الحراري له الأثر فقط على نتائج النظام المدمج وليس له علاقة بنتائج النظام التقليدي لأنه غير مبرّد. فمع ازدياد حجم الخزان الحراري للنظام المدمج (من أجل المساحات من 2 m² وحتى 5 m²) وحتى الحجم (75 lit/m²) تزداد كمية الحرارة

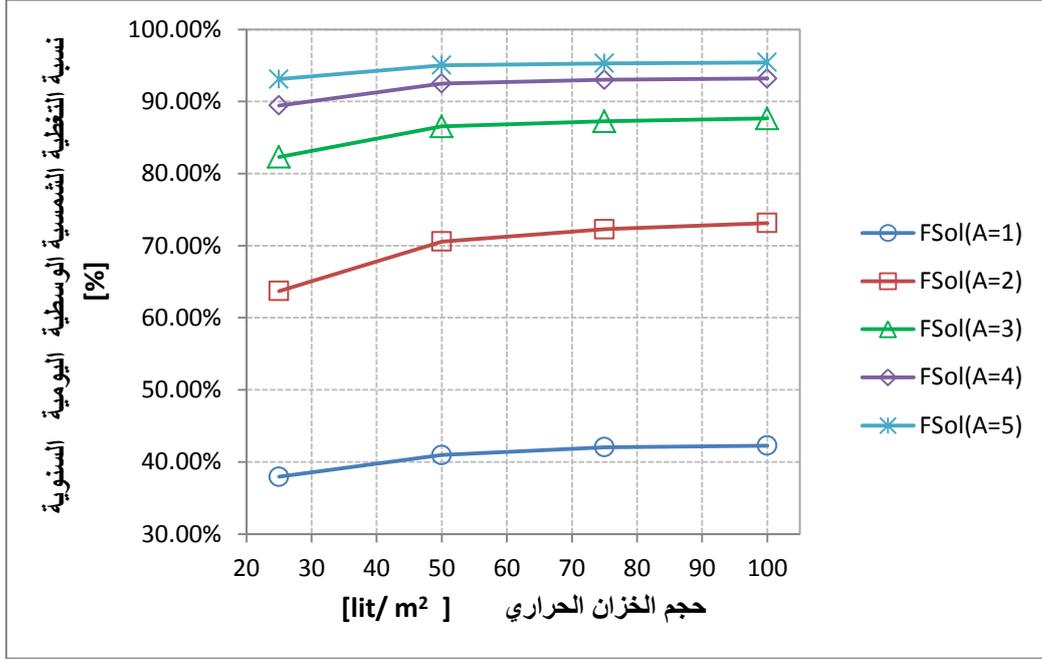
المسحوبة من اللاقط الفوتوفولتي بشكل كبير (يمكن إرجاع ذلك إلى تحسين التدرج الحراري ضمن الخزان الحراري) وهذا يؤدي إلى زيادة القدرة الكهربائية والمردود الكهربائي لذلك النظام ومن ثم زيادة الفرق بين هذه المقادير ومثيلاتها للنظام التقليدي الفوتوفولتي (أكبر زيادة نسبية للفرق في القدرة حوالي 8 % وأكبر زيادة في فرق المردود الكهربائي حوالي 0.3 %)، وتصبح الزيادة بعد ذلك الحجم صغيرة (زيادة نسبية للفرق في القدرة حوالي 1 % وزيادة في فرق المردود الكهربائي لا تتجاوز 0.1 %). أما عند المساحة (1 m²) والتي تكون عندها القدرة والمردود الكهربائيين للنظام التقليدي أكبر من النظام المدمج، يتناقص هذا الفرق بشكل خفيف عند ازدياد الحجم.



