

دراسة تأثير تبريد الألواح الكهروشمسية بالماء على مردودها وطاقاتها الكهربائية المتولدة

علي حمودي*

تاريخ الإيداع 28 / 4 / 2013. قُبل للنشر في 23 / 4 / 2014

□ ملخص □

يتأثر الأداء الكهربائي للألواح الكهروشمسية بشكل كبير بدرجة حرارة تشغيل الخلايا الكهروشمسية السيليكونية بسبب خصائص السيليكون البلوري المستخدم فيها، فتتخفض الطاقة المتولدة من هذه الخلايا بارتفاع درجة حرارتها. وللمحد من هذا الانخفاض في الطاقة تم تبريد الألواح الكهروشمسية باستخدام الماء، وذلك بوضع أنبوب يحوي ثقوب عديدة منتظمة على أعلى اللوح ويجري الماء بشكل حر على سطحه بعدة تدفقات.

ف عند التدفق (4.224 l/min.m^2) ، انخفضت درجة حرارة اللوح بمقدار حتى (20°C)، والزيادة المسجلة في الناتج الكهربائي خلال يوم كامل حوالي (12.8%)، وارتفع المردود من (8.31%) إلى (9.62%) أي بمقدار (1.31%). وعند التدفق (3.167 l/min.m^2)، انخفضت درجة حرارة اللوح بمقدار حتى (18°C) ، والزيادة المسجلة في الناتج الكهربائي حوالي (9.8%) ، وارتفع المردود بمقدار (1.03%). أما عند التدفق (2.112 l/min.m^2)، انخفضت درجة حرارة اللوح بمقدار حتى (15.5°C)، والزيادة المسجلة في الناتج الكهربائي حوالي (7.8%)، وارتفع المردود بمقدار (0.83%).

كما أن جريان الماء على سطح اللوح الكهروشمسي يقلل ضياعات الانعكاس، لأن قرينة انكسار الماء (1.3) متوسط بين قرينة انكسار الهواء (1) والزجاج (1.5)، بالإضافة لذلك يبقى سطح اللوح نظيفاً.

الكلمات المفتاحية: الألواح الكهروشمسية ؛ تحسين المردود ؛ التبريد ؛ الطاقة الشمسية.

* مشرف على الأعمال - قسم هندسة القوى الميكانيكية-كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية-اللاذقية-سورية.

Studying the Impact of Photovoltaic Modules of Cooling by Water on its Efficiency and Generated Electrical Energy

Ali Hammoudi *

(Received 28 / 4 / 2013. Accepted 23 / 4 / 2014)

□ ABSTRACT □

The electrical performance of the PV modules can be severely affected by operating temperature of silicon cells due to properties of the crystalline silicon used; the energy generated from these cells decreases with their high temperatures. To reduce this decline in energy, the PV modules use cooling water by placing a tube containing many regular holes on the top end of the module, and water flows on the surface freely in several flows. So, with flow rate (4.224 l/min.m²), module temperature decreases up to (20C°); the record of increased value of electrical yield over the whole day is about (12.8%). and efficiency rises (from 8.31% to 9.62%) of (1.31%). With Flow rate (3.167 l/min.m²), temperature of module decreases up to (18C°); the record of increased value of electrical yield is about (9.8%), and efficiency rises by (1.03%). But with flow rate (2.112 l/min.m²), temperature of module decreases up to (15.5C°); the record of increased value of electrical yield is about (7.8%), and efficiency rises by (0.83%). Furthermore, flow of water on the surface of PV module reduces the reflection losses because the refractive index of water with (1.3) is intermediate between air (1) and glass (1.5). In addition, the surface of module remains clean.

Keywords: photovoltaic modules, improved output, cooling, solar energy

*Work Supervisor, Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

يعدّ استخدام تقنية توليد الكهرباء بواسطة الخلايا الكهروضوئية (PV)، الأكثر اهتماماً على مستوى العالم، لما تتميز به من إمكانية الاستخدام الدائم بالمقارنة مع الوقود الاحفوري المهدد بالنضوب، لكن لم تستخدم هذه التقنية على نطاق واسع حتى الآن بسبب كلفتها العالية. وتعتبر الخلايا الشمسية السيليكونية المستخدمة في توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية الأكثر شيوعاً واستخداماً، لكن مردودها منخفض لا يتجاوز (15%) في الخلايا التجارية، بسبب وجود ضياعات عديدة.

ضياعات الانعكاس:

يسبب الإشعاع الشمسي الذي يسقط بزواوية ورود عمودية على الزجاج المغلف أو خلايا الألواح الكهروضوئية، ضياعات انعكاس بحدود (4-5%)، وفي معظم التطبيقات العملية، لا تكون زوايا الورد عمودية، وهذا يؤدي إلى زيادة ضياعات الانعكاس حسب قانون فريسنل [1]، وبالتالي يضيع جزء من طاقة الإشعاع الشمسي التي يمكن أن تتحول إلى طاقة مفيدة بواسطة الخلية الشمسية.

تعتمد ضياعات الانعكاس المتراكمة خلال اليوم من أجل زاوية ميل ثابتة للوح الكهروضوئي، على خط العرض ومعامل الوضوح (الذي يعرف بنسبة الإشعاع الشمسي المبعثر إلى الإشعاع الشمسي المباشر)، ونقاوة مادة سطح اللوح الكهروضوئي، وكفاءة معاملات انكسار الضوء لطبقات غلاف اللوح الكهروضوئي. قيمة ضياعات الانعكاس المتراكمة خلال اليوم، أكبر من (8-15%) من الإشعاع الشمسي للأنظمة الكهروضوئية التقليدية، عند الاستفادة فقط من الخصائص الطبيعية لمواد اللوح الكهروضوئي في ظروف التشغيل العملية [2].

لدراسة تحسين كفاءة معاملات الانكسار لمواد اللوح الكهروضوئي، تمت الاستفادة من نموذج ضوئي متطور للوح كهروضوئي ذو ثلاث طبقات، (مع الأخذ بعين الاعتبار الانعكاسات المتعددة داخل الطبقات وفيما بينها) [3,4]، وذلك لنمذجة نظام ضوئي مؤلف من زجاج في الأمام، و (EVA (Ethylene Vinyl Acetate وطلاء مضاد للانعكاس وخلايا شمسية سيليكونية، أدى اختلاف البارامترات بين الحالة التقليدية وهذه الحالة، إلى تحسين الكفاءة الضوئية بين الطبقتين العلويتين (زجاج و EVA)، وزيادة النفاذية الضوئية (3.2%) لمواد ذات معاملات انكسار مثالية $n_1=1.33$ و $n_2=1.73$ [5]، لكن الخصائص المثالية للطبقة العليا لا تتوفر لمواد صلبة. تبين عند استخدام الماء بعامل انكسار $n=1.3$ ، زيادة العائدية الكهربائية والنفاذية الضوئية.

