

نمذجة ومحاكاة تأثير درجة الحرارة والإشعاع الشمسي على أداء وحدات SunPower باستخدام MATLAB/Simulink

عبدالباسط نور الدين¹، سالم فرج العربي²، نوري المقرحي³

كلية التقنية الهندسية- جنزور¹، المعهد العالي للتقنيات الهندسية- بني وليد²، كلية تقنية الطيران المدني والأرصاد الجوية- اسبيعة³

الملخص

الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقة المتجددة التي تساهم بفاعلية في تلبية الطلب العالمي المتزايد على الكهرباء مع تقليل الانبعاثات الكربونية. ورغم الأداء العالي لهذه الوحدات، فإن تحليلاً كمياً دقيقاً لتأثير العوامل البيئية المتغيرة عليها باستخدام النمذجة الديناميكية يبقى أمراً ضرورياً لتحسين أدائها في الظروف الحقلية، ولا سيما شدة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، الأمر الذي ينعكس على كفاءة التحويل الكهربائي للمنظومة. تهدف هذه الدراسة إلى نمذجة ومحاكاة الأداء الكهربائي لوحدة كهروضوئية عالية الكفاءة من نوع SunPower SPR-415E-WHT باستخدام بيئة MATLAB/Simulink، وذلك لتحليل تأثير التغيرات البيئية على خصائص التيار-الجهد (I-V) والقدرة-الجهد (P-V) تم تنفيذ المحاكاة ضمن مدى إشعاعي يتراوح بين 1000-200 w/m²، ودرجات حرارة تتراوح بين 15-35 °C. أظهرت النتائج أن زيادة شدة الإشعاع تؤدي إلى ارتفاع كبير في القدرة العظمى، حيث ازدادت من 18.7 w عند 200 w/m² إلى 424.8 w عند 1000 w/m² بنسبة نمو تقارب 2171%، في حين يتسبب ارتفاع درجة الحرارة في انخفاض الجهد وبالتالي القدرة، حيث انخفضت القدرة العظمى بنسبة 5.27% عند زيادة درجة الحرارة من 15°C إلى 35°C. تبرز هذه النتائج بشكل قاطع الحاجة الملحة للتحكم الحراري وتطبيق استراتيجيات فعالة لتعزيز الأداء، بما في ذلك دمج خوارزميات تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT) في الأنظمة الكهروضوئية، خصوصاً في المناطق ذات المناخ الحار وارتفاع مستويات الإشعاع الشمسي.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية؛ MATLAB/Simulink؛ الإشعاع الشمسي؛ درجة الحرارة؛ الأداء الكهروضوئي؛ النمذجة؛ المحاكاة

1. المقدمة

تمثل الطاقة الشمسية أحد أبرز مصادر الطاقة المتجددة التي تساهم بفاعلية في دعم التحول نحو أنظمة طاقة منخفضة الانبعاثات. ومع ذلك، فإن الأداء التشغيلي للأنظمة الكهروضوئية يتأثر بدرجة كبيرة بمتغيرات الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة. وقد أثبتت نماذج المحاكاة المعتمدة MATLAB/Simulink على أن زيادة الإشعاع تؤدي إلى ارتفاع كلاً من التيار والقدرة المنتجة، في حين يتسبب ارتفاع درجة الحرارة في انخفاض الجهد عند نقطة القدرة العظمى وتراجع كفاءة النظام الكهروضوئي.

وقد تناولت الأدبيات العلمية هذه الإشكالية من خلال ثلاثة محاور رئيسية: النمذجة الرياضية، المحاكاة العددية، والدراسات التجريبية. فقد طوّر Mokhoul et al. (2017) [1] نموذجاً لنظام طاقة شمسي مستقل، مبيّناً أن اعتماد خوارزمية MPPT يساهم في تحسين كفاءة استخلاص الطاقة تحت ظروف إشعاعية وحرارية متغيرة. ودرس Smith et al. (2018) [2] تأثير درجة الحرارة باستخدام نموذج الداويد الواحد، حيث أظهرت نتائجها أن ارتفاع الحرارة يسبب انخفاضاً في جهد نقطة القدرة العظمى بنسبة تقارب 0.45% كما قيّم Al-Mashaqbeh et al. (2019) [3] أداء الأنظمة الكهروضوئية في المناطق الصحراوية، مؤكداً العلاقة شبه الخطية بين الإشعاع وشدة التيار.

