

تأثير شدة الإشعاع الشمسي والطول الموجي على كفاءة الخلية الشمسية السيلكونية

الدكتور رزق محمد قرفول*

(تاريخ الإيداع 15 / 1 / 2020. قُبِلَ للنشر في 1 / 3 / 2020)

□ ملخص □

تضمّنت هذه الدراسة تأثير شدات الإشعاع الشمسي الواقعة في المجال $[200-1000] W / m^2$ عملياً ونظرياً على جهد وتيار وكفاءة الخلية الشمسية السيلكونية وقد كان ذلك بهدف الاستخدام الأمثل لألواح الخلايا الشمسية للحصول على الطاقة الكهربائية اللازمة لتغذية الأحمال المطلوبة، وقد أظهرت هذه الدراسة أنّ أصغر قيمة عملية للكفاءة كانت $\eta = 12.9\%$ عند اشعاع شمسي شدته $200W / m^2$ وأكبر قيمة كانت $\eta = 14.25\%$ عند اشعاع شمسي شدته $1000W / m^2$ وذلك عند درجة حرارة $T = 298 K$ ، وسُجّلت أصغر قيمة نظرية للكفاءة $\eta = 17.17\%$ عند إشعاع شمسي $200W / m^2$ وأكبر قيمة $\eta = 18.77\%$ عند إشعاع شمسي شدته $1000W / m^2$. وذلك عند نفس درجة الحرارة $T = 298 K$. حصلنا أيضاً على أعظم قيمة عملية للكفاءة عند الطول الموجي $5500A^\circ$ وكانت مساوية إلى 13.49% ، وأعظم قيمة نظرية للكفاءة كانت عند الطول الموجي $4100A^\circ$ وكانت مساوية 82.63% عند درجة حرارة $T = 298 K$ وإشعاع شمسي شدته $100W / m^2$.

الكلمات المفتاحية: كفاءة الخلية الشمسية، جهد الدارة المفتوحة، تيار دارة القصر، عامل الملء، تيار الاشباع.

*أستاذ مساعد - قسم الفيزياء - كلية العلوم - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

The Effect of the Solar Radiation Intensity and the Wave Length on the Efficiency of the Silicon Solar Cell

Dr. Rizek Karfoul*

(Received 15 / 1 / 2020. Accepted 1 / 3 / 2020)

□ ABSTRACT □

This study has included the effect of the solar radiation intensities, which are in the field $[200-1000]W / m^2$ practically and theoretically on the voltage, the current and the silicon solar cell efficiency. The purpose of this study is having the optimal use of the solar modules in order to produce the electric power required to provide energy to the loaded needed. This study showed that the minimum practical value of the efficiency was $\eta = 12.9\%$ at a solar radiation of $200W / m^2$, and the maximum value was $\eta = 14.25\%$ at a solar radiation of $1000W / m^2$ at $T = 298 K$. In addition, the minimum theoretical value of the efficiency was $\eta = 17.17\%$ at a solar radiation of $200W / m^2$, and the maximum value was $\eta = 18.77\%$ at the radiation of $1000W / m^2$ at the same temperature $T = 298 K$. We also found the maximum practical value of the efficiency at a wave length of 5500\AA and it was 13.49% , and the maximum theoretical value of the efficiency was at a wave length of 4100\AA and was 82.63% at $T = 298 K$ and a solar radiation intensity of $100W / m^2$.

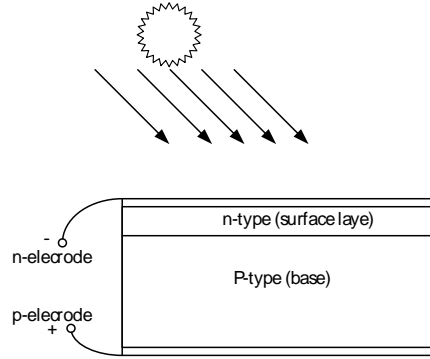
Key Words: Solar Cell Efficiency, Open Voltage, Short Current, Fill Factor, Saturation Current

* Associate Professor, Department of Physics, Faculty of science, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة

بدأت الطاقة الشمسية في الاستخدام عن طريق التحويل الكهروضوئي في الخلايا الشمسية الكهروضوئية تقديم مساهمة ملموسة في مصادر الطاقة في العديد من البلدان، على سبيل المثال، تساهم الطاقة الشمسية بحوالي 4% من متوسط شبكة الكهرباء في الاتحاد الأوروبي، وأكثر من 7% في بلدان مثل ألمانيا وإيطاليا [1,2]. ازداد في العقد الماضي إنتاج الطاقة الكهروضوئية بسرعة في جميع أنحاء العالم بمعدل مرتفع حوالي 30-40% سنوياً وذلك بفضل ازدياد الكفاءة وانخفاض تكاليف إنتاج الخلايا الكهروضوئية التجارية [3,4]، وهذا ما سنسعى إليه في هذا البحث.

تتألف الخلية الشمسية السيلكونية من ثنائي معزول ومصنوع من طبقة رقيقة من السيليكون من النوع p (حقن السيلكون بذرات شائبة) أخذة يُرسب عليها طبقة رقيقة أخرى من السيليكون من النوع n (حقن السيلكون بذرات شائبة مانحة) تُسمى الطبقة الأولى بالأساس والطبقة الثانية بالطبقة السطحية وتثبت الأقطاب على السطحين الخارجيين للثنائي $p - n$ ، يتكوّن القطب الأمامي من طبقة رقيقة تسمح لضوء الشمس بالنفاذ إلى الطبقة السطحية بعد توهين قليل، وبما أنّ الطبقة السطحية للثنائي رقيقة أيضاً فإنّ الضوء يصل إلى الثنائي $p - n$ بسهولة الشكل (1).



