



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

شعبة الطاقات المتجددة

آلية تأثير درجة حرارة سطح الخلية الكهروضوئية في أدائها وتحليل عمل

اللواقط الكهروضوئية الحرارية

(دراسة نظرية وتجريبية)

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في الطاقات المتجددة

إعداد

الطالب المهندس محمد بسام سقباني

إشراف

الاستاذ الدكتور وجيه محمد خير ناعمة

للعام الدراسي: 2024-2025

كلمة شكر وتقدير

نتوجه بالشكر الجزيل

إلى كل من وقف معنا وساندنا وأسهم في تذليل العقبات

إلى كل من كان عوناً لنا وزرع التفاؤل في دربنا وقال لنا كلمة طيبة

إلى جميع أعضاء الهيئة التدريسية في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

الإهداء

إلى من كانت دماؤهم منارةً قدينا جميعا للحريّة وتوصلنا إلى المستقبل المشرق .

..... شهداء سوريا الأبرار

إلى من زرعنا في عقلي قدسية العلم وفي قلبي حب العمل وكانا دائما السند والعون ومصدر الفخر .

..... والدي العزيز م. محمود سقباني وأمي الحبيبة مها دنان

إلى شريكة الحياة وشريكة النجاح ومنع الراحة والسكينة عند النعب وملهمتي للإصرار والنمير .

..... زوجتي الغالية رامانا نويلاتي

إلى السند والأب والأخ والصديق وصاحب الفضل

..... أ. د. م. وجيه ناعمة

إلى المرشد والمحب والذي لم يدخل بصبر ومعونته وبفكرة لنجاح هذا العمل .

..... م. محمد سيف الدين الحلاق

إلى الشمعات الصغيرة التي تير دربي وإلى سبب مثابرتي ومصدر فرحي وسعادتي .

..... ابنتي نايا وتاليا

إلى أصدقاء دربي وملجأي وسندي وعزوتي .

.....أخوتي: مر. هشام، د. وسام، مر. سلام، د. مرام

إلى صديق العم والعمل وسرفيق دربي وشريك نجاحي .

.....عبدالرحمن قضماني

إلى أخي وصديقي ومرشدي ومرجعي .

..... مر. يوسف النجدي

إلى المهندسة المتميزة والعقل الصافي والفنائة المجددة والتي كانت السند لإتمام هذا العمل .

..... مر. جلنار المنعم

إلى عائلتي الثانية جميع أفراد شركة طاقة لأنظمة الحرارة والكهرباء والذي كان لكل فرد منهم لهفة ومعونة في هذا النجاح .

إلى كل أسنذاتي وأصدقائي ومرفاق دربي والذين ساعدوني وثنوا لي النجاح أهدي هذا العمل .

مر. محمد بسام سقباني

دمشق 2025

أعضاء لجنة الحكم والقرار الناظم لها

بناء على القرار رقم /2208/ الذي اتخذه مجلس البحث العلمي والدراسات العليا في جلسته رقم /16/ التي انعقدت بتاريخ 2025/4/14 في شأن تأليف لجنة الحكم على رسالة الماجستير للطالب محمد بسام سقباني.

قرر مجلس البحث العلمي والدراسات العليا ما يلي:

الموافقة على تأليف لجنة الحكم على رسالة الماجستير في قسم هندسة الميكانيك العام والتي أعدها الطالب

محمد بسام سقباني

آلية تأثير درجة حرارة سطح الخلية الكهروضوئية في أدائها وتحليل عمل

اللواقط الكهروضوئية الحرارية

(دراسة نظرية وتجريبية)

في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية من السادة الأساتذة:

د. ثناء حسن	د. أمينة فارس	د. ووجيه ناعمة
عضواً	عضواً	عضواً مشرفاً

قرار الحكم

دقت هذه الرسالة , عنوان الرسالة

"آلية تأثير درجة حرارة سطح الخلية الكهروضوئية في أدائها وتحليل عمل اللواظ الكهروضوئية الحرارية

(دراسة نظرية وتجريبية)"

وأجيزت يوم الأربعاء الواقع 2025/05/7 من قبل السادة أعضاء لجنة الحكم التالية أسمائهم:

الاسم	المرتبة العلمية	الصفة عضواً أو مشرفاً	التوقيع
د.وجيه ناعمة	أستاذ في قسم هندسة الميكانيك العام الاختصاص: آلات وأجهزة التبريد وأنظمة تكييف الهواء	عضواً مشرفاً	
د.ثناء حسن	أستاذ مساعد في قسم هندسة الميكانيك العام علم الطاقة والبيئة/العلوم التقنية	عضواً	
د.أمينة فارس	أستاذ مساعد في قسم هندسة الميكانيك العام الاختصاص: هندسة التدفئة باستخدام الطاقة الشمسية	عضواً	

أجريت التعديلات، وأصبحت الرسالة صالحة لمنح درجة الماجستير في هندسة الطاقة الشمسية

تصريح خطي

أنا الموقع أدناه أصرح بعلمي الكامل وقبولي:

1- أن كل ما ينتج عن البحث والرسالة هو ملكية فكرية ومالية بالتشارك مع جامعة دمشق، وأنني ألتزم بأخذ موافقة الجامعة في حال رغبتي بنشر البحث أو الرسالة أو جزء منها نصاً أو مضموناً خارج إطار الجامعة (من دور نشر أو مكنتبات أو مواقع الكترونية وغيرها من وسائل النشر).

2- أنه لا يوجد أي جزء من هذه الرسالة تم اقتباسه من عمل علمي آخر أو أنجز للحصول على شهادة أخرى في جامعة دمشق أو أية جامعة أو معهد تعليمي داخل الجمهورية العربية السورية أو خارجها.

الاسم والتوقيع

م. محمد بسام سقباني

فهرس المحتويات:

7	فهرس المحتويات:
10	فهرس الجداول:
11	فهرس الأشكال:
13	قائمة المصطلحات:
15	المستخلص:
17	الإطار العام للبحث:
17	المقدمة:
18	المشكلة العلمية:
19	هدف وأهمية البحث:
19	تساؤلات البحث:
20	حدود البحث:
20	مكونات البحث:
21	النتائج والتوصيات:
22	الفصل الأول:
22	دراسة مرجعية:
23	1-1 الدراسات المرجعية المقالات والمجلات العربية:

28	1-2: الدراسات المرجعية المقالات والمجلات الأجنبية:.....
32	الفصل الثاني :.....
32	الدراسة النظرية :.....
33	المقدمة :.....
34	1-2 الشمس:.....
35	2-2 الاشعاع الشمسي:
38	2-3 التأثير الكهروضوئي (Photoelectric effect):.....
39	2-4 الخلايا الشمسية الكهروضوئية (Solar Cells):.....
40	2-4-1 تركيب الخلايا الشمسية (Solar Cells containing):.....
43	2-4-2 آلية توليد الطاقة الكهربائية باستخدام الخلايا الكهروضوئية الشمسية (Electric Power Generation Using Solar Photovoltaic Cells):.....
48	2-4-3 العوامل المؤثرة على أداء الخلية الشمسية:.....
50	2-5 التفسير الفيزيائي لانخفاض كفاءة الخلايا الكهروضوئية:.....
58	2-6 الدراسة العددية لتأثير درجة الحرارة على خرج اللوح الكهروضوئي:.....
58	2-6-1 علاقة استطاعة لوح كهروضوئي ومردوده الكهربائي بتأثير درجة الحرارة [1]:.....
59	2-6-2 الحساب العددي:.....
68	2-6-3 التمثيل البياني للنتائج:.....
70	الفصل الثالث:.....
70	تحليل الأداء الحراري للواقط الكهروضوئية الحرارية (PVT).....
71	المقدمة:.....
71	1-3 اللواقط الكهروضوئية الحرارية:.....
71	1-3-1 أنواع اللواقط الكهروضوئية الحرارية:.....

73	2-1-3 اللواقط الكهروضوئية الحرارية بوسيط نقل حرارة هواء:
74	3-1-3 اللواقط الكهروضوئية الحرارية بوسيط نقل حرارة من مواد متغيرة الطور (PCM):
74	4-1-3 الأنظمة الكهروضوئية المركزة الحرارية (CPVT)
76	5-1-3 اللواقط الكهروضوئية الحرارية بوسيط نقل حرارة سائل:
77	2-3 معادلات التوازن الطاقى للاقط كهروضوئي حراري وسيط ناقل حراري سائل (ماء):
80	3-3 توصيف التجربة العملية:
80	1-3-3 تحديد مكان التركيب والاتجاه وزاوية الميلان:
82	2-3-3 شروط عمل التجربة:
82	3-3-3 مستلزمات التجربة:
86	4-3 الاختبارات التي تم إجراؤها
86	1-4-3 اختبار التبريد
87	2-4-3 معادلات اختبار التبريد
88	3-4-3 نتائج اختبار التبريد
90	4-4-3 اختبار المقارنة
90	5-4-3 معادلات اختبار المقارنة
92	6-4-3 نتائج اختبار المقارنة
95	النتائج والتوصيات :
96	تحليل ومناقشة النتائج:
98	التوصيات:
99	المراجع العملية:

فهرس الجداول:

قائمة الجداول		
رقم الصفحة	عنوان الجدول	الجدول
24	قيم الكفاءة مع تغير درجة الحرارة التي تم توصل إليها في البحث	الجدول (1-1)
25	تغيرات استطاعة الخرج للوح الكهروضوئي خلال ساعات النهار	الجدول (2-1)
26	يظهر تغيرات معدل إنتاج الهيدروجين واستطاعة الخلية تبعًا لتغير درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية	الجدول (3-1)
26	تغيرات معدل إنتاج الهيدروجين واستطاعة الخلية تبعًا لتغير درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية بعد فتح صمام ماء التبريد	الجدول (4-1)
29	جدول نتائج التجربة	الجدول (5-1)
30	الاستطاعة الشهرية المولدة من لوح كهروضوئي 60 [W] مع تبريد بالماء ودون تبريد	الجدول (6-1)
35	أطياف الإشعاع الشمسي الكهروضوئي	الجدول (1-2)
36	معامل الانعكاس لبعض المواد	الجدول (2-2)
60	القيم العددية للمحافظات السورية يوم 2024-08-14	الجدول (3-2)
82	المواصفات التقنية للوح الكهروضوئي التقليدي	الجدول (1-3)
83	المواصفات التقنية للوح الكهروضوئي الحراري	الجدول (2-3)
88	قراءات اختبار التبريد	الجدول (3-3)
92	جدول بيانات اختبار المقارنة	الجدول (4-3)
93	نتائج اختبار المقارنة لحساب الطاقة الكهربائية	الجدول (5-3)

فهرس الأشكال

رقم الصفحة	قائمة الأشكال	الشكل
23	تأثير حرارة سطح الخلية على منحنيات التشغيل للخلية الشمسية	(1-1)
27	التجربة التطبيقية	(2-1)
29	منصة التجربة التطبيقية	(3-1)
31	الاستطاعة السنوية للألواح المستخدمة في التجربة	(4-1)
34	الإشعاع الشمسي	(1-2)
37	التأثير الكهروضوئي	(2-2)
38	تركيب لوح كهروضوئي	(3-2)
39	الشبكة البلورية لذرة السليكون	(4-2)
40	إشابة ذرة السيليكون بذرة فسفور	(5-2)
41	إشابة ذرة سيليكون بذرة بورون	(6-2)
42	الوصلة الثنائية P-n	(7-2)
43	آلية عمل الخلايا الكهروضوئية	(8-2)
44	نطاقات الطاقة في شبه موصل	(9-2)
44	نطاقات الطاقة موصل - شبه موصل - عازل	(10-2)
47	علاقة تردد الفوتون وطاقته الحركية	(11-2)
48	تأثير الإشعاع الشمسي على خرج الخلية الكهروضوئية	(12-2)
49	تغير بارامترات الخلية الكهروضوئية بتغير درجة الحرارة	(13-2)
50	المعاملات الحرارية للوح كهروضوئي	(14-2)
51	قيم مختلفة لنطاقات الطاقة وتأثيرها على حركة الإلكترونات	(15-2)
52	حد الكفاءة القصوى لأشباه النواقل	(16-2)
53	عملية إعادة التركيب	(17-2)
54	تشكل منطقة النضوب	(18-2)

55	جهد الحاجز	(19-2)
56	تضييق منطقة النضوب بتأثير درجة الحرارة	(20-2)
59	جدول المواصفات الفنية للوح الكهروضوئي	(21-2)
67	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة الكهربائية للمحافظات خلال شهر آب	(22-2)
68	التمثيل البياني لنسبة انخفاض الاستطاعة الكهربائية لمحافظتي السويداء ودير الزور خلال اليوم	(23-2)
69	التمثيل البياني للنسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة الكهربائية للمحافظات الساعة الثانية عشر من يوم 2024-08-14	(24-2)
72	لاقط كهروضوئي حراري ذو وسيط نقل حرارة (هواء)	(1-3)
74	الأنظمة الكهروضوئية الحرارية المركزة	(2-3)
74	نظام كهروضوئي حراري مركزي لفندق في جنوب أفريقيا	(3-3)
75	لاقط كهروضوئي حراري ذو وسيط نقل حرارة سائل	(4-3)
81	التجربة العملية (اللاقط الكهروضوئي - اللاقط الكهروضوئي الحراري - أسطوانة الماء)	(5-3)
82	اللوحة الكهروضوئي المستخدم في التجربة	(6-3)
82	اللوحة الكهروضوئي الحراري المستخدم في التجربة	(7-3)
83	أسطوانة الماء مع فاز التمدد	(8-3)
83	حساسات درجة الحرارة	(9-3)
84	جهاز قياس الاستطاعة	(10-3)
84	جهاز قياس درجة حرارة الماء	(11-3)
85	جهاز قياس درجة حرارة السطوح	(12-3)
85	جهاز قياس درجة حرارة الجو الخارجية	(13-3)
86	صورة أثناء القيام بالاختبار	(14-3)
86	رسم تخطيطي تفصيلي لنظام كهروضوئي حراري مع الأسطوانة	(15-3)
88	حل المعادلات عن طريق برنامج ESS لحساب المرود الكهربائي	(16-3)
90	صورة أثناء القيام بالتجربة	(17-3)
93	الاستطاعة الكهربائية لللاقط الكهروضوئي الحراري واللوحة الكهروضوئي	(18-3)

قائمة المصطلحات

قائمة المصطلحات الرموز			
المصطلح باللغة الانكليزية	المصطلح باللغة العربية	الرمز	الواحدة
Solar radiation outside the atmosphere measured on a vertical plane to the rays on day n of the year	الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي والمقاس على مستوي عمودي على الأشعة يوم n من السنة	G_o	[W/m ²]
Solar constant	الثابت الشمسي	G_{sc}	[W/m ²]
Day number in the year	رقم اليوم في السنة	n	-
Einstein's equation	معادلة أينشتاين	E_p	[J]
Planck constant	ثابت بلانك	h	[J.s]
Photon frequency	تردد الفوتون	f	[HZ]
Work function	دالة العمل	W	[ev]
Threshold frequency of the material	تردد العتبة للمادة	f_0	[HZ]
Wave length	طول الموجة	λ_0	[nm]
Speed of light	سرعة الضوء	c	[m/s]
Power of the Photovoltaic panel and electrical efficiency with the effect of temperature	استطاعة لوح كهروضوئي ومردوده الكهربائي بتأثير درجة الحرارة	P_T	[W]
Power of the solar cell without the effect of temperature	استطاعة الخلية الشمسية دون تأثير درجة الحرارة	P	[W]
Temperature coefficient for power variation	معامل درجة الحرارة لتغير الاستطاعة	β_{ref}	-
Reference temperature	درجة الحرارة المرجعية	T_{ref}	[C°]
temperature of the photovoltaic cell	درجة حرارة الخلية الكهروضوئية	T_C	[C°]

emperature of the photovoltaic cell	مساحة سطح اللوح الكهروضوئي التقليدي المعرض للإشعاع الشمسي	A	m^2
Intensity of solar radiation	شدة الإشعاع الشمسي	G	$[W/m^2]$
External temperature	درجة الحرارة الخارجية	T_a	$[C^\circ]$
Power carried by the glass cover and the photovoltaic panel	الاستطاعة التي يحملها الغطاء الزجاجي واللوح الكهروضوئي	Q_{sun}	$[W]$
Surface area of the collector	مساحة سطح اللاقط	A_c	m^2
Transmittance coefficient of the glass cover	معامل نفاذية الغطاء الزجاجي	τ_g	-
Absorptance coefficient of the photovoltaic cell	معامل امتصاصية الخلية الكهروضوئية	α_{cell}	-
Temperature difference	فرق درجات الحرارة	ΔT	$[C^\circ]$
Heat transfer medium flow	تدفق وسيط نقل الحرارة	\dot{m}	$[kg/s]$
Quantity of heat transfer medium	كمية وسيط نقل الحرارة	m	$[kg]$
Heat capacity of the heat transfer fluid	السعة الحرارية لسائل نقل الحرارة	C_p	$J/[kg.C^\circ]$
Thermal losses by convection from the glass cover	الضياعات الحرارية بالحمل من الغطاء الزجاجي	Q_{conv}	$[W]$
Heat transfer coefficient by convection from the glass cover to the external environment	معامل انتقال الحرارة بالحمل من الغطاء الزجاجي إلى المحيط الخارجي	h_w	$W/[m^2.C^\circ]$
Temperature of the glass cover of the thermal photovoltaic collector	درجة حرارة الغطاء الزجاجي للاقط الكهروضوئي الحراري	T_g	$[C^\circ]$
Boltzmann constant	ثابت بولتزمان	σ	$[W.m^{-2}.K^{-4}]$
Transmittance coefficient of the glass cover	معامل النفاذية للغطاء الزجاجي	ε_g	-
Sky temperature	درجة حرارة السماء	T_{sky}	$[C^\circ]$
Power of the thermal photovoltaic collector	استطاعة اللاقط الكهروضوئي الحراري	P_{PVT}	$[W]$

المستخلص

خلفية البحث: تعد الطاقة الشمسية أحد أهم مصادر الطاقة المتجددة في العالم وأكثرها وفرة، وقد تم استخدامها في عدة تطبيقات هندسية على نطاق واسع مثل التدفئة، تنقية وتحلية المياه، عمليات التجفيف، تدفئة أحواض السباحة، الطباخ الشمسي، ونظام تسخين المياه و....

هدف البحث: تعتبر التجربة العملية مرحلة توثيقية لصحة النتائج النظرية التي يمكن استنتاجها من المعادلات الرياضية من جهة ومرجعاً علمياً لإمكانية تطوير تصميم الأنظمة الشمسية بشكل عام (كهروضوئية - كهروضوئية حرارية) من جهة أخرى.

المواد والطرائق: تم في هذا البحث إتباع المنهج التحليلي والمنهج التطبيقي لدراسة تأثير درجة حرارة سطح الخلية الكهروضوئية على أدائها واستخدام في هذا البحث برامج حاسوبية مساعدة

- برنامج (De View) لتحديد قيم الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة الخارجية.
- برنامج (EES) لدراسة النمذجة الرياضية لمعادلة الاستطاعة بتأثير درجة حرارة اللوح الكهروضوئي.
- برنامج (EXEL) للتمثيل البياني للنتائج.
- برنامج (Sketch up) لبناء نموذج ثلاثي الأبعاد للتجربة التطبيقية.

النتائج العملية: لوحظ في هذا البحث أن الأداء الكهربائي للألواح الكهروضوئية التقليدية يتأثر إلى حد كبير بتغير درجة حرارة سطحها، ويعود ذلك إلى خصائص المواد الداخلة في تركيبها وأهمها السيليكون البلوري، إذ تنخفض الطاقة الكهربائية المتولدة من هذه الألواح بشكل واضح عند ارتفاع درجة حرارة سطحها حيث بلغت الاستطاعة الكهربائية 125 [W] للاقط كهروضوئي حراري استطاعته الاسمية 175 [W] عندما وصلت درجة حرارة سطحه إلى 72.4 [C°]، وارتفعت استطاعته إلى 162.2 [W] عندما انخفضت درجة حرارة سطحه إلى 16.3 [C°].

- **الاستنتاجات من وجهة نظر الباحث:** تبريد الألواح الكهروضوئية باستخدام الماء) تقنية اللواقط الكهروضوئية الحرارية (PVT) يزيد من مردود الألواح الكهروضوئية حيث ارتفع المردود الكهربائي للاقط الكهروضوئي الحراري عند القيام باختبار التبريد السريع لمدة خمسة عشر دقيقة من 9% إلى 13% أي ارتفع بنسبة 44% وارتفعت الاستطاعة الكهربائية للاقط خلال هذه المدة أي من بداية الاختبار إلى نهايته بنسبة 30%.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الكهروضوئية، المردود النظري للخلايا الكهروضوئية، اللواقط الكهروضوئية الحرارية (PVT)، المردود الكهربائي، المردود الحراري.

الإطار العام للبحث

المقدمة:

تُستخدم الطاقة الشمسية في مجموعة واسعة من التطبيقات، منها التدفئة، وتوليد الكهرباء، وتتنقية المياه، والطهي الشمسي، مما يسهم في حماية البيئة وتقليل استهلاك الوقود الأحفوري. هذه الاستخدامات تعزز الاستدامة وتدعم جهود الانتقال إلى مصادر طاقة نظيفة ومتجددة.

يعتبر توليد الطاقة الكهربائية باستخدام المنظومات الشمسية من أهم تطبيقات استخدام الطاقة الشمسية في الوقت الحالي، وقد اكتسب هذه الأهمية نظراً لارتفاع سعر المشتقات النفطية، وللحاجة الملحة لها في مختلف نواحي الحياة كمنظومات الاتصالات وثلاجات الأدوية للمجمعات الصحية في المناطق النائية التي يصعب تغذيتها بمصادر الطاقة التقليدية. وللتقليل من تكلفة المنظومات الشمسية فقد أجريت أبحاث كثيرة من أجل تحسين كفاءة المنظومات الشمسية وتشغيل هذه المنظومات عند القدرة القصوى للخلية.

ومن هذه الأبحاث دراسات حول إمكانية استخدام مواد جديدة تدخل في تركيب الخلايا الكهروضوئية تكون أكثر فعالية، استخدام الليزر لزيادة كفاءة تحويل الطاقة، استخدام تقنية التركيز الشمسي في تحسين كفاءة الألواح الكهروضوئية، وتبريد الألواح الكهروضوئية، إلا أن هذه الأبحاث لم تترجم بشكل فعلي على أرض الواقع ولا زالت في طور الدراسة والتطوير.

وستم في هذا البحث دراسة أهم العوامل المؤثرة على أداء الألواح الكهروضوئية والتركيز بشكل خاص على تأثير درجة الحرارة وإمكانية تحسين كفاءة الألواح الكهروضوئية بتخفيض درجة حرارتها وذلك باستخدام تقنية التبريد بالماء والمعروفة بتقنية الألواح الكهروضوئية الحرارية (PVT).

وسيتم عرض هذه الأفكار ضمن ثلاث فصول:

الفصل الأول: دراسات مرجعية.

الفصل الثاني: الدراسة النظرية لتأثير درجة الحرارة على أداء الألواح الكهروضوئية.

الفصل الثالث: تحليل الأداء الحراري للواقط الكهروضوئية الحرارية.

المشكلة العلمية:

تتركز المشكلة العلمية في هذا البحث في انخفاض المردود النظري للألواح الكهروضوئية والتأثير السلبي لارتفاع درجة الحرارة على هذا المردود، حيث لوحظ في الأونة الأخيرة ظهور تقنيات مختلفة لرفع كفاءة الألواح الكهروضوئية وذلك لأهميتها في التقليل من استخدام الوقود الأحفوري والحصول على مصدر طاقة مستدام وصديق للبيئة.

