

نمذجة ومحاكاة لاقط كهروضوئي في بيئة الحزمة البرمجية LABVIEW

م. أيمن إدريس*

د. محمد منذر القادري***

أ. د. جبر الرمحين**

المخلص

نعرض في ورقة العمل هذه نموذجاً رياضياً عاماً للاقط كهروضوئي يمكن استخدامه في الدراسات والتطبيقات التي تستخدم اللواقط الكهروضوئية. يمتاز هذا النموذج بأنه يعتمد على البارامترات الموجودة في نشرة الصانع (Data Sheet) الخاصة باللاقط الكهروضوئي.

بُنِيَ محاكٍ للنموذج الرياضي للاقط باستخدام الحزمة البرمجية LabView خلافاً لمعظم الأوراق السابقة في هذا المجال. تمثل LabView بيئة محاكاة، ويمكن بناء نماذج تجريبية فيها بالاعتماد على مفهوم (Hardware-in-loop)، كما يمكن استخدامها لتنفيذ التطبيقات الهندسية بشكل عملي.

اخْتَبِرَ المحاكى على لاقط كهروضوئي (Shell SP150-PC Photovoltaic Solar Module) ودُرِسَتْ خصائصه، وجرى إيجاد المنحنيات المميزة له. أظهرت نتائج المحاكاة أن النموذج الرياضي المقترح والمحاكي يعطي نتائج دقيقة جداً، إذ إن الخطأ الأعظمي لا يتجاوز 1% مما يمكن من اعتماده واستخدامه في مختلف دراسات وبحوث الطاقة الشمسية الكهروضوئية. وكذلك أثبتت فعالية استخدام الحزمة البرمجية LabView في المحاكاة في هذه التطبيقات.

الكلمات المفتاحية: النمذجة، الخلايا الكهروضوئية، برنامج المحاكاة، Lab view

*أعد هذا البحث في سياق رسالة الدكتوراه للمهندس أيمن إدريس بإشراف الأستاذ الدكتور المهندس جبر الرمحين ومشاركة الدكتور المهندس محمد منذر القادري - قسم هندسة الحواسيب والأتمتة - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

** قسم هندسة الإلكترونيات والاتصالات - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

*** قسم هندسة الحواسيب والأتمتة - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

1. المقدمة

ازدادت أهمية نظم التوليد الكهروضوئية PV لأنها تولد الطاقة الكهربائية قرب موقع الحمل من دون ضجيج ومن دون انبعاثات غازية. الميزة الرئيسية لهذه النظم مقارنة بأنظمة الطاقات المتجددة الأخرى هي توفر نظاماً ذات استطاعات منخفضة يمكن حيازتها وتشغيلها من قبل المستهلك.

يمكن أن نجمل الميزات الرئيسية للنظم الكهروضوئية بالنقاط الآتية [1]:

- قصر الوقت اللازم لتصميم محطة جديدة وتركيبها وتشغيلها.
- ساكنة لا تحتوي أجزاء متحركة، ومن ثم ليس لها أي ضجيج.
- عمرها طويل مع حاجة متدنية للصيانة نظراً إلى عدم وجود أجزاء متحركة فيها.
- سهولة النقل والحمل نظراً إلى خفة وزنها.

الخلايا الشمسية (Photovoltaic Cells) عبارة عن أجهزة بسيطة جداً مصنوعة من مواد ناقلة تمتلك القدرة على امتصاص الضوء وتحويل جزء من الطاقة الضوئية الممتصة إلى حوامل (carriers) التيار الكهربائي (ثقوب وإلكترونات). وهكذا، فإن الخلية الشمسية ببساطة هي ثنائي (diode) مصمم ومنتج بعناية ليمتص طاقة الضوء بكفاءة من الشمس ويحولها إلى طاقة كهربائية.

تُجمَع وتُربط الخلايا الشمسية كهربائياً مع بعضها بعضاً للحصول على اللاقط الكهروضوئي (Module) ، وتجميع اللواقط مع بعضها نحصل على مصفوفة لواقط (Array). يستخدم الربط على التسلسل للحصول على الجهد اللازم، كما أن الربط على التوازي يعطي التيار المطلوب.