لبعض الطرق المستخدمة في تقليل الانعكاس بعض المساوي، فطلاء الزجاج المضاد للانعكاس لا يدوم طويلاً، والسطوح المعالجة ذات البنية المنتظمة، تكون عالية الثمن ويتراكم عليها الغبار، مما يؤدي لصعوبة تنظيفها، لذلك عند استخدام الماء يمكن تلافي هذه المساوي.

تأثير درجة الحرارة على خواص الخلية الكهروضوئية:

يعتمد توليد الطاقة الكهربائية باستخدام الخلايا الكهروضوئية على درجة حرارة تشغيلها، حيث ينخفض جهد الدارة المفتوحة (Voc) بشكل ملحوظ مع زيادة درجة حرارة الخلايا الكهروضوئية، ومعدل هذا الانخفاض في الجهد يساوي $(2.3mV/c^\circ)$ [6] أي أن: $\frac{dV}{dT} = -2.3mV/c^\circ$ وهي علاقة خطية. ويؤدي الانخفاض المتتالي في الجهد (Voc)، إلى انخفاض كفاءة الخلية الكهروضوئية عند قيم الإشعاع الشمسي المدروسة، بالمقابل تزداد قيمة تيار القصر (Isc) المتولد في الخلايا مع ارتفاع درجة الحرارة لكن بقيمة صغيرة [7].

إن معظم الإشعاع الشمسي الممتص من قبل الخلايا الشمسية، يتحول إلى ضياع على شكل حرارة، والتي بدورها تزيد درجة حرارة الخلايا، بالتالي لهذه الحرارة الضائعة تأثير سلبي على الخرج الكهربائي للخلايا [8]. وينخفض جهد و طاقة الخلايا الشمسية السيليكونية الأحادية البلورة والمتعددة البلورات، بحوالي (0.5%-0.4%) لكل ارتفاع في درجة حرارة الخلية الكهروضوئية مقداره درجة مئوية واحدة [9,10]، كما أن الخلية الكهروضوئية تنهار عندما تتجاوز درجة حرارتها 85°C .

تبريد الألواح الكهروضوئية:

نظراً لانخفاض مردود الخلايا الكهروضوئية وخرجها الكهربائي مع زيادة درجة حرارة تشغيلها، يجب الحفاظ على أن تبقى درجة حرارتها منخفضة عن طريق تبريدها. الفائدة الأخرى من نظام التبريد بالماء هي تحسين كفاءة التحويل الكهربائية للخلايا، بسبب خفض الضياعات الناتجة عن الانعكاس حيث إن قرينة انكسار الماء تساوي (1.3)، وهي قيمة وسطية بين الزجاج ذي قرينة انكسار (1.5) والهواء ذي قرينة انكسار (1).

توجد عدة طرق لتبريد الخلايا الكهروضوئية نذكر منها [11]:

1. تبريد الخلايا عن طريق الهواء بشكل قسري.
2. تبريد الخلايا عن طريق استخدام الماء بعدة طرق:
 - جريان الماء على السطح الأمامي للوح الكهروضويسي بشكل حر أو بشكل قسري عن طريق مضخة.
 - جريان الماء في قنوات.
 - جريان الماء في قنوات شعرية.

تبريد الخلايا الكهروضوئية من خلال جريان الماء على السطح الأمامي للوح الكهروضويسي:

تتم هذه الطريقة في تبريد الألواح الكهروضوئية، عن طريق جريان الماء على السطح الأمامي للوح الكهروضويسي بشكل حر أو بشكل قسري، وذلك بوضع أنبوب يحوي ثقوب عديدة على أعلى اللوح حسب أبعاده، يسمح جريان طبقة من الماء على سطح اللوح الكهروضويسي بخفض درجة حرارته، عن طريق ضياع الحرارة بوساطة الحمل الحراري. يسمح الجريان السريع للماء على سطح اللوح الكهروضويسي، بارتفاع طفيف في درجة حرارة الماء، مما يؤدي إلى تبريد سطح اللوح بشكل متوازن، و إلى استقرار في درجة حرارته. ويساهم تبخر جزء من ماء التبريد أيضاً، إلى زيادة في تخفيض درجة حرارة اللوح.

أهمية البحث وأهدافه:

بعد تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية، من أهم بدائل الطاقة الأحفورية، وتعتبر سورية من البلدان التي تتميز بارتفاع شدة الإشعاع الشمسي الساقط، مما يجعل استغلال الطاقة الشمسية في توليد الطاقة الكهربائية ذي أهمية كبيرة، إلا أن هذا الاستغلال لا يزال قليلاً، بسبب انخفاض كفاءة الخلايا الكهروضوئية مقارنة بكلفتها العالية. ومن بين أحد الأسباب الرئيسية في انخفاض الكفاءة، هو ارتفاع درجة الحرارة التشغيلية للخلايا. من هنا تأتي أهمية هذا البحث في إمكانية زيادة كفاءة الخلايا الكهروضوئية والطاقة الكهربائية المتولدة منها، بخفض درجة حرارتها عن طريق تبريدها بالماء، الذي يعدّ عنصر طبيعي متوفر في أغلب المناطق التي تستخدم فيها الخلايا الكهروضوئية.

طرائق البحث ومواده:

تحتسب استطاعة الخرج للوح الكهروضوئى عند نقطة العمل من المعادلة التالية:

$$[W] \quad P_{out} = V_{out} \cdot I_{out} \quad (1)$$

وتحتسب استطاعة الخرج للوح الكهروضوئى عند نقطة الطاقة العظمى من المعادلة التالية:

$$[W] \quad P_{mp} = V_{mp} \cdot I_{mp} \quad (2)$$

وتحتسب استطاعة الدخل للوح الكهروضوئى من المعادلة التالية:

$$[W] \quad P_{in} = G \cdot A \quad (3)$$

ويحتسب مردود اللوح الكهروضوئى من المعادلة التالية:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad \text{عند نقطة العمل، و} \quad \eta = \frac{P_{mp}}{P_{in}} \quad \text{عند نقطة الطاقة العظمى} \quad (4)$$

حيث: V_{out} [V]: جهد اللوح الكهروضوئى عند نقطة العمل.

I_{out} [A]: تيار اللوح الكهروضوئى عند نقطة العمل.

V_{mp} [V]: جهد اللوح الكهروضوئى عند نقطة الطاقة العظمى.

I_{mp} [A]: تيار اللوح الكهروضوئى عند نقطة الطاقة العظمى.

G (W/m^2): شدة الإشعاع الشمسى الساقط.

A [m^2]: سطح اللوح الكهروضوئى.

أجري البحث في مدينة اللاذقية في أيام صافية من شهر حزيران عام 2011.

تم استخدام لوحين كهروضوئيين متماثلين بالمواصفات التالية:

- الاستطاعة (110W) - جهد الدارة المفتوحة ($V_{oc}=21.3V$) - جهد نقطة الطاقة القصوى ($V_{mp}=17.2V$)

- تيار القصير ($I_{sc}=6.77A$) - تيار نقطة الطاقة القصوى ($I_{mp}=6.38A$) - الطول ($L=1450mm$)

العرض ($W=653mm$). وتم تبريد أحد اللوحين وترك الآخر بدون تبريد من أجل المقارنة.