الشكل (1): الخلية الشمسية السيلكونية

عندما تسقط أشعة الشمس على الخلية الشمسية فإنّ قسماً من الفوتونات يقوم بتوليد أزواج الكترول-ثقب والذي بدوره يولّد تياراً كهربائياً I_p يسري من الجانب n إلى الجانب p ويعطى بالعلاقة [5]:

$$I_p = qG \quad (1)$$

حيث أنّ G هي معدّل توليد أزواج الكترول-ثقب لواحدة المساحة و q شحنة الالكترولون.

عندما يكون الثنائي معزول كهربائياً عن الدارة الخارجية فإنّ صافي التيار المار عبر الثنائي في حالة الاستقرار يجب أن يساوي الصفر، وهذا يعني أنّه يجب أن يكون هناك تيار عكسي يعرف بتيار الثنائي I_i ويساوي التيار الكهربائي I_p وهو يسري من الجانب p إلى الجانب n والذي يعتبر تيار أمامي ويعطى بالعلاقة [5,6]:

$$I_p = I_i = I_0 \left(e^{\frac{V_{OC}}{kT}} + 1 \right) \quad (2)$$

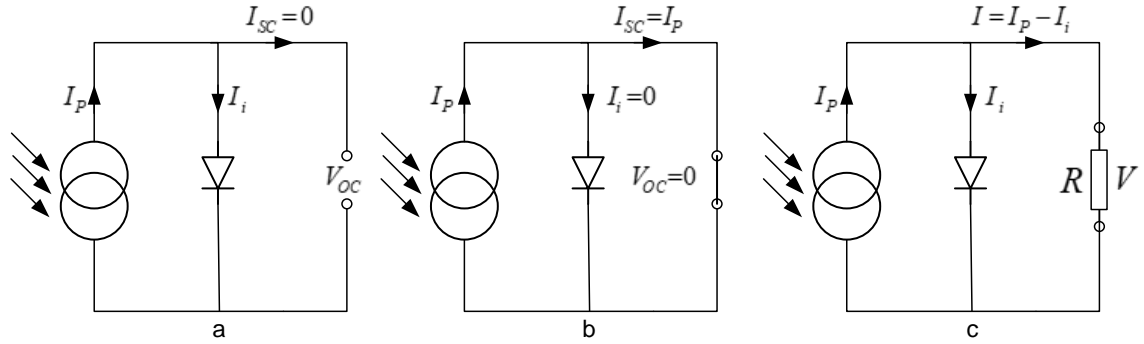
حيث أنّ V_{OC} هو جهد الدارة المفتوحة و k ثابت بولتزمان و T درجة الحرارة المطلقة و I_0 تيار الاشباع ويعطى بالعلاقة الآتية [7]:

$$I_0 = DT^3 e^{\frac{-E_g}{kT}} \quad (3)$$

حيث D ثابت خاص بالثنائي $p - n$ و E_g عرض فجوة الطاقة (القطاع المحظور).

يمكن تكوين نموذج بسيط للخلية الشمسية من مصدر تيار متوازي مع الثنائي كما هو موضح بالشكل (2). حيث يبين الشكل (2-a) جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية، بما أن الخلية معزولة كهربائياً فإن التيار الكهربائي المتولد بالطاقة الشمسية يمر خلال الثنائي ونتيجة لذلك يتكوّن جهد دائرة مفتوحة على طرفي الخلية وبحل المعادلة (2) نجد:

$$\begin{cases} V_{OC} = kT \ln \left[\frac{I_P}{I_0} + 1 \right] \\ I_{OC} = 0 \end{cases} \quad (4)$$



الشكل (2): نموذج الكتروني بسيط لخلية شمسية يتكون من ثنائي مربوط على التوازي مع منبع ضوئي [7,8].

a: عمل الدارة المفتوحة b: عمل دائرة القصر c: تجهيز تيار لمقاومة حمل خارجية

نشير هنا إلى إنّ جهد الدارة المفتوحة الناتج من الثنائي $p - n$ يعتمد على درجة الحرارة والتيار الاشباع الخلفي وكذلك على التيار الضوئي ويعتمد بدوره التيار الضوئي على شدة الاشعاع الشمسي الوارد.

إذا جعلنا قطبي الخلية الشمسية دائرة قصر فإنّ التيار الضوئي الكلي سيمر خلال الدارة الخارجية ويتلاشى تيار الثنائي وبذلك يكون الجهد على طرفي الخلية صفراً الشكل (2-b) وبهذا يكون تيار دائرة القصر مساوياً [8]:

$$\begin{cases} I_{SC} = I_P \\ V_{OC} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

عند ربط مقاومة حمل بين قطبي الخلية الشمسية فإنّ جزءاً من التيار الضوئي يمر عبر الثنائي بينما الجزء المتبقي يمر عبر مقاومة الحمل الشكل (2-c) ويعبر عن تيار الحمل بالعلاقة:

$$I = I_P - I_i = I_P - I_0 \left(e^{\frac{V}{kT}} - 1 \right) \quad (6)$$

ويعبر عن جهد الحمل بالعلاقة:

$$V = kT \ln \left(\frac{I_P - I}{I_0} + 1 \right) \quad (7)$$

كذلك تعطى قيمة التيار الكهربائي I_P بالعلاقة [9]:

$$I_P = qAG(L_e + W + L_h) \quad (8)$$

حيث A مساحة سطح الخلية الشمسية، و W عرض منطقة الاستنزاف و L_e طول انتشار الإلكترون في المنطقة p و L_n طول انتشار الثقب في المنطقة n و G معدّل تولد زوج الكترون-ثقب ضوئياً ويعطى بالعلاقة الآتية [9,10]:

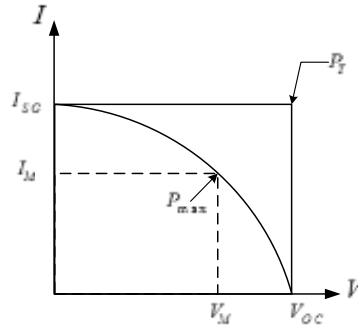
$$G = \frac{1}{2} \alpha \frac{I_D}{E_{ph}} \quad (9)$$