وفي إطار تحسين خوارزميات التتبع، قارنت دراسة Chen et al. (2020) [4] بين خوارزمتي Perturb and Observe و Incremental Conductance (INC) تحت تغيرات إشعاعية سريعة، وأظهرت النتائج تفوق خوارزمية INC من حيث سرعة الاستجابة ودقة تحديد نقطة القدرة العظمى. كما أوضح Rahman et al. (2021) [5] أن التصميم المحسن لخلايا SunPower يقلل الخسائر الحرارية ويرفع القدرة المستخرجة بنسبة تتراوح بين 8% و 10% مقارنة بالخلايا التقليدية. وباستخدام

نموذج ميني على Simulink أظهر (2022) Elkholy [6] أن انخفاض الجهد الناتج عن ارتفاع الحرارة يمثل العامل الأكثر تأثيراً في الأداء السنوي للأنظمة في شمال إفريقيا.

كما أكدت نتائج (2021) Cangi et al. [7] أن ارتفاع درجات الحرارة يؤدي إلى انخفاض ملحوظ في الجهد ضمن منحنيات $I-V$ و $P-V$. وقدم (2016) Salmi et al. [8] تقييماً دقيقاً للدائرة المكافئة للخلية الشمسية باستخدام MATLAB، مما يتيح التنبؤ بالأداء تحت ظروف بيئية مختلفة. وأشار (2023) Dubey et al. [9] إلى أن زيادة درجة الحرارة بمقدار 1°C تؤدي إلى انخفاض واضح في الجهد ومن ثم القدرة المنتجة. وركزت دراسة (2024) Kamal et al. [10] على تأثير التلوث البيئي في كفاءة مصفوفات PV، مبيّنة أن الملوثات الطبيعية تخفض الطاقة المستخرجة بنسبة ملحوظة.

وعلى الرغم من تنوع الدراسات السابقة واتساع نطاقها، إلا أن ثمة قصوراً واضحاً في الأبحاث التي تقدم تحليلاً متكاملًا لأداء خلايا SunPower تحت مدى واسع من تغيرات الإشعاع الشمسي والحرارة باستخدام نماذج محاكاة شاملة، مع ربط النتائج بمؤشرات كمية دقيقة للأداء. ومن ثم، تهدف هذه الورقة إلى سد هذه الفجوة من خلال تطوير نموذج محاكاة متقدم وتحليل تأثير المتغيرات البيئية على كفاءة خلايا SunPower ضمن نطاق تشغيلي واقعي.

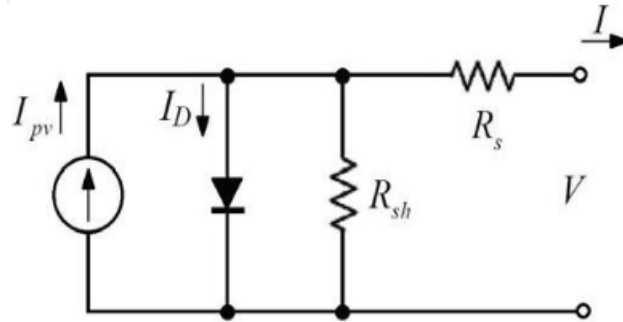
2. نمذجة الخلية الكهروضوئية

1-2. الدائرة المكافئة للخلية الكهروضوئية

تعد الخلايا الكهروضوئية من العناصر الأساسية في أنظمة الطاقة الشمسية، وتحليل أداء الخلية بدقة يتم نمذجة الخلايا الكهروضوئية رياضياً من خلال الدائرة المكافئة العامة، بهدف تحليل سلوكها تحت تأثير الظروف البيئية المختلفة، وذلك بالاعتماد على نموذج الدايدود الواحد لتمثيل الوصلة شبه الموصلية بين طبقتي (p-n). يتكون النموذج من مصدر تيار ضوئي يعتمد على شدة الإشعاع الشمسي، ودايدود يمثل الخصائص غير الخطية للخلية، إضافة إلى مقاومة سلسلة R_s ومقاومة تفرعية R_{sh} تعكسان الخسائر الداخلية للخلية كما هو موضح في الشكل (1).