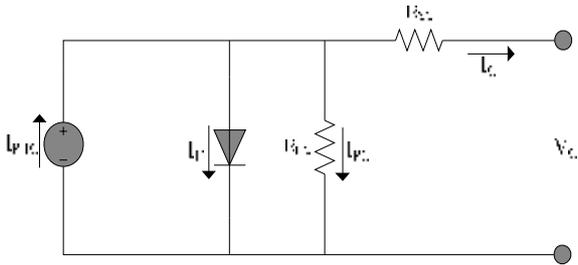
تولد الخلايا الكهروضوئية تياراً مستمراً لذلك يجب استخدام المعرجات (Inverters) في تطبيقات النظم الكهروضوئية الموصولة مع الشبكة أو الأحمال التي تعمل بتيار AC.

2. الدراسة المرجعية

قام عدد من الباحثين باقتراح نموذج للواقط الكهروضوئية تتناسب بحوثهم. فقد اقترح كل من جيرمي لاغروس [2] ودياف [3] وآخرون نموذجاً لحساب قيمة خرج استطاعة اللاقط الكهروضوئي تبعاً لدرجة الحرارة وقيمة شدة الإشعاع الشمسي (Irradiance)، ويُستفاد من هذا النموذج في دراسات إنتاجية هذه الأنظمة ودراسات الجدوى الاقتصادية للنظم الكهروضوئية. أمّا أوزنغلو [4] فقد اقترح نموذجاً لحساب جهد خرج اللاقط الكهروضوئي لتغذية منزل صغير. ومثلت الشاطر [5] النظام الكهروضوئي بمنبع للتيار المستمر في دراسة تطبيق التحكم العائم لإدارة تدفق الطاقة بين مكونات نظام توليد طاقة هجين.

نعرض في ورقة العمل هذه نموذجاً رياضياً عاماً للاقط كهروضوئي يمكن استخدامه في الدراسات والتطبيقات التي تستخدم اللواقط الكهروضوئية. يمتاز هذا النموذج بأنه يعتمد على البارامترات الموجودة في نشرة الصانع (Data Sheet) الخاصة باللاقط الكهروضوئي. إذ يكفي إدخال بارامترات أي لاقط لنحصل على خصائصه ومنحنيات I-V و P-V له عند درجة الحرارة المحيطة Ta وشدة الإشعاع الشمسي G المختلفة.

اعتمد العديد من الباحثين Simulink في بيئة Matlab لتمثيل النماذج الرياضية للواقط الكهروضوئية. أمّا في ورقة العمل هذه فقد استخدمت الحزمة البرمجية LabView لتمثيل النموذج الرياضي العام للاقط الكهروضوئي.



الشكل (2) نموذج لتمثيل الخلية الكهروضوئية

يمكن بتبسيط مقبول إهمال المقاومة التفرعية $R_p = \infty$ [8] و [4] ومن ثمّ باستخدام قانون كيرشوف للعدّة يمكن كتابة المعادلة الآتية:

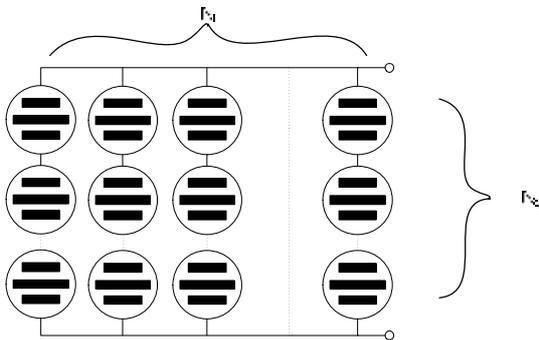
$$I_C = I_{phc} - I_D$$

وبالتعويض نجد أن :

$$I_C = I_{phc} - I_o \left(\exp \left(\frac{V_c + I_c R_{sc}}{n.K.T_c} \right) - 1 \right) \quad (1)$$

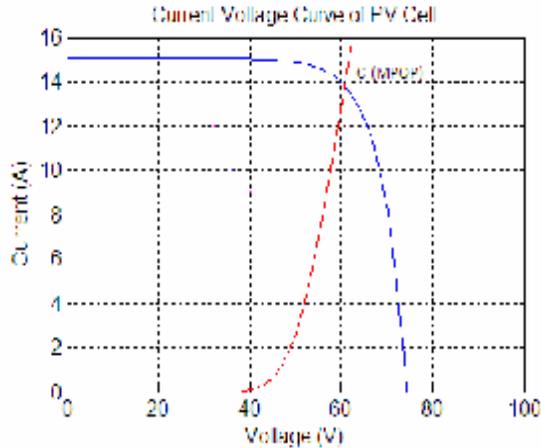
يبين الشكل (3) لاقطاً كهروضوئياً مؤلفاً من عدد من الخلايا موصولة على التسلسل ($N_s=3$) تشكل سلسلة (String) وعدداً من السلاسل موصولة على التفرع ($NP=4$)، ومن ثمّ يمكن كتابة المعادلات الآتية:

$$\begin{cases} I_{PV} = N_p \cdot I_C \\ I_{PH} = N_p \cdot I_{PHC} \\ V_{PV} = N_s \cdot V_C \\ V_{OC} = N_s \cdot V_{OC} \end{cases} \quad (2)$$



الشكل (3) تمثيل اللاقط الكهروضوئي بعدد من الخلايا الكهروضوئية

3. منحني الخصائص المميّزة I-V للاقط الكهروضوئي: يظهر الشكل (1) منحني خصائص تيار - جهد للاقط كهروضوئي، نلاحظ القيمة المميّزة V_{OC} التي تعبر عن جهد الدارة المفتوحة $I=0$ والقيمة المميّزة I_{SC} التي تمثل تيار القصر $V=0$ ، كما نلاحظ النقطة (C) التي تمثل نقطة التشغيل ذات الاستطاعة العظمى $(I_{pm}, V_{pm}) P_{MAX}$.



الشكل (1) منحني الخصائص الكهربية I-V للاقط كهروضوئي [6]

4. نمذجة اللاقط الكهروضوئي:

يتكون أبسط نموذج لتمثيل الخلية الكهروضوئية من منبع تيار موصول على التوازي مع ثنائي (Diode). يوضّح الشكل (2) نموذج الدارة المكافئة الموسعة (Extended Equivalent Circuit) الذي يعطي توصيفاً جيداً في أغلب التطبيقات حيث يُضاف تأثير مقاومة تسلسلية R_S الممانعة لمرور التيار، ومقاومة تفرعية R_P تمثل التسريبات في الخلية الكهروضوئية. كلما انخفضت قيمة R_S أو ازدادت قيمة R_P كلما كانت الخلية الكهروضوئية ذات كفاءة أعلى، والحالة المثالية تتحقق عندما تكون $R_S = 0$ و $R_P = \infty$ ، وبشكل عملي فإن R_S للخلية الكهروضوئية عبارة عن بضعة ميلي أوم و R_P أكبر من 10 أوم. [7]

$$\begin{cases} R_{SA} = \frac{V_{OCA}}{I_{SCA}} - \frac{P_{mA}}{FF_{OA} * I_{SCA}} \\ FF_{OA} = \frac{V_C - I_n(V_C + 0.75)}{1 + V_C} \\ V_C = \frac{V_{OCA} * q}{KT_C} \end{cases} \quad (9)$$

ومن ثمّ تصبح بارامترات المعادلة (3) معلومة جميعها، ولتحديد منحى الخصائص للاقط كهروضوئي نأخذ الحالة الابتدائية التي تكون فيها:

$$\begin{cases} I_{PV} = 0 \\ V_{PV} = V_{OCA} \end{cases}$$

ثم نبدأ بتحديد قيمة جديدة للجهد ($V_{PV} = V_{PV} - STEP$) ونوجد قيمة I_{PV} الموافقة لها، لكن نلاحظ أن قيمة التيار المراد حسابها تتكرر في طرفي المعادلة (3)، ولحل هذه المعادلة نلجأ إلى طرائق التحليل العددي ونستخدم تقنية Newton - Raphson حيث تعطى قيمة ابتدائية للتيار $I_{PV}=0$ ويتم تكرار حساب المعادلة للوصول إلى القيمة الفعلية للتيار وفق الآتي:

$$I_{PV} = I_{PV} - \frac{I_{PV} - I_{PH} + I_0 * \left(\exp\left(\frac{V_{PV} + I_{PV}.R_S}{KT_C/q}\right) \right)}{I_0 * R_S * \exp\left(\frac{V_{PV} + I_{PV}.R_S}{KT_C/q}\right) + 1} \quad (10)$$

ونعيد تكرار العملية حتى الوصول إلى قيمة ($V_{PV}=0$) التي تكون عندها ($I_{PV}=I_{SCA}$).