E_{ph} : طاقة الفوتون و α معامل الامتصاص و I_D شدة الاشعاع الشمسي المباشر على الخلية الشمسية. تُعرّف كفاءة تحويل الطاقة للخلية الشمسية PV energy conversion efficiency بأنها النسبة المئوية للقدرة المحولة من الاشعاع الشمسي الممتص عندما تكون الخلية متصلة بدارة كهربائية وتعطى بالعلاقة الآتية [9,10]:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{I_M \times V_M}{I_D \times A} \quad (10)$$

P_{in} : القدرة الواقعة على الخلية الشمسية و P_{\max} : القدرة الكهربائية المولدة العظمى
 I_M, V_M : جهد وتيار القدرة العظمى على التوالي

أما عامل الملء $fill\ factor$ فيعرّف على أنه مقياس لمربع منحنى $(I - V)$ وكما هو موضّح بالشكل (3)، فإنّه يكون للخلية الشمسية ذات الجهد الأعلى عامل ملء أكبر ويحسب بالعلاقة التجريبية [7,8,9] الآتية:



الشكل (3) مخطط عامل الملء

$$FF = \frac{P_{\max}}{P_T} = \frac{I_M \times V_M}{I_{SC} \times V_{OC}} \quad (11)$$

من المعادلة (8) نجد أنّ $P_{\max} = FF \times P_T = I_{SC} \times V_{OC} \times FF$ وبالتالي تصبح العلاقة بين الكفاءة وعامل الملء [9,10,11] كما يلي:

$$\eta = \frac{I_{SC} \times V_{OC} \times FF}{I_D \times A} \quad (12)$$

وُستخدم لحساب عامل الملء نظرياً العلاقة [12]:

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1} \quad (13)$$

حيث أنّ v_{oc} الجهد المعياري الذي يعطى بالعلاقة الآتية:

$$v_{oc} = \frac{V_{OC}}{KT} \quad (14)$$

الاستجابة الطيفية للتيار الضوئي:

بفرض أن $I_{d\lambda}$ يمثل شدة التوزع الطيفي للإشعاع الشمسي في وحدة الزمن لوحدة المساحة لوحدة الأطوال الموجية الواردة على الخلية الشمسية، وبما أن الفوتون له طول موجي λ فهو يحمل طاقة $E_{ph\lambda}$ ويكون عدد الفوتونات الواردة لوحدة الزمن لوحدة المساحة لوحدة الأطوال الموجية هو [13]:

$$N_{\lambda} = I_{d\lambda} \frac{\lambda}{h \cdot c} \quad (15)$$

حيث c : سرعة الضوء في الخلاء.

لا تولّد جميع الفوتونات الضوئية الواردة تياراً كهربائياً لأنّ الفوتونات التي طاقتها أصغر من طاقة الفجوة E_g لا تولّد أزواج الكترول-ثقب فإما أن تُمتص أو تنعكس من قبل الطبقة السطحية، وحتى عندما يتم تولد أزواج الكترول-ثقب فإن ميل هذه الأزواج لإعادة الاتحاد يخفّض من التيار الكهربائي، وعند أخذ جميع هذه العوامل بالاعتبار نكتب العلاقة التجريبية التالية [10,13]

$$G_{\lambda} = B_{\lambda} N_{\lambda} \quad (16)$$

حيث G_{λ} معدّل تولد أزواج الكترول-ثقب في وحدة المساحة بوساطة N_{λ} ، و B_{λ} الكفاءة الكميّة للفوتونات وتكون قيمة B_{λ} تساوي الصفر لجميع الأطوال الموجية التي تكون أكبر من طول موجة القطع λ_0 التي تساوي طول موجة فوتون طاقتها تساوي طاقة الفجوة E_g وبشكل عام تكون قيمة B_{λ} أعلى ما يمكن عندما تكون λ أقصر بقليل من λ_0 وتقل هذه الكميّة عندما $\frac{\lambda}{\lambda_0} \rightarrow 0$ لذا فإنّ الفوتونات التي تملك طاقة أعلى من طاقة الفجوة تكون أكثر فاعلية لتوليد

التيار الكهربائي، وباستخدام العلاقة $I_{P\lambda} = q G_{\lambda}$ والمعادلتين (15) و (16) نجد أن:

$$I_{P\lambda} = q B_{\lambda} N_{\lambda} = \frac{q B_{\lambda} \lambda}{hc} I_{d\lambda} = K_{\lambda} I_{d\lambda} \quad (17)$$

حيث أنّ $I_{P\lambda}$ هو التيار الكهربائي الطيفي و $K_{\lambda} = \frac{q B_{\lambda} \lambda}{hc}$ هي الاستجابة الطيفية لخلية سيلكونية نموذجية ويعبر عن التيار الكهربائي الكلي المتولّد من الطيف الكلي بالعلاقة:

$$I_P = \int I_{P\lambda} d\lambda = \int_0^{\lambda_0} K_{\lambda} I_{d\lambda} d\lambda = \bar{K} I_d \quad (18)$$

حيث أنّ: $I_d = \int_0^{\infty} I_{d\lambda} d\lambda$ و $\bar{K} = \int_0^{\lambda_0} K_{\lambda} I_{d\lambda} \frac{d\lambda}{I}$ وتعزّف طول موجة القطع بالعلاقة $\lambda_0 = \frac{hc}{E_g}$.