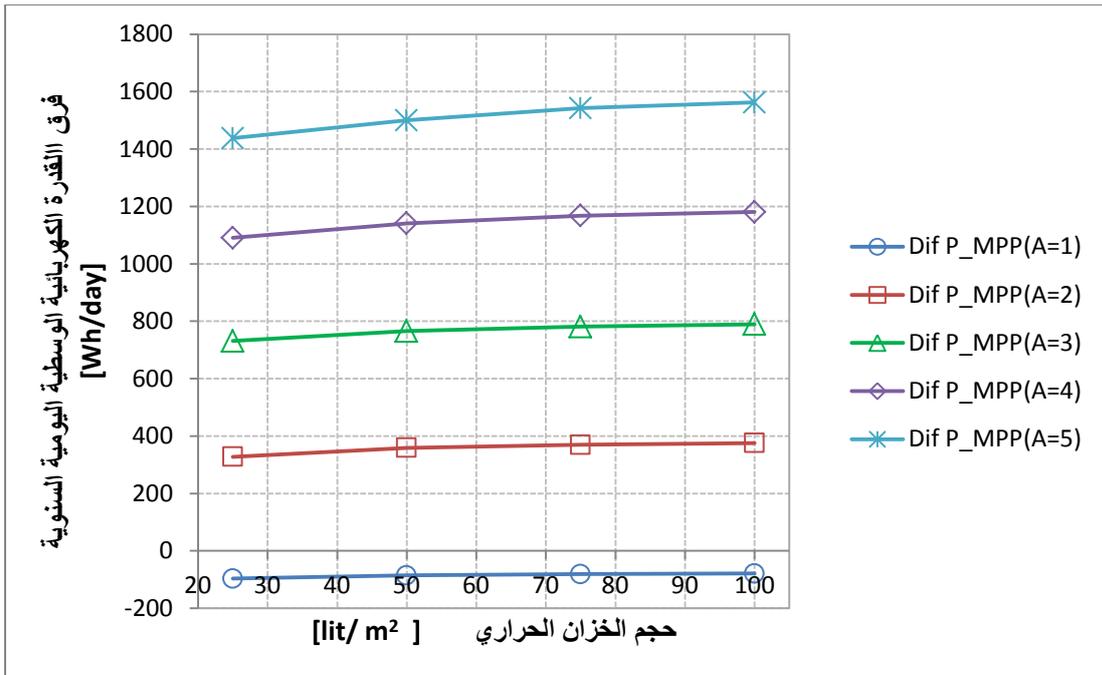
الشكل (8) تغير كمية الطاقة الحرارية المفيدة السنوية بدلالة حجم الخزان الحراري للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط الشمسي.



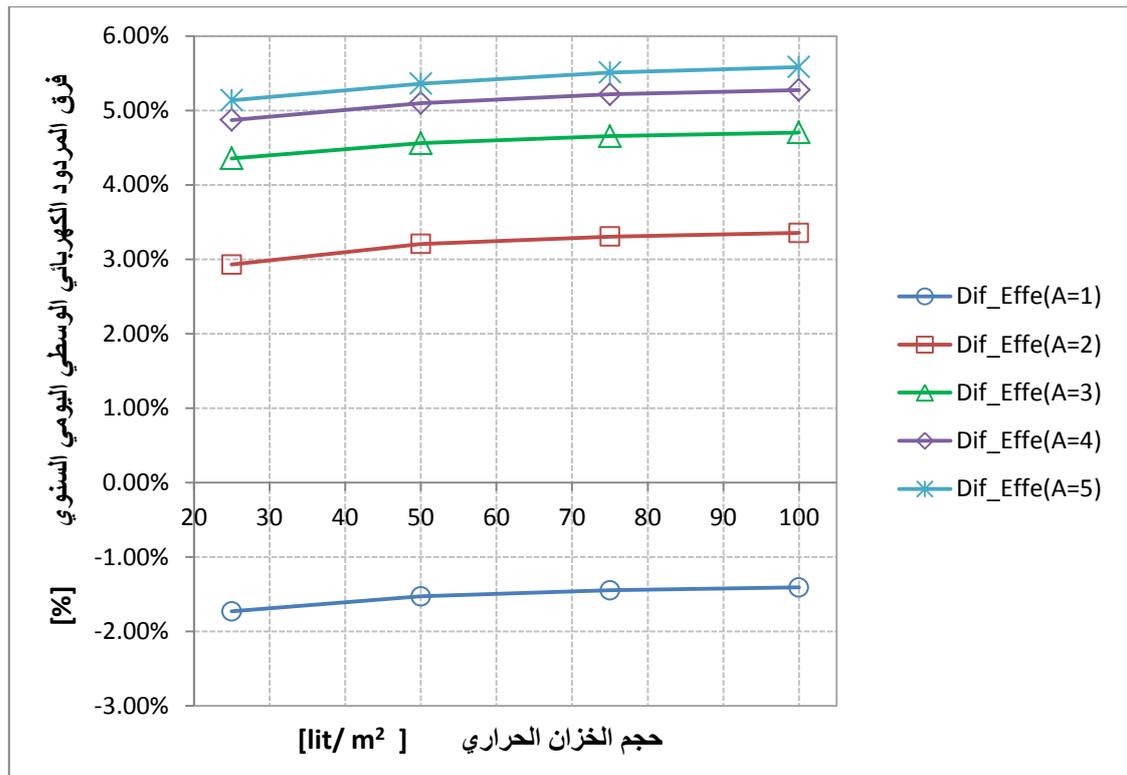
الشكل (9) تغيّر المردود الحراري الوسيط اليومي السنوي بدلالة حجم الخزان الحراري للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط الشمسي.