ولاشك أن الأزمات السياسية، والتحولت الاقتصادية والاجتماعية والتقنية، التي مر بها الوطن العربي بشكل عام، وسوريا بشكل خاص، إلى أزمات اقتصادية كبيرة حملت قطاع الطاقة معاناة كبيرة، كالارتفاع الكبير في أسعار حوامل الطاقة، وعدم قدرة المخزون الاحتياطي من الوقود الأحفوري على تلبية احتياجات المنطقة، حيث أن الاعتماد الأكبر في توليد الطاقة الكهربائية على الوقود الأحفوري، مما أدى إلى انخفاض إجمالي امدادات الكهرباء في المنطقة والذي بدوره أدى إلى تعطل كبير في دورات الإنتاج، وهذا يدعو إلى التفكير مالياً بتوسع إطار العمل للاستفادة القصوى من الطاقة الشمسية في توليد الكهرباء.

هدف وأهمية البحث:

تعتبر التجربة العلمية مرحلة توثيقية لصحة النتائج النظرية التي يمكن استنتاجها من المعادلات الرياضية من جهة ومرجعاً علمياً لإمكانية تطوير تصميم الأنظمة الشمسية بشكل عام (كهروضوئية - كهروضوئية حرارية) من جهة أخرى. تكمن أهمية هذا البحث بدراسة التفسير الفيزيائي بشكل نظري وعددي لانخفاض المردود النظري للألواح الكهروضوئية مما يجعل إمكانية تلافي هذه الانخفاض أسهل، وسيتم أيضاً إجراء تجربة عملية تطبيقية للاقط كهروضوئي حراري وتحليل أدائه لإثبات أهمية تأثير درجة الحرارة على أداء الألواح الكهروضوئية، دراسة مدى فعالية استخدام اللواقط الكهروضوئية الحرارية في سوريا تقنياً واقتصادياً، وخلق مساحة للتفكير في إمكانية ابتكار طرق جديدة تصب في مجال تطوير عمل الخلايا الكهروضوئية.

تساؤلات البحث:

- 1- مم تتكون الخلية الكهروضوئية وآلية عملها؟
- 2- ماهي أشباه النواقل، نطاق التكافؤ، نطاق الفجوة، نطاق التوصيل؟
- 3- ماهي العوامل المؤثرة على استطاعة الخلية الكهروضوئية؟
- 5- ما هو التفسير الفيزيائي لانخفاض المردود النظري للألواح الكهروضوئية؟
- 6- هل المناطق التي تتمتع بأشعاع شمسي مرتفع (حرارة مرتفعة) هي الأفضل لإستخدام الألواح الكهروضوئية؟
- 7- ماهي العلاقة بين درجة حرارة سطح الخلية الكهروضوئية واستطاعتها؟
- 8- كيف يمكن تحسين عمل الخلايا الكهروضوئية؟
- 9- ماهي اللواقط الكهروضوئية الحرارية PVT؟
- 10- ماهي أنواع اللواقط الكهروضوئية الحرارية PVT؟

حدود البحث:

- **الحدود الزمانية:** 2011-2024، تم في هذه المدة تحديد الموضوع والمصادر وإجراء التجارب العملية وتسجيل النتائج وتحليلها وكتابة مسودة البحث، كان هناك انقطاع لفترة معينة بسبب الظروف التي مرت بها المنطقة.

- **الحدود المكانية:** محافظة دمشق.

مكونات البحث:

يتكون هذا البحث من الفصول التالية:

الفصل الأول: دراسات مرجعية

دراسة مرجعية تسلط الضوء على أهم الدراسات المنجزة عالمياً ومحلياً والتي تناولت كلاً من الخلايا الكهروضوئية واللواقط الكهروضوئية الحرارية (PVT).

الفصل الثاني: دراسة نظرية (مبدأ عمل الخلايا الكهروضوئية والعوامل المؤثرة على أدائها)

دراسة نظرية للخلايا الكهروضوئية ونظرة عامة عن الشمس والاشعاع الشمسي، و بنية الخلية الكهروضوئية، العوامل المؤثرة على أدائها، النمذجة الرياضية لمعادلة استطاعة اللوح الكهروضوئي بتأثير درجة الحرارة، تطبيق قيم الاشعاع الشمسي ودرجة الحرارة للمحافظات السورية على هذه المعادلة، وتمثيل النتائج بشكل بياني.

الفصل الثالث: الدراسة العملية التطبيقية

تصميم وتنفيذ منصة اختبارية لاختبار نموذج لاقط كهروضوئي حراري.

الفصل الرابع: النتائج والتوصيات.

ستناقش نتائج هذا البحث وتوضع بعض التوصيات والمراجع العلمية المستخدمة في هذه الدراسة والتي قد تفيد

باحثين آخرين لتطوير هذا العمل المنجز.

الفصل الأول

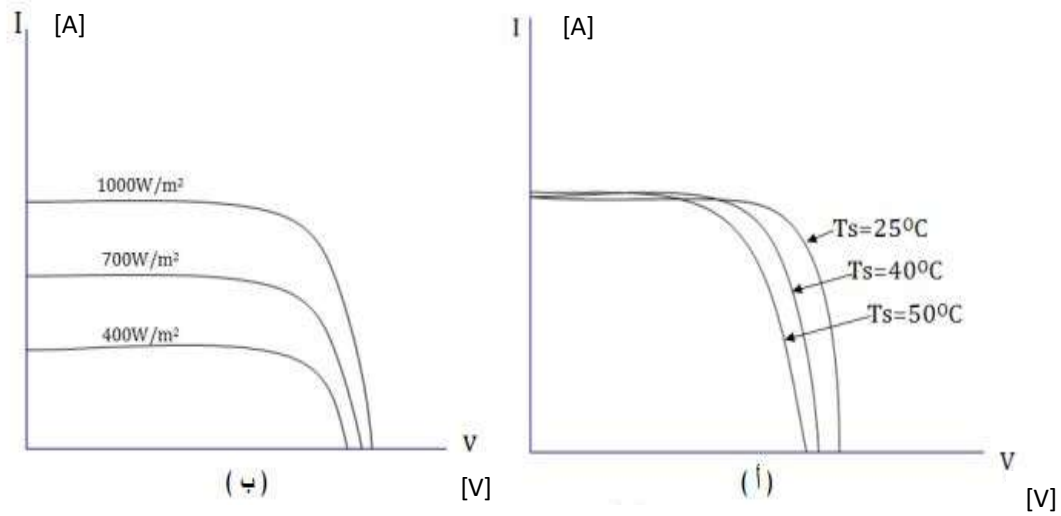
دراسة مرجعية

1-1 الدراسات المرجعية المقالات والمجلات العربية:

الدراسة الأولى: دراسة تأثير العوامل المناخية في اختيار نوعية الألواح الفوتوفولتية المستخدمة وسعة الخزن المستخدم - د. عثمان ذكي مبارك - مجلة العلوم والتكنولوجيا المجلد (14) العدد (2) 2009 -

م ع ت 3 [1]

الخلاصة: في هذا البحث تم إيضاح تأثير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة اللوح الشمسي وحركة الرياح في المناطق المختلفة وتأثيرها على حرارة سطح اللوح الشمسي وقد تم تحليل البيانات التي تم اختبارها من قياسات خرج الألواح وحساب مدى تأثير الانحراف عن جهد القدرة القصوى عند انخفاض درجة حرارة سطح اللوح الشمسي وعند ارتفاعها كما هو موضح بالشكل (1-1).



الشكل (1-1) أ- تأثير حرارة سطح الخلية على منحنيات التشغيل للخلية الشمسية

ب- تأثير شدة الإشعاع الشمسي على منحنيات التشغيل للخلية الشمسية [1]

الدراسة الثانية: تحسين عمل الخلايا الشمسية السيلكونية في السودان رسالة ماجستير للدكتور عثمان

زكي مبارك - مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية - 2020 [2]

الخلاصة: تم دراسة العلاقة بين درجة الحرارة والكفاءة وقدرة الخلايا الشمسية من حيث العلاقة بين

الإشعاع والتيار والجهد في شهر أغسطس 2020 ووجد الآتي:

- عند دراسة العلاقة بين الزمن والقدرة وجد أن القدرة تزداد $[W] 5,7$ ابتداءً من الساعة التاسعة صباحاً وتصل إلى أعلى قيمة لها $[W] 6,3$ عند الساعة الحادية عشر ثم تبدأ في الانخفاض التدريجي.
- عند دراسة العلاقة بين الكفاءة والزمن وجد أن أعلى كفاءة لها في حدود 14% ما بين التاسعة والعاشر صباحاً ثم تبدأ في الانخفاض تدريجياً.
- عند الساعة التاسعة صباحاً كان الإشعاع الشمسي $[W/m^2] 340$ ودرجة الحرارة $[C^{\circ}] 39$ والكفاءة 13,6% ، وعند زيادة الإشعاع عند العاشرة صباحاً كانت درجة الحرارة $[C^{\circ}] 40$ والإشعاع الشمسي $[W/m^2] 620,5$ ازدادت الكفاءة وأصبحت 14% ، وعند الساعة الحادية عشر صباحاً درجة الحرارة $[C^{\circ}] 43$ والإشعاع الشمسي $[W/m^2] 801$ نجد أن الكفاءة انخفضت وأصبحت 11,98% ، وعليه نجد أن عند زيادة درجة الحرارة عن $[C^{\circ}] 40$ تقلل من الكفاءة الكهربائية كما موضح بالجدول (1-1)

الجدول (1-1) قيم الكفاءة مع تغير درجة الحرارة التي تم توصل إليها في البحث [2]

الزمن (t)	أقصى قدرة pm	معامل الامتلاء FF	الكفاءة η	الإشعاع الشمسي $W/m^2 (G)$	درجة الحرارة (c)
9AM	3.04	0.5067	13.6%	340.2	39
10AM	5.70	0.6786	14.01%	620.5	40
11AM	6.30	0.7000	11.98%	801.7	43
12AM	5.52	0.5833	9.39%	852.3	45
1PM	5.40	0.6750	10.40%	792.2	48
2PM	4.50	0.7031	10.40%	659.4	49
3PM	2.60	0.5909	9.17%	432.5	53

الدراسة الثالثة: دراسة تأثير تبريد الألواح الكهروضوئية بالماء على مردودها وطاقاتها الكهربائية المتولدة

- علي حمودي - جامعة اللاذقية- 2014 [3]

الخلاصة: يتأثر الأداء الكهربائي للألواح الكهروضوئية بشكل كبير بدرجة حرارة تشغيل الخلايا الكهروضوئية السيليكونية بسبب خصائص السيليكون البلوري المستخدم فيها، فتتخفص الطاقة المتولدة من هذه الخلايا بارتفاع درجة حرارتها. وللمحد من هذا الانخفاض في الطاقة تم تبريد الألواح الكهروضوئية باستخدام الماء، وذلك بوضع أنبوب يحوي تقوب عديدة منتظمة على أعلى اللوح ويجري الماء بشكل حر على سطحه بعدة تدفقات، فعند التدفق (24.224 l/min.m²) انخفضت درجة حرارة اللوح بمقدار حتى [°C] 20 والزيادة المسجلة في الناتج الكهربائي خلال يوم كامل حوالي % 12.8 وارتفع المردود من % 8.31 إلى % 9.62 أي بنسبة % 16. وعند التدفق (23.167 l/min.m²) انخفضت درجة حرارة اللوح بمقدار % 1.03. أما عند التدفق (2.112 l/min.m²) انخفضت درجة حرارة اللوح بمقدار حتى [°C] 15.5، والزيادة المسجلة في الناتج الكهربائي حوالي % 7.8 وارتفع المردود بمقدار % 0.8 كما هو مبين بالجدول (2-1).

الجدول (2-1) تغيرات استطاعة الخرج للوح الكهروضوئي خلال ساعات النهار [3]

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

الدراسة الرابعة: دراسة تأثير عملية تبريد الخلية الفوتوفولتية على رفع كفاءة أنظمة الهيدروجين

الشمسي -لؤي يسير - جامعة اللاذقية - 2015 [4].

الخلاصة: أثبتت نتائج التجارب أن نظام التبريد يوقف ارتفاع درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية مما عكس النتائج السلبية لإنخفاض كفاءة التحويل كما ازداد الناتج الكهربائي للخلية بمقدار % 33 و أظهرت النتائج كما هو مبين بالجدولين (3-1) و (4-1) أيضا أنه عند توصيل الخلية الفوتوفولتية إلى جهاز التحليل الكهربائي للماء فإن تبريد الخلية الفوتوفولتية انعكس بشكل إيجابي على ارتفاع معدل إنتاج الهيدروجين بحدود % 26 .

الجدول(3-1) يظهر تغيرات معدل إنتاج الهيدروجين واستطاعة الخلية تبعاً لتغير درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية[4]

اليوم الثالث			اليوم الثاني			اليوم الأول		
معدل إنتاج الهيدروجين	استطاعة الخرج	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية	معدل إنتاج الهيدروجين	الخرج في اليوم الثاني	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية	معدل إنتاج الهيدروجين	الخرج في اليوم الأول	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية
ml/min	watt	c°	ml/min	watt	c°	ml/min	watt	c°
35.2	6.95	25	35.4	6.92	25	35	7.05	25
33.1	6.77	30	32.9	6.68	30	33.3	6.76	30
32.6	6.29	35	32.5	6.29	35	32.7	6.36	35
31.5	6.01	40	31.7	5.99	40	31.5	6.07	40
29.9	5.89	45	29.9	5.89	45	30.5	5.88	45
28.4	5.68	50	28.1	5.71	50	28.1	5.69	50
26.8	5.29	55	26.9	5.29	55	27.3	5.32	55
26.7	5.14	60	26.5	5.09	60	26.5	5.07	60

الجدول(4-1) تغيرات معدل إنتاج الهيدروجين واستطاعة الخلية تبعاً لتغير درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية بعد فتح صمام ماء التبريد[4]

اليوم الثالث			اليوم الثاني			اليوم الأول		
معدل إنتاج الهيدروجين	استطاعة الخرج	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية	معدل إنتاج الهيدروجين	الخرج في اليوم الثاني	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية	معدل إنتاج الهيدروجين	الخرج في اليوم الأول	درجة حرارة الخلية الفوتوفولتية
ml/min	watt	c°	ml/min	watt	c°	ml/min	watt	c°
26.7	5.14	60	26.5	5.09	60	26.5	5.07	60
26.9	5.29	55	27	5.3	55	27.3	5.31	55
28.3	5.68	50	28.3	5.72	50	28.2	5.69	50
30	5.89	45	29.5	5.87	45	30.5	5.87	45
32.5	6	40	31.7	6	40	31.5	6.02	40
32.9	6.29	35	32.3	6.27	35	32.7	6.37	35
33.1	6.77	30	32.9	6.68	30	33.3	6.76	30
33.1	6.76	30	33	6.68	30	33.1	6.75	30

الدراسة الخامسة: دراسة تجريبية لتصميم مجمع حراري كهروضوئي هجين (PVT) للاستخدام

المنزلي - د. هيثم يوسف - حمد عواد - جامعة بوليتكنيك فلسطين - 2019. [13]

تم استخدام ثلاثة أنواع من اللواقط الشمسية في هذا البحث كما هو موضح بالشكل (1-2):

1- لوح كهروضوئي

2- لاقط حراري

3- لاقط كهروضوئي حراري

الهدف من البحث هو مقارنة الطاقة الكهربائية والطاقة الحرارية الناتجة من اللاقط الكهروضوئي الحراري مع الطاقة الكهربائية الناتجة من اللوح الكهروضوئي والطاقة الحرارية الناتجة من اللاقط الحراري عند نفس الظروف الجوية.

وكانت النتائج متقاربة جداً وبالتالي يمكن استخدام جهاز واحد وهو اللاقط الكهروضوئي الحراري لإنتاج نفس الكمية من الطاقة التي ينتجها جهازان أحدهما حراري والآخر كهروضوئي وبمساحة أقل.



الشكل (1-2) التجربة التطبيقية [13]

1-2: الدراسات المرجعية المقالات والمجلات الأجنبية:

الدراسة السادسة:

Analysis of Photovoltaic Panel Temperature Effects on its Efficiency-

Thong, Li Wah - Multimedia University – 2016 [14]

تم دراسة تأثير درجة حرارة الألواح الكهروضوئية على كفاءة تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية في ظروف واقعية، أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن هناك تناسب مباشر بين الإشعاع الشمسي وتيار الخرج ودرجة حرارة اللوح الكهروضوئي كما أظهرت أنه مع ارتفاع درجة الحرارة ستخف الكفاءة بشكل تدريجي.

تم استخدام لوح كهروضوئي استطاعة [W] 10 ومساحة [m²] 0.0735 عند اشعاع شمسي ثابت ودرجة حرارة مختلفة وقد بين التحليل التجريبي انخفاض في جهد اللوح من (18.9V – 21.1V) عند درجة حرارة [C°] 34 إلى (16.1V – 18.6V) عند درجة حرارة [C°] 6، كما تبين انخفاض الكفاءة بارتفاع درجة الحرارة حيث تنخفض الكفاءة حوالي (0.27-0.77%) عند ارتفاع درجة الحرارة درجة واحدة .

الدراسة السابعة:

Effect of Temperature on the Performance of Photovoltaic Module-

Muhammad Sani-Abdulmumin Sule- International Journal of Innovative

Science and Research Technology, 1:9 -2020 [15]

تم دراسة تأثير درجة الحرارة على أداء الخلايا الكهروضوئية بشكل عملي وذلك من خلال استخدام لوحين كهروضوئيين استطاعة كل منهما [W] 160 أحدهما مع تبريد باستخدام الماء والآخر بدون تبريد.

أظهرت النتائج أن ارتفاع درجة الحرارة بمقدار درجة مئوية سيؤدي إلى انخفاض الجهد بمقدار $0.12[V]$ مما ينعكس سلباً على استطاعة اللوح، يظهر الجدول (5-1) قيم الجهد والاستطاعة مع وبدون تبريد .

الجدول(5-1) جدول نتائج التجربة [15]

Time	Solar rad.(E)	V ₁	V ₂	I ₁	I ₂	P ₁	P ₂	η ₁	η ₂
8:00am	336	27.20	24.24	1.31	2.08	62.83	50.41	0.09	0.12
8:30am	386	28.35	25.18	1.85	2.95	75.41	74.28	0.10	0.15
9:00am	513	32.41	31.82	3.04	3.95	98.52	125.69	0.16	0.19
9:30am	685	33.42	33.35	3.39	3.34	146.71	111.39	0.17	0.18
10:00am	643	34.32	33.56	4.74	3.97	162.68	133.23	0.18	0.18
10:30am	737	34.49	34.38	4.18	4.79	171.16	164.58	0.19	0.18
11:00am	801	36.80	34.71	4.06	4.07	149.40	141.27	0.19	0.17
11:30am	848	36.41	34.16	4.38	4.06	159.48	138.69	0.20	0.17
12:00pm	902	36.84	32.72	4.31	4.98	177.20	162.94	0.20	0.16
12:30pm	953	34.80	33.34	4.96	5.06	172.60	168.70	0.19	0.16
1:00pm	999	36.45	32.48	5.01	5.27	182.61	171.16	0.19	0.15
1:30pm	991	36.45	29.45	4.38	6.33	195.94	186.42	0.18	0.15
2:00pm	879	36.06	28.80	4.13	5.80	148.93	167.04	0.18	0.14
2:30pm	805	35.18	20.15	3.43	5.50	155.84	110.82	0.17	0.13
3:00pm	715	33.79	29.36	3.68	3.87	124.34	113.62	0.15	0.13
3:30pm	558	35.18	32.57	2.79	2.89	90.75	94.13	0.13	0.13
4:00pm	389	33.53	39.52	0.68	0.86	50.86	94.05	0.12	0.12
4:30pm	253	32.56	29.76	0.57	0.73	17.42	21.73	0.09	0.06
5:00pm	176	29.58	28.199	0.50	0.55	14.79	15.50	0.05	0.05

Table 3:- Result for Average Solar Radiation (E), Electrical parameters and Efficiencies



PV with cooling system



PV without cooling system

Fig 2:- 160W polycrystalline PV modul

الشكل(3-1) منصة التجربة التطبيقية [15]

Improving Photovoltaic Module Efficiency Using Water Cooling- Odeh, Saad. M.Behnia- Macquarie University-2009

تم دراسة تأثير تبريد الألواح الكهروضوئية بالماء باستخدام لوح كهروضوئي استطاعة [60W] وأظهرت النتائج ارتفاع في استطاعة اللوح بمقدار يتراوح بين (4-10%) عند بدء استخدام نظام التبريد على اللوح الجدول (1-6) يبين قيم الاستطاعة الكهربائية الناتجة مع وبدون تبريد عند زوايا ميل مختلفة أيضاً [16].

الجدول (1-6) الاستطاعة الشهرية المولدة من لوح كهروضوئي [60W] مع تبريد بالماء وبدون تبريد [16]

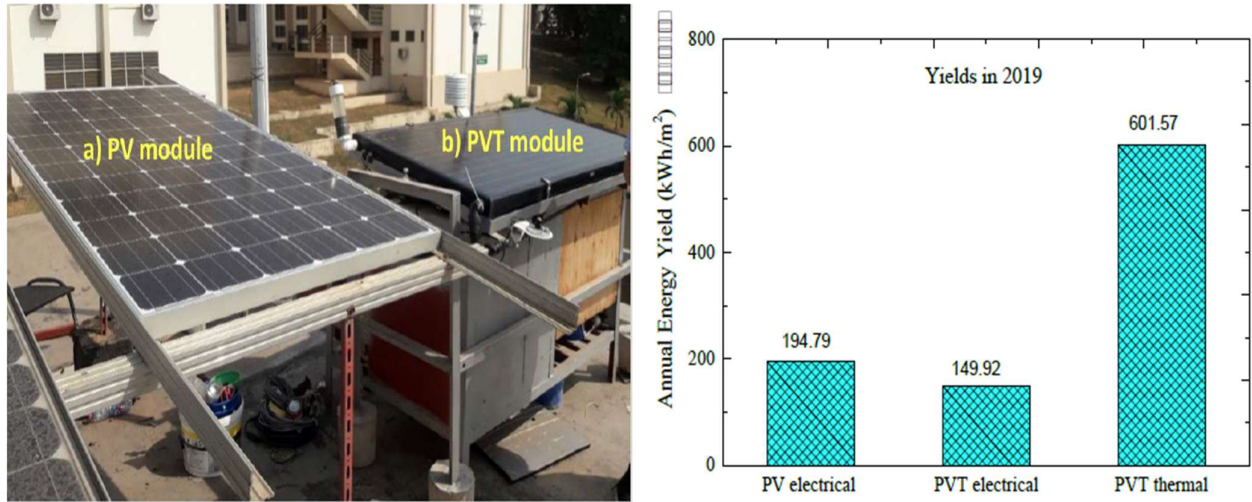
Table 1 Monthly energy delivered by the 60W PV module with underwater cooling and without cooling at different latitudes

Month	Latitude = -33.8° P_{max} (kWh)		Latitude = -31.98° P_{max} (kWh)		Latitude = -12.25° P_{max} (kWh)		Latitude = 32° P_{max} (kWh)	
	With Cooling	Without Cooling	With Cooling	Without Cooling	With Cooling	Without Cooling	With Cooling	Without Cooling
1	10.3	10.0	13.0	12.4	8.8	8.4	7.0	7.1
2	8.6	8.4	10.4	9.9	8.2	7.8	7.8	7.7
3	7.5	7.4	10.3	9.9	9.1	8.6	8.2	8.1
4	5.6	5.5	7.0	6.9	9.4	8.9	9.8	9.6
5	5.1	5.1	6.0	6.0	9.4	8.9	10.5	10.1
6	4.5	4.6	5.1	5.1	9.0	8.7	10.4	9.9
7	5.0	5.1	5.3	5.3	9.6	9.2	10.9	10.3
8	6.5	6.5	7.0	7.0	10.5	9.9	11.1	10.5
9	7.9	7.8	8.4	8.4	10.7	10.2	10.7	10.2
10	10.1	9.9	10.5	10.3	11.0	10.3	9.4	9.1
11	10.7	10.4	12.1	11.7	10.2	9.6	7.7	7.6
12	10.5	10.1	13.4	12.8	9.3	8.8	7.1	7.1
Total	92.3	90.7	108.5	105.6	115.2	109.3	110.5	107.3

Investigation of Solar Photovoltaic-Thermal (PVT) and Solar Photovoltaic (PV) Performance- Saeed Abdul-Ganiyu-Muyiwa S. Adaramola- A Case study in Gana-2020.