يمثل منحنى التيار-الجهد ($I-V$) العلاقة بين الجهد والتيار تحت مستويات مختلفة من الإشعاع الشمسي، بينما يوضح منحنى القدرة-الجهد ($P-V$) كيفية الوصول إلى النقطة القصوى للقدرة (Maximum Power Point) التي تحدد كفاءة توليد الكهرباء للخلية.

مجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية



الشكل(1): الدائرة المكافئة للخلايا الكهروضوئية

يمكن تمثيل التيار الخارج من الخلية الكهروضوئية رياضياً بالعلاقة الرياضية الآتية

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left(\frac{V + IR_s}{nV_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}}$$

حيث ان:

I - التيار الخارج من الخلية V - جهد خرج الخلية

R_s - مقاومة متسلسلة R_{sh} - مقاومة متوازية

n - عامل مثالية الدايبود V_t - الجهد الحراري ويعطي بالعلاقة $V_t = kt/q$

K - ثابت بولتزمان T - درجة الحرارة المطلقة

Q - شحنة الالكترن

تعكس المعادلة بصورة مباشرة تأثير درجة الحرارة وشدة الإشعاع على سلوك الخلية، بما يساعد في تحديد أفضل نقطة تشغيل وتحقيق أعلى كفاءة تحويل في التطبيقات العملية.

وبشكل عام، فإن الدمج بين المفاهيم الفيزيائية للتأثير الكهروضوئي والنمذجة الرياضية والدائرة المكافئة يُعد أساساً في تطوير أنظمة طاقة شمسية عالية الكفاءة، حيث يسهم تحليل منحنيات $(I-V)$ و $(P-V)$ واختيار تصميم مناسب للخلية في تحقيق أقصى استفادة من الطاقة الشمسية المتاحة.

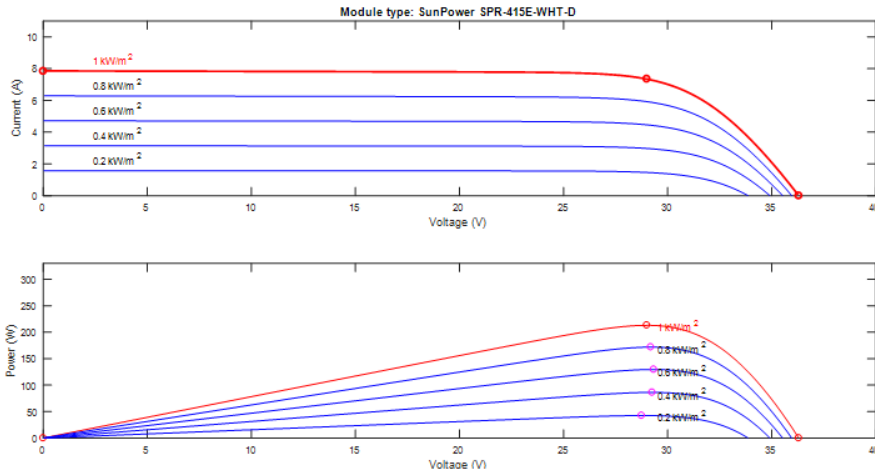
2.2. اختيار الوحدة الكهروضوئية المدروسة

في هذه الدراسة تم اختيار وحدة كهروضوئية أحادية البلورة من نوع SunPower SPR-415E-WHT-D بقدرة اسمية 415 w، نظراً لكفاءتها العالية واستقرار أدائها تحت الظروف البيئية المختلفة، مما يجعلها مناسبة للتحليل الدقيق في MATLAB/Simulink. يوضح الجدول (1) الخصائص الكهربائية الأساسية للوحدة عند شروط الاختبار القياسية STC. ($1000 \text{ w/m}^2, 25^\circ\text{C}$)