- تم قياس درجة حرارة الجو المحيط في الظل.

- تم قياس درجة حرارة الألواح الكهروضوئية بوساطة حساسات حرارية.

- تم تركيب الألواح بزواوية ميل (22°)، وهي الزاوية التي يسقط فيها الإشعاع الشمسى بشكل عمودي على

الألواح خلال فترة انجاز العمل، وتم تحديد ذلك تجريبياً.

- تم تعقب نقطة الطاقة القصوى وقياس طاقة الخرج يدوياً باستخدام مقاومة أومية متغيرة.

- تم تسجيل القراءات كل نصف ساعة.

- تم قياس سرعة الهواء بجانب الألواح.

- اعتمدنا على ASHRAE [12] في تحديد قيم الإشعاع الشمسى عند زاوية ميل للألواح (22°) لمدينة

اللاذقية في أيام إجراء البحث، بسبب عدم توفر جهاز لقياس شدة الإشعاع الشمسى.

- تم استخدام خزان سعته (100) ليتر، موضوع على ارتفاع أكبر من الحافة العليا للوح، ويغذى بشكل دائم

بالماء، وموصول مع أنبوب مثقوب بـ (15) ثقب بقطر (1.5mm) ووضعه على الحافة العليا لأحد الألواح، بحيث

يجري الماء على سطح اللوح بشكل حر ويغطي كامل سطح اللوح.

-تم أخذ القياسات عند تدفقات مختلفة (4 l/min, 3 l/min, 2 l/min) بحيث تتشكل طبقة رقيقة من الماء على سطح اللوح الكهروضويسي، وتم التحكم بذلك عن طريق سكر مركب على الأنبوب مع مقياس تدفق الماء.



الشكل (1) صورة توضيحية للتجربة تبين كيفية جريان الماء على سطح اللوح الكهروضويسي

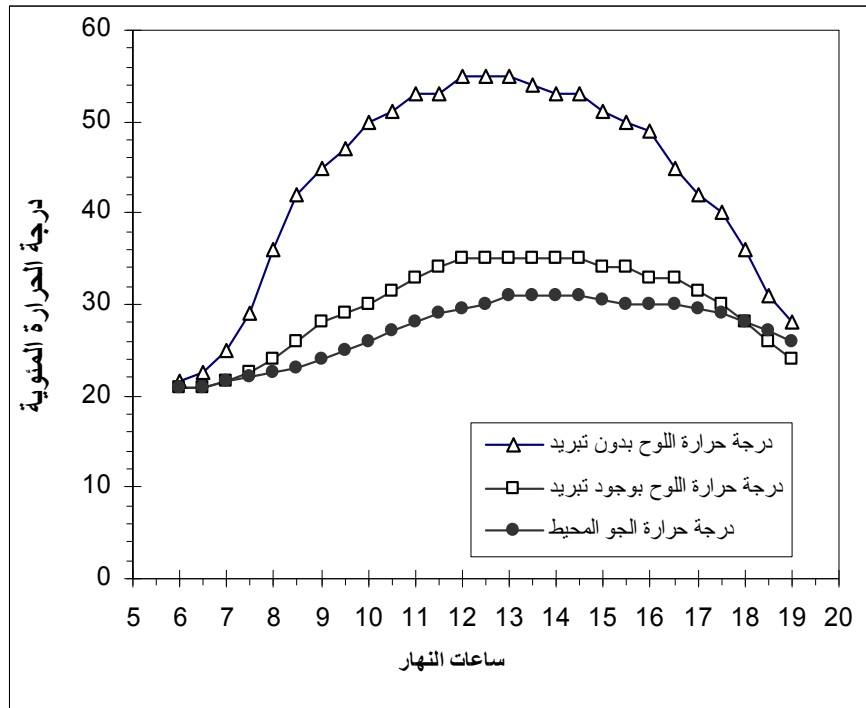
النتائج والمناقشة:

القياسات المسجلة ليوم (7) حزيران عام 2011 للوح كهروضويسي تقليدي (غير مبرّد)، ولوح كهروضويسي مبرّد بتدفق ماء التبريد قدره $Q=4$ l/min، أو تدفق نوعي $q = 4.224$ l/min.m² :
يبين الجدول (1) و الشكل(2)، تغيرات درجة الحرارة لسطح اللوح الكهروضويسي خلال ساعات النهار:

الجدول (1) تغيرات درجة الحرارة لسطح اللوح الكهروضويسي خلال ساعات النهار

درجة حرارة الجو المحيط C°	درجة حرارة اللوح بوجود تبريد C°	درجة حرارة اللوح بدون تبريد C°	الساعة	درجة حرارة الجو المحيط C°	درجة حرارة اللوح بوجود تبريد C°	درجة حرارة اللوح بدون تبريد C°	الساعة
31	35	55	13	21	21	21.5	6
31	35	54	13.5	21	21	22.5	6.5
31	35	53	14	21.5	21.5	25	7
31	35	53	14.5	22	22.5	29	7.5
30.5	34	51	15	22.5	24	36	8
30	34	50	15.5	23	26	42	8.5
30	33	49	16	24	28	45	9
30	33	45	16.5	25	29	47	9.5
29.5	31.5	42	17	26	30	50	10

29	30	40	17.5	27	31.5	51	10.5
28	28	36	18	28	33	53	11
27	26	31	18.5	29	34	53	11.5
26	24	28	19	29.5	35	55	12
				30	35	55	12.5



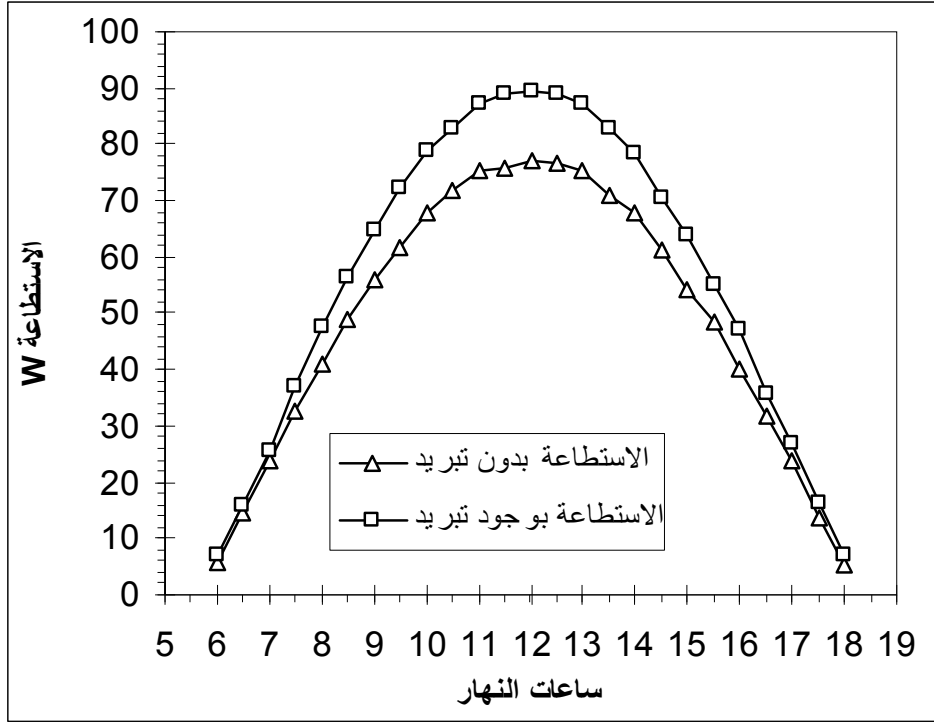
الشكل (2) تغيرات درجة الحرارة لسطح اللوح الكهروضوئسي خلال ساعات النهار