ولحساب الاستطاعة الناتجة عن اللاقط نستخدم المعادلة الآتية:

تكتب المعادلة (1) بعد تحويلها لتمثل لاقطاً كهروضوئياً من خلال التحويلات الواردة في المعادلات (2) وفق الآتي:

$$I_{PV} = I_{Ph} - N_p \cdot I_o \cdot \left(\exp\left(\frac{V_{PV} + I_{PV} \cdot R_s}{n \cdot K \cdot T_c / q}\right) - 1 \right) \quad (3)$$

يعبر I_{Ph} عن قيمة التيار الكهروضوئي عند إشعاع شمسي شدته G ودرجة حرارة الخلية T_C :

$$I_{Ph} = I_{SCA} = \frac{G}{1000} * I_{SC} \left\{ \frac{\partial I}{\partial T} * (T_C - T_{AO}) \right\} \quad (4)$$

ونحصل على I_0 بحل المعادلة (3) عند نقطة التشغيل ($V_{PV} = V_{OC}$ و $I_{PV} = 0$) ومن ثمّ:

$$0 = I_{Ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V_{OC}}{n \cdot K \cdot T_c / q}\right) - 1 \right) \quad (5)$$

$$I_0 = \left(\exp\left(\frac{I_{SCA}}{n \cdot K \cdot T_c / q}\right) - 1 \right) \quad (6)$$

وتحسب قيمة V_{OC} عند درجة حرارة معينة وفقاً للمعادلة الآتية:

$$V_{OCA} = V_{OC} + \left\{ \frac{\partial V}{\partial T} * (T_C - T_{CO}) \right\} \quad (7)$$

يمكن اعتماد العلاقة الآتية لحساب T_C [9]:

$$T_C = T_A + \frac{NOCT - 20}{800} * G \quad (8)$$

ويمكن حساب قيمة R_S وفقاً لما توصل إليه أندريو [10]:

R_{SC}	Cell series resistance (Ω)	V_{OC}	Open circuit voltage of cell (V)
R_{PC}	Cell parallel resistance (Ω)	V_{oc}	Open circuit voltage of cell
I_{Phc}	Cell photon current (A)	V_{ocA}	Open circuit voltage of cell @ T_A (V)
I_D	Current through diode (A)	R_S	Module series resistance (Ω)
I_C	Cell current (A)	R_P	Module parallel resistance (Ω)
I_0	Diode reverse saturation current (A)	$\partial I / \partial T$	Current temperature coefficients (A/K)
V_C	Cell volt (V)	$\partial V / \partial T$	Volt temperature coefficients (V/K)

n	Non-ideality factor	$\partial P/\partial T$	Power temperature coefficients (W/K)
K	Boltzmann constant ($1.38e^{-23}$ (J/K))	I_{SC}	Short circuit current (A)
Q	Electron charge ($1.6e^{-19}$ (C))	I_{SCA}	Short circuit current @ Ta
I_{PV}	Operation module Current @ Ta (A)	T_C	Cell Temperature (K)
I_{PH}	Module photon current (A)	T_{CO}	Cell temperature @ Ta=25 C (K)
V_{PV}	Operation module voltage (V) @ Ta (A)	NOCT	Nominal operating cell temperature
N_s	Number of cells connected in series	Ta	Ambient temperature (K)
N_p	Number of cells connected in parallel	R_{SA}	Module series resistance @ Ta (Ω)
P	Module rated power output (W)	G	Solar irradiation ($W.m^{-2}$)
P_{mA}	Maximum power output @ Ta (W)	FF _{OA}	Fill factor of the Module with ($R_s = 0$)

5. محاكاة اللاقط الكهروضوئي

LABView مايسمى بتدفق البيانات (dataflow) الذي

يحدد تنفيذ البرنامج [11].

