

تأثير درجة الحرارة على معالم خرج الخلية الشمسية السيلكونية تجريبياً ونظرياً

د. رزق محمد قرفول*

(تاريخ الإيداع 2019/ 12/19. قُبِلَ للنشر في 2020/ 1 / 14)

□ ملخص □

تضمنت هذه الدراسة تأثير درجات الحرارة الواقعة في المجال $C^{\circ} [25 - 60]$ تجريبياً 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 القيمة العملية العظمى لجهد الدارة المفتوحة كان عملياً $0.6V$ ونظرياً $0.8778V$ عند الدرجة $25C^{\circ}$ ، و شدة إشعاع شمسي $I_D = 1000 W / m^2$ وطول موجي $\lambda = 580 nm$ للون الأصفر، وأظهرت أيضاً أنّ الكفاءة العملية العظمى للخلية الشمسية كانت 11.012% والكفاءة النظرية العظمى كانت 26.35% عند نفس الدرجة ونفس شدة الإشعاع الشمسي ونفس الطول الموجي، وتبين أنّ كل من الجهد والكفاءة للخلية الشمسية يتناقص مع زيادة درجات الحرارة، بينما تيار الخلية يبقى ثابتاً تقريباً.

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

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

The Temperature Effect on the Output Parameters of the Silicon Solar Cell Experimentally and Theoretically Dr. Rizek Karfoul*

(Received 19/12 /2019. Accepted 14/ 1 /2020)

□ ABSTRACT □

This study has included the effect of temperatures which are in the field $[25 - 60] C^{\circ}$ experimentally and theoretically on the voltage, the current and the efficiency of the solar cell. The purpose of this study is having the best use of the solar modules in order to produce the electric power required to provide energy to the whole loaded needed. This study showed that the maximum practical value of the open circuit voltage was experimentally $0.6V$ and theoretically it was $0.8778V$ at $25 C^{\circ}$, solar radiation intensity $I_D = 1000W / m^2$ and wave length $\lambda = 580 nm$ (yellow color). In addition, it showed that the maximum practical value of efficiency of the solar cell was 11.012% and the maximum theoretical value was 26.35% at the same temperature, same radiation intensity and same wave length. The study also proved that each of the voltage and the efficiency of the solar cell decreases by the increase of temperatures whereas the cell current stay almost constant.

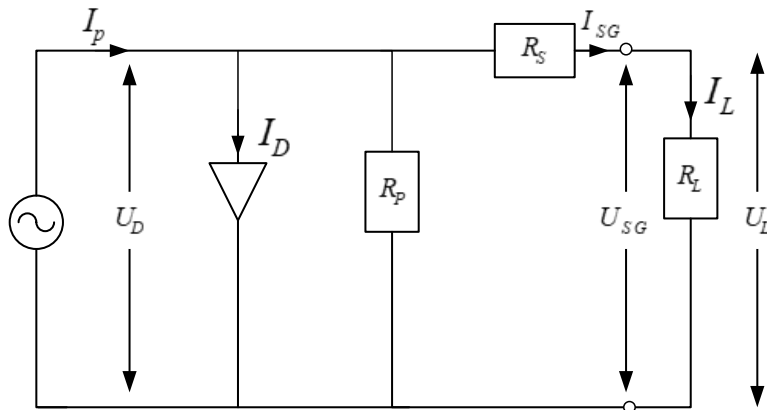
Key Words: Solar Cell Efficiency, Open Voltage, Short Current, Fill Factor, Saturation Current

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

مقدمة:

تعتبر الطاقة الشمسية إحدى صور الطاقة المتجددة والتي أصبحت تشكل جزءاً كبيراً من اهتمام جميع دول العالم لما لها من أهمية كبيرة في توفير نسبة عالية من الطاقة التقليدية علاوة على كونها طاقة نظيفة لا تحدث أي تلوث للبيئة بالإضافة لذلك فهي أقل تكلفة من كل مصادر الطاقة المستخدمة حتى الآن، هذا وقد بدأ استغلال الطاقة الشمسية منذ زمنٍ بعيدٍ إلا أن الدراسات المجدية على هذا النوع من الطاقة المتجددة لم تحقق نجاحاتٍ إلا في السنوات القليلة الماضية [1,2]، وما زال هذا المجال حتى الآن تحت دراسة العديد من الباحثين والعلماء في مختلف دول العالم وصولاً إلى أفضل الطرق لتجميع وتخزين هذا النوع من الطاقة الطبيعية والنظيفة والرخيصة التكاليف، لقد أعطى النصيب الأوفر في البحوث والتطبيقات لمجال تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء وهو ما يعرف بالفوتو فولتية photovoltaic [3]، وهذا المصدر من الطاقة هو أمل الدول النامية في التطور حيث أصبح توفر الطاقة الكهربائية من أهم العوامل الرئيسية لإيجاد البنى الأساسية فيها ولا يتطلب إنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية إلى مركزية التوليد بل تنتج الطاقة وتستخدم بنفس المنطقة أو المكان وهذا ما سوف يوفر كثيراً من تكلفة النقل والمواصلات وتعتمد هذه الطريقة بصورة أساسية على تحويل أشعة الشمس إلى طاقة كهربائية وتوجد في الطبيعة مواد كثيرة تُستخدم في صناعة الخلايا الشمسية والتي تُجمع بنظام كهربائي وهندسي محدد لتكوين ما يسمى باللوحة الشمسية [4].

فعند تعرض الخلية الشمسية لفوتونات ضوئية ذات طاقة أكبر من فجوة الطاقة (القطاع المحظور) لنصف الناقل E_g ، فإنها تُمتص من قبله وكل فوتون سوف يولد زوج (الكترن-ثقب) واللذان يتحdan بسرعة ويتحولان إلى حرارة، ولكن بوجود حاجز الجهد يتجه الإلكترون إلى الناقل الخارجي من المنطقة n والثقب نحو الناقل الخارجي من المنطقة p فيتولد جهد يؤدي إلى سريان تيار كهربائي لتشغيل حمل خارجي [3,4]، ولفهم العمل الكهربائي للخلية الشمسية يجب معرفة الدارة الكهربائية المكافئة لها على أساس مكونات كهربائية لها أداء معروف جيداً، يمكن تمثيل الخلية الشمسية النموذجية بمصدر تيار كهربائي current source متصل على التوازي مع ديود diode ولكن عملياً لا يمكن أن يتحقق ذلك لذا تكون الدارة الكهربائية المكافئة [5] محتوية على مصدر تيار على التوازي مع ديود بالإضافة إلى مقاومة على التسلسل وأخرى على التفرع الشكل (1).



الشكل (1) الدارة الكهربائية المكافئة للخلية الشمسية نظرياً

I_p : التيار الضوئي الناتج من الخلية الشمسية

I_d, U_d : جهد و تيار الديود الداخلي

R_p : مقاومة تفرع نتيجة عدم تجانس السطح والتيار المفقود عند حواف الخلية الشمسية

R_s : مقاومة تسلسل نتيجة مقاومة السيلكون

I_{SG}, U_{SG} : تيار وجهد الخلية الشمسية

R_L : مقاومة الحمل

I_L, U_L : جهد وتيار مقاومة الحمل حيث $I_L = I_{SG}$ و $U_L = U_{SG}$

تعرف أيضاً تيار الدارة المغلقة (تيار دائرة القصر) short current (I_{SC}) بأنه التيار المار في الخلية الشمسية إلى دائرة خارجية بدون حمل وهو أقصى تيار تستطيع خلية شمسية من إنتاجه من الإشعاع الشمسي ويعطى بالعلاقة الآتية [5,6]:

$$I_{SC} = I_0 \left(e^{\frac{qV_{oc}}{KT}} - 1 \right) \quad (1)$$

حيث K ثابت بولتزمان و T درجة الحرارة المطلقة و q شحنة الإلكترون و V_{oc} جهد الدارة المفتوحة open voltage الذي يعرف بأنه الجهد الذي تعطيه الخلية الشمسية عندما لا يمر تيار في الدارة أي عندما تكون دائرة الخلية مفتوحة ($R_L = \infty$) ويعطى بالعلاقة الآتية [5,6]:

$$V_{oc} = \frac{KT}{q} \ln \left(\frac{I_p}{I_0} + 1 \right) \quad (2)$$

I_0 : تيار الإشعاع لديود الخلية الشمسية ويعطى بالمعادلة الآتية [7]:

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

D : ثابت مميز للوصلة $p-n$ و E_g : عرض فجوة الطاقة وهو يتبع العلاقة الآتية [8]:

$$E_g(T) = E_g(300K) + \frac{dE_g}{dT}(T - 300K) \quad (4)$$

حيث أن $\frac{dE_g}{dT} = -2.3 \times 10^{-4} (eV / K)$ للسيليكون.