يبين الجدول (2) و الشكل(3)، تغيرات استطاعة الخرج للوح الكهروضوئسي خلال ساعات النهار:

الجدول (2) تغيرات استطاعة الخرج للوح الكهروضوئسي خلال ساعات النهار

استطاعة الخرج بوجود تبريد W	استطاعة الخرج بدون تبريد W	الإشعاع الشمسي W/m^2	الساعة	استطاعة الخرج بوجود تبريد W	استطاعة الخرج بدون تبريد W	الإشعاع الشمسي W/m^2	الساعة
88.77	76.77	975	12.5	6.85	5.65	97.243	6
87.1	75.48	958.57	13	15.98	14.75	200	6.5
82.9	70.81	912	13.5	25.68	23.94	304.02	7
78.4	67.9	863.47	14	36.8	32.68	415	7.5
70.49	61.4	785	14.5	47.4	40.98	520.47	8
63.76	54.16	713.25	15	56.46	48.82	620	8.5
55.15	48.6	620	15.5	64.96	56.16	713.25	9

47.15	39.98	520.47	16	72.2	61.81	785	9.5
35.8	31.8	415	16.5	78.64	67.99	863.47	10
26.68	23.94	304.02	17	83	71.81	912	10.5
16.21	13.75	200	17.5	87.3	75.48	958.57	11
6.95	5.5	97.243	18	88.8	75.77	975	11.5
				89.6	76.9	991.1	12



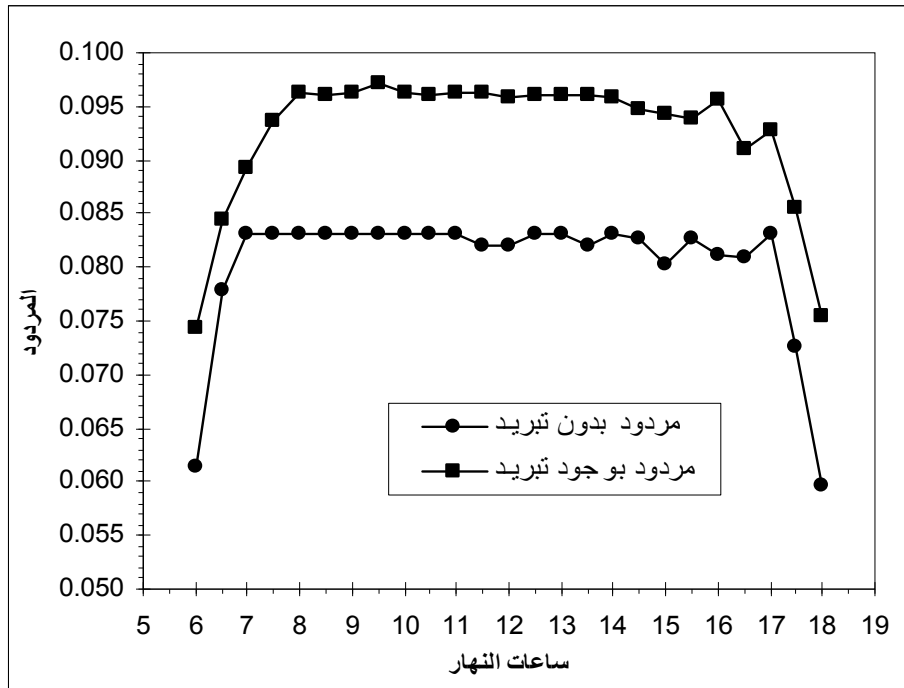
الشكل(3) تغيرات استطاعة الخرج للوح الكهروضوئية خلال ساعات النهار

يبين الجدول (3) و الشكل(4) تغيرات مردود اللوح الكهروضوئية خلال ساعات النهار:

الجدول (3) تغيرات مردود اللوح الكهروضوئية خلال ساعات النهار

الساعة	استطاعة الدخل W	المردود بدون تبريد	المردود بوجود تبريد	الساعة	استطاعة الدخل W	المردود بدون تبريد	المردود بوجود تبريد
6	92.09	0.0614	0.0744	12.5	923.33	0.0831	0.0961
6.5	189.40	0.0779	0.0844	13	907.76	0.0831	0.0959
7	287.90	0.0832	0.0892	13.5	863.66	0.0820	0.0960
7.5	393.01	0.0832	0.0936	14	817.70	0.0830	0.0959
8	492.89	0.0831	0.0962	14.5	743.40	0.0826	0.0948
8.5	587.14	0.0831	0.0962	15	675.45	0.0802	0.0944

0.0939	0.0828	587.14	15.5	0.0962	0.0831	675.45	9
0.0957	0.0811	492.89	16	0.0971	0.0831	743.40	9.5
0.0911	0.0809	393.01	16.5	0.0962	0.0831	817.70	10
0.0927	0.0832	287.90	17	0.0961	0.0831	863.66	10.5
0.0856	0.0726	189.40	17.5	0.0962	0.0831	907.76	11
0.0755	0.0597	92.09	18	0.0962	0.0821	923.33	11.5
				0.0958	0.0819	938.57	12