تم في هذه الدراسة استخدام لوحين إحداهما كهروضوئي والآخر كهروضوئي حراري ضمن الشروط الحرارية لغانا، استطاعة اللوح كهروضوئي 270[W] واللوح كهروضوئي الحراري 200[W].

أظهرت النتائج السنوية أن استطاعة اللوح كهروضوئي الكهربائية 194.79 [kWh/m²] والاستطاعة الكهربائية للوح كهروضوئي الحراري 149.92 [kWh/m²] بالإضافة لاستطاعة حرارية مقدارها 601.57 [kWh/m²] وهذا ما يوضحه الشكل (4-1) [17].



الشكل (4-1) الاستطاعة السنوية للألواح المستخدمة في التجربة [17]

لوحظ أن هذه الدراسات أكدت على أهمية تأثير درجة الحرارة على أداء اللوح كهروضوئي، ولوحظ استخدام تقنيات مختلفة في تبريد الألواح كهروضوئية منها من خلال تبريد سطحها الأمامي بالماء عن طريق أنبوب متقب، أو عن طريق تصميم مبادل حراري على الوجه الخلفي للوح، ولوحظ في هذه الدراسات التأثير الإيجابي

لاستخدام تقنيات تبريد الألواح الكهروضوئية، معظم هذه الدراسات هي دراسات عملية تطبيقية لم تطرق لنمذجة عددية، سيتم في هذا البحث تأكيد صحة النتائج التي تم التوصل إليها في النمذجة العددية بالدراسة التطبيقية.

ملخص الدراسات المرجعية

1- دراسات مرجعية عربية

الدراسة	صاحب الدراسة	المصدر	السنة	النتيجة
1	د. عثمان زكي مبارك	مجلة العلوم الإنسانية والتكنولوجيا	2009	في هذا البحث تم إيضاح تأثير شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة اللوح الشمسي وحركة الرياح في المناطق المختلفة وتأثيرها على حرارة سطح اللوح الشمسي
2	علي حمودي	جامعة اللاذقية	2014	انخفضت درجة حرارة اللوح بمقدار 20 درجة ارتفاع المرود بمقدار 1.31%
3	لؤي يسير	جامعة اللاذقية	2015	تبين أن نظام التبريد يوقف ارتفاع درجة حرارة الخلية الفوتو فولتية مما عكس النتائج السلبية لانخفاض كفاءة التحويل كما ازداد الناتج الكهربائي للخلية بمقدار 33%
4	د. هيثم يوسف- حمد عواد	جامعة بوليتكنيك فلسطين	2019	تبين أنه يمكن استخدام جهاز واحد وهو اللاقط الكهروضوئي الحراري لإنتاج نفس الكمية من الطاقة التي ينتجها جهازان أحدهما حراري والآخر كهروضوئي وبمساحة أقل
5	د. عثمان زكي مبارك	مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية	2020	عند اشعاع شمسي [W/m ²] 340 ودرجة الحرارة [C°] 39 كانت الكفاءة 13,6%

2- دراسات مرجعية أجنبية

الدراسة	صاحب الدراسة	المصدر	السنة	النتيجة
1	Odeh, Saad. M.Behnia	Macquarie University	2009	تم دراسة تأثير تبريد الألواح الكهروضوئية بالماء باستخدام لوح كهروضوئي استطاعة 60 [W] وأظهرت النتائج ارتفاع في استطاعة اللوح بمقدار يتراوح بين (4-10%) عند بدء استخدام نظام التبريد على اللوح
2	Thong, Li Wah	Multimedia University	2016	انخفاض في جهد اللوح من (18.9V-21.1V) عند درجة حرارة 34 °C إلى (16.1V-18.6V) عند درجة حرارة 6 [C°] انخفاض الكفاءة حوالي (0.77-0.27%) عند ارتفاع درجة الحرارة درجة واحدة
3	-Muhammad Sani Abdulmumin Sule	International Journal of Innovative Science and Research Technology, 1:9.	2020	أظهرت النتائج أن ارتفاع درجة الحرارة بمقدار درجة مئوية سيؤدي إلى انخفاض الجهد بمقدار [V] 0.12 مما ينعكس سلباً على استطاعة اللوح
4	Saeed Abdul-Ganiyu-Muyiwa S. Adaramola	A Case study in Gana.	2020	تم في هذه الدراسة استخدام لوح كهروضوئي تقليدي [W] 270 ولوح كهروضوئي حراري [W] 200 أظهرت النتائج السنوية أن استطاعة اللوح الكهروضوئي الكهربائية [kWh/m ²] 194.79 والاستطاعة الكهربائية للوح الكهروضوئي الحراري [kWh/m ²] 149.92 بالإضافة لاستطاعة حرارية مقدارها 601.57 [kWh/m ²]

الفصل الثاني

الدراسة النظرية

المقدمة:

تعد الطاقة الشمسية أحد مصادر الطاقة المتجددة والتي أصبحت تشكل جزءاً كبيراً من اهتمام جميع دول العالم كونها طاقة نظيفة لا تحدث أي تلوث للبيئة إذ تعد تقنية تحويل أشعة الشمس إلى طاقة كهربائية إحدى الإنجازات العلمية الكبرى في القرن العشرين وهي من أفضل التقنيات المستخدمة في مجال الطاقات المتجددة ويمكن القول إن المنظومات الشمسية الكهروضوئية حالياً هي من المصادر الهامة والمتنامية في العالم وتدخل بشكل فعال في كثير من التطبيقات المنزلية والصناعية.

سيتم في هذا البحث التركيز على دراسة الخلايا الكهروضوئية والعوامل المؤثرة عليها وإمكانية تحسين عملها بالتبريد و التفسير الفيزيائي لانخفاض مردودها النظري بارتفاع درجة حرارة سطحها والذي بدوره يخلق مساحة للتفكير في إمكانية ابتكار طرق جديدة تصب في رفع أداء الخلايا الكهروضوئية.

سيتم أيضاً نمذجة عددية لمعادلة استطاعة اللوح الكهروضوئي بتأثير درجة الحرارة وإسقاط النتائج على المحافظات السورية لمدة عام كامل.

1-2 الشمس:

عبارة عن كرة من المواد الغازية الملتهبة ذات درجات الحرارة المرتفعة جداً وقطر 1.39×10^9 [m] وتبعد عن الأرض حوالي 1.5×10^8 [km]، بما أن الإشعاع الشمسي ينتقل بسرعة الضوء في الخلاء 3.8×10^8 [m/s] فإنه يصل إلى الأرض بعد مغادرته للشمس بغضون 8 دقائق و 20 ثانية، ويكون خرج الطاقة الكلي للشمس هو 3.8×10^{20} [MW] والتي تساوي 63 [MW/m²] على سطح الشمس. هذه الطاقة تشع خارجاً في كل الاتجاهات، تستلم الأرض فقط نسبة قليلة من الإشعاع الكلي المنبعث مساوية 1.7×10^{14} [kW]. [5]

وهذه الكمية تغطي الحمل الطاقى للعالم وتزيد، لذلك وجب استغلالها بالشكل المناسب.

2-2 الإشعاع الشمسي:

تختلف شدة الإشعاع الشمسي وكميته من مكان الى آخر، وهذا الاختلاف ناتج عن العوامل الآتية والتي تشكل

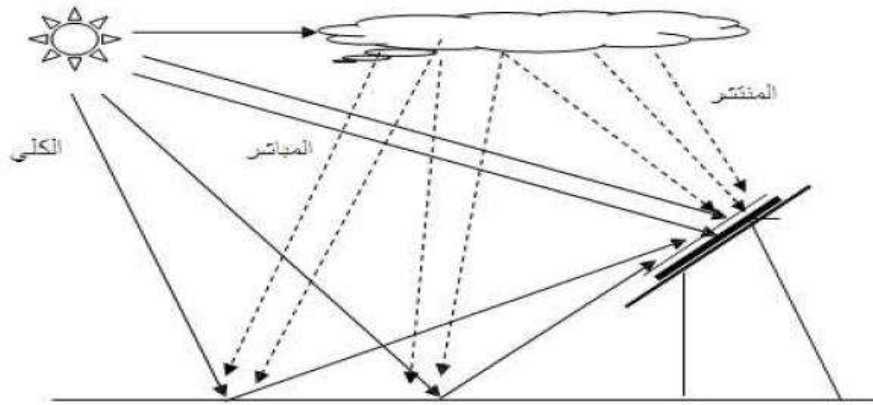
القوة المحركة للكثير من الظواهر الطبيعية على سطح الأرض:

1- دوران الأرض في شكل بيضاوي مرة كل 365 يوم محدثاً تغيرات الفصول.

2- دوران الأرض حول محورها كل 24 ساعة محدثاً اختلاف الليل والنهار.

يصل الى الأرض ثلاثة أنواع من الإشعاعات والتي تمثل نسبة 50% من الأشعة الشمسية وهي موضحة

بالشكل (1-2). [5].



الشكل (1-2) الإشعاع الشمسي [5]

الإشعاع المباشر: Direct or Beam Radiation

وهو جزء من الإشعاع الشمسي الذي يصل سطح الأرض، حيث أنه لا يتأثر بعوامل الامتصاص والانتشار.

الإشعاع المنتشر: Diffuse Radiation

وهو جزء من الإشعاع الشمسي الذي يصل سطح الأرض بعد تعرضه لعوامل الانعكاس والانكسار.

الإشعاع الكلي: Global Radiation

يكون الإشعاع الكلي الواصل إلى سطح الأرض مجموع الإشعاعين المباشر والمنتشر. [5]

وتعطي علاقة شدة الإشعاع الشمسي العامودي على سطح متوضع خارج الغلاف الجوي في n يوم من السنة

بالشكل التالي. [5]

$$G_O = G_{sc} \cdot \left[1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right] \quad (1-2)$$

حيث:

G_O : الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي والمقاس على مستوي عمودي على الأشعة في n يوم من السنة
[W/m²].

G_{sc} : الثابت الشمسي وقيمه [1367 W/m²].

n : رقم اليوم في السنة.

تصل الطاقة الشمسية إلى الأرض على شكل إشعاع كهرومغناطيسي ذي أطوال موجية تتراوح من 0.2 - 3

:[μm]

الجدول (1-2) أطيف الإشعاع الشمسي الكهروضوئي [5]

شدة الإشعاع الشمسي W/m ²	النسبة %	الطول الموجي (μm)	المجال
٩٥	٧	٠.٣٨ - ٠	الأشعة فوق البنفسجية UV
٦٤٠	٤٧,٢٩	٠.٧٨ - ٠.٣٨	الإشعاع المرئية Visible
٦١٨	٤٥,٧١	٣.٠ - ٠.٧٨	الأشعة تحت الحمراء IR

عموماً تتأثر كمية وشدة الإشعاع لجميع الأنواع بعدة عوامل منها:

- حالة السماء من حيث صفائها وتلبدها بالغيوم.
- الوقت خلال النهار والفصل خلال السنة.
- الارتفاع فوق منسوب البحر.
- موقع الشمس في السماء وزاوية ميل الشمس.

كما وتختلف كمية الإشعاع المنعكس على سطح الخلية الشمسية تبعاً لإختلاف معاملات السطوح العاكسة للإشعاع، ويوضح الجدول (2-2) معاملات الإنعكاس (Reflection coefficients) لبعض المواد العاكسة والتي تساعد عند حساب كمية الإشعاع الساقط على موضع معين من الأرض.

الجدول (2-2) معامل الانعكاس لبعض المواد [5]

المادة	معامل الإنعكاس
الثلج	0.70-0.87
الخرسانة	0.31-0.33
أسطح قطران وحصى	0.12-0.15
طرق أسفلت	0.10-0.12

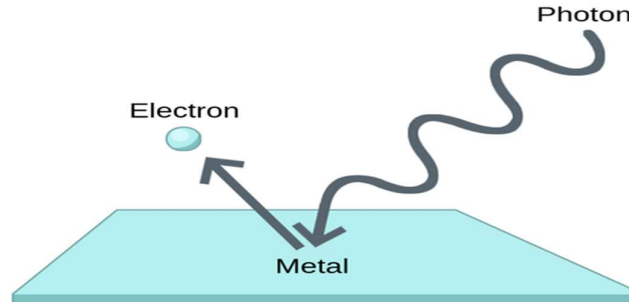
2-3 التأثير الكهروضوئي (Photoelectric effect):

تعتبر نظرية التأثير الكهروضوئي أحد الاكتشافات الهامة في مجال العلوم والفيزياء والتي ساهمت في كثير من التطورات والتكنولوجية وأهمها الخلايا الكهروضوئية الشمسية.

التأثير الكهروضوئي هو عملية يتم بها انبعاث الإلكترونات من الأجسام الصلبة عند امتصاص الطاقة من الضوء، ولما كان التيار الكهربائي عبارة عن سيل من الإلكترونات سميت ظاهرة انترع الإلكترونات بواسطة الضوء بالظاهرة الكهروضوئية.

إلا أن تحرير الإلكترونات يحدث عند بلوغ الشدة الضوئية قيمة معينة تدعى تردد العتبة فإذا كانت قيمة تردد الأمواج الساقطة أكبر من تردد العتبة والذي هو أدنى تردد بصري كافٍ لانترع الإلكترونات من السطح دون أن ينتج عنه طاقة حركية تحدث الظاهرة الكهروضوئية.

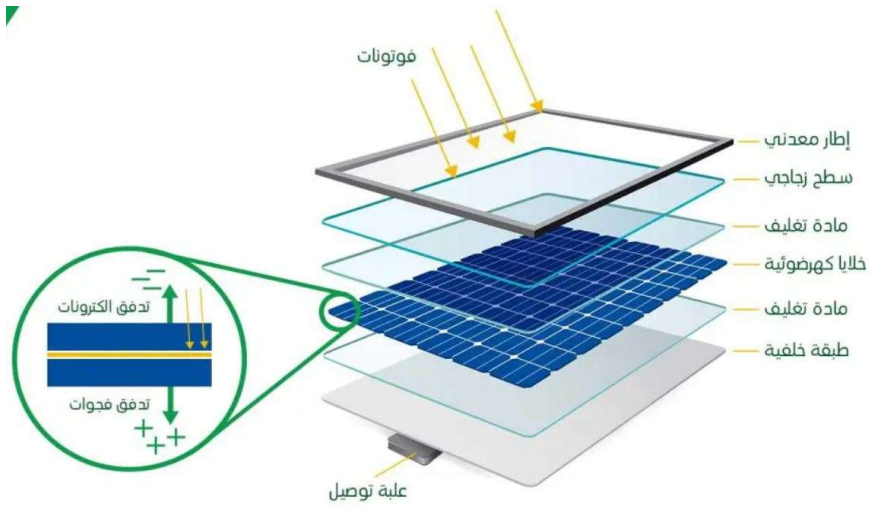
يحدث التأثير الكهروضوئي مباشرة بعد أن يسقط تردد الموجة المناسب لتلك الموجة الكهرومغناطيسية على السطح دون النظر إلى شدة الأمواج، وكما ذكر في الرسالة أهم تطبيقاتها هي الخلايا الكهروضوئية الشمسية التي سيتم درستها [6].



الشكل (2-2) التأثير الكهروضوئي [6]

2-4 الخلايا الشمسية الكهروضوئية (Solar Cells):

الخلية الشمسية هي الوحدة التي تقوم بتحويل ضوء الشمس الذي يكون على هيئة تدفق من الفوتونات إلى طاقة كهربائية وفقاً لنظرية التأثير الكهروضوئي، وتصنع الخلية الشمسية من أشباه الموصلات (Semiconductors) مثل السليكون الذي يستخرج من الرمل النقي. قد تكون مواد نصف ناقلة أحادية البلورة (Mono crystalline) أو متعددة البلورات (Multi crystalline) أو من مواد نصف ناقلة لا بلورية (Amorphus) أو من مواد نصف ناقلة مركبة [7].

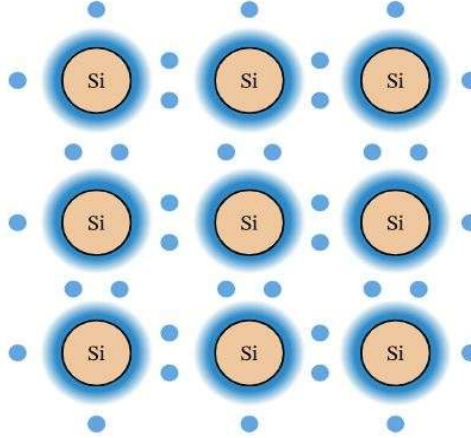


الشكل (2-3) تركيب لوح كهروضوئي [7]

2-4-1 تركيب الخلايا الشمسية (Solar Cells containing):

تتكون الخلايا الكهروضوئية من أشباه موصلات وهي مواد لها خواص توصيلية تصنف بين العوازل والموصلات وتسمح هذه الخواص المميزة لأشباه الموصلات بالتحكم في توصيلها للتيار الكهربائي بطرق مختلفة.

أشباه الموصلات النقية تتكون من نوع واحد من العناصر والأكثر شيوعاً منها هو السيلكون حيث تحتوي ذرة السيلكون المتعادلة حرارياً على أربع إلكترونات في مدارها الإلكتروني الخارجي وعند تجميعها معاً تشكل الذرات شبكة من الروابط التساهمية مع الذرات المجاورة كما في الشكل (2-4). [2].



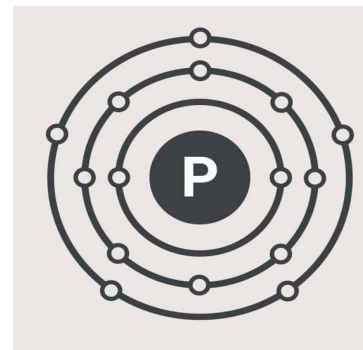
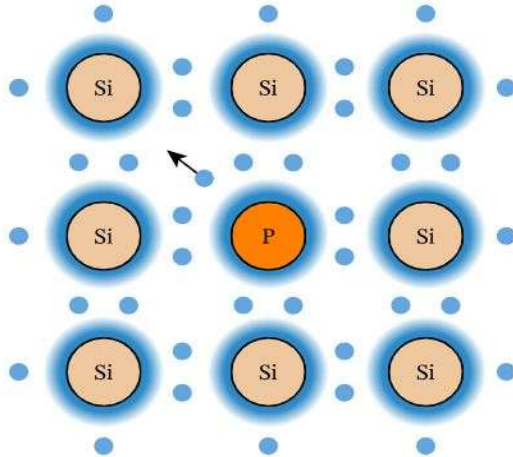
الشكل (2-4) الشبكة البلورية لذرة السيلكون [26]

وكما هو معلوم أن أي ذرة داخلية أو مركزية لديها ذرة تجاورها من الأعلى ومن الأسفل ومن اليسار ومن اليمين ولديها أربعة أزواج من الإلكترونات تحيط بها يكون مدارها الإلكتروني الخارجي أكثر اكتمالاً وتكون عازليتها للتيار الكهربائي كبيرة ولذلك سيعتمد على أساليب معينة لزيادة موصليتها ومن هذه الأساليب تطعيمها أو إشابتها.

ويستخدم في الخلايا الكهروضوئية نوعان من أشباه الموصلات: أشباه موصلات مطعمة (مشابهة) من النوع n وأشباه موصلات مطعمة (مشابهة) من النوع p.

- شبه موصل (N-Type):

نحصل على شبه موصل من النوع السالب عند إشابة بلورة من عنصر شبه موصل رباعي التكافؤ مثل السليكون بحوي أربعة إلكترونات على مداره الخارجي مع شوائب من عنصر خماسي التكافؤ مثل الفوسفور الذي يحوي خمسة إلكترونات على مداره الخارجي وبالتالي للوصول إلى حالة الاستقرار الكيميائي وتحقيق ثمانية الإلكترونات على المدار الخارجي ستساهم ذرة السليكون بأربعة إلكترونات وذرة الفوسفور بخمسة إلكترونات لتشكيل روابط كيميائية وبالتالي سيبقى إلكترون «إضافي» من ذرة الفوسفور لم تشملته الرابطة المتكوّنة، هذا الإلكترون (المشار إليه بالسهم في الشكل (2-5)) يصبح إلكترونًا حرًا للتحرك في الشبكة. وبما أن جميع هذه الإلكترونات الحرة تكون سالبة الشحنة، يُسمى هذا النوع من أشباه الموصلات المشابهة بالنوع (negative) . [8] .