I_p : التيار المتولد ضوئياً ويعطى بالمعادلة الآتية [8]:

$$I_p = qAG(L_e + W + L_h) \quad (5)$$

حيث A مساحة الخلية الشمسية، و W عرض منطقة الاستنزاف و L_e, L_h هما طول الانتشار للإلكترون في المنطقة p وطول الانتشار للثقب في المنطقة n على التوالي و G معدل توليد زوج الكترون-ثقب ضوئياً ويعطى بالعلاقة الآتية [9]:

$$G = \frac{1}{2} \alpha \frac{I_D}{E_{ph}} \quad (6)$$

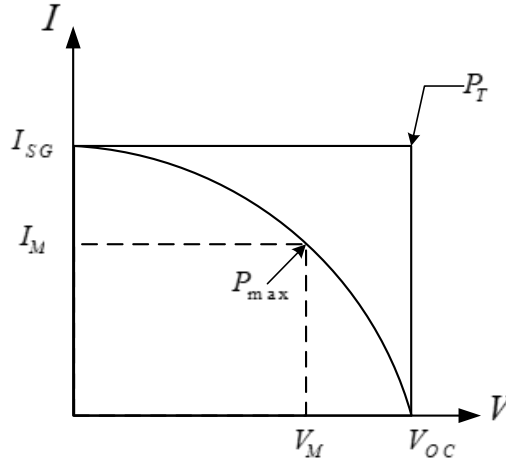
E_{ph} : طاقة الفوتون و α معامل الامتصاص و I_D شدة الإشعاع الشمسي المباشر على الخلية الشمسية. تعرف كفاءة تحويل الطاقة للخلية الشمسية PV energy conversion efficiency بأنها النسبة المئوية للقدرة المحولة من الإشعاع الشمسي الممتص عندما تكون الخلية متصلة بدارة كهربائية وتعطى الآتية [9]:

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{I_M \times V_M}{I_D \times A} \quad (7)$$

P_{in} : القدرة الواردة على الخلية الشمسية و P_{\max} : القدرة الكهربائية المولدة العظمى

I_M, V_M : جهد و تيار القدرة العظمى على التوالي

فإنه يكون للخلية الشمسية ذات الجهد الأعلى عامل ملء أكبر وتعطى العلاقة التجريبية لحسابه [7,8,9] كما يلي:



الشكل (2) تعريف عامل الملء

$$FF = \frac{P_{\max}}{P_T} = \frac{I_M \times V_M}{I_{sc} \times V_{oc}} \quad (8)$$

من المعادلة (8) نجد $P_{\max} = FF \times P_T = I_{sc} \times V_{oc} \times FF$ وبالتالي تصبح العلاقة بين الكفاءة وعامل الملء [7,8,9] كما يلي:

$$\eta = \frac{I_{sc} \times V_{oc} \times FF}{I_D \times A} \quad (9)$$

أما العلاقة النظرية التي تُستخدم لحساب عامل الملء نظرياً [8] فهي

$$FF = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1} \quad (10)$$

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

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{KT} = \frac{V_{oc}}{V_T} \quad (11)$$

حيث أن V_T الجهد الحراري.

أهمية البحث وأهدافه:

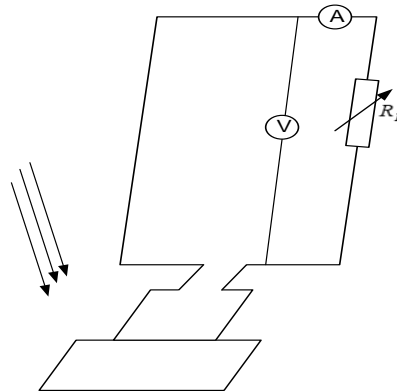
إنّ نضوب مصادر الطاقة التقليدية وتلويثها للبيئة والاستهلاك السريع لها، دفع العديد من الباحثين إلى الحصول على مصادر جديدة مُستدامة وغير ملوثة للبيئة كالطاقة الشمسية وذلك من خلال الظاهرة الفوتو فولتية التي هي تحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية مباشرةً باستخدام الخواص الالكترونية لبعض المواد النصف ناقلة مثل السيليكون 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 أبواب وآفاق 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:

أولاً تجريبياً:

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 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 على مسافة 30 cm بشكل عمودي من الخلية، وسخان حراري يوضع على بعد 5 cm من الخلية وأسلاك توصيل والشكل (3) يوضح الدارة المستخدمة لقياس معالم خرج الخلية الشمسية.