الشكل (4) تغيرات مردود اللوح الكهروضوئسي خلال ساعات النهار

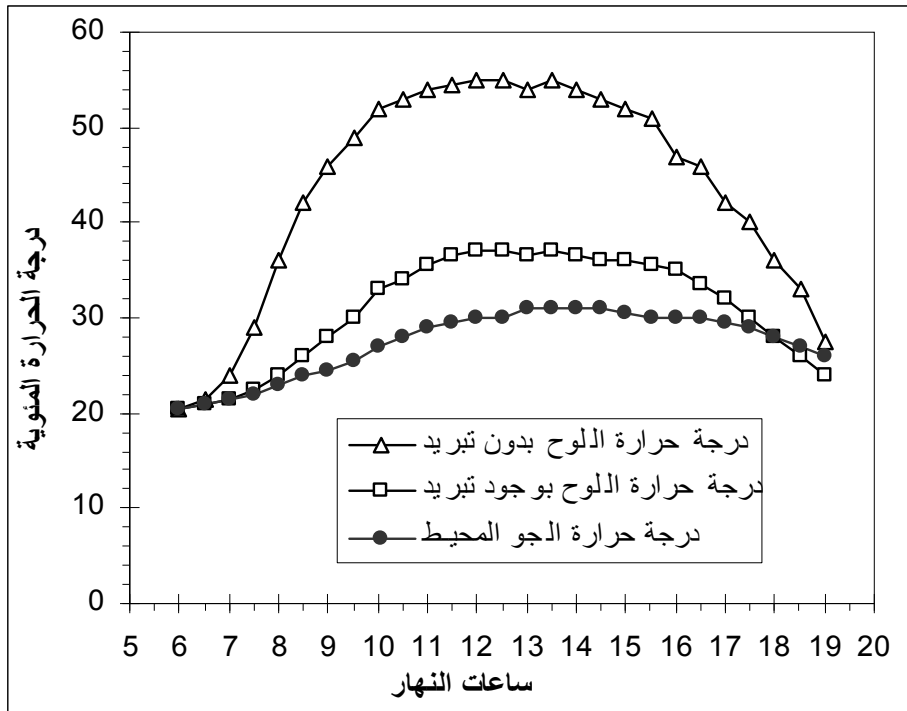
القياسات المسجلة ليوم (8) حزيران عام 2011 للوح كهروضوئسي تقليدي (غير مبرد)، ولوح كهروضوئسي مبرد بتدفق ماء التبريد قدره $Q=3$ l/min ، أو تدفق نوعي $q = 3.167$ l/min.m² :

يبين الجدول (4) و الشكل (5) تغيرات درجة الحرارة لسطح اللوح الكهروضوئسي خلال ساعات النهار :

الجدول (4) تغيرات درجة الحرارة لسطح اللوح الكهروضوئسي خلال ساعات النهار

الساعة	درجة حرارة اللوح بدون تبريد C°	درجة حرارة اللوح بوجود تبريد C°	الساعة	درجة حرارة الجو المحيط C°	درجة حرارة اللوح بوجود تبريد C°	درجة حرارة الجو المحيط C°	الساعة
6	20.5	20.5	13	20.5	20.5	31	6
6.5	21.5	21	13.5	21	21	31	6.5
7	24	21.5	14	21.5	21.5	31	7

31	36	53	14.5	22	22.5	29	7.5
30.5	36	52	15	23	24	36	8
30	35.5	51	15.5	24	26	42	8.5
30	35	47	16	24.5	28	46	9
30	33.5	46	16.5	25.5	30	49	9.5
29.5	32	42	17	27	33	52	10
29	30	40	17.5	28	34	53	10.5
28	28	36	18	29	35.5	54	11
27	26	33	18.5	29.5	36.5	54.5	11.5
26	24	27.5	19	30	37	55	12
				30	37	55	12.5

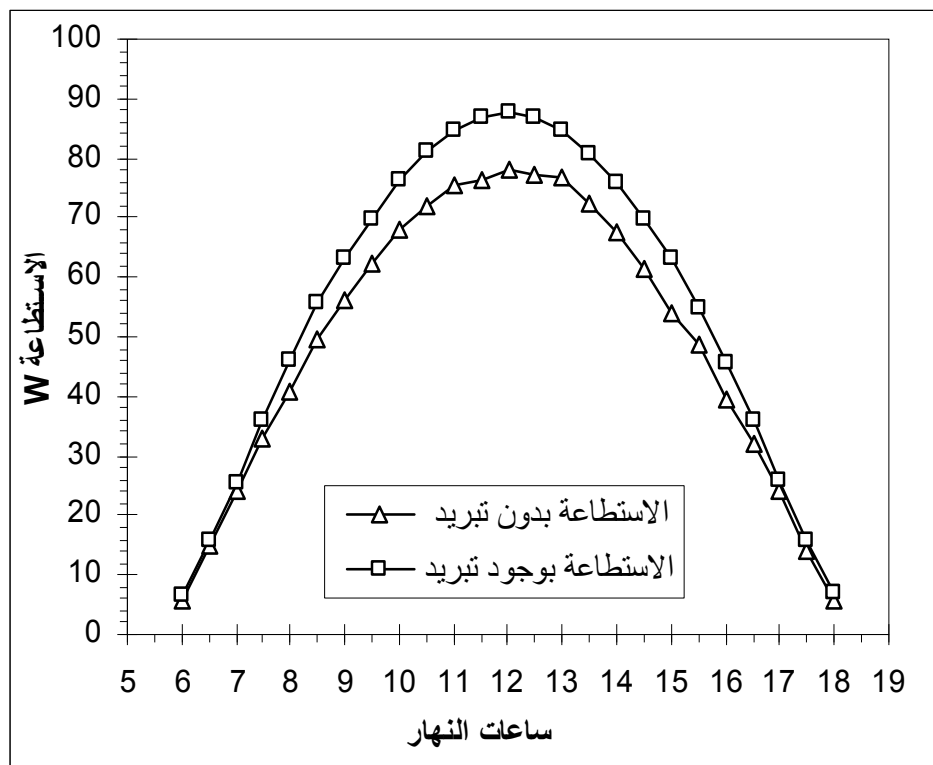


الشكل (5) تغيرات درجة الحرارة لسطح اللوح الكهروضوئي خلال ساعات النهار

يبين الجدول (5) و الشكل(6) تغيرات استطاعة الخرج للوح الكهروضمسي خلال ساعات النهار:

الجدول (5) تغيرات استطاعة الخرج للوح الكهروضمسي خلال ساعات النهار

استطاعة الخرج بوجود تبريد W	استطاعة الخرج بدون تبريد W	الإشعاع الشمسي W/m ²	الساعة	استطاعة الخرج بوجود تبريد W	استطاعة الخرج بدون تبريد W	الإشعاع الشمسي W/m ²	الساعة
86.77	77.2	980	12.5	6.75	5.75	97.712	6
84.85	76.9	958.45	13	15.95	14.8	201	6.5
80.87	72.3	915	13.5	25.5	23.97	304.39	7
76	67.4	863.41	14	36.16	33	420	7.5
69.6	61.25	790	14.5	46	41	520.68	8
63	53.75	713.31	15	55.75	49.6	630	8.5
54.95	48.77	630	15.5	63.12	56.16	713.31	9
45.78	39.4	520.68	16	69.91	62.2	790	9.5
35.95	32	420	16.5	76.4	67.98	863.41	10
25.93	23.97	304.39	17	80.97	72	915	10.5
15.78	13.89	201	17.5	84.81	75.46	958.45	11
6.8	5.7	97.712	18	86.72	76.16	980	11.5
				87.7	78	990.95	12