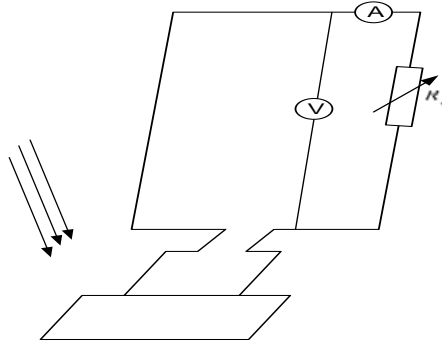
أهميّة البحث وأهدافه:

لما كانت مصادر الطاقة التقليدية ناضبة وملوثة للبيئة والاستهلاك السريع لها، ما دفع العديد من الباحثين إلى الحصول على مصادر جديدة مُستدامة وغير ملوثة للبيئة كالتقنية الشمسية وذلك من خلال الظاهرة الفوتو فولتية التي هي تحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية مباشرة باستخدام الخواص الالكترونية لبعض المواد النصف ناقلة مثل السيليكون المشاب وغيره.

اكتسبت المنظومة الفوتو فولتية أهميتها وذلك لاستخدامها في كثير من التطبيقات كمنظومات الاتصال في المناطق المعزولة وثلاجات الأدوية في المناطق النائية والتي يصعب تغذيتها من الشبكة الكهربائية، وقد حاول الانسان منذ فترة بعيدة الاستفادة من الطاقة الشمسية واستغلالها ولكن بقدر قليل ومحدود، ومع التطور الكبير في التقنية والتقدم العلمي الذي وصل إليه الانسان فتحت آفاق علميه جديدة ومتطورة في مجال استغلال الطاقة الشمسية، لهذه الأسباب كان هدف البحث دراسة تأثير درجة الحرارة عملياً ونظرياً على منحنيات تشغيل الخلية الشمسية وهي تيار دائرة القصر I_{SC} وجهد الدارة المفتوحة V_{OC} ونقطة القدرة العظمى P_{max} وتيار الاشباع I_0 وكفاءة الخلية η وعامل الملء FF .

طرائق البحث ومواده:

استُخدمت خلية شمسية من السيلكون أحادي البلورة ذات شكل مربع طول ضلعه 10 cm وسماكتها $0.5 \pm 0.015\text{ mm}$ ومعامل انكسارها $n = 2.2$ ، كذلك استخدم مقياسان رقميان digital multimeter لقياس التيار والجهد الخارجان من الخلية الشمسية، ومقياس رقمي digital thermometer لقياس درجة حرارة الخلية الشمسية، وجهاز Solar meter لقياس شدة الاشعاع الشمسي الوارد على الخلية الشمسية، ومقاومة متغيرة $riostat$ ، ومصدر ضوئي يحاكي ضوء الشمس ويوضع عمودياً على مسافة 30 cm من الخلية، وسخان حراري يُوضع على بعد 5 cm من الخلية وأسلاك توصيل والشكل (4) يُوضح الدارة المستخدمة لقياس معالم خرج الخلية الشمسية عملياً.



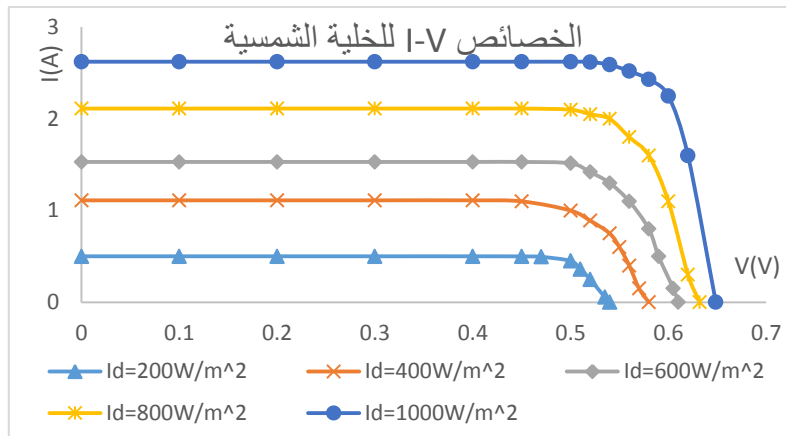
الشكل (4) الدارة الكهربائية التجريبية

تُسلط ضوء شدته $200\text{ W}/\text{m}^2$ وتثبت درجة حرارة الخلية الشمسية عند 298 K وهي الدرجة $25\text{ }^\circ\text{C}$ ثم نقيس كل من التيار والجهد بتغيير قيم المقاومة المتغيرة R_L ونستطيع الحصول على تيار دائرة القصر I_{SC} عندما تكون المقاومة R_L معدومة والجهد أيضاً معدوم ونحصل كذلك على جهد الدارة المفتوحة V_{OC} عندما تكون دائرة الخلية مفتوحة أي التيار معدوم والمقاومة $R_L = \infty$ ، تكرر هذه الخطوات من أجل قيم مختلفة لشدات الإشعاع الشمسي $(200, 400, 600, 800, 1000)\text{ W}/\text{m}^2$ وتدوّن النتائج وترسم المنحنيات البيانية، ثم نستخدم مرشحات ضوئية مختلفة (أزرق، أخضر، أصفر، برتقالي، أحمر) ونثبت شدة الإشعاع الشمسي عند $200\text{ W}/\text{m}^2$ ودرجة الحرارة عند 298 K وتدوّن النتائج التي سنناقشها تباعاً. أما النتائج النظرية فقد أعدنا برنامج على الحاسوب (MATLAB) باستخدام المعادلات (2,3,4,8,9,11,12,13,14,18). وتم حساب معالم خرج الخلية نظرياً عند شدات إشعاع شمسي مختلفة مع ثبات درجة الحرارة وكذلك حساب هذه المعالم بتغيير طول موجة الضوء عند ثبات شدة الاشعاع الشمسي ودرجة الحرارة ورسم الخطوط البيانية الموافقة لذلك.