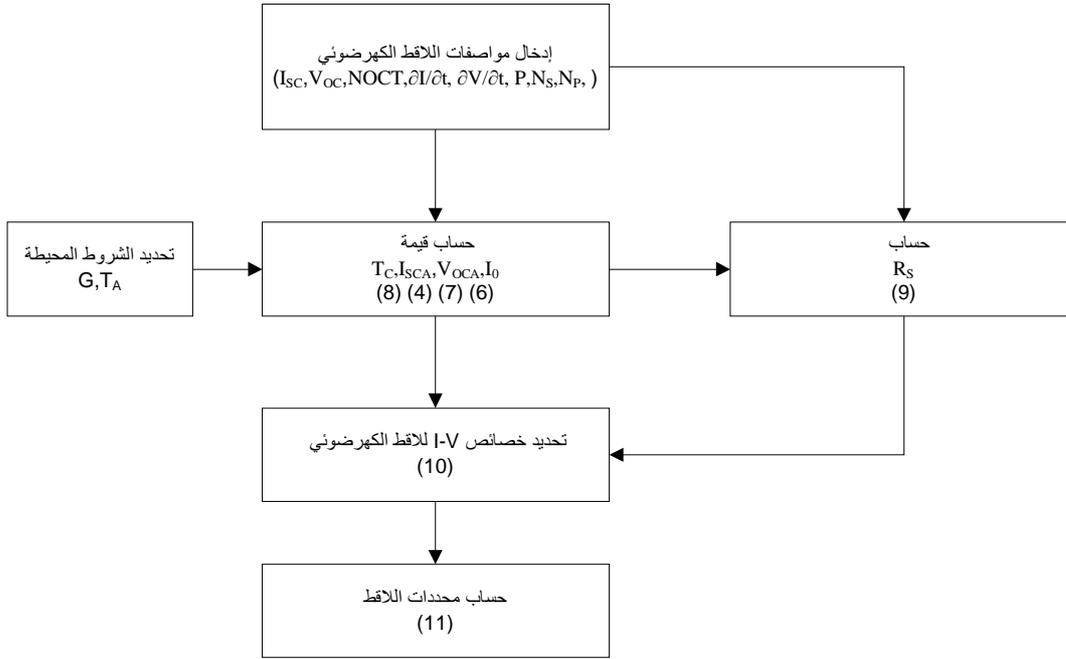
يوضح الشكل (5) الواجهة الرئيسية للمحاكي إذ نلاحظ وجود واجهة ذات أربع قوائم تبويب (Tab) الأول يظهر منحني الخصائص المميزة للاقط والثاني يتضمن مواصفات اللاقط المراد دراسته، والثالث يتضمن قيم درجة حرارة الوسط المحيط وشدة الإشعاع الشمسي، والأخير يتضمن مخرجات المحاكاة كالاستطاعة العظمى وقيمة Fill Factor.

أمّا الشكل (6) فيوضح صفحة إدخال اللاقط الكهروضوئي المراد دراسته باستخدام المحاكي وفق النموذج الرياضي العام الموضح سابقاً.

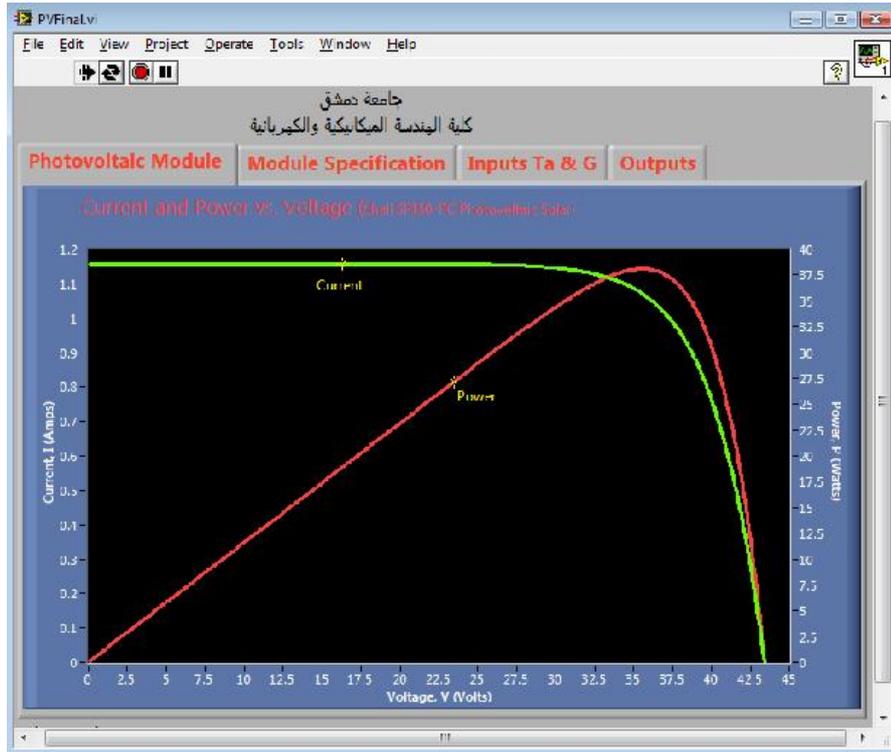
ويوضح الشكل (7) البرنامج الرئيس (Code) للمحاكي المبني باستخدام LabView ويضم ست برمجيات جزئية (Subroutine) يوضح الشكل واحدة منها المتمثلة بالكود اللازم لحساب قيم منحني I-V.