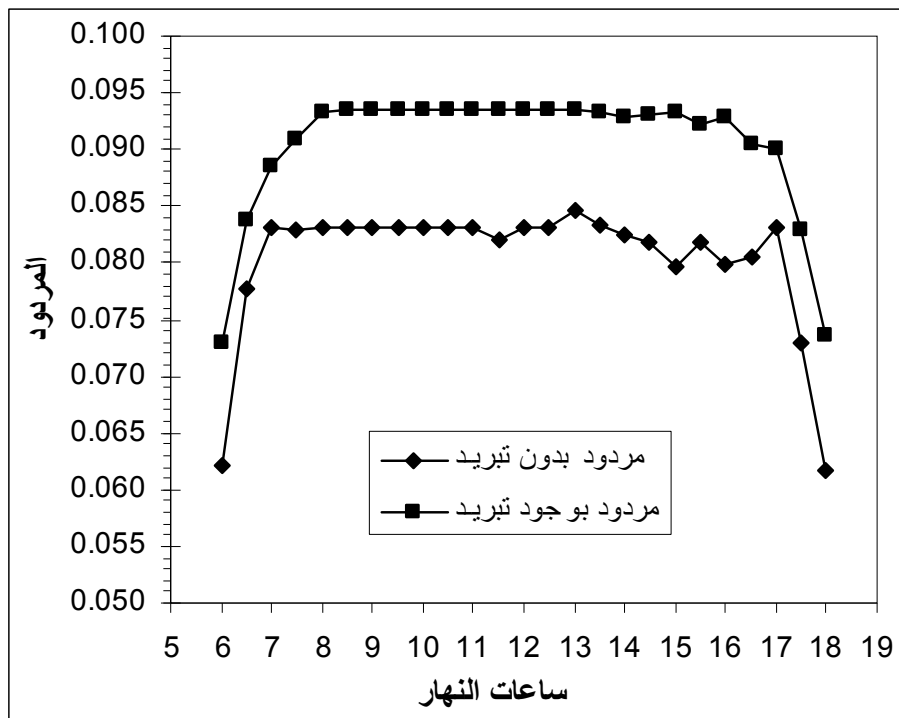


الشكل (6) تغيرات استطاعة الخرج للوح الكهروضمسي خلال ساعات النهار

يبين الجدول (6) والشكل (7) تغيرات مردود اللوح الكهروضوئي خلال ساعات النهار:

الجدول (6) تغيرات مردود اللوح الكهروضوئي خلال ساعات النهار

المردود بوجود تبريد	المردود بدون تبريد	استطاعة الدخل W	الساعة	المردود بوجود تبريد	المردود بدون تبريد	استطاعة الدخل W	الساعة
0.0935	0.0832	928.06	12.5	0.0729	0.0621	92.53	6
0.0935	0.0847	907.65	13	0.0838	0.0778	190.35	6.5
0.0933	0.0834	866.51	13.5	0.0885	0.0832	288.25	7
0.0929	0.0824	817.65	14	0.0909	0.0830	397.74	7.5
0.0930	0.0819	748.13	14.5	0.0933	0.0832	493.08	8
0.0933	0.0796	675.51	15	0.0934	0.0831	596.61	8.5
0.0921	0.0817	596.61	15.5	0.0934	0.0831	675.51	9
0.0928	0.0799	493.08	16	0.0934	0.0831	748.13	9.5
0.0904	0.0805	397.74	16.5	0.0934	0.0831	817.65	10
0.0900	0.0832	288.25	17	0.0934	0.0831	866.51	10.5
0.0829	0.0730	190.35	17.5	0.0934	0.0831	907.65	11
0.0735	0.0616	92.53	18	0.0934	0.0821	928.06	11.5
				0.0935	0.0831	938.43	12



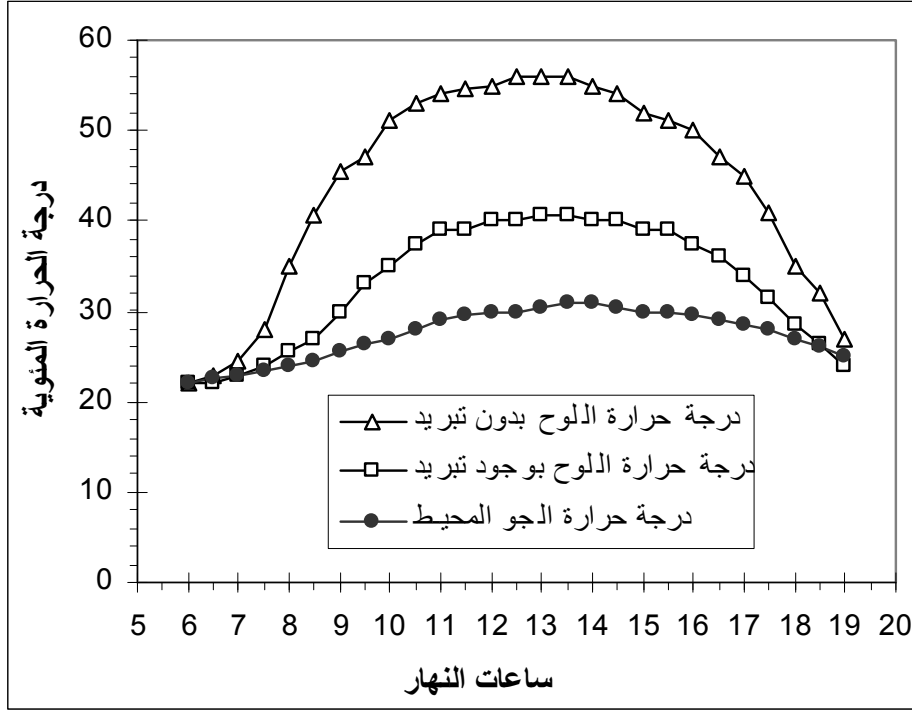
الشكل (7) تغيرات مرئود اللوح الكهروضوئسي خلال ساعات النهار

القياسات المسجلة ليوم (9) حزيران عام 2011 للوح كهروضوئسي تقليدي (غير مبرّد)، و لوح كهروضوئسي مبرّد بتدفق ماء التبريد قدره $Q=2 \text{ l/min}$ ، أو تدفق نوعي $q = 2.112 \text{ l/min.m}^2$:
 يبين الجدول (7) و الشكل (8) تغيرات درجة الحرارة لسطح اللوح الكهروضوئسي خلال ساعات النهار :

الجدول (7) تغيرات درجة الحرارة لسطح اللوح الكهروضوئسي خلال ساعات النهار

الساعة	درجة حرارة اللوح بدون تبريد C°	درجة حرارة اللوح بوجود تبريد C°	درجة حرارة الجو المحيط C°	الساعة	درجة حرارة اللوح بدون تبريد C°	درجة حرارة اللوح بوجود تبريد C°	درجة حرارة الجو المحيط C°
6	22	22	22	13	56	40.5	30.5
6.5	23	22	22.5	13.5	56	40.5	31
7	24.5	23	23	14	55	40	31
7.5	28	24	23.5	14.5	54	40	30.5
8	35	25.5	24	15	52	39	30
8.5	40.5	27	24.5	15.5	51	39	30
9	45.5	30	25.5	16	50	37.5	29.5
9.5	47	33	26.5	16.5	47	36	29
10	51	35	27	17	45	34	28.5
10.5	53	37.5	28	17.5	41	31.5	28
11	54	39	29	18	35	28.5	27