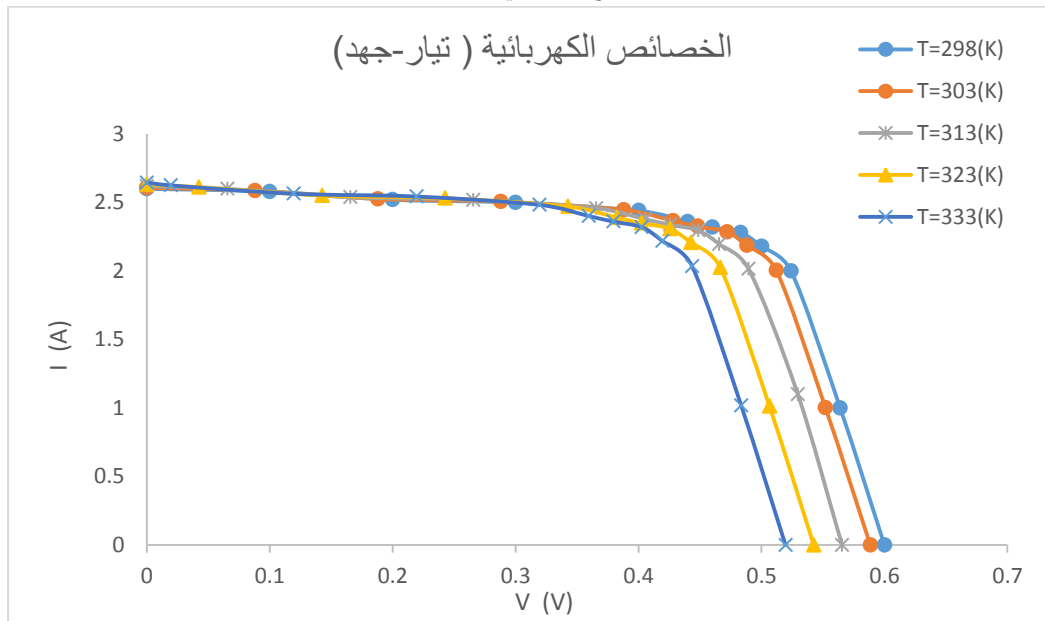
الشكل (3) الدارة الكهربائية التجريبية

نُسلط ضوء شدته $1000\text{ W} / \text{m}^2$ ونثبت درجة حرارة الخلية الشمسية عند 298 K وهي الدرجة $25\text{ }^\circ\text{C}$ ثم نقيس كل من التيار والجهد بتغير 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 دارة الخلية مفتوحة أي التيار معدوم والمقاومة $R_L = \infty$ ، تكرر هذه الخطوات من أجل قيم مختلفة لدرجات الحرارة المطلقة ($303 K, 313 K, 323 K, 333 K$) وتدون النتائج وترسم المنحنيات البيانية والتي سيتم مناقشتها لاحقاً. ثانياً نظرياً: أعد برنامج على الحاسوب (MATLAB) باستخدام المعادلات (1,2,3,4,5,6,9,10,11). وتم حساب معالم خرج الخلية عند درجات حرارة مختلفة ورسم الخطوط البيانية الموافقة لذلك.