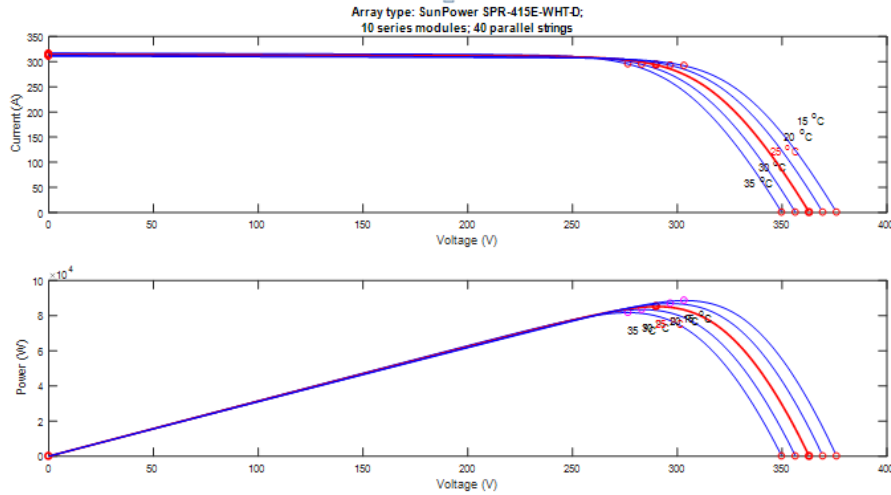
الجدول (1): المواصفات الكهربائية للوحدة الكهروضوئية SunPower SPR-415E-WHT-D عند STC

Module: SunPower SPR-415E-WHT-D	
Maximum Power (W) : 414.801	Cells per module (Ncell): 128
Open Circuit Voltage (V): 85.3	Short-circuit current I_{sc} (A): 6.09
Voltage at maximum power point V_{mp} (V) : 72.9	Current at maximum power point I_{mp} (A) : 5.69
Temperature coefficient of v_{oc} (%/deg.c) : -0.229	Temperature coefficient of I_{sc} (%/deg.c) : 0.0030706

لغرض التحقق من النموذج، تم استخدام منحنيات الأداء الكهربائية للوحدة. حيث يوضح الشكل (2) منحنيات التيار-الجهد $(I-V)$ والقدرة-الجهد $(P-V)$ عند مستويات مختلفة من الإشعاع الشمسي عند ثبات درجة الحرارة، بينما يوضح الشكل (3) تأثير تغير درجة الحرارة مع ثبات الإشعاع على نفس المنحنيات.



الشكل (2): منحنيات (I-V) و (P-V) للوحدة الكهروضوئية عند مستويات إشعاع مختلفة



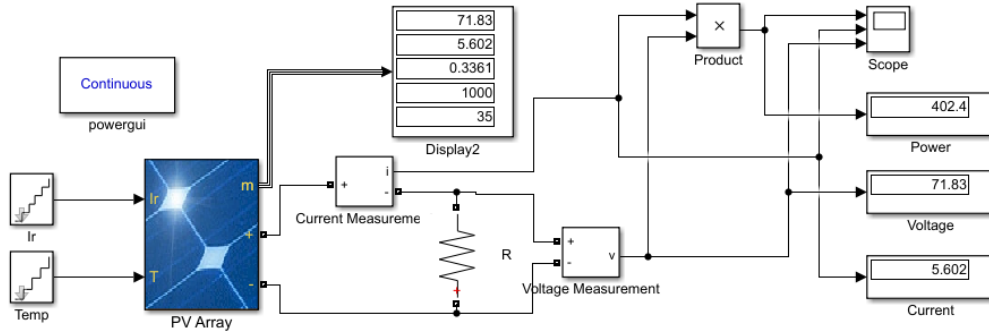
الشكل (3): منحنيات (I-V) و (P-V) للوحدة الكهروضوئية عند درجات حرارة مختلفة