الشكل (10) تغيّر نسبة التغطية الشمسية الوسطية اليومية السنوية بدلالة حجم الخزان الحراري للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط الشمسي.



الشكل (11) تغيّر فرق القدرة الكهربائية الوسطية اليومية السنوية للوح الفوتوفولتي بين النظامين المدمج والتقليدي بدلالة حجم الخزان الحراري للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط الشمسي.



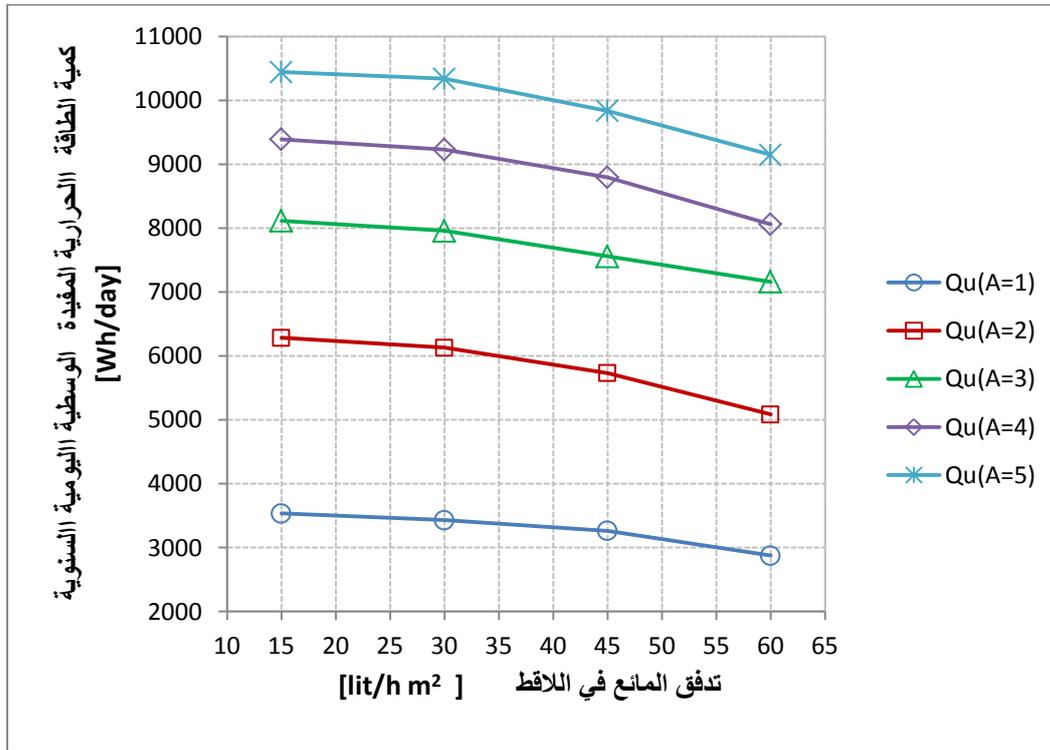
الشكل (12) تغيّر فرق المراديد الكهربائية الوسطية اليومية السنوية للوح الفوتوفولتي بين النظامين المدمج والتقليدي بدلالة حجم الخزان الحراري للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط الشمسي.

2 تأثير تدفق المانع عبر اللاقط الشمسي الحراري على أداء النظام المدمج:

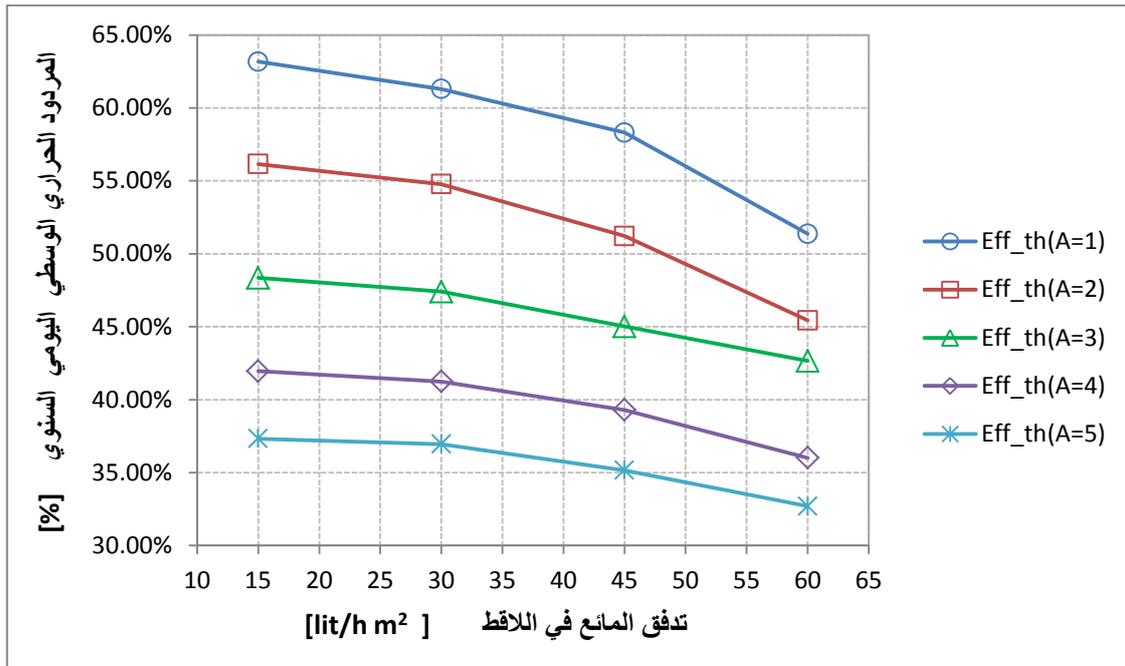
تمت دراسة تأثير تدفق المانع المار عبر دائرة اللاقط الشمسي على أداء النظام المدمج (الكهربائي والحراري)، من خلال انجاز محاكاة على النظام لسنة كاملة باستخدام القيم العددية للمقادير الواردة في الجدول (1) من أجل تدفقات مختلفة لمائع دائرة اللاقط من (15 lit/h m²) إلى (60 lit/h m²) مع مساحات متغيرة للاقط الشمسي من (1 m²) إلى (5 m²) لكل تدفق مدروس.

يظهر الشكل (13) أنه مهما كانت مساحة اللاقط فإن كمية الطاقة الحرارية المفيدة الوسطية اليومية السنوية المقدمة من اللاقط إلى النظام تتناقص مع ازدياد التدفق عبر دائرة اللاقط، ويعود ذلك إلى نقصان الفرصة السانحة في سحب الماء المار عبر اللاقط الشمسي الحراري لكمية أكبر من حرارة اللاقط الفوتوفولتي، حيث يبلغ أكبر نقصان نسبي في تلك الطاقة مع تغير التدفقات حوالي (19%). بينما يظهر الشكل (14) التناقص في مردود اللاقط الحراري مع ازدياد التدفق مهما كانت مساحة اللاقط المدروسة، وذلك يعود إلى نقصان التدرج لدرجات حرارة الخزان الحراري مع ازدياد التدفق والذي يؤدي بدوره إلى إمداد اللاقط بمائع أقل برودة وبالتالي نقصان المردود الحراري، وتبلغ أكبر نسبة في نقصان المردود حوالي (12%). كما يظهر الشكل (15) التناقص في نسبة التغطية الشمسية للنظام مع ازدياد التدفق عبر دائرة اللاقط وذلك لأن زيادة التدفق تؤدي إلى الإقلال من تدرج درجات الحرارة ضمن الخزان الحراري للنظام والذي يؤدي بدوره إلى زيادة الحاجة إلى مصدر الطاقة المساعدة وبالمحصلة نقصان نسبة التغطية الشمسية، حيث تبلغ