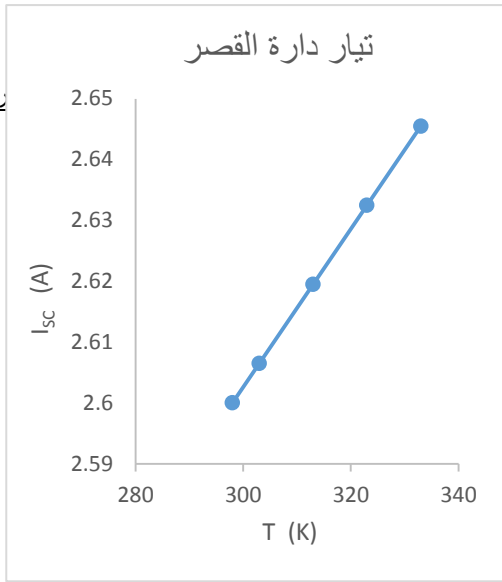
النتائج والمناقشة:

أولاً مناقشة النتائج التجريبية: يبين الشكل (4) خصائص (التيار-الجهد) للخلية الشمسية السيليكونية المدروسة مع تغير درجة الحرارة المطلقة عند ثبات شدة الاشعاع الشمسي عند $I_D = 1000 W / m^2$.

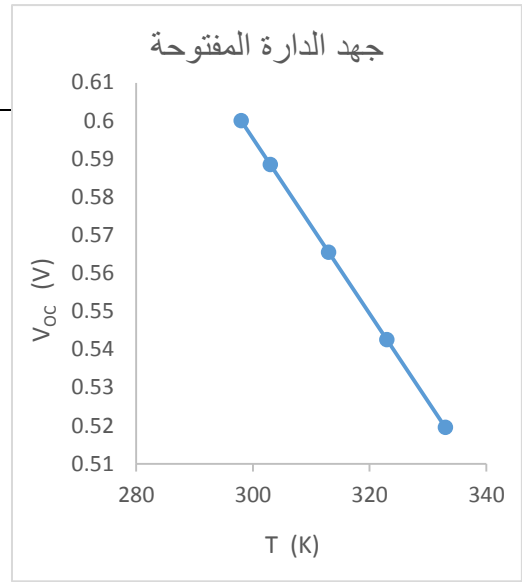


الشكل(4) الخصائص (تيار - جهد) عملياً عند درجات حرارة مختلفة

يتضح من الشكل أنه بزيادة درجة الحرارة فإن الكثير من الالكترونات ستكون قادرة على التحرك من قطاع التكافؤ في نصف الناقل إلى قطاع الناقلية، إضافة إلى وجود الالكترونات في قطاع الناقلية وفجوات في قطاع التكافؤ والتي تؤدي إلى زيادة تيار الاشعاع مما يؤدي إلى تناقص في جهد الدارة المفتوحة بمعدل $2.3 \times 10^{-3} V / K$ الشكل(5). وهذا التناقص في الجهد يسمح لحاملات الشحنة المتهيجة حرارياً أن تعبر منطقة الاستنزاف في كلا الاتجاهين، لكن تيار دارة القصر يزداد بمعدل $0.05\% A / K$ الشكل(6)

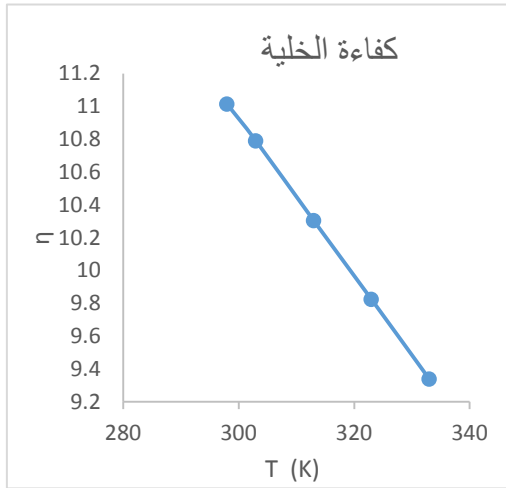


الشكل (6) تغير تيار دائرة القصر عملياً بتغير درجة الحرارة

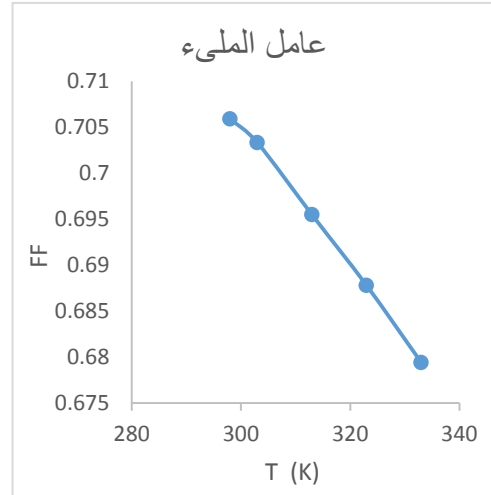


الشكل (5) تغير جهد الدائرة المفتوحة عملياً بتغير درجة الحرارة

وبما أنّ معدّل التناقص في جهد الدائرة المفتوحة أكبر من معدّل التزايد في تيار دائرة القصر سيؤدي ذلك إلى تناقص ملحوظ في عامل الملء FF بمعدّل $7.57 \times 10^{-4} / K$ (الشكل (7)) وتناقص أيضاً بكفاءة تحويل الخلية الشمسية η بمعدّل $4.78 \times 10^{-2} / K$ (الشكل (8)).