يوضح الشكل (2) منحنيات (I-V) و (P-V) عند مستويات إشعاع مختلفة مع ثبات درجة الحرارة، حيث يزداد التيار مع ارتفاع الإشعاع بينما يقل الجهد قليلاً، في حين يبين الشكل (3) منحنيات (I-V) و (P-V) للخلية عند درجات حرارة مختلفة، مما يشير إلى أن الأداء الكهروضوئي يعتمد بشكل رئيسي على شدة الإشعاع مع تأثير طفيف لدرجة الحرارة على الجهد، مؤكداً أهمية التحكم في الإشعاع ودرجة الحرارة لتحسين كفاءة الوحدة. وتستخدم هذه البيانات في التحقق من دقة النموذج الرياضي وتقييم أداء اللوحة تحت ظروف التشغيل الحرجة في البيئات الحارة.

3.2 محاكاة أداء الخلية الكهروضوئية تحت تأثير المتغيرات البنينة باستخدام MATLAB

تم بناء نموذج المحاكاة الشكل (4) باستخدام برنامج MATLAB/Simulink بحيث تتضمن المنظومة محاكاة الدائرة المكافئة للخلية الشمسية، إضافة إلى مصادر متغيرة لكل من الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، مع منافذ لقياس التيار الخارج (I_{pv}) والجهد الطرفي (V_{pv}). تم إجراء المحاكاة عبر مدى إشعاعي يتراوح بين $200-1000 \text{ w/m}^2$ ، وبدرجات حرارة تتراوح بين

وتم تسجيل مخرجات الجهد والتيار والقدرة عند كل حالة تشغيل، وتحليل منحنيات (I-V) و (P-V)، وحساب مؤشرات الأداء بناءً على التغير النسبي للقدرة والتيار والجهد بهدف تقييم أثر الظروف البيئية على كفاءة الخلية الشمسية.



الشكل (4): نموذج وحدة الطاقة الشمسية الكهروضوئية باستخدام Simulink

4.2. مخرجات المحاكاة

تم تسجيل التغيرات التي حدثت على الجهد والتيار والقدرة لتحليل تأثير العوامل البيئية على منحنيات التيار-الجهد (I-V) ومنحنيات القدرة-الجهد (P-V)، مما يتيح تقييمًا شاملاً للأداء الكهربائي للخلية. تُظهر بيانات الجداول والرسوم البيانية العلاقة بين شدة الإشعاع الشمسي (w/m^2) ودرجة الحرارة ($^{\circ}C$) وتأثيرهما المباشر على التيار والجهد والقدرة الناتجة، موفرة فهمًا واضحًا لكيفية تأثير كفاءة الطاقة المستخرجة من الخلية بالظروف البيئية المختلفة.

الجدول (2): أقصى التغيرات في الجهد للوحة الطاقة الشمسية

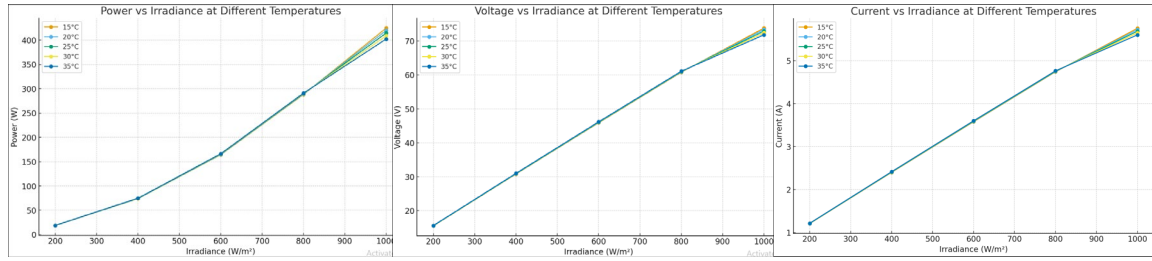
نتائج محاكاة الماتلاب						
أقصى جهد (v)	الإشعاع الشمسي (w/m^2)					درجة الحرارة $^{\circ}C$
	200	400	600	800	1000	
V_{max}	15.49	30.79	45.89	60.8	73.8	15
V_{max}	15.51	30.83	45.96	60.88	73.4	20
V_{max}	15.54	30.88	46.03	60.96	72.93	25
V_{max}	15.56	30.93	46.1	61.03	72.4	30
Vmax	15.59	30.98	46.17	61.09	71.83	35