يبين الشكل (4) مخطط بناء محاكي اللاقط الكهروضوئي وفق النموذج الذي عرّض في الفقرة السابقة. استخدمنا الحزمة البرمجية LabView لمحاكاة النموذج خلافاً لما هو متبع في اعتماد Matlab وذلك نظراً إلى أن هذه الحزمة تمثل بيئة محاكاة بالدرجة الأولى، كما أن الميزة الثانية لهذه الحزمة تتمثل بإمكانية بناء نماذج تجريبية فيها بالاعتماد على تقنية (Hardware-in-loop) التي غدت تقنية فعالة في التصميم الهندسي كمرحلة وسطى بين مرحلة المحاكاة ومرحلة تنفيذ التطبيق الهندسي بشكل كامل. وأخيراً فإن الحزمة البرمجية تشكل بيئة تطبيقات عملية يتم من خلالها تنفيذ أعقد التطبيقات الهندسية.

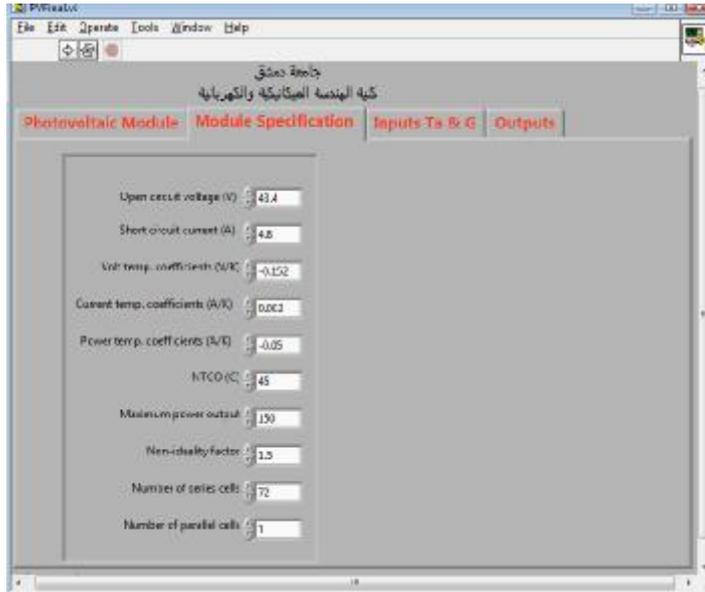
تعدّ الحزمة البرمجية LabView لغة برمجة رسومية (graphical) تستخدم الأيقونات عوضاً عن السطور النصية لإنشاء التطبيقات البرمجية وعلى نقيض لغات البرمجة التقليدية التي تستخدم النصوص حيث تحدد التعليمات (instruction) مراحل تنفيذ البرنامج، تستخدم



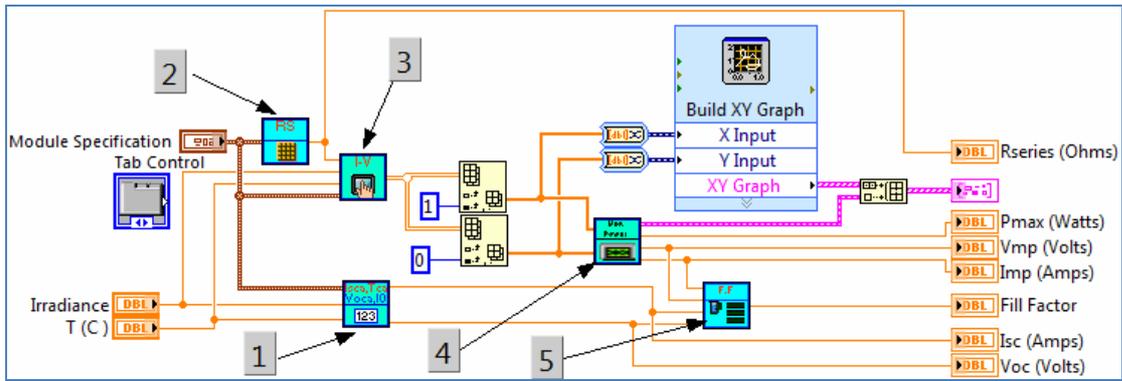
الشكل (4) مخطط بناء محاك لنموذج اللاقط الكهروضوئي