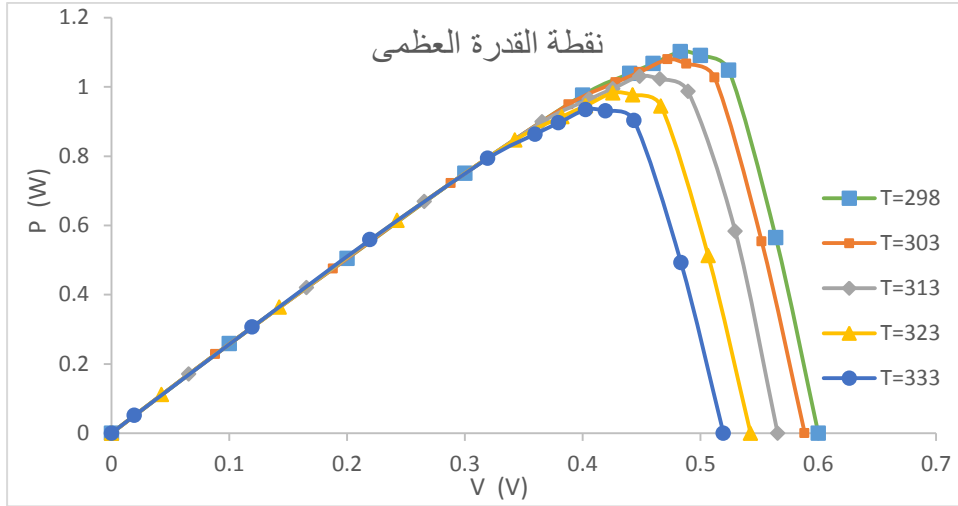


الشكل (8) تغير كفاءة الخلية عملياً بتغير درجة الحرارة



الشكل (7) تغير عامل الملء عملياً بتغير درجة الحرارة

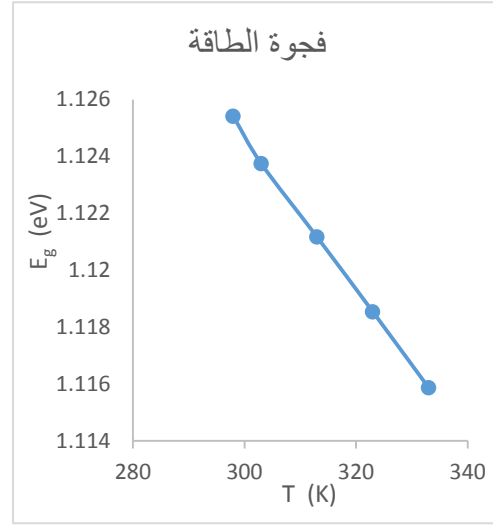
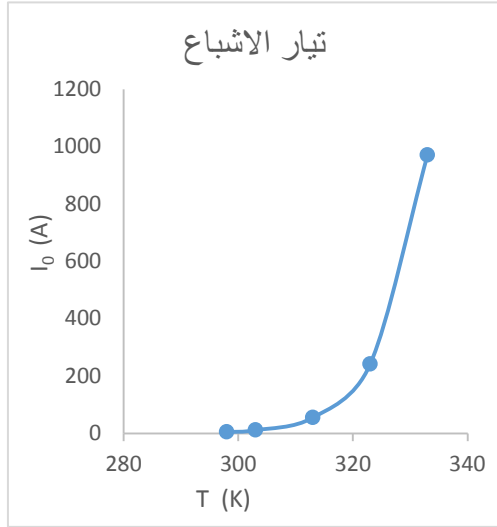
أما القدرة العظمى للخلية الشمسية فقد انخفضت بمعدّل $4.85 \times 10^{-3} W/k$ مع انزياح جانبي نحو اليسار (الشكل (9))