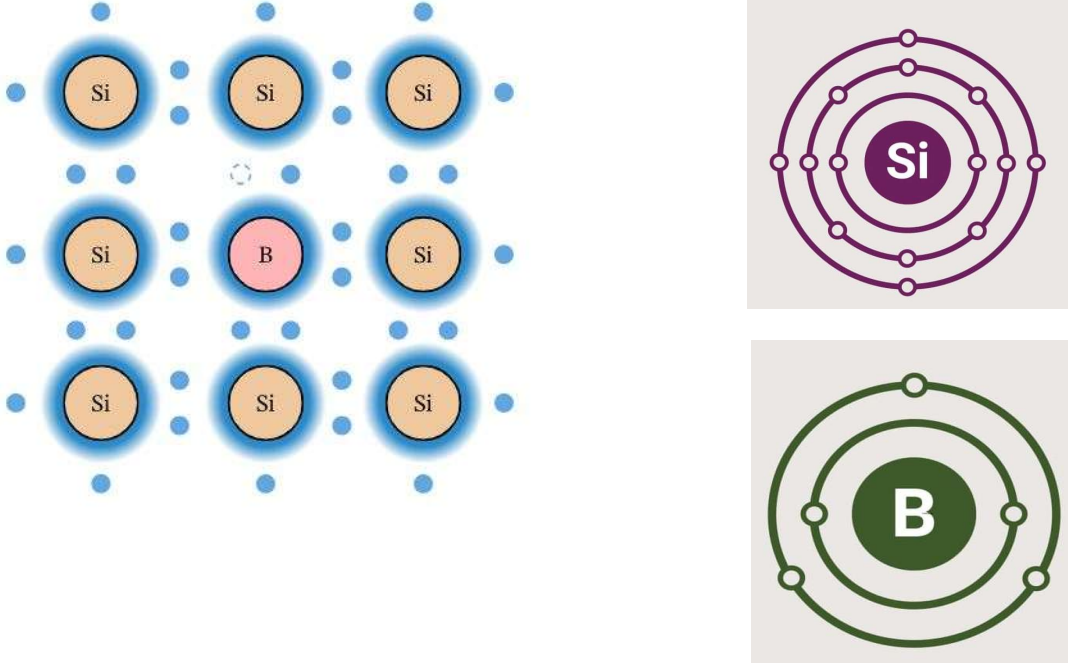


الشكل(2-5) إشابة ذرة السليكون بذرة فسفور [26]

- شبه موصل (P-Type):

نحصل على شبه موصل من النوع الموجب عند إشابة بلورة من عنصر شبه موصل رباعي التكافؤ مثل السيليكون يحوي أربعة إلكترونات على مداره الخارجي مع شوائب من عنصر ثلاثي التكافؤ مثل البورون الذي يحوي ثلاثة إلكترونات على مداره الخارجي وبالتالي للوصول إلى حالة الاستقرار الكيميائي وتحقيق ثمانية إلكترونات على المدار الخارجي ستساهم ذرة السيليكون بأربعة إلكترونات وذرة البورون بثلاثة إلكترونات لتشكيل روابط كيميائية ويبقى هناك (فجوة) غير مكتملة وكما نعلم ليس للفجوة في حد ذاتها شحنة ولكنها تمثل شحنة موجبة بالنسبة إلى الإلكترون، ونتيجة لذلك تتجذب إلكترونات أخرى إلى هذه الفجوة، وفي بعض الأحيان قد تترك الإلكترونات ذرة أخرى وتأتي لملء الفجوة، وعلى الرغم من أن الإلكترونات هي التي تتحرك فعلياً فإننا نعتبر أن الفجوة تتحرك عبر الشبكة كلما انتقلت إلكترونات مختلفة لملئها وهذا يعني أن حاملات الشحنة في هذه الحالة تكون موجبة، ويسمى هذا النوع من

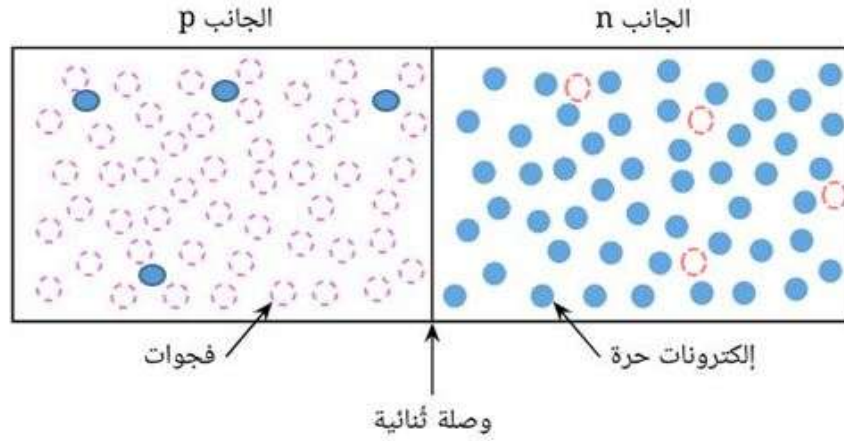
أشباه الموصلات المشابة بالنوع P (Positive). [26]



الشكل (2-6) إشابة ذرة سيليكون بذرة بورون [26]

- الوصلة الثنائية (P-n):

وتتشكل الوصلة P-n عند الجمع بين شبه موصل نوع P مع شبه موصل نوع n كما في الشكل حيث يكون كلاً من الجانبين متعادلين كهربائياً قبل وصلهما، ويسمى الحد الذي يفصل بينهما بالحد الفاصل. [26]



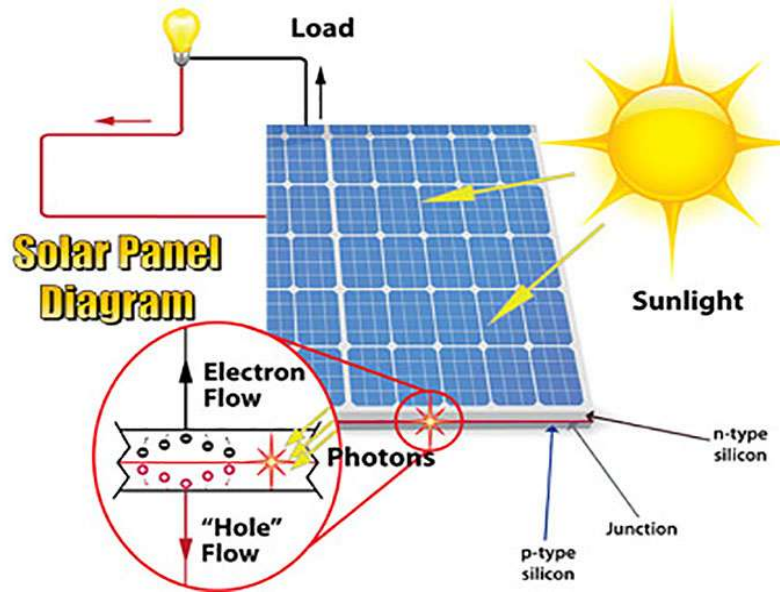
الشكل (7-2) الوصلة الثنائية P-n [26]

2-4-2 آلية توليد الطاقة الكهربائية باستخدام الخلايا الكهروضوئية الشمسية (Electric Power)

:(Generation Using Solar Photovoltaic Cells)

عندما تعرض الخلية الكهروضوئية للإشعاع الشمسي فإن الإلكترونات الحرة تمتص طاقة الفوتونات المكونة للإشعاع الشمسي أي أن الطاقة المنبعثة من الشمس تصطدم بسطح الخلية على شكل فوتون (الفوتون عبارة عن طاقة بصورة ضوء وإشعاع كهرومغناطيسي وليس لها شحنة ولا كتلة) وتولد جهداً كافياً لدفع هذه الإلكترونات ضمن الدارة المشكلة للتيار الكهربائي [7].

وعند توصيل حمل كهربائي بين طرفي الخلية الشمسية يتم الاستفادة من حركة الإلكترونات الناتجة من سقوط ضوء الشمس على الخلية بتوليد التيار الكهربائي.



الشكل (2-8) آلية عمل الخلايا الكهروضوئية [18]

يعتمد توليد الطاقة الكهربائية أيضاً على نطاقات الطاقة للمادة حيث يتركب نطاق الطاقة للمواد في الطبيعة من نطاق تكافؤ ونطاق توصيل ويفصل بينهما منطقة تسمى فجوة نطاق الطاقة.

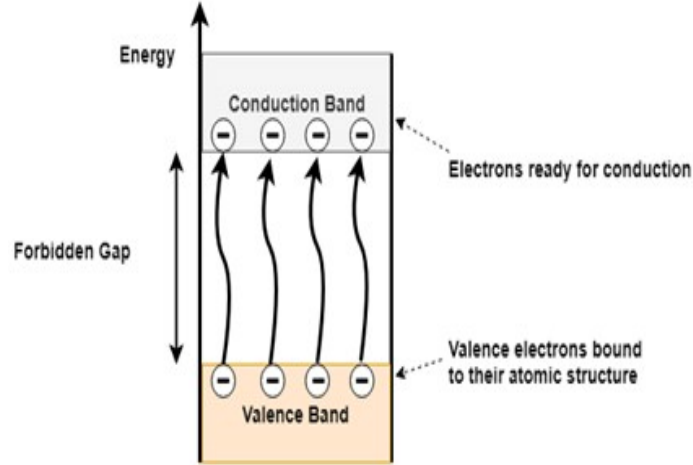
نطاق التكافؤ: هو المنطقة الأقل طاقة ويكون مشغول بشكل كامل بالإلكترونات وترتبط إلكترونات هذه المنطقة ببعضها بإحكام ولا يمكنها التحرك بسهولة [18].

نطاق التوصيل: هو المنطقة ذو الطاقة الأعلى ويكون فارغاً أو مشغول جزئياً [18].

فجوة النطاق: توجد بين نطاق التكافؤ ونطاق التوصيل وتحدد هذه الفجوة قدرة المادة على توصيل التيار الكهربائي. تتمتع الإلكترونات الموجودة في نطاق التوصيل بحرية أكبر في التحرك والمساهمة في تدفق التيار الكهربائي، وعندما تكتسب الإلكترونات الموجودة في نطاق التكافؤ طاقة كافية يمكنها تجاوز فجوة الطاقة والقفز إلى نطاق التوصيل وتصبح حاملة شحنة منتقلة فعالة [18].

أي أن حاملات الشحنة الفعالة هي الإلكترونات التي اكتسبت طاقة تمكنها في الانتقال في نطاق التكافؤ إلى نطاق

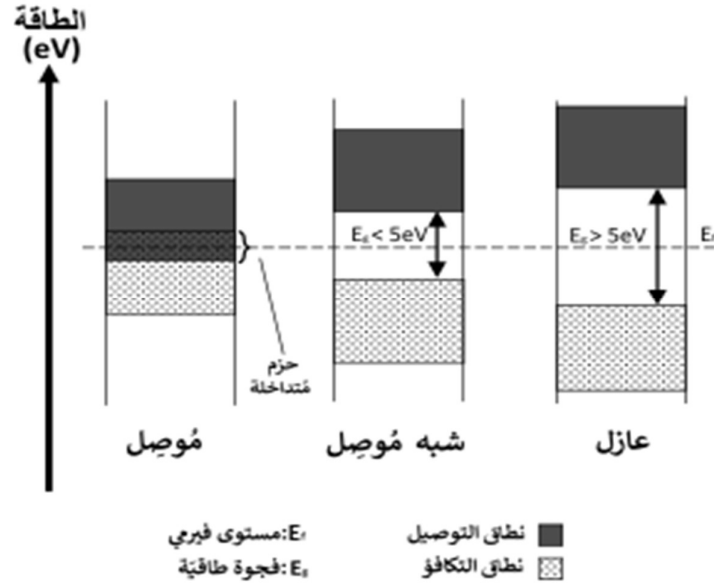
التوصيل



الشكل (2-9) نطاقات الطاقة في شبه موصل [19]

وبالتالي كلما كانت قيمة فجوة النطاق أقل كلما كانت الطاقة اللازمة لتحرير الإلكترون من المادة أقل وبالتالي تكون موصليتها للتيار الكهربائي أكبر، يبين الشكل (2-10) فجوة النطاق لكل من المعادن وأنصاف النواقل والعازل.

حيث أن فجوة النطاق لأنصاف النواقل تتراوح بين (4-0.1) إلكترون فولط وفجوة النطاق للمواد العازلة أكبر من 4 إلكترون فولط.



الشكل (2-10) نطاقات الطاقة موصل - شبه موصل - عازل [19]

وعند إسقاط ظاهرة التأثير الضوئي على آلية عمل الخلية الكهروضوئية يمكننا القول إنه لا يمكن لأي ضوء نزع الإلكترونات من سطح شبه الناقل، إنما يتطلب الأمر طاقة كافية للفوتونات كي تستطيع تحرير الإلكترونات ووفقاً لفرضية أينشتاين بأن الضوء عبارة عن جسيمات عديمة الشحنة (فوتونات) ولكل فوتون كمية منفصلة من الطاقة ويرمز لها E_p وتعطى بالمعادلة التالية [10]:

$$E_p = h \cdot f \quad (2-2)$$

E_p : طاقة الفوتون [ev].

f : تردد الفوتون [Hz]

h : ثابت بلانك [J.s]

وبالتالي عندما تصطدم الفوتونات بسطح الخلية فإن طاقة الفوتون تنتقل إلى الإلكترون وتكون على شكلين:

1- طاقة تجعله يتحرر من سطح شبه الناقل (أقل طاقة لازمة لتحرير الإلكترون هي "دالة العمل")

2- طاقة حركية تجعله ينطلق على شكل تيار كهروضوئي.

تعطى علاقة دالة العمل بالشكل التالي [10]:

$$W = h \cdot f_0 \quad (3-2)$$

W : دالة العمل [ev]

f_0 : تردد العتبة للمادة [Hz].

أي أن الضوء الساقط يستطيع أن يحرر الكترون إذا كانت طاقته أقل من دالة العمل أي تردده أقل من تردد العتبة ولكن لن يستطيع أن يحرك الكترون على شكل طاقة كهروضوئية إلا إذا كانت طاقته أكبر من دالة العمل أي تردده

أكبر من تردد العتبة f_0 وبالتالي يمكن حساب الطاقة الحركية العظمى التي ينتقل بها الإلكترون على شكل تيار

كهروضوئي إذا طرحنا قيمة دالة العمل W من قيمة طاقة الفوتون الإجمالية E_p [10]

$$E_{\max} = E_p - W \quad (4-2)$$

E_p : طاقة الفوتون [ev].

أي أن :

$$E_{\max} = h \cdot f - h \cdot f_0 = h(f - f_0) \quad (5-2)$$

وبالتالي العامل الهام المؤثر على الطاقة الحركية الفعالة للإلكترون هو تردد الفوتون الساقط أي أنه مهما كانت شدة

الضوء كبيرة وتردده أقل من تردد العتبة فإن الجسم لن يفقد أي الكترونات ومهما كانت شدة الضوء ضعيفة (باهت-

خافت) وتردد الفوتون أكبر من تردد العتبة فإنه سيؤدي لتحرير الكترونات وطالما أن التردد متعلق بطول الموجة

فغالباً ما تعطى دالة العمل بدلالة طول الموجة بدلاً من التردد حيث [10]

$$f_0 = \frac{c}{\lambda_0} \quad (6-2)$$

f_0 : تردد العتبة [Hz].

λ_0 : طول الموجة الحدي (طول موجة العتبة) اللازم لحركة الالكترونات [nm].

c : سرعة الضوء [m/s].

يبين الشكل (2-11) أن الفوتونات التي لها قيم أقل من تردد العتبة تكون طاقتها الحركية معدومة وتزداد قيمة الطاقة

الحركية بزيادة التردد بعد تردد العتبة.

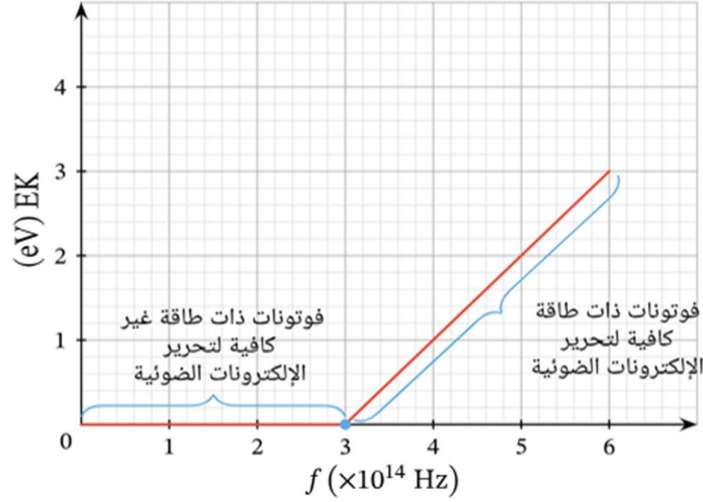
النقطة التي يتحول عندها المنحني عن المحور الأفقي هي النقطة الموافقة لتردد العتبة f_0 والذي عنده تكون الطاقة

الحركية تساوي الصفر $E_{\max} = 0$ أي $0 = h \cdot f_0 - W$ وبالتالي يكون تردد العتبة

$$f_o = W.h \quad (7-2)$$

لنحصل على إلكترون قادر على التحرر والتحرك من المادة يجب أن يكون تردد الفوتون الساقط عليه أكبر من تردد العتبة أي:

$$f > f_o$$



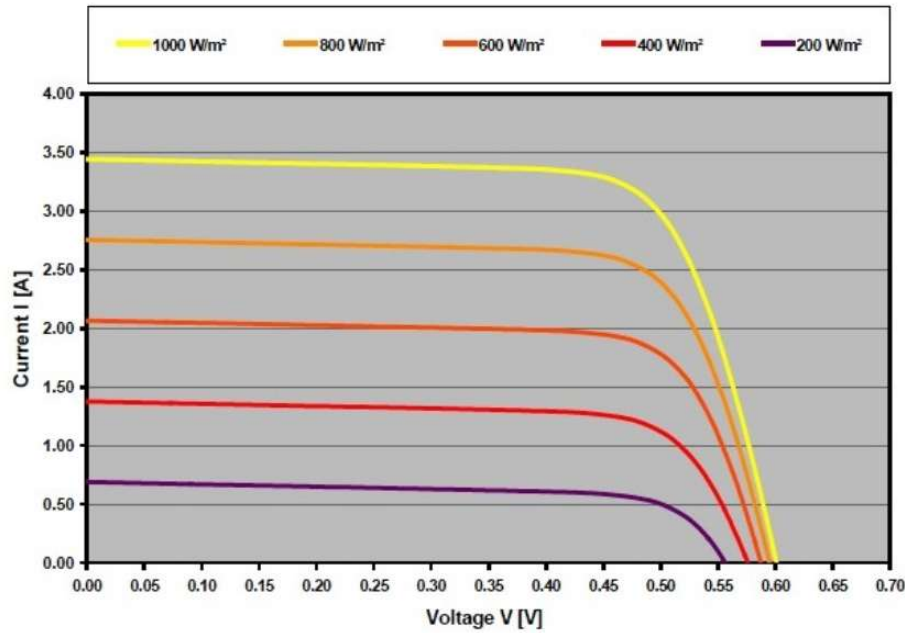
الشكل (11-2) علاقة تردد الفوتون وطاقته الحركية [26]

2-4-3 العوامل المؤثرة على أداء الخلية الشمسية:

تمثل شدة الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة المحيط وحركة الرياح المؤثرات المناخية الرئيسية على الخلية الكهروضوئية، وهذه العوامل المناخية تؤثر على قيم خرج الخلية (الجهد - التيار - نقطة الاستطاعة العظمى) كما تؤثر هذه العوامل على الحرارة الداخلية للخلية الكهروضوئية والتي بدورها تؤثر على خرج الخلية الكهروضوئية.

تأثير شدة الإشعاع الشمسي:

يعتمد خرج الخلية الكهروضوئية المصنعة من السليكون أحادي البلورة ومتعدد البلورات على شدة الإشعاع الشمسي الساقط ويزداد تيار الخرج للخلية الكهروضوئية كلما زادت شدة الإشعاع الشمسي أما جهد الدائرة المفتوحة للخلية فإنه يرتفع إلى حد معين وبعده لا يتزايد بشكل كبير وهذا ما يوضحه الشكل (2-12).



الشكل(12-2) تأثير الإشعاع الشمسي على خرج الخلية الكهروضوئية [11]

تأثير درجة الحرارة:

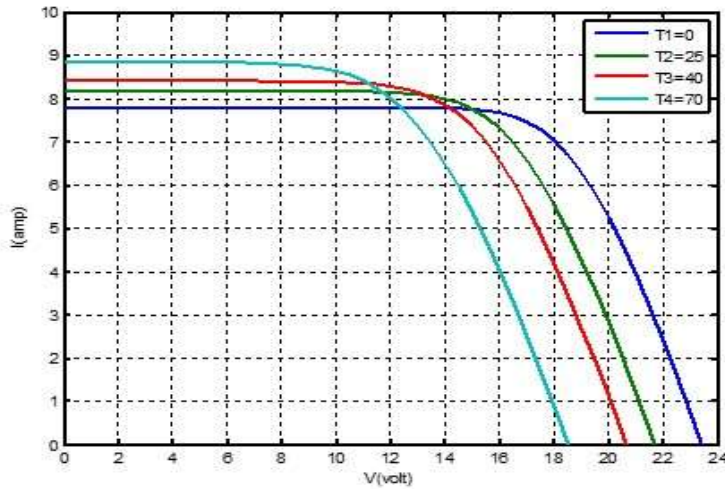
هناك معتقدات خاطئة تفترض أن الشمس كلما كانت أقوى وأكثر سخونة كلما كانت كمية الطاقة الكهربائية التي تنتجها الألواح الكهروضوئية ستكون أكبر ولكن هذا الافتراض يناقض الواقع العملي حيث أن أحد العوامل الرئيسية التي تؤثر على كمية الطاقة التي نحصل عليها من النظام الكهروضوئي هي درجة الحرارة وعلى الرغم من أن درجة الحرارة لا تؤثر على كمية ضوء الشمس التي تتلقاها الخلية الكهروضوئية إلا أنها تؤثر على كمية الطاقة التي يتم إنتاجها.

تتكون الخلايا الكهروضوئية كما ذكرنا من أشباه موصلات وهي حساسة للتغيرات في درجات الحرارة، إن زيادة درجات الحرارة فوق المستويات المثلى تقلل من جهد الدارة المفتوحة للخلايا الكهروضوئية وبالتالي تقلل من قدرة الخلية على إنتاج الطاقة الكهربائية.

يتم قياس ناتج معظم الألواح الكهروضوئية وفقاً لشروط الاختبار القياسية (STC) وهذا يعني كتلة هواء AM=1.5 واشعاع شمسي $1000 [W/m^2]$ ودرجة حرارة $25[C^\circ]$ تمثل درجة حرارة الاختبار متوسط درجة الحرارة خلال ساعات الذروة الشمسية في الربيع والخريف.

ووفقاً لمعايير التصنيع تشير درجة الحرارة $25[C^\circ]$ إلى ذروة نطاق درجة الحرارة المثلى للألواح الكهروضوئية وعندها تكون الخلايا الكهروضوئية قادرة على امتصاص أشعة الشمس بأقصى قدر من الكفاءة وتؤدي أفضل أداء.

ويكون تأثير درجة الحرارة واضحاً على بارامترات الخلية الكهروضوئية (جهد الدارة المفتوحة - تيار دارة القصر) حيث ينخفض جهد الخلية الكهروضوئية ويزداد تيار دارة القصر كلما ارتفعت درجة الحرارة ولكن تغير التيار وفقاً لدرجة الحرارة صغير مقارنة بتغير الجهد مع درجة الحرارة ويوضح الشكل (2-13) تأثير درجة حرارة المحيط على منحنيات التشغيل.



الشكل (2-13) تغير بارامترات الخلية الكهروضوئية بتغير درجة الحرارة [10]

وبالتالي تضع الشركة الصانعة للألواح قيمة معامل تغير الاستطاعة والجهد والتيار بتغير درجة الحرارة ضمن المواصفات التقنية كما هو موضح بالشكل (2-14) المعاملات الحرارية للوح كهروضوئي

من شركة JINKO SOLAR طراز (Tiger Neo N-type -72HL4-BDV-570-550 W)

Temperature coefficients of Pmax	-0.30%/°C
Temperature coefficients of Voc	-0.25%/°C
Temperature coefficients of Isc	0.046%/°C

الشكل (2-14) المعاملات الحرارية للوح كهروضوئي

سيتم في هذا البحث دراسة تأثير درجة الحرارة على أداء الألواح الكهروضوئية.

2-5 التفسير الفيزيائي لانخفاض كفاءة الخلايا الكهروضوئية:

بعد دراسة العديد من المراجع والدراسات المتعلقة بالدراسة الفيزيائية لتأثير درجة الحرارة على أداء الخلية الكهروضوئية ، لذلك سيتم في هذا البحث دراسة مطورة ومفسرة لهذه الظاهرة وتعتبر إحدى النتائج النظرية الهامة لهذا البحث:

تتضمن هذه الدراسة عدة عوامل يجب دراستها للوصول إلى التفسير الفيزيائي وهي:

1- حد الكفاءة القصوى وانخفاض المردود النظري للخلايا الكهروضوئية.

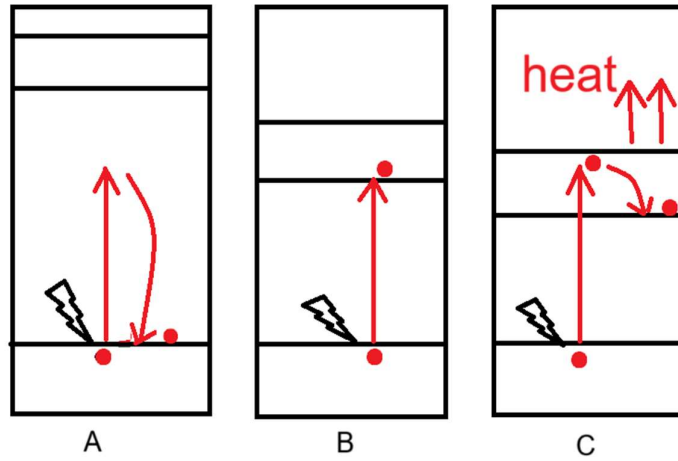
2- الحرارة الناتجة عن عملية إعادة التركيب.

3- منطقة النضوب وجهد الحاجز.

4- علاقة جهد الدارة المفتوحة للخلية الكهروضوئية مع درجة الحرارة.