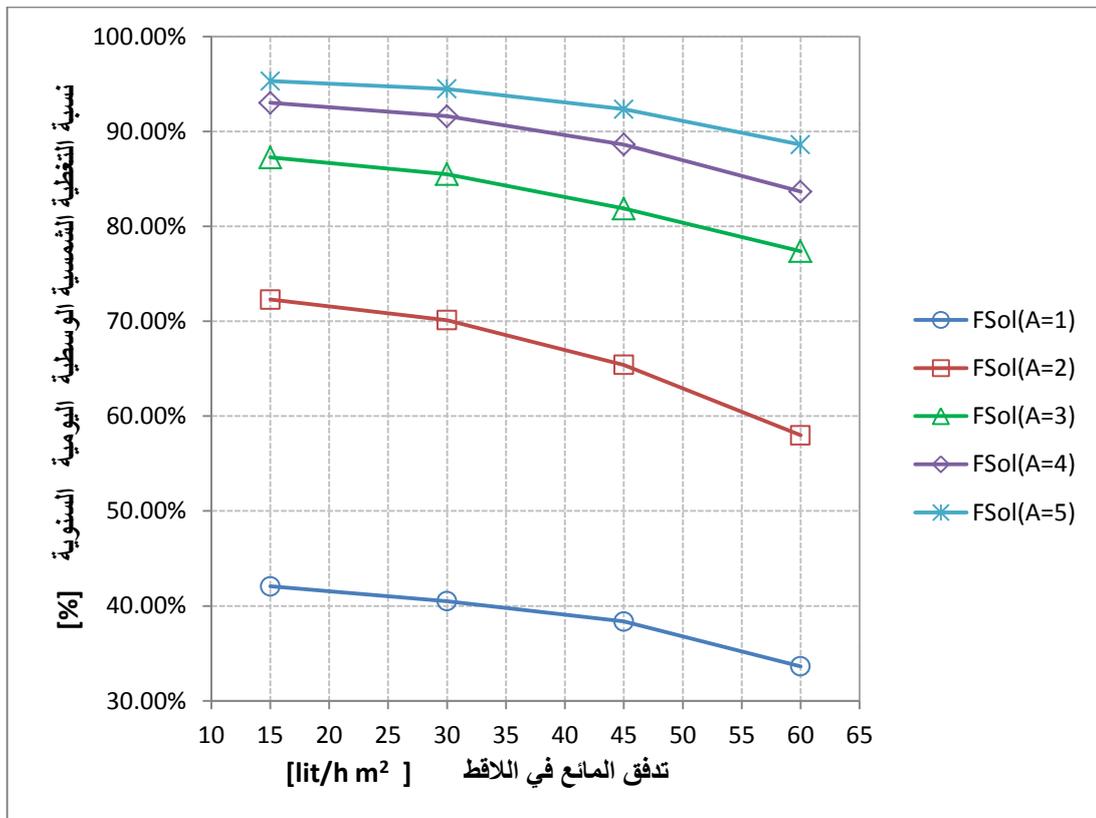
أكبر نسبة في نقصان نسبة التغطية الشمسية حوالي (14%). أما الشكلان (16) و (17) فيظهران أنه مهما كانت مساحة اللاقط فإن الفرق في القدرة الكهربائية وفي المردود الكهربائي الواسطين السنويين للنظامين المدمج والتقليدي يتناقص مع ازدياد التدفق عبر دارة اللاقط، حيث يؤثر التدفق فقط على الأداء الكهربائي للنظام المدمج بينما ليس له أي علاقة بالنظام التقليدي على اعتباره لا يحوي دارة تبريد. يعود السبب في تناقص القدرة والمردود الكهربائيين للنظام المدمج مع تناقص التدفق في دارة اللاقط لذلك النظام، إلى أنه مع ازدياد التدفق يقل التدرج لدرجات حرارة الخزان الحراري والذي يؤدي بدوره إلى إمداد اللاقط بمائع أقل برودة وبالتالي تقل كمية الحرارة المسحوبة من اللاقط الفوتوفولتي للنظام المدمج بواسطة المائع والذي ينعكس على أدائه الكهربائي (القدرة والمردود) حيث يتناقص. يكون أكبر تناقص نسبي في فرق المردود الكهربائي الواسطي اليومي السنوي بين النظامين مع ازدياد التدفق حوالي (11%)، كما يبلغ أكبر تناقص نسبي في فرق القدرة الكهربائية الواسطية اليومية السنوية للنظامين مع ازدياد التدفق حوالي (11%). تقود النتائج المختلفة لدراسة تأثير تغيير التدفق إلى اعتبار التدفق (15 lit/h m^2) هو الأفضل وقد تم اعتماده في الدراسة الأساسية للمقارنة بين النظامين الفوتوفولتيين المدمج والتقليدي.