النتائج والمناقشة:

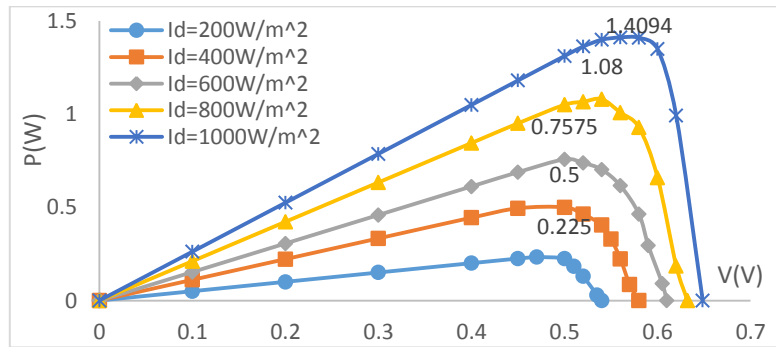
أولاً: تأثير شدة الإشعاع الشمسي على معالم خرج الخلية عملياً

يبين الشكل (5) تأثير شدة الإشعاع الشمسي الوارد على منحنى التشغيل للخلية الشمسية السيلكونية المدروسة عند ثبات درجة الحرارة عند $T = 298K$ ، وقد لوحظ زيادة تيار الخرج للخلية كلما زادت شدة الإشعاع الشمسي، أما جهد الدارة فإنه يرتفع إلى قرب أعلى قيمة له مع بداية ظهور الشمس أي عندما تكون شدة الإشعاع الشمسي أقل من $200W / m^2$ حيث يرتفع جهد المخرج للدارة من الصفر إلى حوالي $0.5V$ وتزداد هذه القيمة لوغاريتمياً إلى قيمة تقارب $0.6V$ عندما تزداد شدة الإشعاع الشمسي إلى القيمة $1000W / m^2$ أما تيار الدارة فيزداد خطياً مع تزايد شدة الإشعاع الشمسي.

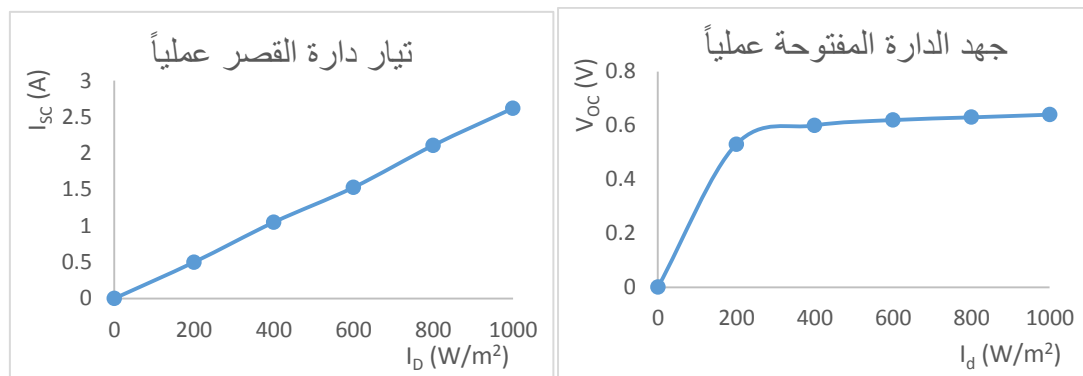


الشكل (5) الخصائص الكهربائية (تيار-جهد) للخلية الشمسية بدلالة تغير شدة الإشعاع الشمسي

يُوضّح الشكل (6) تغيرات قدرة الخلية بتغير شدة الإشعاع الشمسي حيث لاحظنا زيادة كبيرة في نقطة القدرة العظمى من القيمة $0.225W$ عند اشعاع شمسي شدته $200W / m^2$ إلى القيمة $1.4094W$ عند اشعاع شمسي شدته $1000W / m^2$ وهذا يعود إلى الزيادة الكبيرة لعدد الفوتونات التي تقوم بتوليد أزواج الكترول-ثقب مما يزيد من قيمة التيار الكهربائي.



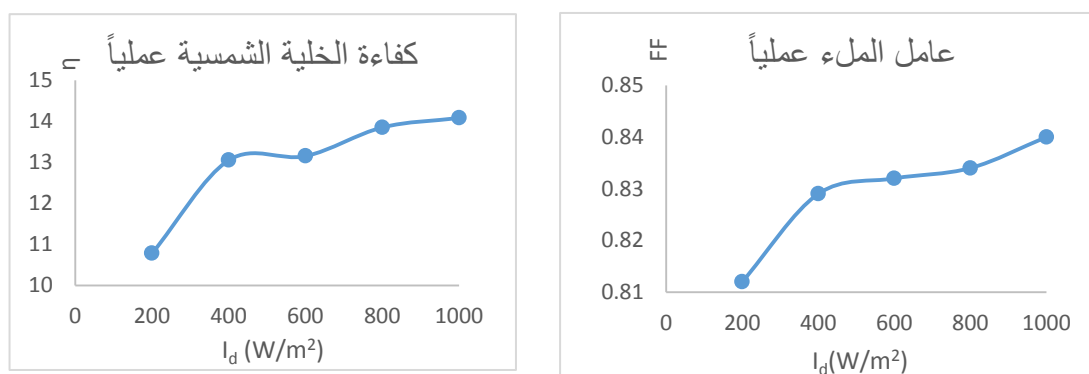
الشكل (6) تغير قدرة الخلية الشمسية بدلالة تغير شدة الإشعاع الشمسي



الشكل (7) تغير تيار دائرة القصر بدلالة شدة الإشعاع الشمسي الشكل (8) تغير جهد الدارة المفتوحة بدلالة شدة الإشعاع الشمسي

يوضح الشكل (7) العلاقة بين تيار دائرة القصر وشدة الإشعاع الشمسي حيث نلاحظ ازدياد تيار دائرة القصر من القيمة $0.5013A$ عند اشعاع شمسي شدته $200W / m^2$ إلى القيمة $2.6231A$ عند إشعاع شمسي شدته $1000W / m^2$ ويعود ذلك لزيادة تولد أزواج (الكترن-ثقب) نتيجة ازدياد عدد الفوتونات الواردة على الخلية. كما يبين الشكل (8) تزايد جهد الدارة المفتوحة أسياً مع تزايد شدة الإشعاع الشمسي حيث كانت أصغر قيمة لهذا الجهد $0.5892V$ عند اشعاع شمسي شدته $200W / m^2$ وأكبر قيمة $0.6485V$ عند اشعاع شمسي شدته $1000W / m^2$.