الشكل(9) تغيير قدرة الخلية الشمسية عملياً مع تغير درجة الحرارة المطلقة

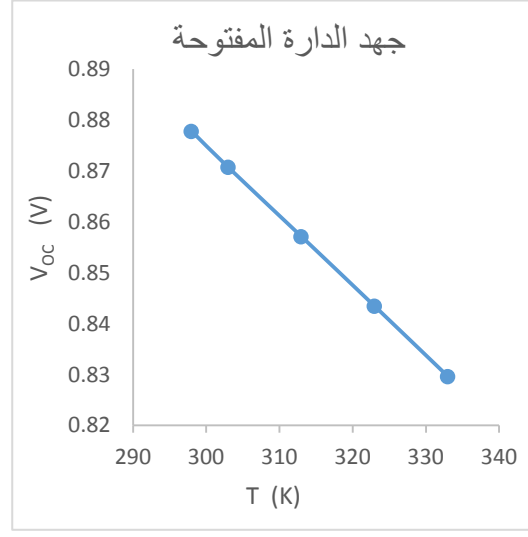
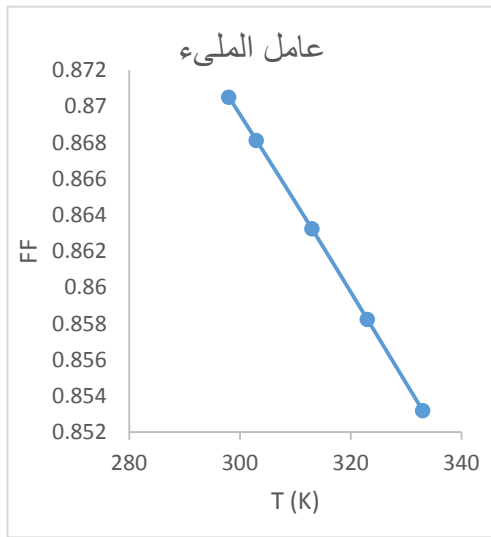
ثانياً مناقشة النتائج النظرية:

بالاعتماد على برنامج الحاسبة الالكترونية تمّ حساب معالم خرج الخلية السيلكونية عند درجات حرارة مختلفة وشدة إشعاع شمسي $I_D = 1000 W / m^2$ وطول موجي $\lambda = 580 nm$ وهو طول موجة الضوء الأصفر، وقد لوحظ أنه مع زيادة درجة الحرارة يتناقص عرض فجوة الطاقة E_g بمقدار $2.67 \times 10^{-4} eV / K$ الشكل (10)، مما يؤدي إلى أنّ الكثير من الالكترونات ستكون قادرة على الحركة من قطاع التكافؤ إلى قطاع الناقلية تاركَةً ثغوب، وهذا ما يدفع إلى زيادة في تيار الاثباع I_0 بمقدار $27.57 A / K$ الشكل(11).



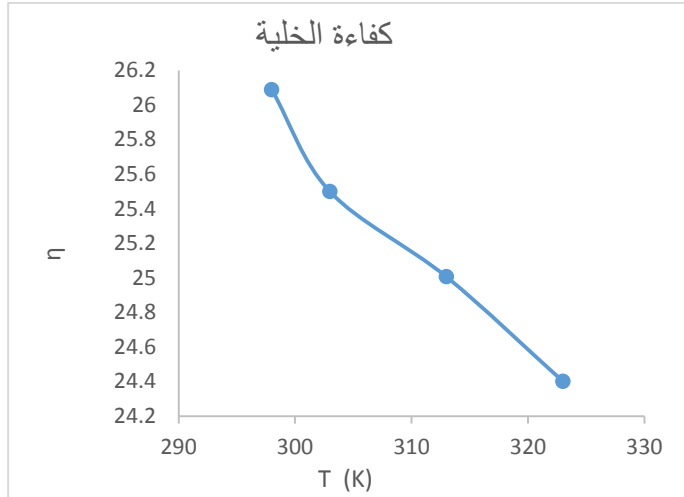
الشكل (10) تغيرات فجوة الطاقة نظرياً بتغير درجة الحرارة الشكل (11) تغيرات تيار الاشباع نظرياً بتغير درجة الحرارة

بالإضافة لذلك لاحظنا تناقص واضح في جهد الدارة المفتوحة V_{oc} بمقدار $1.377 \times 10^{-3} V / K$ الشكل(12)، وثبات بقيمة تيار دارة قصر الدارة.