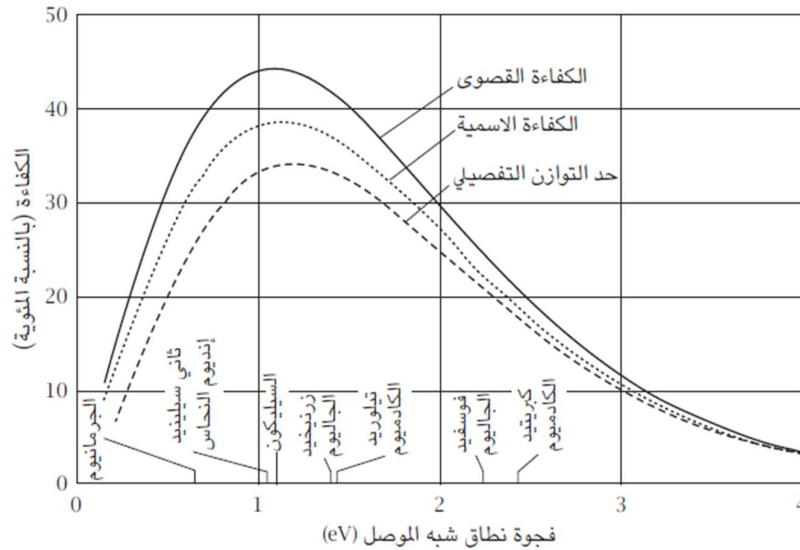
حد الكفاءة القصوى: يحدد حد الكفاءة القصوى أكبر قيمة للطاقة التي يمكن الحصول عليها من الخلية الكهروضوئية ويتعلق هذا الحد بقيمة طاقة فجوة النطاق وهي كما ذكر سابقاً تختلف من مادة إلى أخرى

حسب موصليتها للتيار الكهربائي. إذا كانت فجوة النطاق كبيرة جداً فإن الإلكترونات لن تستطيع الوصول إلى نطاق التوصيل الشكل (A-15-2)، وإذا كانت صغيرة جداً فإن الإلكترونات ستتجاوز نطاق التوصيل وطاقتها الحركية الزائدة ستتلاشى على شكل حرارة الشكل (C-15-2) وبالتالي هناك حد معين لفجوة النطاق يتم عنده الحصول على أقصى كمية من الطاقة الشكل (B-15-2) وهو ما سمي بحد الكفاءة القصوى أو حد شوكلبي وكويسيه (Shockley-Queisser Limit) نسبة للعالمين اللذين توصلا لقيمة فجوة النطاق المكافئة للكفاءة القصوى لأشباه النواقل التي تدخل في تركيب الخلية الكهروضوئية وهي بالنسبة للسيليكون $\eta_{\max} = 0.44$ عند فجوة نطاق مثل 1.1eV [19].



الشكل (15-2) قيم مختلفة لنطاقات الطاقة وتأثيرها على حركة الإلكترونات [19]

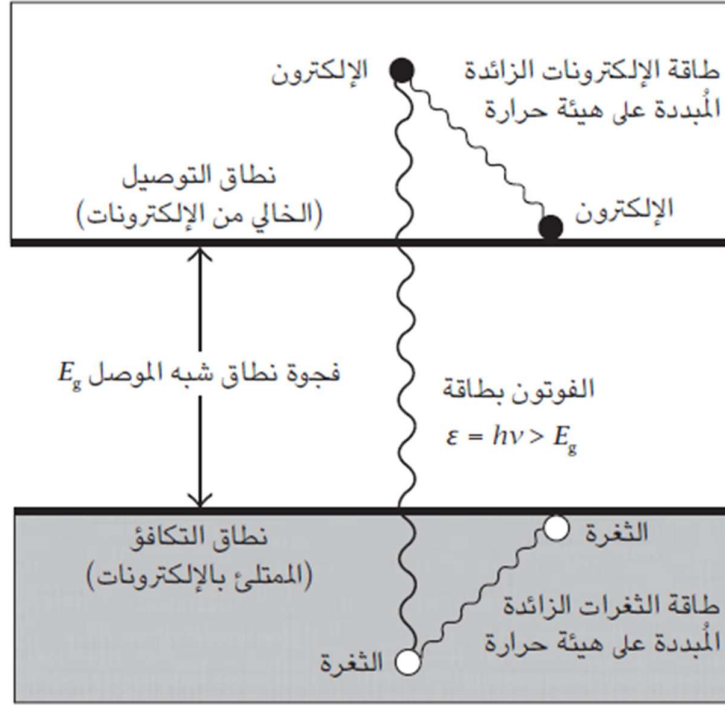
يبين الشكل (2-16) علاقة الكفاءة القصوى للخلية الكهروضوئية مع نسبة فجوة نطاق شبه الموصل.



الشكل (2-16) حد الكفاءة القصوى لأشباه النواقل [19]

الحرارة الناتجة عن إعادة التركيب:

تدعى عملية انتقال الكترولون من مستوي طاقي منخفض إلى مستوي طاقي أعلى منه تدعى بعملية التوليد (generation) وتدعى العملية المعاكسة لها أي هبوط الكترولونات بعملية إعادة التركيب (recombination). حيث أن الفوتونات التي طاقتها أكبر من فجوة نطاق شبه الموصل بكثير والتي طاقتها أقل من فجوة نطاق شبه الموصل بكثير ستقوم بتحرير الكترولونات إلى سويات طاقيه بعيدة جداً عن نطاق التوصيل وطاقة زوج الكترولون ثقب الزائدة عن فجوة النطاق تتبدد سريعاً على شكل حرارة، بالإضافة إلى أن ارتفاع درجة الحرارة يعني زيادة الطاقة الحركية العشوائية للكترولونات وبالتالي زيادة في عمليات إعادة التركيب. الشكل (2-17) عملية إعادة التركيب وتبدد الطاقة على هيئة حرارة [20].



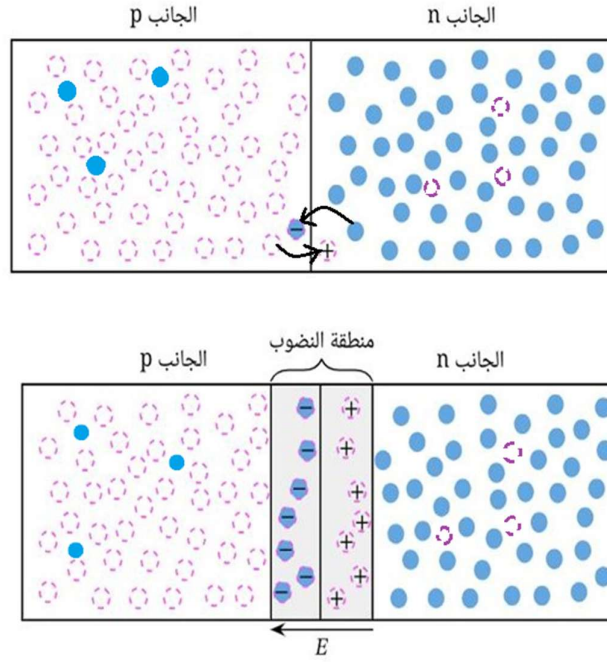
الشكل (17-2) عملية إعادة التركيب [19]

منطقة النضوب وتشكل جهد الحاجز

عند الجمع بين النوعين n و p وبما أن عدد الإلكترونات الحرة في المنطقة n أكبر بكثير من الإلكترونات الحرة في المنطقة p وبالتالي نتيجة هذا الاختلاف في تركيز الإلكترونات الحرة تنتشر من المنطقة n ذات التركيز المرتفع إلى المنطقة p ذات التركيز المنخفض عبر الوصلة $p-n$.

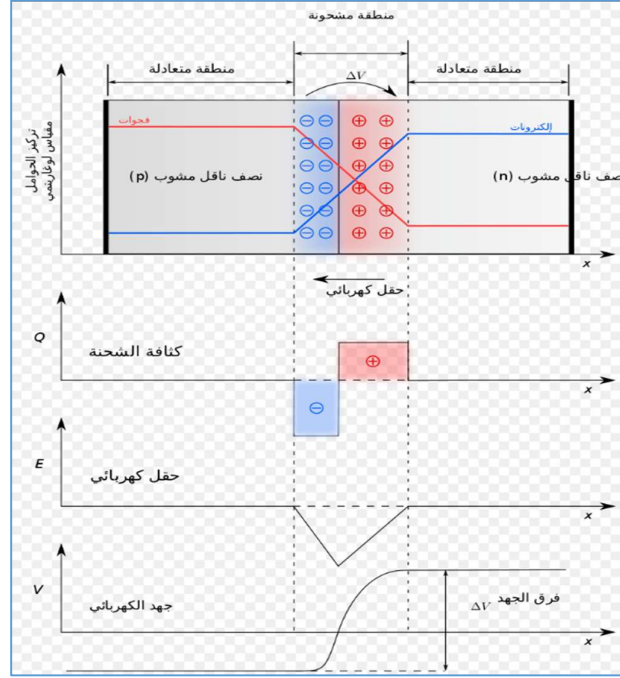
سيكون الإلكترون الذي انتقل للمنطقة p محاطاً بعدد كبير من الفجوات وبالتالي سرعان ما يقوم بملئ إحدى هذه الفجوات ويتحول إلى (الكثرون تكافؤ) وينتج عن هذا الانتشار أيون سالب في المنطقة p وأيون موجب في المنطقة n

وفي كل مرة ينتشر فيها الكترولون عبر الوصلة ينتج زوجاً من الأيونات على طرفي الوصلة والتي تكون ثابتة في التركيب البلوري بسبب الرابطة التساهمية وهذه الأيونات غير فعالة أي لا تستطيع التحرك والمشاركة في التيار الكهربائي. وبزيادة هذه الانتقالات سينتج منطقة خالية من الشحنات المتحركة تسمى بمنطقة النضوب (Depletion region) [9].



الشكل(2-18) تشكل منطقة النضوب [9]

وينشأ في منطقة النضوب مجال كهربائي يزداد بزيادة عدد الإلكترونات المنتقلة إلى أن تصبح كافية لتمنع انتقال أي الكترولون إضافي عبر الوصلة وبالتالي يحدث التوازن، هذا المجال الذي ينشأ على طرفي منطقة النضوب يكافئ فرق جهد كهربائي يسمى جهد الحاجز الشكل (2-19).



الشكل (19-2) جهد الحاجز [9]

وبالتالي اتساع منطقة النضوب يكافئ كفاءة أعلى للخلية الكهروضوئية حيث أنه لا يوجد في هذه المنطقة أي من الإلكترونات والثقوب أي أن احتمال حدوث عملية إعادة التركيب شبه معدومة في هذه المنطقة، وستتم دراسة تأثير ارتفاع درجة الحرارة على اتساع منطقة النضوب.

تشكل جهد الدارة المفتوحة

عند سقوط الإشعاع الشمسي على الوصلة (p-n) يتحرر زوج إلكترون ثقوب ضمن منطقة النضوب ومن ثم وبسبب تأثير الحقل الكهربائي لجهد الحاجز يتجه الإلكترون المتحرك باتجاه الطرف n من الوصلة بينما يتجه الثقب الناتج باتجاه الطرف p من الوصلة، ومع استمرار سقوط الفوتونات وعدم وصل طرفي الوصلة /دائرة مفتوحة/ ستتراكم هذه الشحنات السالبة على حافة المنطقة n والشحنات الموجبة على حافة المنطقة P من الوصلة وسينشأ فرق الجهد الكهربائي للوصلة V_{oc} وهذا الجهد سيمنع انتقال حاملات الشحنة من العبور.

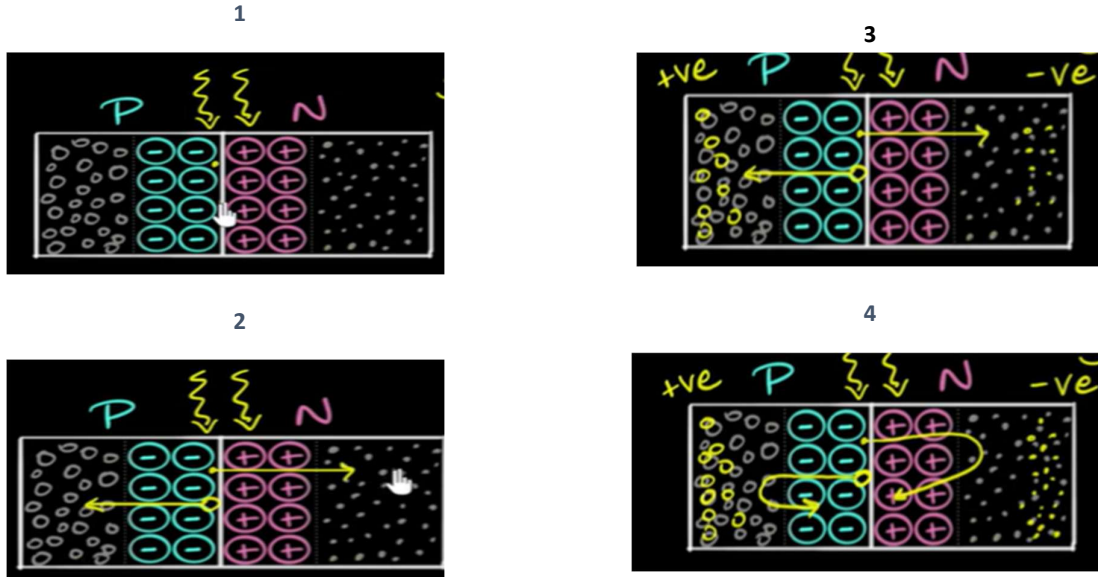
تأثير درجة الحرارة على منطقة النضوب

كما ذكر سابقاً أنه بارتفاع درجة الحرارة ستزداد الطاقة الحركية للالكترونات وسوف تزداد معدلات عملية إعادة التركيب، مما يؤدي إلى تدمير منطقة النضوب كما هو موضح بالشكل (2-20) وبالتالي سيتناقص اتساعها.

إن تضيق منطقة النضوب سيؤثر بشكل مباشر على جهد الحاجز و الذي بدوره سيؤثر على كمية الشحنات السالبة و الموجبة على طرفي الوصلة PN و بالتالي انخفاض توتر الدارة المفتوحة للخلية VOC.

إن انخفاض توتر الدارة المفتوحة VOC سيؤدي بشكل مباشر إلى انخفاض الاستطاعة المولدة من الخلية الكهروضوئية P.

إن تضيق منطقة النضوب أيضاً سيؤثر على كمية الشحنات المارة عبر الوصلة خلال الأثر الكهروضوئي و بالتالي ازدياد هذه الشحنات الأمر الذي سيؤدي لازدياد تيار الخلية (تبار القصر ISC) و الذي يؤدي إلى ازدياد الاستطاعة المولدة من الخلية الكهروضوئية.



الشكل (2-20) تضيق منطقة النضوب بتأثير درجة الحرارة [27]

وبالتالي تتأثر الخلية الكهروضوئية بدرجة حرارة سطحها، حيث تنخفض كفاءة الخلية والاستطاعة

المولدة منها مع ارتفاع درجة حرارة سطح هذه الخلية.

2-6 الدراسة العددية لتأثير درجة الحرارة على خرج اللوح الكهروضوئي:

2-6-1 علاقة استطاعة لوح كهروضوئي ومردوده الكهربائي بتأثير درجة الحرارة [21]:

$$P_T = P[1 - \beta_{ref}(T_C - T_{ref})] \quad (8-2)$$

حيث:

P : استطاعة الخلية الشمسية دون تأثير درجة الحرارة [W].

β_{ref} : معامل درجة الحرارة لتغير الاستطاعة.

T_{ref} : درجة الحرارة المرجعية [C°].

T_C : درجة حرارة الخلية الكهروضوئية [C°].

يتم حساب P من المعادلة [12]:

$$\eta_{T_{ref}} = \frac{P}{A * G} \quad (9-2)$$

حيث:

A : مساحة سطح اللوح الكهروضوئي المعرض للإشعاع الشمسي [m²].

G : شدة الإشعاع الشمسي [W/m²].

$\eta_{T_{ref}}$: المردود الكهربائي عند درجة الحرارة المرجعية.

وبالتالي:

$$P = A * \eta_{T_{ref}} * G \quad (10-2)$$

وتحسب درجة حرارة الخلية T_C كتابع لتغير درجة الحرارة المحيطة والإشعاع الشمسي من العلاقة [11]:

$$T_c = T_a + \frac{T_{NOCT} - 20}{800} \cdot G \quad (11-2)$$

حيث T_{NOCT} هي درجة حرارة الخلية في لوح عندما يعمل اللوح كدارة مفتوحة تحت شروط STC وتتراوح قيمتها بالنسبة للوح تبعاً لشدة الإشعاع الشمسي بين $[33-58] [C^\circ]$ وغالباً ما تؤخذ $[C^\circ] 45$. [11]

T_a : درجة الحرارة الخارجية $[C^\circ]$.

وتعطي علاقة المردود الكهربائي بالشكل [12] [11]:

$$\eta_T = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref})] \quad (12-2)$$

حيث:

η_{Tref} المردود الكهربائي للخلية الشمسية عند درجة الحرارة المرجعية.

2-6-2 الحساب العددي:

تم اخذ قيم الإشعاع الشمسي G ودرجة حرارة الوسط المحيط T_a لكل المدن السورية باستخدام برنامج DView خلال ساعات سطوع الشمس لكل يوم من أيام سنة لعام 2019.

تم اختيار لوح كهروضوئي لإجراء الحساب العددي مصنع من شركة JINKO SOLAR طراز JKM545M- 772HL4-V ، وتم أخذ قيمة المساحة A و المردود الكهربائي ومعامل انخفاض درجة الحرارة بالنسبة للاستطاعة للوح الكهروضوئي عند درجة الحرارة المرجعية η_{Tref} و β_{ref} عند الشروط القياسية STC وهي (درجة حرارة الخلية $[C^\circ] 25$ وإشعاع شمسي $[W/m^2] 1000$ وكتلة الهواء 1.5) موضحة بالشكل (2-21).

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM530M-72HL4		JKM535M-72HL4		JKM540M-72HL4		JKM545M-72HL4		JKM550M-72HL4	
	JKM530M-72HL4-V	JKM530M-72HL4-V	JKM535M-72HL4-V	JKM535M-72HL4-V	JKM540M-72HL4-V	JKM540M-72HL4-V	JKM545M-72HL4-V	JKM545M-72HL4-V	JKM550M-72HL4-V	JKM550M-72HL4-V
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	530Wp	394Wp	535Wp	398Wp	540Wp	402Wp	545Wp	405Wp	550Wp	409Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	40.56V	37.84V	40.63V	37.91V	40.70V	38.08V	40.80V	38.25V	40.90V	38.42V
Maximum Power Current (Imp)	13.07A	10.42A	13.17A	10.50A	13.27A	10.55A	13.36A	10.60A	13.45A	10.65A
Open-circuit Voltage (Voc)	49.26V	46.50V	49.34V	46.57V	49.42V	46.65V	49.52V	46.74V	49.62V	46.84V
Short-circuit Current (Isc)	13.71A	11.07A	13.79A	11.14A	13.85A	11.19A	13.94A	11.26A	14.03A	11.33A
Module Efficiency STC (%)	20.55%		20.75%		20.94%		21.13%		21.33%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	25A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

*STC:  Irradiance 1000W/m²  Cell Temperature 25°C  AM=1.5

NOCT:  Irradiance 800W/m²  Ambient Temperature 20°C  AM=1.5  Wind Speed 1m/s

الشكل(21-2) جدول المواصفات الفنية للوح الكهروضوئي

وبالتالي لدينا:

$$A = 1.134 * 2.274 = 2.58 [m^2]$$

$$\eta_{Tref} = 21.13\% = 0.2113$$

$$\beta_{ref} = -0.35\%C^{\circ}$$

الإشارة السالبة هنا فقط للدلالة على انخفاض الاستطاعة بمقدار 0.35% عند ارتفاع درجة الحرارة [°C].

$$T_{NOTC} = 45[C^{\circ}]$$

تم تعويض هذه القيم بمعادلتى الاستطاعة الكهربائية والمردود الكهربائي بتأثير درجة الحرارة (2-8) و(2-12) باستخدام برنامج EES وحصلنا على قيم الاستطاعة والمردود والنسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة بتأثير درجة الحرارة لكافة المحافظات السورية ولجميع الأيام خلال أشهر الصيف ولتبسيط قراءة القيم والنتائج سنقوم بعرض نتائج يوم واحد 2019-08-14 لكل محافظة على حدى الجدول (2-3).

الجدول(2-3) القيم العددية للمحافظات السورية يوم 2024-08-14

دمشق						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الاشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	26.1	55	27.82	29.78	29.49	1%
7	29.4	244	37.03	132.1	126.6	4%
8	32.4	456	46.65	246.9	228.2	8%
9	34.6	654	55.04	354.2	316.9	12%
10	36.2	811	61.54	439.2	383	15%
11	37.3	915	65.89	495.5	424.6	17%
12	37.7	963	67.79	521.5	443.4	18%
13	37.6	942	67.04	510.1	435.1	17%
14	36.9	853	63.56	461.9	399.6	16%
15	35.7	706	57.76	382.3	338.5	13%
16	34.1	520	50.35	281.6	256.6	10%
17	32.2	311	41.92	168.4	158.4	6%
18	30	109	33.41	59.03	57.29	3%
اللاذقية						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الاشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	28.4	43	29.74	23.29	22.9	2%
7	29.1	214	35.79	115.9	111.5	4%
8	29.9	305	39.43	165.2	156.8	5%
9	30.5	593	49.03	321.1	294.1	9%
10	30.9	744	54.15	402.9	361.8	11%
11	31.1	847	57.57	458.7	406.4	13%
12	31	881	58.53	477.1	421.1	13%
13	30.8	868	57.93	470	415.9	13%
14	30.5	791	55.22	428.4	383	12%
15	30.1	654	50.54	354.2	322.5	10%
16	29.6	482	44.66	261	243.1	7%
17	29	290	38.06	157	149.9	5%
18	28.5	105	31.78	56.86	55.51	2%

حماء						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الاشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	26.1	55	27.82	29.78	29.49	1%
7	29.4	235	36.74	127.3	122	4%
8	32.9	436	46.53	236.1	218.3	8%
9	35.5	622	54.94	336.8	301.5	12%
10	37.4	774	61.59	419.1	365.5	15%
11	38.7	874	66.01	473.3	405.4	17%
12	39.2	921	67.98	498.7	423.7	18%
13	39.1	896	67.1	485.2	413.7	17%
14	38.3	810	63.61	438.6	379.4	16%
15	36.9	666	57.71	360.7	319.4	13%
16	34.8	487	50.02	263.7	240.6	10%
17	32.6	287	41.57	155.4	146.4	6%
18	30.5	98	33.56	53.07	51.48	3%
حمص						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الاشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	25.6	56	27.35	30.33	30.08	1%
7	29	235	36.34	127.3	122.2	4%
8	32.3	439	46.02	237.7	220.2	8%
9	34.7	628	54.33	340.1	305.2	11%
10	36.4	780	60.78	422.4	369.5	14%
11	37.4	882	64.96	477.6	410.8	16%
12	37.8	933	66.96	505.2	431.1	17%
13	37.6	907	65.94	491.2	420.8	17%
14	36.8	819	62.39	443.5	385.5	15%
15	35.4	674	56.46	365	324.8	12%
16	33.4	493	48.81	267	244.7	9%
17	31	291	40.09	157.6	149.3	6%
18	28.8	99	31.89	53.61	52.32	2%

حلب						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الاشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	26.2	54	27.89	29.24	28.95	1%
7	28.9	227	35.99	122.9	118.2	4%
8	32	325	42.16	176	165.4	6%
9	35	606	53.94	328.2	294.9	11%
10	37.7	756	61.33	409.4	357.3	15%
11	39.7	856	66.45	463.5	396.3	17%
12	41	899	69.09	486.8	411.7	18%
13	41.6	875	68.94	473.8	401	18%
14	41.4	789	66.06	427.3	365.9	17%
15	40.4	646	60.59	349.8	306.3	14%
16	38.6	469	53.26	254	228.9	11%
17	35.9	273	44.43	147.8	137.8	7%
18	33	89	35.78	48.2	46.38	4%
ادلب						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الاشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	25.2	51	26.79	27.62	27.44	1%
7	28.1	227	35.19	122.9	118.5	4%
8	31.3	427	44.64	231.2	215.3	7%
9	34	614	53.19	332.5	299.7	11%
10	36.2	768	60.2	415.9	364.7	14%
11	37.8	871	65.02	471.7	405.6	16%
12	38.7	911	67.17	493.3	420.5	17%
13	38.8	890	66.61	482	411.8	17%
14	38.3	804	63.43	435.4	376.8	16%
15	37	660	57.63	357.4	316.6	13%
16	35	483	50.09	261.6	238.6	10%
17	32.5	285	41.41	154.3	145.5	6%
18	30.2	97	33.23	52.53	51.02	3%