الشكلان (9) و (10) يوضحان ازدياد قيم عامل الملء FF ، وكفاءة الخلية الشمسية η بازدياد شدة الإشعاع الشمسي وقد سُجلت أصغر قيمة للكفاءة $\eta = 10.78\%$ عند إشعاع شمسي شدته $200W / m^2$ وأكبر قيمة $\eta = 14.08\%$ عند اشعاع شمسي شدته $1000W / m^2$.

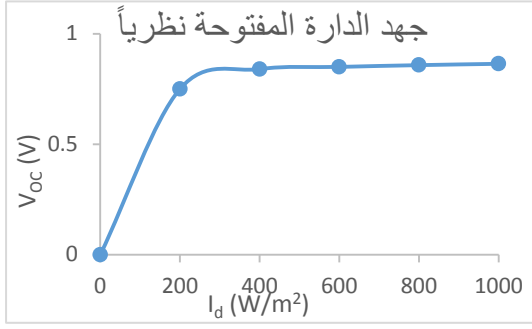


الشكل (9) تغير عامل الملء بدلالة شدة الإشعاع الشمسي الشكل (10) تغير كفاءة الخلية بدلالة شدة الإشعاع الشمسي

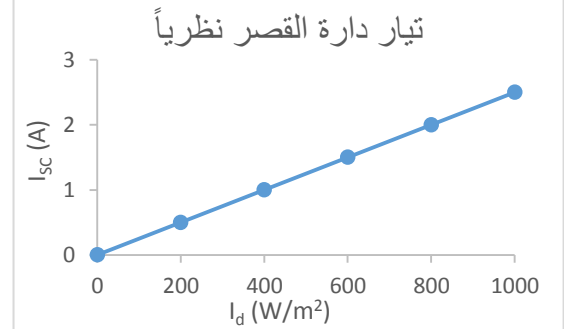
ثانياً: تأثير شدة الإشعاع الشمسي على معالم خرج الخلية نظرياً

باستخدام المعادلات (2,3,4,12,13,14) وُضع برنامج على الحاسب بلغة (MATLAB) وتم حساب تيار دائرة القصر وجهد الدارة المفتوحة وعامل الملء وكفاءة الخلية الشمسية بدلالة شدة الإشعاع الشمسي عند ثبات درجة الحرارة، والأشكال (11)، (12)، (13)، (14) توضح تغيرات تيار دائرة القصر وجهد الدارة المفتوحة وعامل الملء وكفاءة الخلية على التوالي بدلالة شدة الإشعاع الشمسي، حيث يُلاحظ ازدياد تيار دائرة القصر خطياً بازدياد شدة الإشعاع

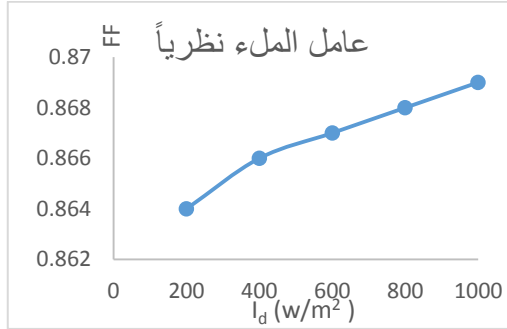
الشمسي ابتداءً من الصفر حتى بلغ أعظم قيمة $2.5A$ عند شدة اشعاع شمسي $1000W / m^2$ في حين ازداد جهد الدارة المفتوحة أسياً وبلغ مستويات أكبر من القيم التي سُجّلت عملياً فقد وصل إلى $0.869V$ عند شدة اشعاع شمسي $1000W / m^2$ علاوة على تبين أنّ الكفاءة تأخذ قيمةً بين $\eta = 17.17\%$ عند إشعاع شمسي شدته $200W / m^2$ و $\eta = 18.77\%$ عند إشعاع شمسي شدته $1000W / m^2$. وهذا يؤكد تزايد تركيز حوامل الشحنة عند ازدياد شدة الإشعاع الشمسي نتيجة الامتصاص الأعلى للضوء مما يثبت فرضية أنّ نسبة التولد الأعلى للأزواج هي تعود لشدة الإضاءة الأعلى.



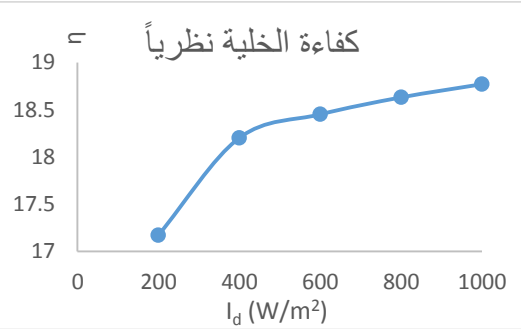
الشكل (12) تغير جهد الدارة المفتوحة بدلالة شدة الإشعاع الشمسي