26	26.5	32	18.5	29.5	39	54.5	11.5
25	24	27	19	30	40	55	12
				30	40	56	12.5



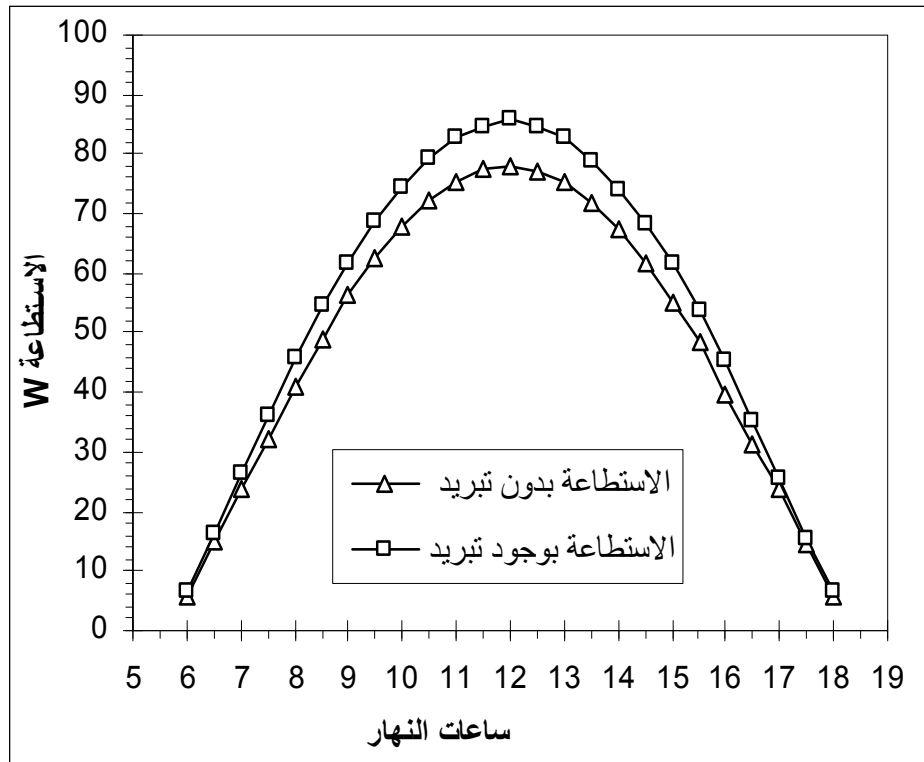
الشكل (8) تغيرات درجة الحرارة لسطح اللوح الكهروضوئي خلال ساعات النهار

يبين الجدول (8) و الشكل(9) تغيرات استطاعة الخرج للوح الكهروضوئي خلال ساعات النهار:

الجدول (8) تغيرات استطاعة الخرج للوح الكهروضوئي خلال ساعات النهار

استطاعة الخرج بوجود تبريد W	استطاعة الخرج بدون تبريد W	الإشعاع الشمسي W/m^2	الساعة	استطاعة الخرج بوجود تبريد W	استطاعة الخرج بدون تبريد W	الإشعاع الشمسي W/m^2	الساعة
84.65	77	982	12.5	6.7	5.82	98.144	6
82.65	75.35	958.33	13	16.41	14.9	202	6.5
79	72	917	13.5	26.26	24	304.72	7
74.2	67.35	863.36	14	36	32.28	410	7.5
68.3	61.7	795	14.5	45.8	41	520.86	8
61.5	55	713.36	15	54.44	48.81	620	8.5
53.8	48.25	620	15.5	61.75	56.17	713.36	9
45.5	39.8	520.86	16	68.53	62.6	795	9.5

35.34	31.2	410	16.5	74.43	67.98	863.36	10
25.75	23.87	304.72	17	79.1	72.2	917	10.5
15.6	14.5	202	17.5	82.61	75.45	958.33	11
6.65	5.72	98.144	18	84.75	77.32	982	11.5
				85.81	78	990.81	12



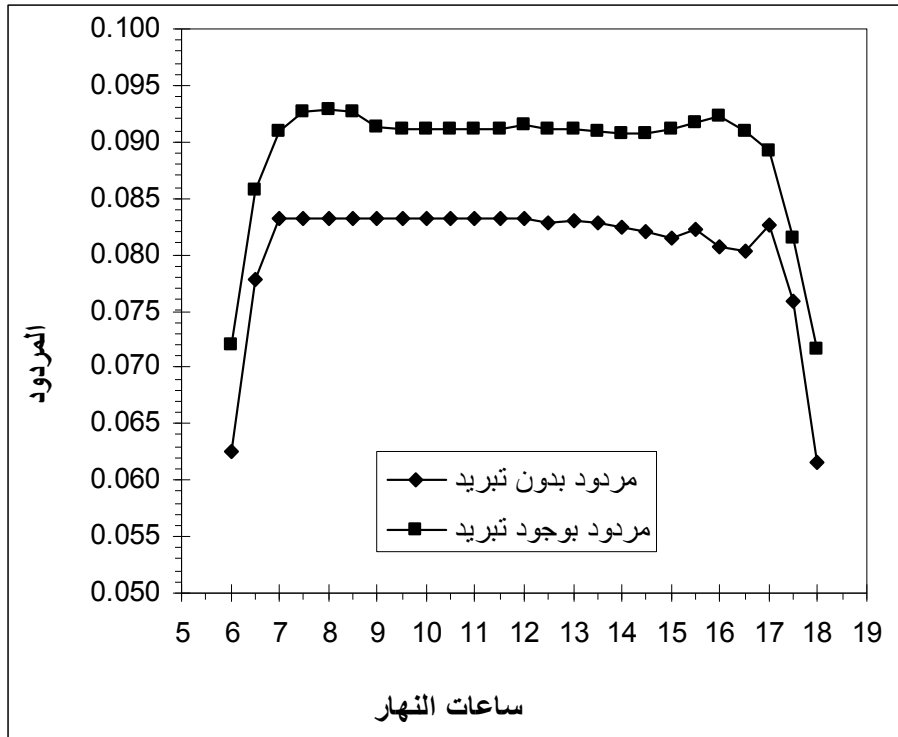
الشكل (9) تغيرات استطاعة الخرج للوح الكهروضويسي خلال ساعات النهار

يبين الجدول (9) والشكل (10) تغيرات مردود اللوح الكهروضويسي خلال ساعات النهار:

الجدول (9) تغيرات مردود اللوح الكهروضويسي خلال ساعات النهار

الساعة	استطاعة الدخل W	المردود بدون تبريد	المردود بوجود تبريد	الساعة	استطاعة الدخل W	المردود بدون تبريد	المردود بوجود تبريد
6	92.94	0.0626	0.0721	12.5	929.95	0.0828	0.0910
6.5	191.29	0.0779	0.0858	13	907.54	0.0830	0.0911
7	288.57	0.0832	0.0910	13.5	868.40	0.0829	0.0910
7.5	388.27	0.0831	0.0927	14	817.60	0.0824	0.0908
8	493.26	0.0831	0.0929	14.5	752.87	0.0820	0.0907
8.5	587.14	0.0831	0.0927	15	675.56	0.0814	0.0910

0.0916	0.0822	587.14	15.5	0.0914	0.0831	675.56	9
0.0922	0.0807	493.26	16	0.0910	0.0831	752.87	9.5
0.0910	0.0804	388.27	16.5	0.0910	0.0831	817.60	10
0.0892	0.0827	288.57	17	0.0911	0.0831	868.40	10.5
0.0815	0.0758	191.29	17.5	0.0910	0.0831	907.54	11
0.0715	0.0615	92.94	18	0.0911	0.0831	929.95	11.5
				0.0915	0.0831	938.30	12



الشكل (10) تغيرات مردود اللوح الكهروضوئي خلال ساعات النهار

لم تتجاوز سرعة الهواء خلال فترة أخذ القياسات (3 m/s).