طرطوس						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الإشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	28.9	48	30.4	25.99	25.5	2%
7	30.1	221	37.01	119.7	114.6	4%
8	31.1	419	44.19	226.9	211.7	7%
9	31.9	603	50.74	326.5	297.1	10%
10	32.3	754	55.86	408.3	364.2	12%
11	32.4	856	59.15	463.5	408.1	14%
12	32.3	897	60.33	485.8	425.7	14%
13	31.9	878	59.34	475.5	418.3	14%
14	31.5	796	56.38	431.1	383.7	12%
15	31	484	46.13	262.1	242.7	8%
16	30.4	307	39.99	166.2	157.5	6%
17	29.7	289	38.73	156.5	149	5%
18	29	102	32.19	55.24	53.85	3%
الرقبة						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الإشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	28.7	65	30.73	35.2	34.49	2%
7	30.7	243	38.29	131.6	125.5	5%
8	33.1	437	46.76	236.6	218.6	8%
9	35.6	618	54.91	334.7	299.6	12%
10	38.1	761	61.88	412.1	358.9	15%
11	40.4	853	67.06	461.9	393.9	17%
12	42.1	872	69.35	472.2	398.9	18%
13	43	840	69.25	454.9	384.4	18%
14	43.4	747	66.74	404.5	345.4	17%
15	43.3	603	62.14	326.5	284.1	15%
16	42.6	424	55.85	229.6	204.8	12%
17	40.8	233	48.08	126.2	116	9%
18	38.1	55	39.82	29.78	28.24	5%

الحسكة						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الإشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	34.1	83	36.69	44.95	43.11	4%
7	36.8	268	45.18	145.1	134.9	8%
8	39.9	464	54.4	251.3	225.4	11%
9	42.5	639	62.47	346	300.7	15%
10	44.4	778	68.71	421.3	356.9	18%
11	45.7	863	72.67	467.3	389.4	20%
12	46.6	883	74.19	478.2	395.8	21%
13	47	775	71.22	419.7	351.8	19%
14	46.9	744	70.15	402.9	339.2	19%
15	46.5	568	64.25	307.6	265.3	16%
16	45.5	42	46.81	22.74	21.01	8%
17	42.8	136	47.05	73.65	67.96	8%
18	39.4	47	40.87	25.45	24.04	6%
القامشلي						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الإشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	33.7	104	36.95	56.32	53.96	4%
7	36.7	290	45.76	157	145.6	8%
8	39.6	485	54.76	262.6	235.3	12%
9	41.9	659	62.49	356.9	310	15%
10	43.8	790	68.49	427.8	362.7	18%
11	45.2	870	72.39	471.1	393	20%
12	46.1	883	73.69	478.2	396.7	21%
13	46.4	841	72.68	455.4	379.4	20%
14	46.3	738	69.36	399.6	337.6	18%
15	45.7	471	60.42	255.1	223.4	14%
16	44.4	202	50.71	109.4	99.54	10%
17	41.3	20	41.93	10.83	10.19	6%
18	37.5	6	37.69	3.249	3.105	5%

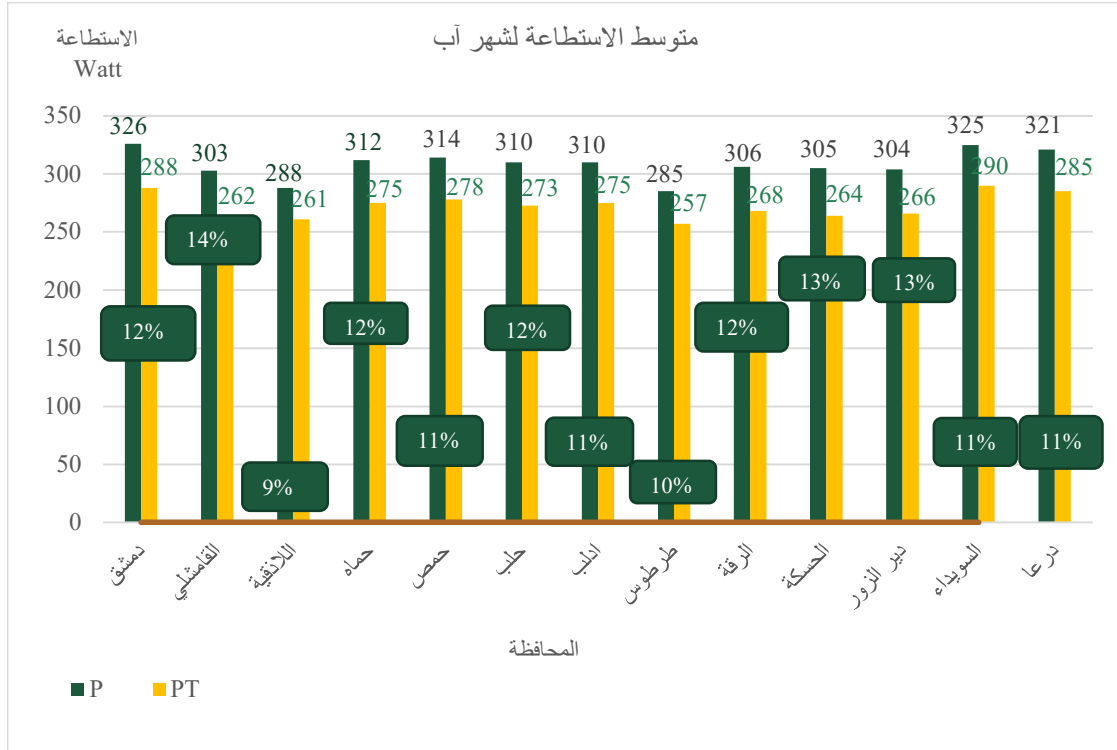
دير الزور						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الاشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	30.5	77	32.91	41.7	40.54	3%
7	33	263	41.22	142.4	134.3	6%
8	36.1	463	50.57	250.7	228.3	10%
9	39.2	644	59.33	348.7	306.8	14%
10	42.1	788	66.73	426.7	364.4	17%
11	44.1	876	71.48	474.4	397.2	19%
12	45.2	879	72.67	476	396.6	20%
13	45.8	840	72.05	454.9	380	20%
14	46	742	69.19	401.8	339.7	18%
15	45.8	594	64.36	321.7	277.4	16%
16	44.8	412	57.68	223.1	197.6	13%
17	42.7	217	49.48	117.5	107.4	9%
18	40.6	22	41.29	11.91	11.23	6%
السويداء						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الاشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	21.1	61	23.01	33.26	33.03	1%
7	24.1	259	32.19	140.3	136.7	3%
8	27.3	476	42.18	257.8	242.3	6%
9	29.8	675	50.89	365.5	332.4	10%
10	31.6	834	57.66	451.6	400	13%
11	32.9	940	62.28	509	442.6	15%
12	33.8	991	64.77	536.7	462	16%
13	34.1	966	64.29	523.1	451.2	16%
14	33.8	875	61.14	473.8	413.9	14%
15	32.9	730	55.71	395.3	352.8	12%
16	31.4	538	48.21	291.3	267.7	9%
17	29.4	322	39.46	174.4	165.5	5%
18	27	112	30.5	60.65	59.48	2%

درعا						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الإشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	21.9	59	23.74	31.95	32.09	0%
7	24.8	254	32.74	137.5	133.8	3%
8	28	471	42.72	255.1	239.2	7%
9	30.5	668	51.38	361.7	328.3	10%
10	32.2	828	58.08	448.4	396.5	13%
11	33.6	935	62.82	506.3	439.3	15%
12	34.5	983	65.22	532.3	457.4	16%
13	35	959	64.97	519.3	446.7	16%
14	34.9	869	62.06	470.6	409.6	15%
15	34.1	725	56.76	392.6	349	12%
16	32.5	534	49.19	289.2	264.7	9%
17	30.4	319	40.37	172.7	163.5	6%
18	27.9	111	31.37	60.11	58.77	2%
القيطرة						
الساعة	درجة الحرارة الخارجية (C°)	الإشعاع الشمسي (w/m2)	درجة حرارة الخلية (C°)	الاستطاعة الكهربائية للوح (w)	الاستطاعة الكهربائية للوح مع تأثير درجة الحرارة (w)	النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة
6	22.4	54	24.09	29.24	29.34	0%
7	25.8	245	33.46	132.7	128.7	3%
8	29	462	43.44	250.2	234	7%
9	31.4	662	52.09	358.5	324.5	10%
10	33	821	58.66	444.6	392.2	13%
11	34	928	63	502.5	435.7	15%
12	34.3	974	64.74	527.5	454.1	16%
13	34.2	950	63.89	514.5	444.4	16%
14	33.6	865	60.63	468.4	410	14%
15	32.5	723	55.09	391.5	350.3	12%
16	30.8	537	47.58	290.8	267.8	9%
17	28.7	326	38.89	176.5	168	5%
18	26.3	118	29.99	63.9	62.79	2%

2-6-3 التمثيل البياني للنتائج:

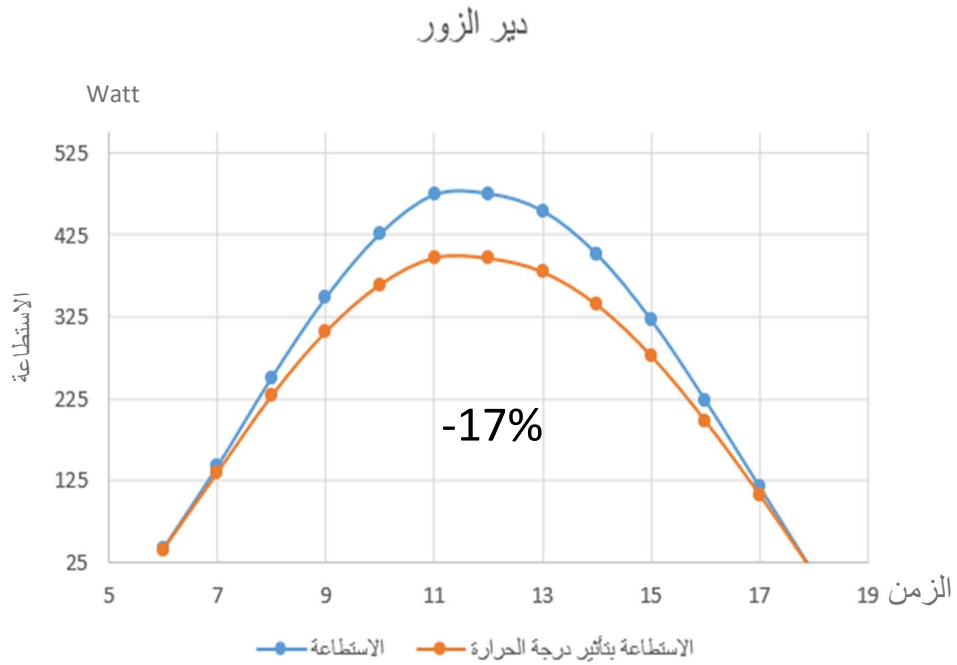
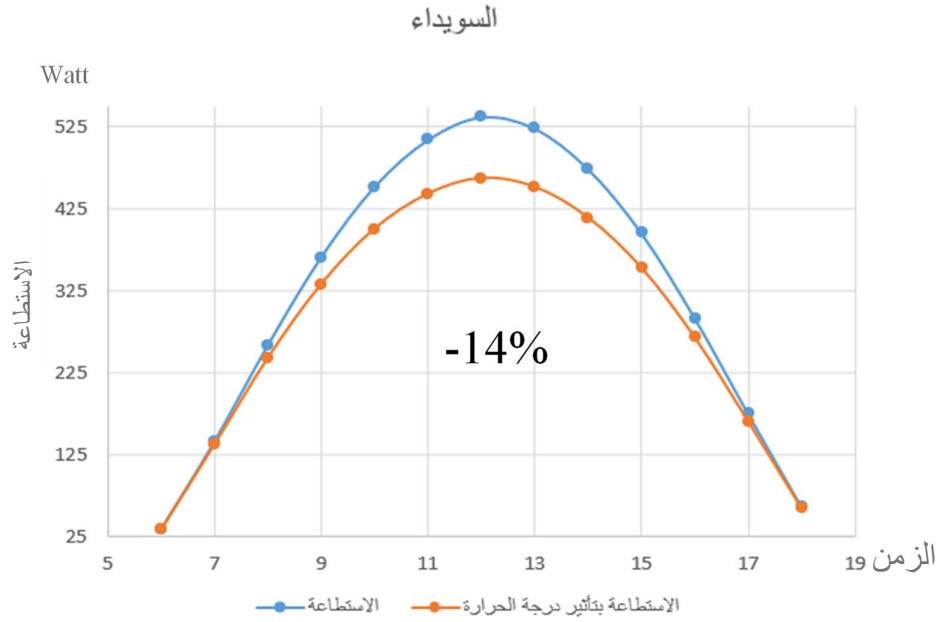
تم حساب متوسط الاستطاعة الكهربائية بتأثير درجة الحرارة وبلا تأثير درجة الحرارة والنسبة المئوية للإنخفاض في

الاستطاعة الكهربائية لكافة المحافظات في شهر آب كاملاً وكانت النتائج كالتالي:



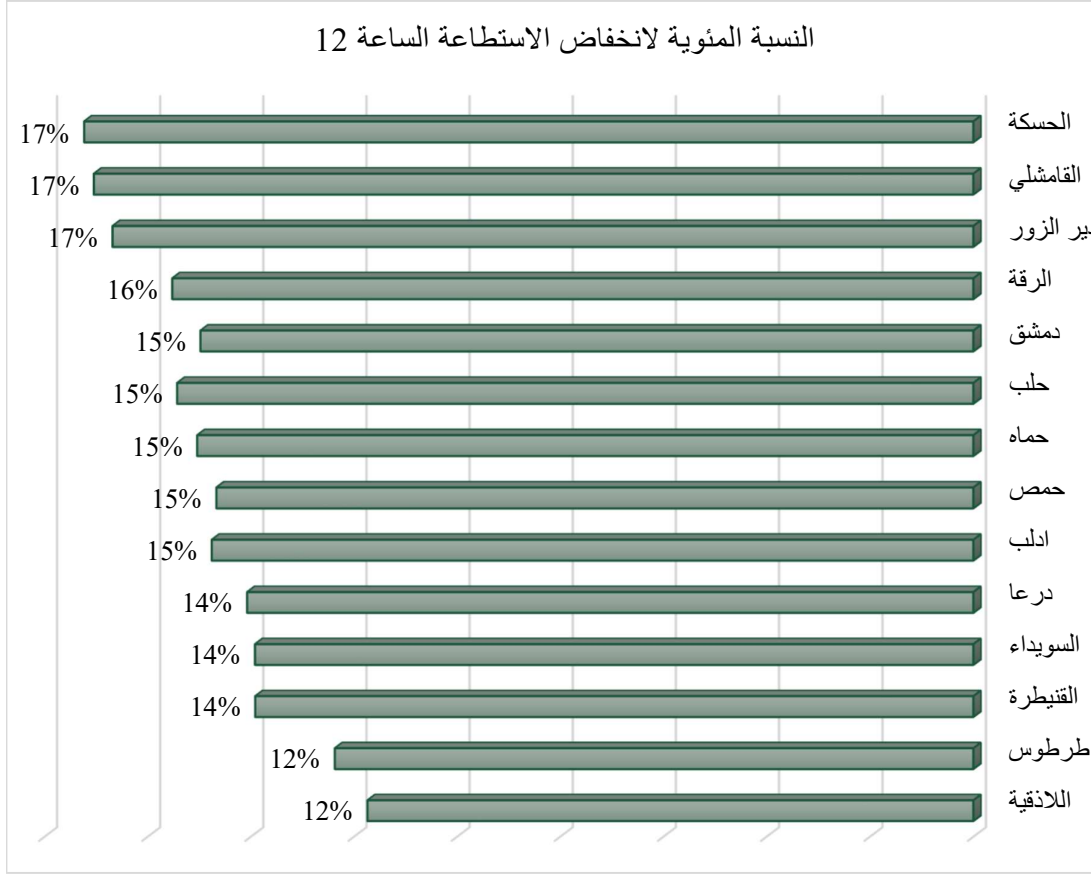
الشكل (22-2) النسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة الكهربائية للمحافظات خلال شهر آب

تم حساب نسبة الإنخفاض بالاستطاعة الكهربائية لكافة المحافظات خلال يوم 14-08-2024 وكانت أقل نسبة انخفاض في المناطق الجنوبية الباردة نسبياً والأكثر انخفاضاً في المحافظات الشرقية.



الشكل (23-2) التمثيل البياني لنسبة انخفاض الاستطاعة الكهربائية لمحافظة السويداء ودير الزور خلال اليوم

ولتوضيح النتائج بشكل أكبر تم حساب النسبة المئوية للانخفاض في الساعة الثانية عشرة ظهراً من نفس اليوم ولكل محافظة على حدى وكانت النتائج كالتالي:



الشكل (24-2) التمثيل البياني للنسبة المئوية لانخفاض الاستطاعة الكهربائية للمحافظات الساعة الثانية عشر من يوم 14-08-2024

الفصل الثالث

تحليل الأداء الحراري للواقط

الكهروضوئية الحرارية (PVT)

المقدمة:

يهدف هذا البحث لتحليل أداء اللواقط الكهروضوئية الحرارية والتعرف على طرق رفع كفاءة الألواح الكهروضوئية التقليدية من خلال تبريدها، وسيتم إجراء تجربة تطبيقية باستخدام لاقط كهروضوئي حراري باستطاعة [W]175 وآخر كهروضوئي تقليدي باستطاعة [W]200 لدراسة تأثير التبريد بالماء المستخدم في النظام الهجين والمقارنة بينهما.

3-1 اللواقط الكهروضوئية الحرارية:

اللواقط الكهروضوئية الحرارية التي يتم اختصارها عادة باسم مجمعات PVT والمعروفة أيضاً باسم المجمعات الشمسية الهجينة، أو أنظمة التوليد المشترك للطاقة الشمسية، أو اللواقط الكهروضوئية الحرارية، وهي تقنيات لتوليد الطاقة بتحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة حرارية وكهربائية قابلة للاستخدام.

تجمع لواقط PVT بين الألواح الكهروضوئية التقليدية والمجمعات الحرارية الشمسية والتي تنقل الحرارة المهدورة غير المستخدمة من الألواح إلى وسيط نقل الحرارة (ماء - هواء - مواد متغيرة الطور PCM).

من خلال الجمع بين النظامين بنظام واحد يمكن الاستفادة من توليد الكهرباء والحرارة (ماء ساخن - هواء ساخن) بنفس الوقت، ويمكن أن تصل هذه التقنيات إلى كفاءة إجمالية أعلى من استخدام أحد النظامين بشكل مستقل عن الآخر. كما توفر هذه التقنية مساحات التركيب الأمر الذي نحتاجه في الأبنية الحديثة وخاصة في الأبراج السكنية.

3-1-1 أنواع اللواقط الكهروضوئية الحرارية:

أجريت أبحاث مهمة في تطوير مجموعة متنوعة من تقنيات PVT منذ السبعينيات، تختلف تقنيات مجمعات PVT في تصميم المجمع الخاص بها، وسيط نقل الحرارة، نوع الخلايا الكهروضوئية المستخدم، شكل المبادل الحراري، وفي تطبيقات استخدامها تبعاً لدرجة الحرارة المطلوبة وبالتالي يمكن تصنيفها [22].

أولاً: وفقاً لوسيط نقل الحرارة:

1- لاقط PVT بوسيط نقل حرارة هواء

2- لاقط PVT بوسيط نقل حرارة من مواد متغيرة الطور PCM

3- لاقط PVT بوسيط نقل حرارة سائل

ثانياً: وفقاً لوجود زجاج ثانوي لتقليل فقد الحرارة:

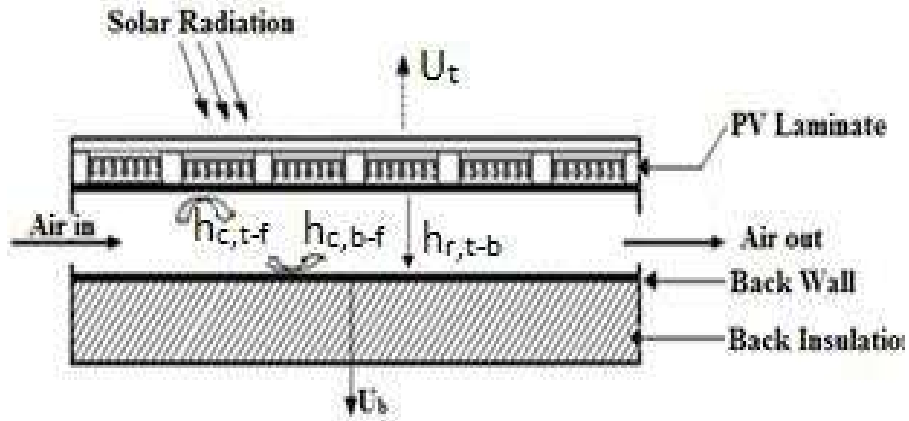
1- لاقط PVT مع غطاء زجاج ثانوي

2- لاقط PVT بدون غطاء زجاج ثانوي

3- الأنظمة الكهروضوئية المركزة الحرارية (CPVT) (مع غطاء تركيز)

3-1-2 اللواقط الكهروضوئية الحرارية بوسيط نقل حرارة هواء:

تعتمد هذه التقنية على تمرير تيار هواء على السطح الخلفي للألواح الكهروضوئية، إما أن يكون تيار حمل طبيعي، أو تيار حمل قسري بواسطة مراوح لدفع الهواء، يمرر الهواء إما داخل مجرى هواء (ديكت) على السطح الخلفي للخلايا الكهروضوئية كما هو موضح بالشكل (1-3)، أو توضع صفيحة رقيقة ضمن هذا المجرى، أو يصمم المجرى مع عدد من الزعانف المعدنية لزيادة سطح التبادل الحراري وبالتالي تبريد بشكل أسرع.



الشكل (1-3) لاقط كهروضوئي حراري ذو سيط نقل حرارة (هواء) [22]

3-1-3 اللواقط الكهروضوئية الحرارية بوسيط نقل حرارة من مواد متغيرة الطور (PCM):

يتم استخدام المواد متغيرة الطور لتبريد الألواح الكهروضوئية عند ارتفاع درجة حرارتها، حيث تقوم هذه المواد بامتصاص الحرارة من الألواح حتى تصل المواد المتغيرة الطور إلى نقطة الانصهار (تحول حراري محسوس)، ومن ثم تبدأ بامتصاص الحرارة حتى تتحول من الحالة الصلبة إلى الحالة السائلة (تحول حراري كامن)، وبالتالي خلال النهار المواد متغيرة الطور تقوم بامتصاص الحرارة الزائدة من الألواح وتتحول إلى الحالة السائلة، وأثناء غياب الشمس الحرارة الممتصة من قبل المواد المتغيرة الطور تنتقل إلى الوسط الخارجي وتعود المواد متغيرة الطور من جديد إلى حالتها الصلبة، كفاءة هذه التقنية تعتبر مرتفعة نسبياً ولكن تكلفتها المادية مرتفعة جداً أيضاً [23].

كما تبرز فعالية المواد متغيرة الطور عند الحاجة إلى تخزين المياه الساخنة وذلك من أجل الحفاظ على درجة حرارة التخزين وكذلك للحفاظ على فرق درجات الحرارة في المبادل ثابتاً لإتمام عملية التبادل الحراري بكفاءة ثابتة.