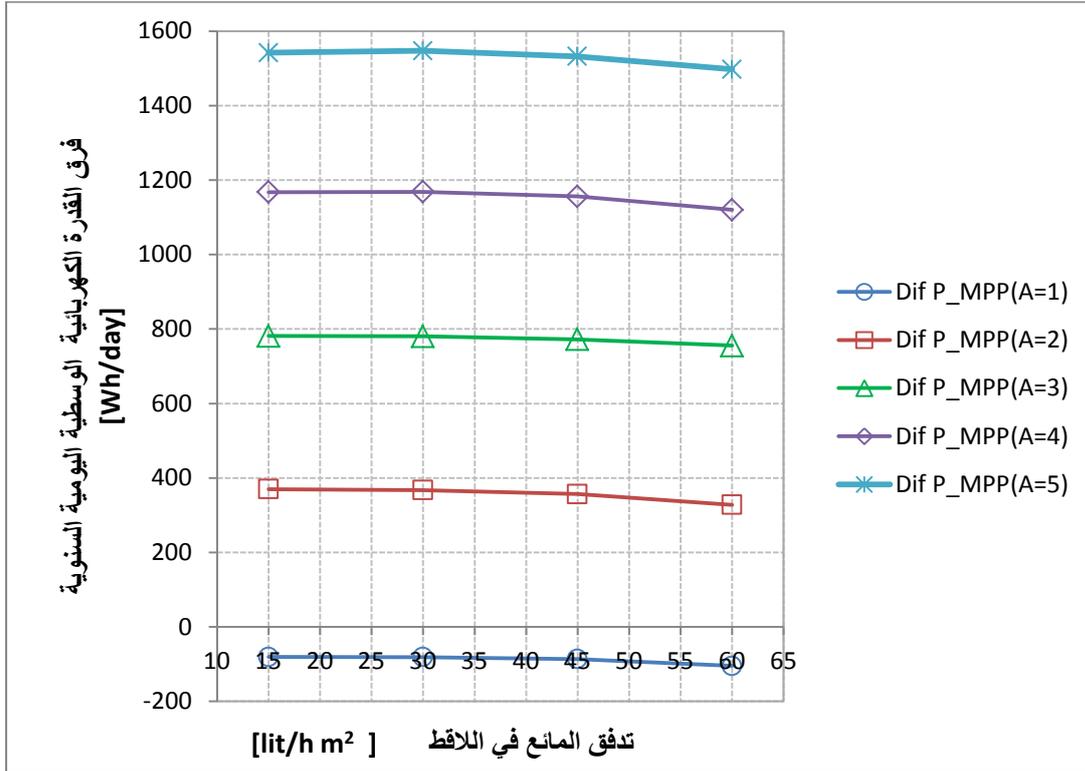
الشكل (13) تغير كمية الطاقة الحرارية المفيدة الواسطية اليومية السنوية بدلالة تدفق المانع في اللاقط الشمسي للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط.



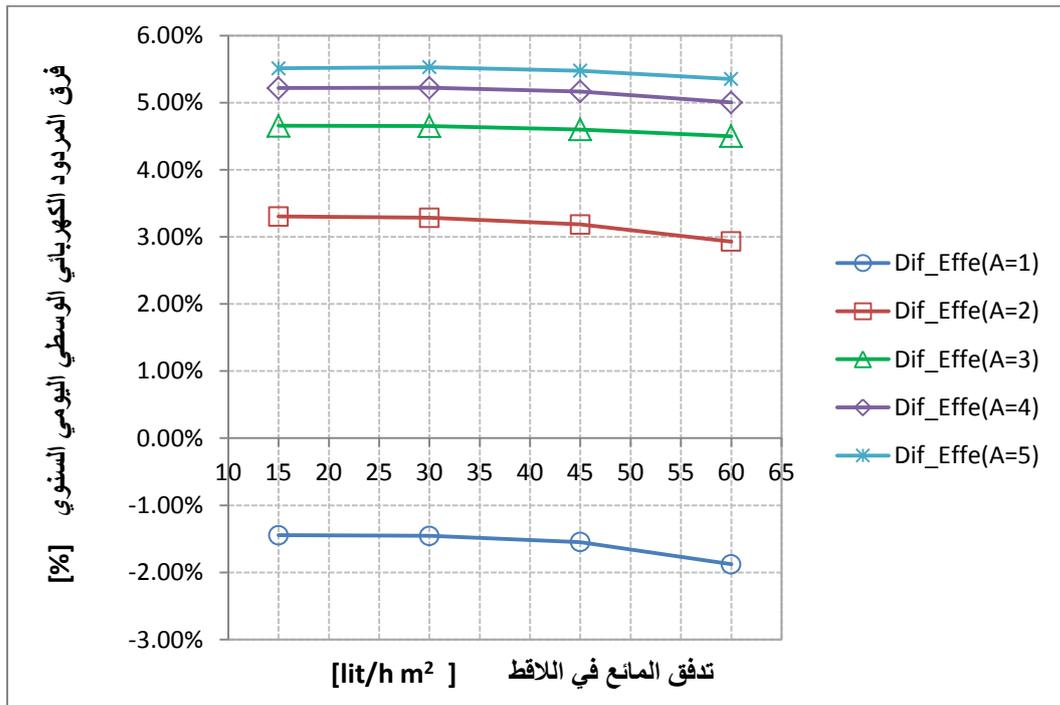
الشكل (14) تغيير المردود الحراري اليومي السنوي بدلالة تدفق المانع في اللاقط الشمسي للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط.