الاستنتاجات والتوصيات:

يتحول جزء من الإشعاع الشمسي الساقط على اللوح الكهروضوئي إلى طاقة كهربائية، بينما يؤدي الجزء الآخر إلى ارتفاع درجة حرارة اللوح. أما عند استخدام الماء في تبريد اللوح الكهروضوئي، انخفضت درجة حرارته بشكل كبير مقارنة مع اللوح التقليدي (بدون تبريد) حسب تدفق الماء، وازدادت استطاعة الخرج وتحسن مردود اللوح. فعند التدفق النوعي $q = 4.224 \text{ l/min.m}^2$ ، انخفضت درجة حرارة اللوح حوالي (20°C) كما في الجدول (1) و الشكل (2)، والزيادة المسجلة في استطاعة الخرج للوح خلال يوم كامل حوالي (12.8%) كما في الجدول (2) و الشكل (3)، وتحسن مردود اللوح من (8.31%) إلى (9.62%) أي بمقدار (1.31%) كما في الجدول (3) و الشكل (4). وعند التدفق النوعي $q = 3.167 \text{ l/min.m}^2$ ، انخفضت درجة حرارة اللوح حوالي (18°C) كما في الجدول (4) و

الشكل (5)، والزيادة المسجلة في استطاعة الخرج للوح خلال يوم كامل حوالي (9.8%) كما في الجدول (5) و الشكل (6)، وتحسن مردود اللوح بمقدار (1.03%) كما في الجدول (6) و الشكل (7). أما عند التدفق النوعي $q = 2.112 \text{ l/min.m}^2$ ، انخفضت درجة حرارة اللوح حوالي (15.5C°) كما في الجدول (7) و الشكل (8)، والزيادة المسجلة في استطاعة الخرج للوح خلال يوم كامل حوالي (7.8%) كما في الجدول (8) و الشكل (9)، وتحسن مردود اللوح بمقدار (0.83%) كما في الجدول (9) و الشكل (10). وبالتالي يمكن القول: إن تبريد اللوح الكهروضمسي بالماء يؤدي إلى امتصاص الحرارة المتولدة فيه نتيجة سقوط الإشعاع الشمسي عليه، وبالتالي انخفاض درجة حرارة اللوح، وهذا يؤدي إلى زيادة الجهد (VOC) مقارنة باللوح الكهروضمسي غير المبرد، مما يؤدي إلى زيادة طاقة الخرج الكهربائية والمردود للخلايا الكهروضمسية.

كما أن تدفق الماء على سطح اللوح الكهروضمسي حسن من الأداء الضوئي له، (من خلال تقليل ضياعات الانعكاس بسبب وجود طبقة من الماء على سطح اللوح الكهروضمسي)، وتبين ذلك من خلال زيادة استطاعة ومردود اللوح الكهروضمسي المبرد في بداية النهار عند جميع التدفقات، عندما كانت درجات حرارة اللوح المبرد وغير المبرد متساوية تقريباً، بالإضافة لبقاء سطح اللوح نظيفاً.

يمكن أن يستخدم تبريد الألواح الكهروضمسية بهذه الطريقة بفعالية كبيرة في أنظمة ضخ المياه بالطاقة الشمسية، بحيث يستخدم جزء صغير من الماء الذي تم ضخه في تبريد الألواح، ثم يعاد استخدام هذا الجزء في تطبيقات أخرى تقادياً للهدر.

المراجع:

- [1]-BORN,M. ; WOLF, E. *Principles of Optics*. 5th Edition, Pergamon, Oxford, 1975.
- [2]-KRAUTER,S. ; HANITSCH,R. ; CAMPBELL,P. ; WENHAM,S.R. *Optical modelling, simulation and improvement of PV module encapsulation*. Proceedings of the 12th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Vol. 2, Amsterdam, April 11–15, 1994, pp. 1198–1201.
- [3]-KRAUTER,S. ; HANITSCH,R. *The influence of the capsulation on the efficiency of PV-modules*. Proceedings of the 1st World Renewable Energy Congress, Reading, UK, September 23–28, 1990, Vol. 1, pp. 141–144.
- [4]-KRAUTER,S. ; HANITSCH,R. ; STRAUSS,Ph. *Simulation-program for selecting efficiency improving strategies of PV-module encapsulations under operating conditions*. Proceedings of Renewable Energy Sources'91'', International Conference, Prague, CFSR, July 1–4, 1990, Vol. 3, pp. 48–53.
- [5]-KRAUTER,S. *Betriebsmodell der optischen, thermischen and elektrischen Parameter von PV-Modulen*, Koster Press, Berlin, 1993.
- [6]-KRAUTER,S. *Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels*. Solar Energy Materials and Solar Cells, Brazil, 2004, Vol. 82, pp. 131-137.
- [7]-MARTINELLI,G. ; STEFANCICH,M. *Solar Cell Cooling*. 2nd, Springer Berlin Heidelberg, 2007, pp.133-149.
- [8]-Maycock, P. D., "PV Review, World Solar PV Market Continues Explosive Growth," *Refocus*, 16th, 2005, pp. 105–145.
- [9]-BRINKWORTH,B.J. ; CROSS,B.M. ; MARSHALL,R.H. "Thermal Regulation of Photovoltaic Cladding," *Sol. Energy*. 61st, 1997, pp. 169–178.

- [10]-KRAUTER,S. ; ARAUJA,R. G. ; SCHROER,S. ; HANITSH,R. ; SALHI,M.J. ; TRIEBEL,C. ; LEMOINE,R. “*Combined Photovoltaic and Solar Thermal Systems for Facade Integration and Building Insulation,*” *Sol. Energy*, 67th, 1999, pp. 239–248.
- [11]-ROYNE, A. ; DEY,C. ; MILLS,D. *Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review.* *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1 April 2005, Vol. 86, pp. 451–483.
- [12]-ASHRAE. (*America Society of Heating , Refrigeration and Air Conditioning Engineers*). *ASHRAE Handbook of HVAC Applications*,1995-1996.