الجدول (3): أقصى التغيرات في التيار للوحة الطاقة الشمسية

نتائج محاكاة الماتلاب						
أقصى تيار (A)	الإشعاع الشمسي (w/m ²)					درجة الحرارة °C
	200	400	600	800	1000	
I_{max}	1.208	2.401	3.579	4.742	5.756	15
I_{max}	1.21	2.405	3.585	4.748	5.724	20
I_{max}	1.212	2.408	3.59	4.754	5.688	25
I_{max}	1.214	2.412	3.596	4.76	5.647	30
I_{max}	1.216	2.416	3.601	4.764	5.602	35

الجدول (4): أقصى التغيرات في القدرة للوحة الطاقة الشمسية

نتائج محاكاة الماتلاب						
أقصى قدرة (w)	الإشعاع الشمسي (w/m ²)					درجة الحرارة °C
	200	400	600	800	1000	
P_{max}	18.71	73.92	164.3	288.3	424.8	15
P_{max}	18.77	74.15	164.8	289.1	420.1	20
P_{max}	18.83	74.38	165.3	289.8	414.8	25
P_{max}	18.89	74.6	165.8	290.5	408.8	30
P_{max}	18.95	74.83	166.3	291	402.4	35



الشكل (5): يوضح العلاقة بين الجهد (V) والتيار (I) والقدرة (P) و شدة الإشعاع الشمسي (G) عند درجات حرارة

3. مؤشرات نسبة التغير (مؤشر أداء (Performance Indicators))

1. أثر تغير الإشعاع (مقارنة بين $G=200$ و $G=1000 \text{ w/m}^2$ عند $T=15^\circ\text{C}$)

❖ P_{max} من 18.71w الي 424.8w

$$\text{التغير النسبي} = 100 \times \frac{424.8 - 18.71}{18.71} \approx 2171\% \quad (\text{أي ازيد بحوالي 22 ضعفا})$$

❖ I_{max} من 1.208A الي 5.756A

$$\text{التغير النسبي} = 100 \times \frac{5.756 - 1.208}{1.208} \approx 376.7\%$$

❖ V_{max} من 15.49v الي 73.8v

$$\text{التغير النسبي} = 100 \times \frac{73.8 - 15.49}{15.49} \approx 376.5\%$$

الجدول (5): أثر تغير الإشعاع على مؤشرات الأداء عند $T=15^\circ\text{C}$

المؤشر	عند 200 w/m^2	عند 1000 w/m^2	نسبة التغير %
$(W)P_{max}$	18.71	424.8	+2171%
$(A)I_{max}$	1.208	5.756	+376.7%
$(V)V_{max}$	15.49	73.8	+376.5%

الزيادة العالية في القدرة ناتجة أساساً عن الزيادة الكبيرة في التيار مع زيادة الإشعاع، في حين يزداد الجهد بطريق أقل حدة؛ لذلك تتضاعف القدرة نتيجة تراكم تأثيري بين التيار والجهد.