الشكل (15) تغيير نسبة التغطية الشمسية الوسطية اليومية السنوية بدلالة تدفق المانع في اللاقط الشمسي للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط الشمسي.



الشكل (16) تغيير فرق القدرة الكهربائية الوسطية اليومية السنوية للوح الفوتوفولتي بين النظامين المدمج والتقليدي بدلالة تدفق المانع في اللاقط الشمسي للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط الشمسي.



الشكل (17) تغيّر فرق المراديد الكهربائية الوسطية اليومية السنوية للوح الفوتوفولتي بين النظامين المدمج والتقليدي بدلالة تدفق المانع في اللاقط الشمسي للنظام المدمج من أجل مساحات مختلفة للاقط الشمسي.

الاستنتاجات والتوصيات:

- قادت النمذجة والمحاكاة لمدة سنة كاملة بخطوة زمنية قدرها ساعة واحدة (باستخدام برنامج المحاكاة TRNSYS) لنظامين فوتوفولتيين أحدهما تقليدياً بدون تبريد والآخر مدمج (لاقط فوتوفولتي مع لاقط شمسي حراري موصول بدارة مغلقة يجري عبرها الماء ويعتبر هذا النظام نظام فوتوفولتي مُبرّد) إلى النتائج الآتية:
1. بلغت الزيادة في القدرة الكهربائية الوسطية اليومية السنوية للاقط الفوتوفولتي المبرّد عن اللاقط التقليدي غير المبرّد حوالي (1542 - 370) Wh/day من أجل مساحة متغيرة للاقط المستخدم m^2 (5 - 2).
 2. بلغت الزيادة في المردود الكهربائي الوسطي اليومي السنوي للاقط الفوتوفولتي في النظام المدمج عن النظام التقليدي من حوالي (3 %) عند مساحة للاقط قدرها $(2 m^2)$ إلى حوالي (6 %) عند مساحة للاقط قدرها $(5 m^2)$.
 3. أمكن الاستفادة من الحرارة المسحوبة من اللاقط الفوتوفولتي في النظام المدمج لتسخين الماء، حيث بلغت كمية الطاقة الحرارية المفيدة (Q_u) الوسطية اليومية السنوية المقّمة من اللاقط الشمسي للنظام حوالي (10445 - 3535) Wh/day من أجل مساحات مختلفة للاقط m^2 (5 - 1). بينما بلغت قيمة المردود الحراري الوسطي اليومي السنوي لذلك النظام (37 - 63) % و نسبة التغطية الشمسية الوسطية اليومية السنوية للنظام (42 - 95) % من أجل المساحات المختلفة للاقط.
 4. أظهرت الدراسة لتأثير حجم الخزان الحراري على أداء النظام المدمج (الحراري والكهربائي) أن زيادة الحجم حتى $(75 lit/m^2)$ من أجل مساحات متغيرة للاقط تؤدي إلى زيادة الأداء الحراري للنظام (أكبر زيادة نسبية في كمية الطاقة الحرارية هي حوالي 11 % و أكبر زيادة في المردود الحراري هي حوالي 6 % و أكبر زيادة في نسبة التغطية الشمسية هي حوالي 7 %، وزيادة المقادير الكهربائية الوسطية اليومية السنوية (القدرة الكهربائية والمردود الكهربائي) لذلك النظام بالمقارنة مع النظام التقليدي (أكبر زيادة نسبية للفرق في القدرة بين النظامين هي حوالي 8 % و أكبر زيادة في فرق المردود الكهربائي هي حوالي 0.3 %). أما الزيادة في أداء النظام (الحراري والكهربائي) بعد الحجم $(75 lit/m^2)$ تصبح قليلة، لذلك يُعتبر الحجم $(75 lit/m^2)$ هو الأفضل للاستخدام.
 5. أظهرت الدراسة لتأثير تدفق المانع المار عبر اللاقط الشمسي على أداء النظام المدمج (الكهربائي والحراري)، أنه مهما كانت مساحة اللاقط فإن المقادير المعبّرة عن الأداء الحراري (كمية الطاقة الحرارية المفيدة المقّمة من اللاقط، المردود الحراري، نسبة التغطية الشمسية) والمقادير المعبّرة عن الأداء الكهربائي (القدرة الكهربائية والمردود الكهربائي) تتناقص مع ازدياد التدفق عبر دارة اللاقط وكانت أفضل هذه المقادير عند التدفق $(15 lit/h m^2)$ ، لذلك يُعتبر هذا التدفق هو الأفضل في الاستخدام.
- تمت دراسة أثر التبريد على النظام الفوتوفولتي أيضاً من خلال المقارنة بين نتائج النظام المدمج في حالتين: تمثل الأولى تدوير السائل ضمن دارة التبريد ويُعتبر النظام في هذه الحالة مبرداً، أما الحالة الثانية فتتمثل إيقاف تدوير السائل ضمن دارة التبريد ويُعتبر النظام في هذه الحالة غير مبرّد. قادت الدراسة إلى نتيجة مفادها أن تدوير السائل في