الشكل (11) تغير تيار دارة القصر بدلالة شدة الإشعاع الشمسي



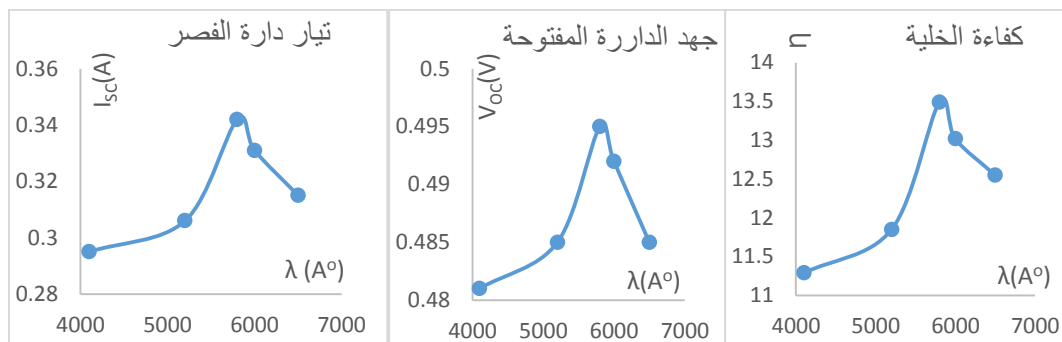
الشكل (14) تغير كفاءة الخلية بدلالة شدة الإشعاع الشمسي



الشكل (13) تغير عامل الملء بدلالة شدة الإشعاع الشمسي

ثالثاً: تأثير الطول الموجي على معالم خرج الخلية عملياً

يوضح الشكل (15) تغيرات تيار دارة القصر وجهد الدارة المفتوحة وكفاءة الخلية الشمسية مع تغير الطول الموجي λ باستخدام المرشحات الضوئية عند شدة إشعاع شمسي $100W / m^2$ ودرجة حرارة $298K$ ويلاحظ أن الاستجابة الطيفية كانت منخفضة عند الطول الموجي $4700A^\circ$ (اللون الأزرق) لأنّ الأطوال الموجية القصيرة يتم امتصاصها بالقرب من الطبقة السطحية وتكون عملية إعادة الاتحاد لأزواج الكترولون-ثقب أكثر وضوحاً ممّا يسبب توهين للتيار الكهربائي، بينما تزداد الاستجابة الطيفية عند الطول الموجي $5800A^\circ$ (اللون الأصفر) لأن معظم حوامل الشحنة المتولدة والقريبة من الوصلة $p - n$ تصل إليه ولهذا يكون توهين التيار الكهربائي شبه معدوم.

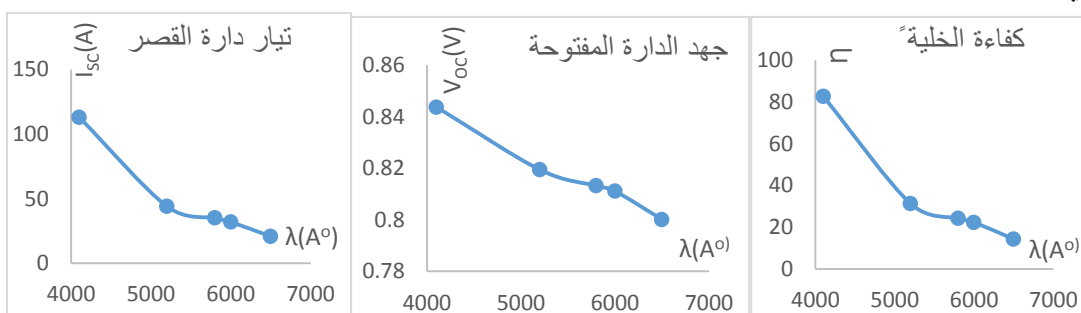


الشكل(15) تغير تيار دائرة القصر وجهد الدارة المفتوحة وكفاءة الخلية الشمسية بدلالة الطول الموجي عملياً

أما باقي الأطوال الموجية 6000Å (اللون البرتقالي) و 6500Å (اللون الأحمر) فإن الفوتونات تكون ممتصة وعمق في البلورة بعيداً عن الثنائي $p-n$ بالإضافة إلى حصول إعادة اتحاد من أجل تلك الأطوال، ونستطيع القول أن الطول الموجي الأمثل للخلايا السيلكونية هو 5800Å (اللون الأصفر) لهذا يمكن القول أن تحويل الطيف الشمسي إلى ضوء أحادي اللون يزيد من كفاءة الخلية الشمسية وأن القيمة العظمى للكفاءة كانت عند هذا الطول الموجي حيث بلغت 13.49%.

رابعاً: تأثير الطول الموجي على معالم خرج الخلية نظرياً

باستخدام البرنامج على الحاسب بلغة (MATLAB) الذي وُضع تم حساب تيار دائرة القصر وجهد الدارة المفتوحة وعامل الملاء وكفاءة الخلية الشمسية مع تغير الطول الموجي عند شدة إشعاع شمسي $100W/m^2$ ودرجة حرارة $298K$ والشكل(16) يوضح أن أكبر منطقة امتصاص كانت عند اللون الأزرق حيث بلغ التيار الكهربائي $113.02A$ وكفاءة الخلية 82.63% ويرجع ذلك لعمليات الامتصاص المباشرة للثقوب ثم بدأ الامتصاص بالتناقص تدريجياً ابتداءً من اللون الأخضر حيث كان التيار الكهربائي $43.97A$ وكفاءة الخلية 31.11% واستمر هذا التناقص إلى اللون الأحمر حيث أصبحت قيمة التيار الكهربائي $20.7A$ وكفاءة الخلية 14.26% ويمكن أن نفسر ذلك بأن معامل الامتصاص يتناسب طردياً مع معدل تولد أزواج (الالكترون-ثقب) وبنقصان معدل التولد يتناقص التيار المتولد ضوئياً وبالتالي تناقص تيار دائرة القصر وجهد الدارة المفتوحة وبالنتيجة تناقص واضح بكفاءة الخلية الشمسية.