3-1-4 الأنظمة الكهروضوئية المركزة الحرارية (CPVT)

كان الجمع بين تقنية الخلايا الكهروضوئية (PV) والتكنولوجيا الحرارية الشمسية والمكثفات الشمسية العاكسة أو الانكسارية خياراً هاماً للغاية للمطورين والباحثين منذ أواخر السبعينيات وأوائل الثمانينيات، والنتيجة هي ما يُعرف بالأنظمة الكهروضوئية المركزة الحرارية (CPVT) (concentrated photovoltaic thermal)، وهو مزيج هجين من الأنظمة الكهروضوئية المركزة (CPV) (concentrated photovoltaic)، والأنظمة الكهروضوئية الحرارية (PVT) photovoltaic thermal [23].

تعد الأنظمة الكهروضوئية المركزة الحرارية (CPVT) نوعاً من أنواع تقنيات الطاقة الشمسية المتقدمة، وتعمل هذه الأنظمة عن طريق تجميع الطاقة الشمسية باستخدام مرايا تقوم بتوجيه وتركيز الضوء الشمسي نحو نقطة تركيز حيث يتم توليد الحرارة والكهرباء، تستخدم هذه التقنية عادة في المناطق ذات الإشعاع الشمسي العالي لتوليد طاقة كهربائية بكفاءة عالية.

تتكون الأنظمة الكهروضوئية المركزة (CPVT) من أربعة أجزاء [23]:

1. الخلايا الكهروضوئية (PV) تستخدم لتحويل الضوء الشمسي إلى كهرباء

2. المرايا أو عدسات التركيز: تستخدم لتركيز الضوء الشمسي على ألواح PV لزيادة كفاءة تحويل الطاقة

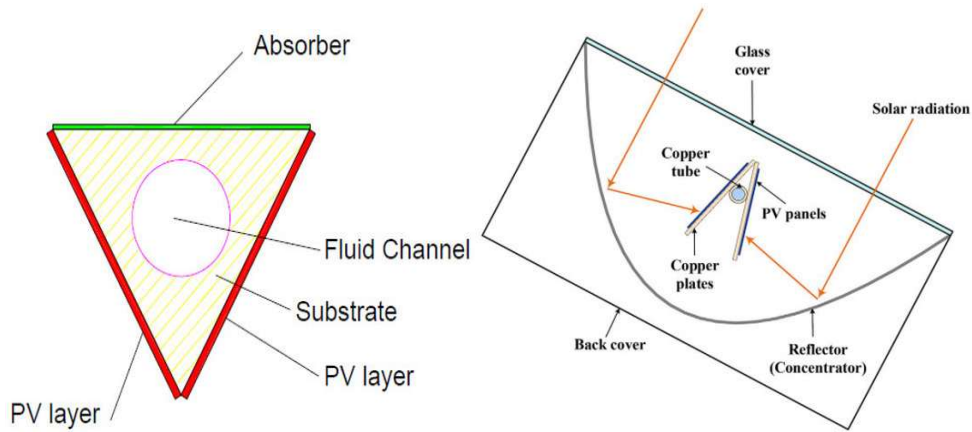
3. وسائط نقل الحرارة: تستخدم لنقل الحرارة المولدة في نظام التركيز إلى مراحل أو أنظمة تحويل حراري لتوليد

الحرارة

4. مولد كهربائي: يستخدم لتحويل الكهرباء المولدة من الخلايا الكهروضوئية إلى طاقة كهربائية قابلة للاستخدام

5. نظام تحكم ورصد: يستخدم لضبط أداء النظام بما في ذلك توجيه المرايا ومتابعة أداء الخلايا الكهروضوئية

هذه الأجزاء تعمل معاً لتحقيق تحويل فعال للطاقة الشمسية إلى كهرباء وحرارة باستخدام تقنية CPVT



الشكل (2-3) الأنظمة الكهروضوئية الحرارية المركزة [23]



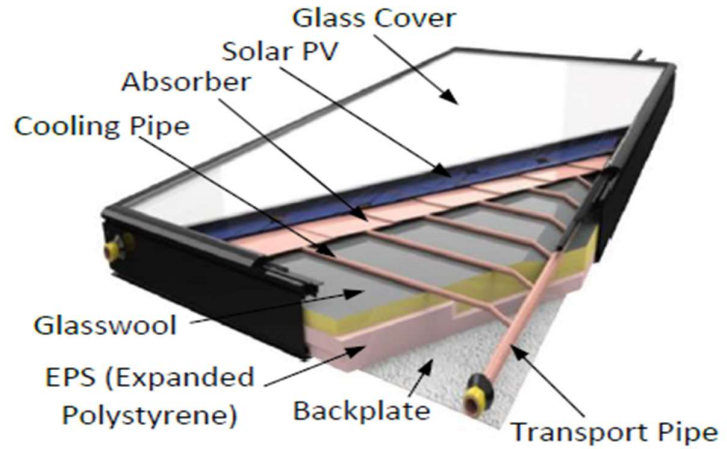
الشكل (3-3) نظام كهروضوئي حراري مركز لفندق في جنوب افريقيا [23]

3-1-5 اللواقط الكهروضوئية الحرارية بوسيط نقل حرارة سائل:

هذه التقنية مشابهة لتقنية تبريد الألواح باستخدام الهواء باختلاف وسيط نقل الحرارة الذي يكون في هذه الحالة هو الماء.

يتم تمرير الماء ضمن أنابيب توضع على السطح الخلفي للألواح الكهروضوئية، يتم امتصاص الحرارة الزائدة من قبل أنابيب المياه ومن ثم تنقل لخزان خارجي يتم الاستفادة منها في تطبيقات أخرى. [25]

- مكونات اللاقط الكهروضوئي الحراري:



الشكل (3-4) لاقط كهروضوئي حراري ذو وسيط نقل حرارة سائل [25]

- 1- الغطاء الزجاجي (glass cover)
- 2- اللوح الكهروضوئي (PV-Panel)
- 3- الطبقة الماصة (absorber-Panel)
- 4- شبكة أنابيب وسيط النقل الحراري (Cooling Pipe)
- 5- طبقة عزل الصوف الزجاجي (Glass wool)
- 6- طبقة عزل البوليسترين (Expanded Polystyrene)
- 7- طبقة الألمنيوم الخلفية (Backplate)

2-3 معادلات التوازن الطاقي للاقط كهروضوئي حراري وسيط ناقل حراري سائل (ماء):

طاقة الدخل [24]:

$$Q_{in} = Q_{sun} \quad (1-3)$$

$$Q_{sun} = G \cdot A_c \cdot \tau_g \cdot \alpha_{cell} \quad (2-3)$$

حيث:

Q_{sun} : الاستطاعة التي يحملها الغطاء الزجاجي واللوح كهروضوئي [W].

G : الإشعاع الشمسي الكلي (W/m^2).

A_c : مساحة سطح الاقط (m^2).

τ_g : معامل نفاذية الغطاء الزجاجي.

α_{cell} : معامل امتصاصية الخلية كهروضوئية.

طاقة الخرج:

يتحول جزء من كمية الإشعاع الشمسي الوارد إلى طاقة كهربائية Q_{ele} بواسطة اللوح كهروضوئي التقليدي والجزء

الآخر إلى حرارة تمتص من قبل الماء (وسيط النقل الحراري) الموجود ضمن أنابيب نقل الحراري بشكل طاقة حرارية

Q_{th} وجزء يتبدد على شكل ضياعات Q_{loss} إلى الوسط الخارجي.

$$Q_{out} = Q_{th} + Q_{ele} + Q_{loss} \quad (3-3)$$

Q_{th} : الاستطاعة الحرارية [w]

Q_{ele} : الاستطاعة الكهربائية [w]

Q_{loss} : ضياعات الحمل والاشعاع [w]

وبالتالي تكتب معادلة التوازن الطاقى بالشكل [24]:

$$Q_{in} = Q_{out} \quad (4-3)$$

$$Q_{sun} = Q_{th} + Q_{ele} + Q_{loss} \quad (5-3)$$

تعطى معادلة خرج الطاقة الكهربائية من اللوح الكهروضوئي كتدفق للطاقة الكهربائية بالشكل [24]:

$$Q_{ele} = Q_{sun} \cdot \eta_{pv} \quad (6-3)$$

η_{pv} : تم استنتاجها من الفصل السابق وهي بالشكل :

$$\eta_T = \eta_{ref} \cdot (1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref})) \quad (7-3)$$

وبالتالي بتعويض (2-3) و(7-3) في (6-3) تصبح علاقة الطاقة الكهربائية بالشكل:

$$Q_{ele} = G \cdot A_c \cdot \tau_g \cdot \alpha_{cell} \cdot \eta_{ref} \cdot (1 - \beta_{ref}(T_c - T_{ref})) \quad (8-3)$$

وتعطى معادلة خرج الطاقة الحرارية من أنابيب النقل الحراري كتدفق للطاقة الحرارية بالشكل [24]:

$$Q_{th} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (9-3)$$

ΔT : الفرق بين درجات حرارة دخول وخروج الماء [K].

\dot{m} : تدفق كتلي لوسيط نقل الحرارة (الماء) [kg/s].

C_p : السعة الحرارية لسائل نقل الحرارة [J/kg.K].

باعتبار العزل السفلي والجوانب للاقط تام أي الضياع الحراري لهم مهمل، والضياعات الحرارية فقط من السطح

الزجاجي للاقط وهي عبارة عن ضياعات بالإشعاع والحمل [24]:

$$Q_{\text{loss}} = Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}} \quad (10-3)$$

حيث:

Q_{conv} : الضياعات الحرارية بالحمل من الغطاء الزجاجي ويعطى بالمعادلة [24]:

$$Q_{\text{conv}} = h_w \cdot (T_g - T_a) \cdot A_c \quad (11-3)$$

h_w : معامل انتقال الحرارة بالحمل من الغطاء الزجاجي إلى المحيط الخارجي [W/m².K].

A_c : مساحة اللاقط [m²].

T_g : درجة حرارة الغطاء الزجاجي [K].

T_a : درجة حرارة المحيط الخارجي [K].

تعطى علاقة h_w للاقط كهروضوئي حراري بالشكل [24]:

$$h_w = 5.7 + 3.8V_w \quad (12-3)$$

V_w : سرعة الرياح في الموقع (Km/h).

Q_{rad} : الضياعات الحرارية بالإشعاع من الغطاء الزجاجي ويعطى بالمعادلة [24]:

$$Q_{\text{rad}} = \sigma \cdot \epsilon_g (T_g^4 - T_{\text{sky}}^4) \cdot A_c \quad (13-3)$$

σ : ثابت بولتزمان [W.m⁻².K⁻⁴] 5.56×10^{-8} .

ε_g : معامل الاشعاع للغطاء الزجاجي.

T_{sky} : درجة حرارة السماء وتعطى بالعلاقة [24]:

$$T_{sky} = 0.0552 \cdot T_a^{1.5} \quad (14-3)$$

بالتعويض بالعلاقة (10-3) نجد:

$$Q_{loss} = Q_{conv} + Q_{rad} \quad (15-3)$$

$$Q_{loss} = \left((5.7 + 3.8V_w) \cdot (T_g - T_a) \cdot A_c \right) + \sigma \cdot \varepsilon_g \left(T_g^4 - 0.0552 \cdot T_a^{1.5^4} \right) \cdot A_c \quad (16-3)$$

بالتعويض في المعادلة (5-3) أصبحت معادلة التوازن الطاقي:

$$Q_{sun} = Q_{th} + Q_{ele} + Q_{loss} \quad (17-3)$$

$$G \cdot A_c \cdot \tau_g \cdot \alpha_{cell} = \quad (18-3)$$

$$\begin{aligned} & \dot{m} \cdot Cp \cdot (T_{out} - T_{in}) \dots + G \cdot A_c \cdot \tau_g \cdot \alpha_{cell} \cdot \eta_{ref} \cdot \left(1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref}) \right) \dots \\ & + \left((5.7 + 3.8V_w) \cdot (T_g - T_a) \cdot A_c \right) \dots \\ & + \sigma \cdot \varepsilon_g \left(T_g^4 - (0.0552 \cdot T_a^{1.5})^4 \right) \cdot A_c \end{aligned}$$

استنتاج علاقة الطاقة الحرارية المفيدة بتأثير درجة حرارة سطح اللوح الكهروضوئي:

من العلاقة رقم (5-3) نجد:

$$Q_{th} = Q_{sun} - (Q_{ele} + Q_{loss}) \quad (19-3)$$

وبالتالي:

$$\begin{aligned}
Q_{th} = G \cdot A_c \cdot \tau_g \cdot \alpha_{cell} \dots & \quad (20-3) \\
- \left[\left(G \cdot A_c \cdot \tau_g \cdot \alpha_{cell} \cdot \eta_{ref} \cdot \left(1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref}) \right) \right) \right] \dots & \\
+ \left((5.7 + 3.8V_w) \cdot (T_g - T_a) \cdot A_c \right) \dots & \\
+ \left(\sigma \cdot \varepsilon_g \left(T_g^4 - (0.0552 \cdot T_a^{1.5})^4 \right) \cdot A_c \right) & \quad]
\end{aligned}$$

3-3 توصيف التجربة العملية:

تم إجراء التجربة العملية باستخدام لاقط كهروضوئي حراري ولوح آخر كهروضوئي فقط (تقليدي) باستطاعات متقاربة ونوع خلية واحد (monocrystalline) وعدد الخلايا نفسه وتم إجراء عدة اختبارات على هذه التجربة وفقاً للمعطيات التالية.

3-3-1 تحديد مكان التركيب والاتجاه وزاوية الميلان:

تم تركيب التجربة على سطح مبنى في مدينة دمشق حيث وتم توجيهه باتجاه الجنوب وبزاوية ميل 30 درجة للاستفادة القصوى من الإشعاع الشمسي طوال اليوم حيث تم تثبيت الجهازين على قاعدة معدنية واحدة وتم تثبيت أسطوانة الماء خلفهما كما في الشكل (3-5):



الشكل (3-5) التجربة العملية (اللاقط الكهروضوئي-اللاقط الكهروضوئي الحراري - اسطوانة الماء)

3-3-2 شروط عمل التجربة:

- 1- الفترة الزمنية: مدة الاشعاع الشمسي من الشروق الى الغروب.
- 2- درجة حرارة وإشعاع شمسي متغيرين.
- 3- إهمال تأثير الرطوبة وسرعة الرياح لتأثيرهما الضئيل في فصل الصيف مقارنة بتأثير درجة الحرارة.
- 4- تدفق الماء غير مقاس وسيكون بفعل الثيرموسيفون الحراري.

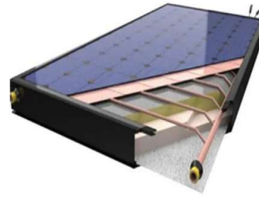
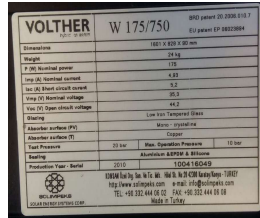
3-3-3 مستلزمات التجربة:

لوح كهروضوئي



الشكل (3-6) اللوح الكهروضوئي المستخدم في التجربة

لوح كهروضوئي حراري:



الشكل (3-7) اللوح الكهروضوئي الحراري المستخدم في التجربة

جدول (1-3) المواصفات التقنية للوح الكهروضوئي التقليدي

تيار دارة القصر I_{sc} : 5.91 [A]	الطراز: SL200-24M	الماركة: SOLAR WORLD
جهد نقطة الاستطاعة العظمى: 37.2 [V]	جهد الدارة المفتوحة V_{oc} : 45.1 [V]	نوع الخلايا: monocrystalline
نقطة الاستطاعة العظمى P_{mpp1} : 280.136[W]	تيار نقطة الاستطاعة العظمى I_{mp} : 5.38 [A]	الاستطاعة: 200[W]

جدول (2-3) المواصفات التقنية للوح الكهروضوئي الحراري

تيار نقطة الاستطاعة العظمى I_{mp} : 4.93 [A]	السطح الماص الحراري: نحاس	الماركة: SOLIMPEKS
نقطة الاستطاعة العظمى P_{mpp2} : 174.029[W]	جهد الدارة المفتوحة V_{oc} : 44.2 [V]	الاستطاعة: 175[W]
جهد نقطة الاستطاعة العظمى V_{mp} : 35.3 [V]	تيار دارة القصر I_{sc} : 5.2 [A]	نوع الخلايا: monocrystalline

أسطوانة ماء مع خزان تمدد:

مصنوعة من الحديد المغلفن سماكة 3 ملم معزولة بالفوم عالي الكثافة 5سم ومغلقة بالحديد المطلي حرارياً سعتها [L] 100 مزودة بفتحات تعبئة وتفرغ وتهوية.



الشكل (8-3) اسطوانة الماء مع فاز التمدد

حساسات درجة حرارة الماء :

العدد: 3 (درجة حرارة دخول الماء للاقط - درجة حرارة خروج الماء من اللاقط- درجة حرارة الماء داخل الاسطوانة)



الشكل (3-9) حساسات درجة الحرارة

جهاز قياس الاستطاعة:

مزود بشاشة لإظهار البارامترات التالية (استطاعة - جهد نقطة الاستطاعة العظمى - تيار نقطة الاستطاعة العظمى - جهد الدارة المفتوحة).



الشكل (3-10) جهاز قياس الاستطاعة

جهاز قياس درجة حرارة ماء الدخول والخروج: (SR208C solar controller):

جهاز قياس موصول مع حساسات درجة الحرارة ومزود بشاشة لإظهار درجة حرارة الماء داخل الأسطوانة، درجة حرارة الماء الداخل للاقط، درجة حرارة الماء الخارج من اللاقط.



الشكل (3-11) جهاز قياس درجة حرارة الماء

جهاز قياس درجة حرارة السطوح بالأشعة تحت الحمراء:



الشكل (3-12) جهاز قياس درجة حرارة السطوح

جهاز قياس درجة الحرارة الخارجية:

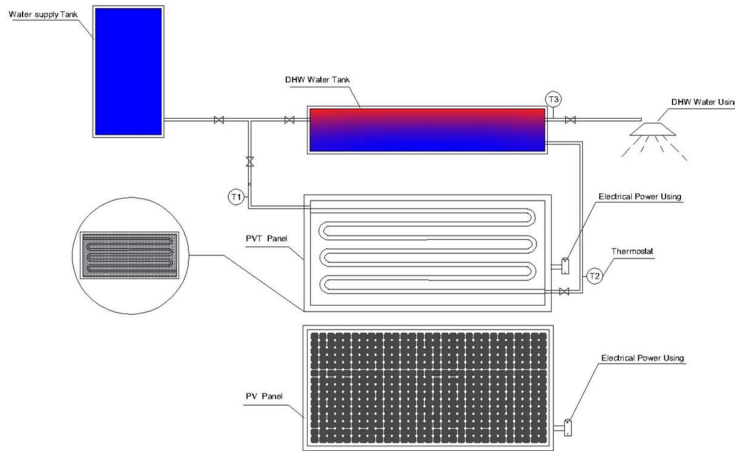


الشكل (3-13) جهاز قياس درجة حرارة الجو الخارجية

3-4 الاختبارات التي تم إجراؤها

تم إجراء اختبار تبريد للاقط الكهروضوئي الحراري واختبار مقارنة بين أداء اللاقط الكهروضوئي الحراري واللوح الكهروضوئي التقليدي وفقاً لشروط العمل المذكورة سابقاً.

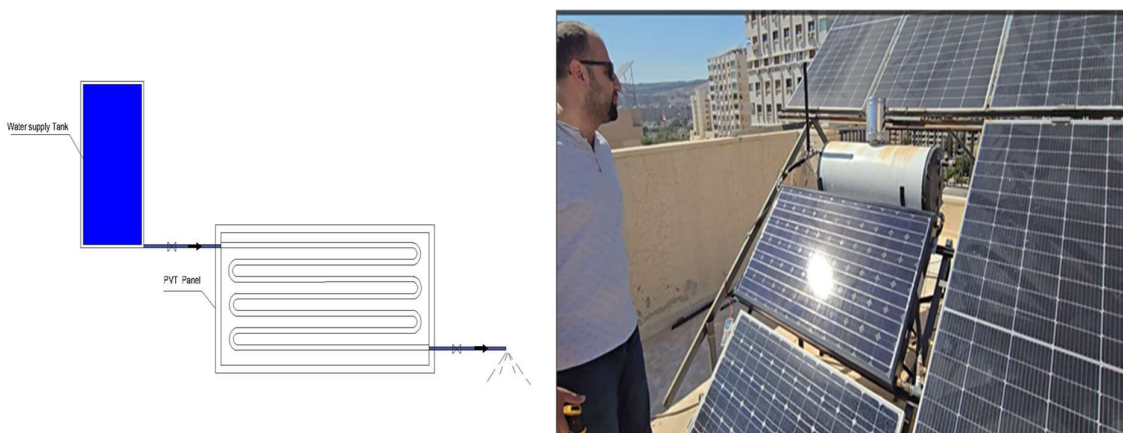
حيث تم تركيب منظومة الاختبار لفترة زمنية طويلة لأكثر من أربعة أشهر خلال فصل الصيف (من شهر أيار إلى الشهر أيلول)



الشكل (3-14) صورة أثناء القيام بالاختبار ومخطط توضيحي لمنصة الاختبار

3-4-1 اختبار التبريد

من خلال تفريغ اللاقط والاسطوانة من الماء وبالتالي تعرض اللاقط للإشعاع الشمسي دون وجود عامل مبرد (الماء - وسيط نقل الحرارة) حتى الساعة الثانية عشرة ظهراً حيث تكون درجة حرارة سطح اللاقط وصلت لأعلى قيمها، ثم قمنا بعملية تبريد سريع للاقط من خلال تمرير مياه التغذية الرئيسية ضمن المبادل الحراري للاقط، وأثناء عملية التبريد قمنا بقياس قيم مختلفة لاستطاعة اللوح تبعاً لتغير درجة حرارة السطح وذلك لمدة ربع ساعة.



الشكل (3-15) صورة أثناء القيام بالاختبار ومخطط توضيحي لدارة تجربة التبريد

3-4-2 معادلات اختبار التبريد

1- حساب المردود الكهربائي للاقط الكهروضوئي الحراري عند قيم الاستطاعة ودرجات الحرارة

- حساب المردود الكهربائي η_{el} من العلاقة التالية [21]:

$$\eta_{el} = \frac{P_{PVT}}{G \cdot A} \quad (4-3)$$

بدلالة:

- P_{PVT} : استطاعة اللاقط (المقاسة في التجربة) [W].
- G : الإشعاع الشمسي (باستخدام بيانات D-VIEW Syria لليوم الذي قمنا فيه بالاختبار) [W/m^2].

• A : مساحة سطح اللاقط المعرض للاشعاع (من النشرة الفنية المقدمة من الشركة الصانعة للاقط) [m²].