دائرة اللاقط (تبريد اللاقط الفوتوفولتي) بالمقارنة مع حالة عدم التبريد يؤدي إلى زيادة في القدرة الكهربائية الوسطية اليومية السنوية للوح الفوتوفولتي بحوالي (164 – 484) Wh/day من أجل مساحة متغيرة للوح المستخدم m^2 (1 – 5). أما الزيادة في المردود الكهربائي للاقط الفوتوفولتي لذلك النظام في حالة التبريد عن حالة عدم التبريد متغيرة من (2.6 %) عند المساحة (1 m^2) إلى (1.4 %) عند المساحة (5 m^2). تُعتبر الزيادة في هذه المقادير أقل من الزيادة في تلك المقادير من أجل حالة المقارنة بين النظام المدمج المبرّد والنظام التقليدي غير المبرّد. أما التوصيات التي يوصى بها فهي دراسة أنظمة تبريد للأنظمة الفوتوفولتية أكثر تطوراً والتي من شأنها زيادة تحسين الأداء الكهربائي لتلك الأنظمة.

المراجع

1. The German Energy Society. Planning and Installing Photovoltaic System. A guide for installers, Architects and Engineers. James & James, Ltd in USA and UK, 2005,368.
2. Tomas Markvart, Solar Electricity. University of Southampton, UK, 1994,228.
3. Hayoung Park, Soonwoo Kwon, JoonSung Lee, Hee Jin Lim ,Sewang Yoon, DonghwanKim. Improvement on surface texturing of single crystalline silicon for solar cells by saw-damage etching using an acidic solution. Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 93, 2009, 1773-1778.
4. Germà Garcia-Belmonte. Temperature dependence of open-circuit voltage in organic solar cells from generation–recombination kinetic balanc. Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 94, 2010, 2166-2169.
5. E. Skoplaki, J.A. Palyvos. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. Solar Energy, Vol. 83, 2009, 614-624.
6. M. Abdolzadeh, M. Ameri. Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells. Renewable Energy, Vol. 34, 2009, 91-96.
7. HUANG B. J., LIN T. H., HUNG W. C., SUN F. S. Performance Evaluation Of Solar Photovoltaic/Thermal Systems. Solar Energy, Vol. 70, 2001, 443-448.
8. R. Zakharchenko, L. Licea-Jiménez, S.A. Pérez-García, P. Vorobiev, U. Dehesa-Carrasco, J.F. Pérez-Robles, J. González-Hernández, Yu. Vorobiev. Photovoltaic solar panel for hybrid PV/thermal system. Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 82, 2004, 253-261.
9. B. Robles-Ocampo, E. Ruíz-Vasquez, H. Canseco-Sánchez, R.C. Cornejo-Meza, G. Trápaga-Martínez, F.J. García-Rodríguez, J. González-Hernández, Yu.V. Vorobiev. Photovoltaic/thrml solar hybrid system with bifacial PV module and transparent plane collector. Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 91, 2007, 1966-1971.
10. C. Gibart. Study of and tests on a hybrid photovoltaic-thermal collector using concentrated sunlight. Solar Cells, Vol. 4, 1981, 71-89.
11. Branislav Lalović, Zoltan Kiss, Herbert Weakliem. A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector. Solar Cells, Vol. 19, 1986, 131-138.
12. M. Vivar, I. Skryabin, V. Everett, A. Blakers. A concept for a hybrid solar water purification and photovoltaic system. Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 94, 2010, 1772-1782.

13. MG. Vokas, N. Christandonis, F. Skittides. Hybrid photovoltaic-thermal systems for domestic heating and cooling-Atheoretical approach. *Solar Energy*, Vol. 80, 2006, 607-615.
14. Swapnil Dubey, G.N. Tiwari. Thermal modeling of a combined of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater. *Solar Energy*, Vol. 82, 2008, 602-612.
15. KLEIN, S. A. et al., TRNSYS – a transient simulation program, version 16.1, User Manual. University of Wisconsin-Madison, USA. 2006.
16. Meteonorm, 4.00, Global Meteorological Database for Solar Energy Applied Meteorology. Nov 1999.