2. أثر تغير درجة الحرارة (مقارنة بين $T=15^{\circ}\text{C}$ و $T=35^{\circ}\text{C}$ عند $G=1000\text{ w/m}^2$)

❖ P_{max} من 424.8w الي 402.4w

$$\text{التغيير النسبي} = \frac{402.4-424.8}{424.8} \times 100 \approx -5.27\% \text{ (انخفاض)}$$

❖ V_{max} من 71.83v الي 73.8v

$$\text{التغيير النسبي} = \frac{71.83-73.8}{73.8} \times 100 \approx -2.67\% \text{ (انخفاض)}$$

❖ I_{max} من 5.602A الي 5.757A

$$\text{التغيير النسبي} = \frac{5.602-5.757}{5.757} \times 100 \approx -2.68\% \text{ (انخفاض)}$$

الجدول (6): أثر تغير درجة الحرارة على مؤشرات الأداء عند $G=1000\text{ w/m}^2$

المؤشر	عند 15°C	عند 15°C	نسبة التغير %
P_{max} (W)	424.8	402.4	-5.27%
I_{max} (A)	73.8	71.83	-2.67%
V_{max} (V)	5.756	5.602	-2.68%

يتضح من نتائج المحاكاة أن الإشعاع الشمسي يُعد العامل الأكثر تأثيرًا في رفع القدرة المستخرجة، حيث ارتفعت القدرة العظمى P_{max} بنحو 22.7 ضعفًا عند زيادة الإشعاع من 200 إلى 1000 w/m^2 عند 15°C ، وذلك نتيجة الزيادة الكبيرة في التيار والجهد على حدٍ سواء. في المقابل، أظهرت الحرارة تأثيرًا عكسيًا؛ حيث أدى ارتفاع درجة الحرارة من 15°C إلى 35°C إلى انخفاض القدرة بنسبة حوالي 5.27% بسبب الانخفاض الملحوظ في الجهد. تُبرز هذه المؤشرات أهمية الاعتبارات الحرارية عند تصميم وتشغيل الأنظمة الكهروضوئية في البيئات الحارة، وضرورة استخدام حلول التبريد المناسبة لتقليل الخسائر الحرارية وتحسين الأداء العام.

4. تحليل نتائج المحاكاة

أظهرت نتائج المحاكاة أن الإشعاع الشمسي يُعد العامل الأكثر تأثيرًا على الأداء الكهربائي للخلية، حيث ارتفعت القدرة القصوى (P_{max}) من 18.71w إلى 424.8w عند زيادة الإشعاع من 200 إلى 1000 w/m^2 عند 15°C ، ما يعادل زيادة نسبية بحوالي 2171%، أي أكثر من 22 ضعفًا، نتيجة ارتفاع التيار (I_{max}) بنسبة 376.7% والجهد (V_{max}) بنسبة 376.5%، مما يشير إلى تراكم تأثيري للتيار والجهد على القدرة. في المقابل، أدى رفع درجة الحرارة من 15°C إلى 35°C عند إشعاع 1000 w/m^2 إلى انخفاض القدرة من 424.8w إلى 402.4w بنسبة -5.27%، مع انخفاض طفيف في الجهد والتيار، ما يوضح أن الحرارة تؤثر سلبيًا على الأداء. تبرز هذه النتائج أهمية التحكم في الظروف الحرارية عند تصميم وتشغيل الأنظمة الكهروضوئية، واستخدام حلول التبريد لتحسين الكفاءة وتقليل الخسائر الناتجة عن ارتفاع درجة الحرارة.

5. حدود الدراسة

على الرغم من النتائج المهمة التي تم الحصول عليها، تقتصر هذه الدراسة على نمذجة ومحاكاة رقمية باستخدام MATLAB/Simulink دون إجراء تجارب ميدانية فعلية، مما قد يؤثر على دقة التنبؤ بالأداء تحت ظروف تشغيل حقيقية ومتغيرة. كما تم تحليل الإشعاع الشمسي ضمن نطاق $200-1000 \text{ W/m}^2$ ودرجة الحرارة بين $15^\circ\text{C}-35^\circ\text{C}$ فقط، بينما قد تختلف هذه القيم في بيئات طبيعية أخرى.