2- حساب النسبة المئوية لتغير استطاعة اللاقط الكهروضوئي الحراري الكهربائية باختلاف درجة حرارة سطح

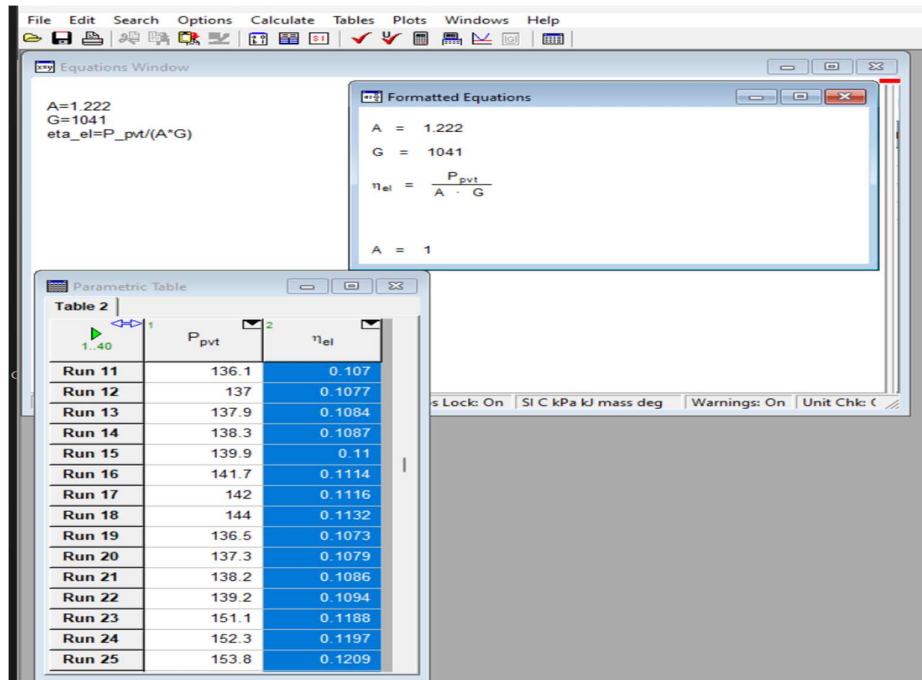
اللاقط وفقاً للمعادلة التالية [22]:

$$\Delta_p = \frac{P_{\text{end}} - P_{\text{start}}}{P_{\text{start}}} \quad (5-3)$$

P_{start} : قيمة الاستطاعة الكهربائية للاقط الكهروضوئي الحراري قبل التبريد [W].

P_{end} : قيمة الاستطاعة الكهربائية للاقط الكهروضوئي الحراري بعد التبريد [W].

3-4-3 نتائج اختبار التبريد



الشكل (3-16) حل المعادلات عن طريق برنامج ESS لحساب المرود الكهربائي

جدول (3-3) قراءات اختبار التبريد

2024-07-30										
9	8	7	6	5	4	3	2	1	-	رقم القراءة
51.1	52	55.2	56.9	58.9	60.8	61	61.1	72.4	Tpvt	درجة حرارة سطح اللاقط [C°]
134.8	133.8	133.5	132.2	130.2	129.8	129.5	128.9	125	Ppvt	الاستطاعة الكهربائية لللاقط [W]
11%	11%	10%	10%	10%	10%	10%	%10	10%	η_{el}	المردود الكهربائي

$\Delta P=30\%$										
النسبة المئوية لإرتفاع الاستطاعة بانخفاض درجة حرارة سطح اللاقط										
18	17	16	15	14	13	12	11	10	-	رقم القراءة
31.5	32	32.9	33.8	44.3	44.5	45	45.7	46.1	Tpvt	درجة حرارة سطح اللاقط [C°]
144	142	141.7	139.9	138.3	137.9	137	136.1	135.2	Ppvt	الاستطاعة الكهربائية لللاقط [W]
11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	11%	η_{el}	المردود الكهربائي

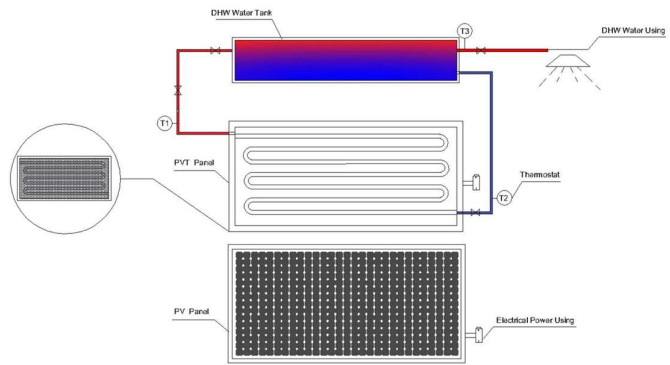
28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	-	رقم القراءة
16.3	17	22	23.2	24.9	26.3	27.8	28	28.9	30	Tpvt	درجة حرارة سطح اللاقط [C°]
162.2	160.8	157	153.8	152.3	151.1	139.2	138.2	137.3	136.5	Ppvt	الاستطاعة الكهربائية لللاقط [W]
13%	13%	12%	12%	12%	12%	11%	11%	11%	11%	η_{el}	المردود الكهربائي

لوحظ أنه في بداية التجربة كانت درجة حرارة سطح اللاقط الكهروضوئي الحراري $T_{pvt}=72.4 [C^{\circ}]$ ومردوده الكهربائي كان $\eta_{el} = 9\%$ وفي نهاية التجربة كانت درجة حرارة سطح اللاقط الكهروضوئي الحراري $T_{pvt}=16.3 [C^{\circ}]$ والمردود الكهربائي $\eta_{el} = 13\%$ وبالتالي ارتفع المردود الكهربائي بانخفاض درجة حرارة سطح اللاقط بمقدار 4% خلال ربع ساعة.

3-4-4 اختبار المقارنة

وهو اختبار للمقارنة بين أداء اللاقط الكهروضوئي الحراري الخاضع للتبريد واللوح الكهروضوئي التقليدي من خلال تعرضهما لنفس الشروط الخارجية من إشعاع شمسي ودرجة حرارة خارجية ورطوبة الخ، ومقارنة الطاقة المستفادة من كل منهما.

حيث تم تفرغ اللاقط الكهروضوئي الحراري واسطوانة الماء في الصباح الباكر قبل البدء بالتجربة ومن ثم تعبئتهما من مياه التغذية الرئيسية وتم أخذ القراءات على مدار اليوم دون أي استهلاك للمياه لنتمكن من حساب كمية الطاقة الحرارية التي ستستخلصها كمية المياه خلال اليوم.



الشكل (3-17) صورة أثناء القيام بالاختبار ومخطط توضيحي لدارة تجربة المقارنة

3-4-5 معادلات اختبار المقارنة

1- حساب الطاقة الحرارية المستفاد من المعادلة:

$$Q_{th} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (6-3)$$

حيث:

Q_{th} : الطاقة الحرارية المكتسبة [J]

ΔT : الفرق بين درجات حرارة دخول وخروج الماء [C°].

m : كمية الماء [kg].

C_p : السعة الحرارية لسائل نقل الحرارة [J/kg.C°].

2- حساب النسبة المئوية لتغير الاستطاعة الكهربائية بين اللاقط الكهروضوئي الحراري واللوح الكهربائي:

$$\Delta_p = \frac{[P_{pvt} - P_{pv}]}{P_{pv}} \quad (24-3)$$

P_{pvt} : الاستطاعة الكهربائية للاقط الكهروضوئي الحراري [W].

P_{pv} : الاستطاعة الكهربائية للاقط الكهروضوئي التقليدي [W].

3- رسم الخط البياني للاستطاعة الكهربائية لكلا اللاقطين وحساب الاستطاعة من حساب المساحة تحت المنحني

باستخدام برنامج EXEL.

3-4-6 نتائج اختبار المقارنة

جدول (3-4) جدول بيانات اختبار المقارنة

12/8/2024									
الوقت	درجة الحرارة الخارجية [C°]	درجة حرارة خروج الماء من اللاقط [C°]	درجة حرارة دخول الماء إلى اللاقط [C°]	درجة حرارة الاسطوانة [C°]	درجة حرارة سطح اللوح الكهروضوئي التقليدي [C°]	استطاعة اللوح الكهروضوئي التقليدي [W]	درجة حرارة سطح اللاقط الكهروضوئي الحراري [C°]	استطاعة اللاقط الكهروضوئي الحراري [W]	النسبة المئوية لتغير الاستطاعة الكهربائية
06:00	27	40.5	30.7	21.4	15.6	32.5	15	35.9	10%
07:00	27.8	41.2	31.3	25.6	26.5	37.6	21.2	41.7	11%
08:00	28.2	42.5	32.6	26.8	38.5	79.1	32	89.4	13%
09:00	30.3	44.2	39.4	29.3	40.4	91.9	33.8	101.6	11%
10:00	32	45.1	40.7	30.3	50.1	110.7	40.2	123.6	12%
11:00	34	45.2	41.1	35	51.4	111.2	42.5	131.7	18%
12:00	35.9	46.1	42.5	36	53.3	112.1	45.9	143.9	28%
13:00	36	46.6	42.7	36.6	50.1	111.6	42	129.2	16%
14:00	36.2	47	43	37.5	35.2	110	34.6	124.3	13%
15:00	36	47.2	43.3	38.1	32	98.3	30	108.7	11%
16:00	34	47.8	43.6	41.3	30.3	65	28.3	72.3	11%
17:00	33.2	48	44	41.3	26.7	60.1	24.4	65.1	8%
18:00	30	48.3	44.2	41.6	21.2	47.4	20	51.3	8%

- نلاحظ أن الفرق الأكبر في تغير الاستطاعة كان عند الساعة الثانية عشر ظهراً عند درجة حرارة خارجية

35.9[C°] حيث ارتفعت استطاعة اللاقط الكهروضوئي الحراري ذو الاستطاعة الاسمية [W] 175 بنسبة 28%

عن استطاعة اللوح الكهروضوئي ذو الاستطاعة الاسمية [W] 200 عند نفس الشروط.

- تم حساب كمية الطاقة الحرارية المستفادة من الماء الساخن خلال اليوم بدلالة:

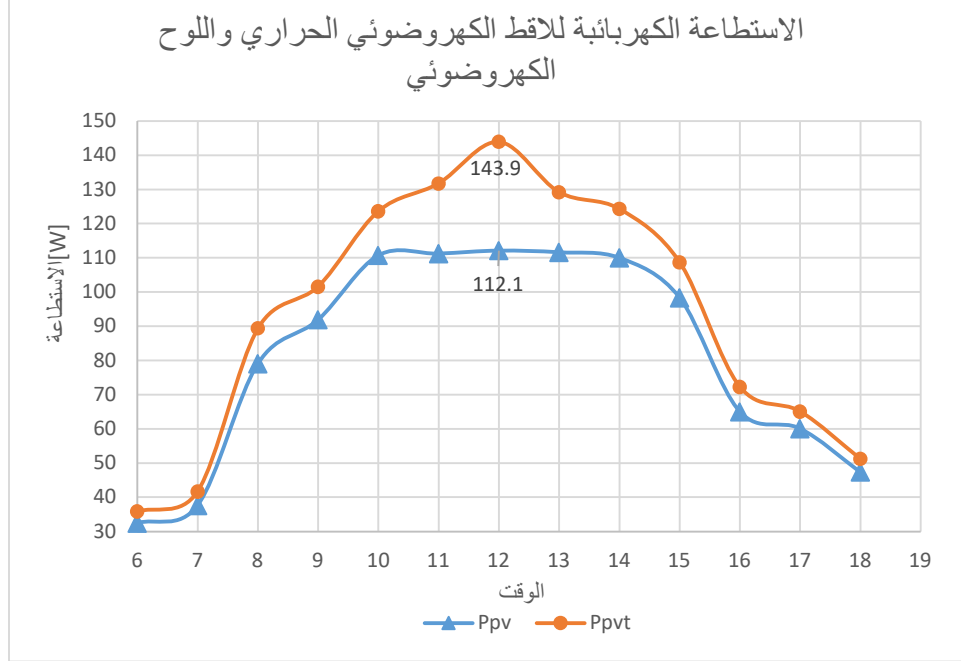
فرق درجة حرارة الماء ضمن الأسطوانة ذات السعة [Lit] 100 من بداية اليوم إلى نهاية التجربة حيث بلغت درجة

حرارة الماء عندها ضمن الأسطوانة [C°] 41.6.

$$Q_{th} = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q_{th} = \frac{100.4180 \cdot (41.6 - 21.4)}{3600} = 2345.4 \text{ [Wh - day]}$$

4- رسم الخط البياني للاستطاعة الكهربائية لكلا اللاقطين وحساب المساحة تحت المنحي باستخدام برنامج EXEL.



الشكل (18-3) الاستطاعة الكهربائية للاقط الكهروضوئي الحراري واللوحة الكهروضوئي

جدول (5-3) نتائج اختبار المقارنة لحساب الطاقة الكهربائية

1027.55 [Wh]	الطاقة الكهربائية الكلية المستخلصة من اللوحة الكهروضوئي (المساحة تحت منحي PV)
1175.1 [Wh]	الطاقة الكهربائية الكلية المستخلصة من اللاقط الكهروضوئي الحراري (المساحة تحت منحي PVT)
14%	النسبة المئوية للفرق بين المساحتين

نلاحظ أن الطاقة الكهربائية المستخلصة من اللاقط الكهروضوئي الحراري خلال اليوم كانت 1175.1 [Wh] والطاقة الكهربائية المستخلصة من اللوح الكهروضوئي التقليدي كانت 1027.55 [Wh] والنسبة المئوية لارتفاع الاستطاعة الكهربائية هي 14%.

وبالتالي الطاقة الإجمالية المستفاد من اللوح الكهروضوئي هي:

$$1027.55 \text{ [Wh]} = \text{الطاقة الكهربائية للوح} = \text{الطاقة الإجمالية المستفاد من اللوح الكهروضوئي PV}$$

والطاقة الإجمالية المستفاد من اللاقط الكهروضوئي الحراري هي:

$$\begin{aligned} & \text{كمية الطاقة الحرارية المستفاد من الماء الساخن} + \text{الطاقة الكهربائية للوح} = \text{الطاقة الإجمالية المستفاد من اللاقط الكهروضوئي الحراري PVT} \\ & 2345.4 \text{ [Wh]} + 1175.1 \text{ [Wh]} = \\ & 3520.5 \text{ [Wh]} \end{aligned}$$

النتائج والتوصيات

تحليل ومناقشة النتائج:

1- أجريت في هذا البحث محاكاة عددية لمعادلة الاستطاعة الكهربائية للخلايا الكهروضوئية التقليدية بتأثير درجة الحرارة لكافة المحافظات السورية خلال عام كامل حيث لاحظنا في هذه المحاكاة اختلاف قيمة الاستطاعة دون تأثير درجة الحرارة عن الاستطاعة بتأثير درجة الحرارة بشكل واضح في ساعات الذروة الشمسية الساعة 12 ظهراً حيث انخفضت الاستطاعة في محافظة دير الزور من $476W$ الى $396.6 W$ أي بنسبة 17% وفي محافظة السويداء من $536.7W$ إلى $462W$ أي بنسبة 14% خلال اليوم، وهذا يؤكد أهمية تأثير درجة الحرارة على مردود الألواح الكهروضوئية وأنه يجب أخذه بعين الاعتبار في الدراسات النظرية والتطبيقية.

2- توضح المحاكاة العددية بأن انخفاض المردود كان بالحدود الدنيا في المحافظات التي تتمتع بطقس بارد نسبياً أي في المناطق الساحلية كاللاذقية وطرطوس والمناطق الجبلية كالسويداء والقنيطرة ودرعا، والانخفاض بالمردود بنسب أعلى كان في المحافظات التي تتمتع بطقس حار نسبياً كالحسكة والقامشلي ودير الزور والتي تتمتع بقيمة إشعاع شمسي عالي وهذا يناهض الاعتقاد السائد بأن المناطق الداخلية والصحراوية ذات الإشعاع الشمسي العالي (والحرارة العالية) هي الأنسب للاستفادة من طاقة الألواح الكهروضوئية وهذا الاعتقاد تم اثبات خطأه.

3- تبين بعد تحليل عمل اللواقط الكهروضوئية الحرارية ودراسة تأثير درجة حرارة سطح الخلايا الكهروضوئية على أداءها أن هذا التأثير يكون واضحاً في ساعات الذروة الشمسية (منتصف النهار). حيث كان الفرق الأكبر في تغير الاستطاعة باختبار المقارنة الساعة الثانية عشر ظهراً عند درجة حرارة خارجية $35.9[C^{\circ}]$ حيث ارتفعت استطاعة اللاقط الكهروضوئي الحراري ذو الاستطاعة الاسمية $175[W]$ بنسبة **28%** عن استطاعة اللوح الكهروضوئي ذو الاستطاعة الاسمية $200[W]$ عند نفس الشروط الخارجية.

4- تبريد الألواح الكهروضوئية باستخدام الماء (تقنية اللواقط الكهروضوئية الحرارية PVT) يزيد من مردود

الألواح الكهروضوئية حيث ارتفع المردود الكهربائي للاقط الكهروضوئي الحراري عند القيام باختبار التبريد

السريع لمدة خمسة عشر دقيقة من 9% إلى 13% أي ارتفع بنسبة 4%

وارتفعت الاستطاعة الكهربائية للاقط خلال هذه المدة أي من بداية الاختبار إلى نهايته بنسبة **30%**.

حيث كانت الاستطاعة الكهربائية للاقط الكهروضوئي الحراري [W] 125 عندما وصلت درجة حرارة سطح

اللاقط إلى [C°] 72.4 وعندما انخفضت درجة حرارة سطح اللاقط أثناء اختبار التبريد إلى [C°] 16.3

ارتفعت استطاعة اللاقط الكهروضوئي الحراري إلى [W] 162.2 .

5- تم في هذا البحث إجراء عدة اختبارات خلال فترات زمنية مختلفة وأشهر مختلفة ولكن تم عرض النتائج الأكثر

وضوحاً فقط.

6- ما توصلنا إليه في التجربة التطبيقية يتطابق مع نتائج الدراسة النظرية وهذا بدوره يؤكد على أهمية دراسة

تأثير درجة حرارة سطح الخلية على أدائها والعمل على تطوير التقنيات التي تصب في هذا المجال.

7- استخدام تقنية اللواقط الكهروضوئية الحرارية ذو فائدة أكبر عندما تكون المساحة المتاحة صغيرة حيث

يمكن الاستفادة من الطاقة الكهربائية للاقط بالإضافة لكمية الطاقة الحرارية المستخلصة من الماء

الساخن في جهاز واحد.

حيث كان إجمالي الطاقة المستفادة من اللوح الكهروضوئي التقليدي ذو الاستطاعة الاسمية [W] 200 في يوم

2024-08-12 هي [Wh] 1027.55 .

بينما إجمالي الطاقة المستفادة من اللاقط الكهروضوئي الحراري ذو الاستطاعة الاسمية [W] 175 هي 3520.5

[Wh] (طاقة كهربائية [Wh] 1175.1 + كمية طاقة حرارية [Wh] 2345.4) .

التوصيات:

- 1- أخذ تأثير درجة الحرارة بعين الاعتبار عند دراسة أي تقنيات جديدة للتطوير في مجال الخلايا الكهروضوئية.
- 2- استخدام لاقط كهروضوئي حراري طراز حديث للحصول على نتائج أفضل ومقارنتها بالنتائج التي حصلنا عليها.
- 3- التركيز على دراسة تقنيات مختلفة للواقط الكهروضوئية الحرارية مثل:
 - استخدام المركبات الشمسية حيث يظهر تأثير درجة الحرارة فيها بشكل أوضح.
 - استخدام تقنية المواد متغيرة الطور في اللواقط الكهروضوئية الحرارية حيث تعمل على الحفاظ على درجة حرارة التخزين للمياه، وكذلك تحافظ على فرق درجة الحرارة في المبادل ثابتة لإتمام عملية التبادل الحراري بكفاءة ثابتة.
- 4- تحفيز الصناعة الوطنية لمثل هذه التقنيات عن طريق الدعم المادي وتأمين مواد التصنيع لتشجيع الصناعة المحلية.

المراجع العملية:

1. علي ، د. عثمان ذكي مبارك .(2009). دراسة تأثير العوامل المناخية في اختيار نوعية

الألواح. مجلة العلوم الإنسانية والتكنولوجيا: المجلد رقم (14) العدد (2).

2. علي ، د. عثمان ذكي مبارك . (2020). تحسين عمل الخلايا الشمسية السيلكونية. مجلة

العلوم الإنسانية والطبيعية.

3. حمودي، علي. (2014). دراسة تأثير تبريد الألواح الكهروضوئية بالماء على مردودها

وطاقتها الكهربائية المتولدة. مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية. المجلد (36)

العدد (2).

4. يسير، لؤي. (2015). دراسة تأثير تبريد الخلية الفوتوفولتية على رفع كفاءة أنظمة

الهيدروجين الشمسي. مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية. المجلد (37) العدد

(1).

5. محمد، الدكتور المهندس كاميليا يوسف. الطاقة الكهروضوئية.

6. بلال، نورا أكرم. (2021). التأثير الكهروضوئي وتوليد الطاقة الكهربائية. جامعة الموصل

قسم الطاقات الجديدة والمتجددة.

7. Abdelmalek ، Baamar ، Abdlehakim ، Eldjouzi .(2018-2017). دراسة تأثير

الإشعاع الكوني على تدهور الخلايا الكهروضوئية. جامعة أدرار -الجزائر .

8. العربي، زينب أولاد. قريدة، سهام. (2020-2019). تأثير التطعيم الثنائي بالفلور

والكوبالت على الخصائص البنيوية والضوئية والكهربائية للأغشية الرقيقة لأكسيد الزنك

بتقنية رقاد الانحلال الحراري.

9. فيزياء. أشباه الموصلات. الفصل الثاني.

10. صالح، فراس فاضل. (2022). تأثير الإشعاع الشمسي على أداء الخلية الشمسية.

11. النسمة، أسامة. العصيري، رغد. بلال، محمد بهاء. ديب، نور علي. تحسين أداء الألواح

الكهروضوئية تطبيق مفهوم التكثيف الشمسي ونظام التعقب. (نموذج مخبري) جامعة

دمشق- 2016-2017.

12. حمزة، علي. (2008-2009). هندسة النظم الكهروضوئية تحليل وتصميم. جامعة

دمشق. 520.

13- Yousef, Haytham. (2019). Experimental study of design a hybrid photovoltaic thermal collector(PVT -collector) for a domestic use (Master of Science in Renewable Energy & Sustainability, Palestine Polytechnic University).

14- Thong, Li Wah. (2016). Analysis of Photovoltaic Panel Temperature Effects on its Efficiency (Faculty of Engineering and Technology, Multimedia University).

- 15- Abdulmunim, Sule. (2020), **Effect of Temperature on the Performance of Photovoltaic Module**. International Journal of Innovative Science and Research Technology, 1:9.(State College of Basic and Remedial Studies, Sokoto Nigeria).
- 16- Odeh, Saad. M.Behnia.(2009). **Improving photovoltaic module efficiency using water cooling**.
- 17- Abdul, Saeed. Ganiyu. (2020). **Investigatigation of solar photovoltaic – thermal (PVT) and solar photovoltaic (PV) performance**:A Case study in Gana.
- 18- Qaisar, Saeed mian. **Avehicle movement based self organiz solar powered street lighting**.
- 19- Julian, Si. (2017). **Solar energy physics**.
- 20- (2012). **Fundamental properties of solar cells**. university of Toledo.
- 21-Sanka, Chandrasiri. (2017). **Tempertur effect on solar photovoltaic power generation** . University Of Moratuwa.
- 22- Shi, Jimeng. (2011). **Computational simulation and analysis of major control parameters of time-dependent PV/T collectors**.

- 23- Sharf, Omar.Z. (2015). **Conceptual design and analysis of concentrated photovoltaic (CPVT).** United Arab Emirates.
- 24- Yan, Yan. Wa, Qiuxuan. (2022). **Numerical and experimental investigation of photovoltaic / thermal systems: Parameter analysis and determination of optimum flow.**
- 25- Obalaneg, M. Mahmoudi, Y. (2024). **Performance assessment of a hybrid photovoltaic – thermal and heat pump system for solar heating and electricity.**
- 26- <https://www.nagwa.com/or/explainers/128152463062/>
- 27- https://youtu.be/YSRs3PuYT_k?si=qohxChzhHMxv-zb0

Damascus University

Faculty of Mechanical & Electrical Engineering

Department of General Mechanical Engineering

Specialization in Renewable Energy



**A Study of the solar cell temperature Influence in its performance
and work analysis of a Hybrid Solar Collector Photovoltaic
Thermal (PVT)**

**A study prepared for obtaining a Master's Degree in
renewable energy**

Prepared by

Eng.Mhd.Bassam Sakbani

Supervised by

Prof.Dr.Eng Wajih Mhd.Khair Nimeh

2024-2025

Academic year