الشكل(16) تغير تيار دائرة القصر وجهد الدارة المفتوحة وكفاءة الخلية الشمسية بدلالة الطول الموجي نظرياً

الاستنتاجات والتوصيات:

1. سُجلت أكبر قيمة عملية لتيار المخرج $2.62 A$ عند شدة اشعاع شمسي $I_D = 1000 W / m^2$ ودرجة حرارة $T = 298K$ بينما بلغت أكبر قيمة نظرية للتيار $2.5 A$ عند نفس شدة الاشعاع الشمسي ونفس درجة الحرارة المستخدمة عملياً.
2. ازداد جهد الدارة المفتوحة عملياً إلى أعلى قيمة له $0.5V$ مع بداية شروق الشمس وازدادت هذه القيمة لوغاريتمياً مع تزايد شدة الاشعاع الشمسي وبلغت $0.64V$ عند شدة اشعاع شمسي $I_D = 1000 W / m^2$ ودرجة حرارة $T = 298K$ أما نظرياً فقد بلغ جهد الدارة المفتوحة مستويات أكبر من القيم التي سُجلت عملياً ووصل إلى $0.869V$ عند شدة الاشعاع الشمسي الأعظمي $I_D = 1000 W / m^2$.
3. لوحظ تزايد كبير في نقطة القدرة العظمى من القيمة $0.225 W$ عند اشعاع شمسي شدته $I_D = 200 W / m^2$ إلى القيمة $1.409 W$ عند اشعاع شمسي شدته $I_D = 1000 W / m^2$ وتعود هذه الزيادة إلى ازدياد عدد الفوتونات بازياد شدة الاشعاع الشمسي مما يؤدي إلى ازدياد تولد أزواج (الكترن-ثقب) وهذا بدوره يؤدي إلى ازدياد التيار الكهربائي.
4. ازدادت كفاءة الخلية الشمسية تجريبياً من 10.78% عند اشعاع شمسي شدته $I_D = 200 W / m^2$ إلى 14.08% عند اشعاع شمسي شدته $I_D = 1000 W / m^2$ مع ثبات درجة الحرارة عند $T = 298K$.
5. تجريبياً سُجلت أفضل قيم لتيار دارة القصر $0.342 A$ وجهد الدارة المفتوحة $0.495V$ وكفاءة الخلية 13.49% عند الطول الموجي للون الأصفر $5800 A^\circ$ وشدة اشعاع شمسي $I_D = 100 W / m^2$ ودرجة حرارة $T = 298K$ ويرجح ذلك لعمليات الامتصاص المباشرة للفوتونات عند هذا الطول الموجي.
6. أكبر منطقة امتصاص نظرياً كانت عند اللون الأزرق $4200 A^\circ$ حيث بلغ تيار دارة القصر $113.02 A$ وجهد الدارة المفتوحة $32.820V$ وكفاءة الخلية 82.63% وهذا يعود إلى التناسب الخطي لمعامل الامتصاص مع معدل تولد أزواج (ثقب-الكترن).

Reference:

- [1] SAMIC H.; MAKHAM S.; *the Solar Cell The Influence of Radiation on Efficiency* BALKAN JOURNAL OF ELECTRICAL & COMPUTER ENGINEERING, Vol.2, No.1, **2014**
- [2] OGHEROhHWO E. P.; BARNABAS B. ;ALAFIATAYO A .O.; *Studying the effect of spectral variations intensity of the incident solar radiation on the Si solar cells performance* International Journal of Innovative Research in Computer Science & Technology Vol. 3, Issue4, **2015**
- [3] CHEMISANA D.; IBANEZ M.; ROSELL J.I. *Characterization of a photovoltaic-thermal module for Fresnel linear concentrator*. Energy Conversion and Management, Vol. 52, **2011**, 3234–3240.
- [4] LIANG Z. C.; CHEN D. M.; LIANG X. Q.; YANG Z. J.; SHEN H.; SHI J.; *Crystalline Si solar cells based on solar grade silicon materials*, Renewable Energy, Vol. 35, N.10, **2010**.
- [5] El Amin A.A.; · Al-Maghrabi M. A.; *The Analysis of Temperature Effect for mc-Si Photovoltaic Cells Performance Silicon*, Vol.10, **2018**, 1551–1555.

- [6] KLAMPAFTIS E.; RICHARDS B.S.; *Improvement in multi-crystalline silicon solar cell efficiency via addition of luminescent material to EVA encapsulation layer*. Prog. Photovoltaic. **2011**, 19, 345–351
- [7] DING K.; ZHANG J.; BIAN X.; XU J. *A simplified model for photovoltaic modules based on improved translation equations*. Solar Energy, 101, **2014**, 40-52.
- [8] PRIYANKA SINGH; RAVINDRA N.M.; *Temperature of Solar cell Performance-an analysis*, Solar Energy Materials & Solar Cells. 101, **2012**, 36-45.
- [9] SUBHASH CHANDER; PUROHIT, A.; ANSHU SHARMA; NEHRA, S.P; *A Study on Photovoltaic Parameters of Mono-Crystalline Silicon Solar Cell with Cell Temperature*. Energy Reports, vol.1, **2015**, 104-109.
- [10] SINGH P.; SINGH S.N.; LAL M.; HUSAIN M.; *Temperature dependence of I–V characteristics and performance parameters of silicon solar cell*. Solar Energy Materials and Solar Cells 92, **2008**, 1611–1616.
- [11] KEERTHI K NAIR; JITY JOSE; AJITH RAVINDRAN; *Analysis of temperature dependent parameters on solar cell efficiency using MATLAB*. IJEDR, Vol. 4, Issue 3, **2016**, 536-541.
- [12] JEHAD ADEEB, ALAA FARHAN, AHMED AL-SALAYMEH. *Temperature Effect on Performance of Different Solar Cell Technologies*. JEE. Vol. 20, **2019**.
- [13] MARTIN LIBRA, VLADISLAV POULEK, PAVEL KOURIM. *Temperature changes of I-V characteristics of photovoltaic cells as a consequence of the Fermi energy level shift*. Res. Agr. Eng. Vol. 63, **2017**.