الشكل(12) تغيرات جهد الدارة المفتوحة نظرياً بتغير درجة الحرارة الشكل(13) تغيرات عامل الملء نظرياً بتغير درجة الحرارة

وهذا بدوره يؤدي إلى تناقص في عامل الملء FF بمقدار $0.15\% / K$ الشكل(13)، ونقصان كفاءة الخلية الشمسية بمقدار 1.96% بين درجتي الحرارة $298 K$ و $333 K$ الشكل(14)، وهذا يتوافق مع دراسات سابقة [7,8,9,10].



الشكل (14) تغيرات كفاءة الخلية نظرياً بتغير درجة الحرارة

إن مقارنة القيم النظرية والعملية عند شروط التجربة المذكورة آنفاً وجدنا أن القيمة العظمى النظرية للكفاءة كانت 26.35% عند الدرجة 298K بينما كانت القيمة العظمى العملية للكفاءة عند نفس الدرجة 11.012% كذلك وجدنا أن أعظم قيمة لجهد الدارة المفتوحة نظرياً كانت 0.8778V عند الدرجة 298K أما عملياً فكانت أعظم قيمة 0.6V عند الدرجة 298K.

الاستنتاجات والتوصيات:

1. سُجلت أكبر قيمة لجهد الدارة المفتوحة عند شدة اشعاع شمسي $I_D = 1000 W / m^2$ ودرجة حرارة $25 C^\circ$ وكانت 0.6V.
2. سُجل تزايد كبير في قيم تيار الاشباع I_0 مع زيادة درجة الحرارة فقد بدأت بقيمة $6.1843 \times 10^{-13} A$ عند الدرجة $25 C^\circ$ ووصلت إلى $1116.217 \times 10^{-13} A$ عند الدرجة $60 C^\circ$.
3. لُوحظ انخفاض في عرض القطاع المحظور (فجوة الطاقة) E_g من 1.12046 eV عند الدرجة $25 C^\circ$ إلى 1.11241 eV عند الدرجة $60 C^\circ$.
4. لم يلاحظ ارتفاع يُذكر في قيم تيار دارة القصر I_{sc} فكانت قيمته 2.6 A عند الدرجة $25 C^\circ$ وأصبحت قيمته 2.6455 A عند الدرجة $60 C^\circ$.
5. سُجل انخفاض في قيم عامل الملاءم مع ارتفاع درجة الحرارة مما أثر سلباً على قيم كفاءة الخلية الشمسية التي بدورها انخفضت من القيمة 11.0124% عند الدرجة $25 C^\circ$ إلى القيمة 9.337598% عند الدرجة $60 C^\circ$.
6. إن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى زيادة تيار الاشباع، وبالتالي إلى تناقص القدرة الخارجة، لذا يفضل بناء أو وضع منظومات الخلايا الشمسية في أماكن لا ترتفع فيها درجات الحرارة كثيراً، ويجب أن تحتوي هذه الأماكن على تهويه جيدة أو أغطية نباتية أرضية منخفضة الارتفاع أو تُطلى الخلايا الشمسية بطبقتين أو أكثر لتقليل الانعكاسية عن السطح.

7. العمل أكثر على تقريب نُسب الكفاءة من القيمة النظرية البالغة % 18.4 وذلك بتقليل مقاومات التسلسل والتوازي والحمل لغرض رفع قدرة خرج الخلية الشمسية.

المراجع:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] PRIYANKA SINGH; RAVINDRA N.M.; *Temperature of Solar cell Performance-an analysis*, Solar Energy Materials & Solar Cells. 101, 2012, 36-45.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] KEERTHI K NAIR; JITTY JOSE; AJITH RAVINDRAN; *Analysis of temperature dependent parameters on solar cell efficiency using MATLAB*. IJEDR, Vol. 4, Issue 3, 2016, 536-541.
- [9] JEHAD ADEEB, ALAA FARHAN, AHMED AL-SALAYMEH. *Temperature Effect on Performance of Different Solar Cell Technologies*. JEE. Vol. 20, 2019.
- [10] 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.