6. الخلاصة

تقدم هذه الدراسة نموذجًا عدديًا دقيقًا لوحدتي SunPower الكهروضوئية بهدف تحليل تأثير الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة والمعروف أنهما العاملان الأكثر تحكمًا في الأداء وذلك باستخدام بيئة MATLAB/Simulink. وانطلاقًا من مشكلة البحث المتمثلة في محدودية النماذج التي تقيم أداء هذا النوع من الوحدات تحت مدى واسع من الظروف البيئية، جاءت النتائج لتوضح بصورة كمية أن الإشعاع يمثل العامل الأكثر تعزيزًا للقدرة المستخرجة، حيث أدى ارتفاعه من 200 إلى 1000 W/m^2 إلى زيادة القدرة القصوى بنسبة 2171% نتيجة الزيادة شبه الخطية في التيار المولد. في المقابل، بينت المحاكاة أن ارتفاع درجة الحرارة من 15°C إلى 35°C يؤدي إلى انخفاض القدرة بنسبة 5.27% ، وهو ما يعود أساسًا إلى الانخفاض الملحوظ في جهد الدائرة المفتوحة نتيجة تأثيرات الدايدود.

وتعكس هذه النتائج بصورة مباشرة إشكالية البحث، مؤكدة أن تحسين أداء الوحدات الكهروضوئية في البيئات الحارة يتطلب معالجة التأثير السلبي للحرارة عبر اعتماد حلول تنظيم حراري، إضافة إلى دمج خوارزميات تتبع نقطة القدرة العظمى لضمان تشغيل مستقر وكفاء. ومن ثم، توفر هذه الدراسة أساسًا عمليًا لتطوير نماذج أكثر واقعية ودعم قرارات تصميم وتشغيل الأنظمة الشمسية في المناطق ذات الإشعاع المرتفع والحرارة العالية.

مجلة ليبيا للعلوم التطبيقية والتقنية

المراجع

- [1]. Mokhou, M. S., Khaddour, A. B., & Youssef, J. (2017). *Modeling and performance analysis of stand-alone solar system using MATLAB with MPPT* [نمذجة وتحليل أداء نظام طاقة شمسي مستقل باستخدام MATLAB مع تتبع نقطة الاستطاعة العظمى]. *Tishreen University Journal for Scientific Studies: Engineering Sciences Series*, 39(3), 175–195.
- [2]. Smith, J., Brown, A., & Lee, K. (2018). *Analysis of temperature effects on photovoltaic panel performance using single-diode MATLAB model*. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(4), 1123–1132.
- [3]. Al-Mashaqbeh, O., & Hassan, M. (2019). *Simulation of solar irradiance impact on PV system efficiency in desert environments*. *Solar Energy*, 182, 120–131. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.02.012>

- [4].Chen, L., & Wu, H. (2020). *Comparative study of MPPT algorithms under rapidly changing irradiance conditions: P&O vs. Incremental Conductance*. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11(2), 789–798. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2019.2956234>
- [5].Rahman, F., Ahmed, S., & Li, X. (2021). *Modeling and analysis of high-efficiency SunPower SPR series PV cells under varying irradiance and temperature*. *Renewable Energy*, 169, 1104–1115. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.074>
- [6].Elkholy, A. (2022). *Simulink-based modeling to assess climatic parameter effects on PV system performance in North Africa*. *Energy Reports*, 8, 1502–1515. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.04.035>
- [7].Cangi, H., Adak, S., & Yilmaz, A. S. (2021). *Effect of temperature on the I–V and P–V curves of the photovoltaic cell*. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 11(4), 2682–2694. <https://doi.org/10.21597/jist.978148>
- [8].Salmi, T., Bouzguenda, M., Gastli, A., & Masmoudi, A. (2016). *MATLAB/Simulink based modeling of photovoltaic cell*. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 6(2), 442–449.
- [9].Dubey, S., & Pillai, A. (2023). *Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency and its effect on PV-production*. *Energy Procedia*, 33, 311–317. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.04.005>
- [10].Kamal, H., et al. (2024). *Energy- and exergy-based evaluation of the influence of natural pollutants on PV array performance*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13160-1>