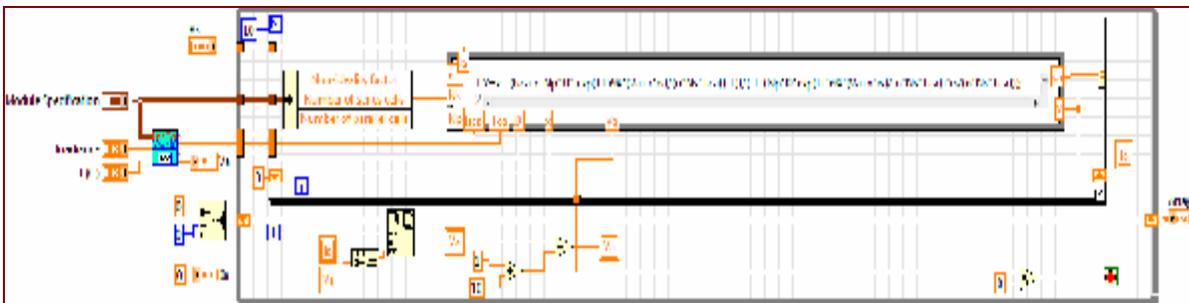
الشكل (5) الواجهة الرئيسية للمحاكي باستخدام LabView



الشكل (6) نموذج لإدخال بارامترات اللاقط الكهروضوئي



الشكل (7) الكود البرمجي للمحاكي باستخدام LabView



الشكل (8) الكود البرمجي الجزئي لحساب I-V للاقط

6. نتائج المحاكاة

- باستخدام النموذج الرياضي العام للاقط الكهروضوئي المعتمد الذي تم محاكاته باعتماد LABView سنقوم باستعراض نتائج المحاكاة للاقط نوع (Shell SP150-PC Photovoltaic Solar Module) وسنستعرض منحنى I-V ومنحنى P-V للاقط عند الشروط القياسية، ومنحنيات I-V ومنحنيات P-V في الحالات الآتية:
- الجدول (1) مواصفات اللاقط كهروضوئي Shell SP150-PC Photovoltaic Solar Module

الجدول (1) مواصفات اللاقط الكهروضوئي Shell SP150-PC Photovoltaic Solar Module

Parameter	Variable	Value	Parameter	Variable	Value
استطاعة خرج اللاقط Module rated power output	P	150 (W)	جهد الدارة المفتوحة Open circuit voltage	V _{oc}	43.4 (V)
المعامل الحراري للتيار Current temperature coefficients	$\partial I/\partial T$	2 mA/°C	المعامل الحراري للجهد Volt temp. Coefficients	$\partial V/\partial T$	-152 mV/°C
المعامل الحراري للاستطاعة Power temperature coefficients	$\partial P/\partial T$	-0.45 %/°C	تيار دارة القصر Short circuit current	I _{sc}	4.8 (A)
درجة حرارة التشغيل الاسمية للخلية Nominal operating cell temp.	NOCT	45 °C	الاستطاعة عند نقطة التشغيل العظمى Maximum power output	P _{mA}	150
عدد الخلايا التسلسلية Number of series cells	N _s	72	عدد السلاسل التفرعية Number of parallel cells	N _p	1

STC: irradiance level 1000W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature 25°C

- يوضح الشكل (9) منحنى الخصائص المميزة I-V و P-V للاقط (Shell SP150-PC) بالاعتماد على المحاكى. تتأثر قيمة التيار المتولد في اللاقط الكهروضوئي بقيمة شدة الإشعاع الشمسي إذ ترتفع قيمة التيار بارتفاع شدة الإشعاع مع ثبات قيمة الجهد (الشكل B-10)، ومن ثم فإن قيمة الاستطاعة ترتفع (الشكل B-11). ويوضح الشكل (الشكل A-11) تأثير تغير درجة الحرارة في منحنى I-V ونلاحظ انخفاض قيمة الجهد مع زيادة قيمة درجة الحرارة، ومن ثم تنخفض قيمة الاستطاعة (الشكل A-11) ومن ثم فإن كفاءة اللاقط تنخفض.

7. الخلاصة والتوصيات

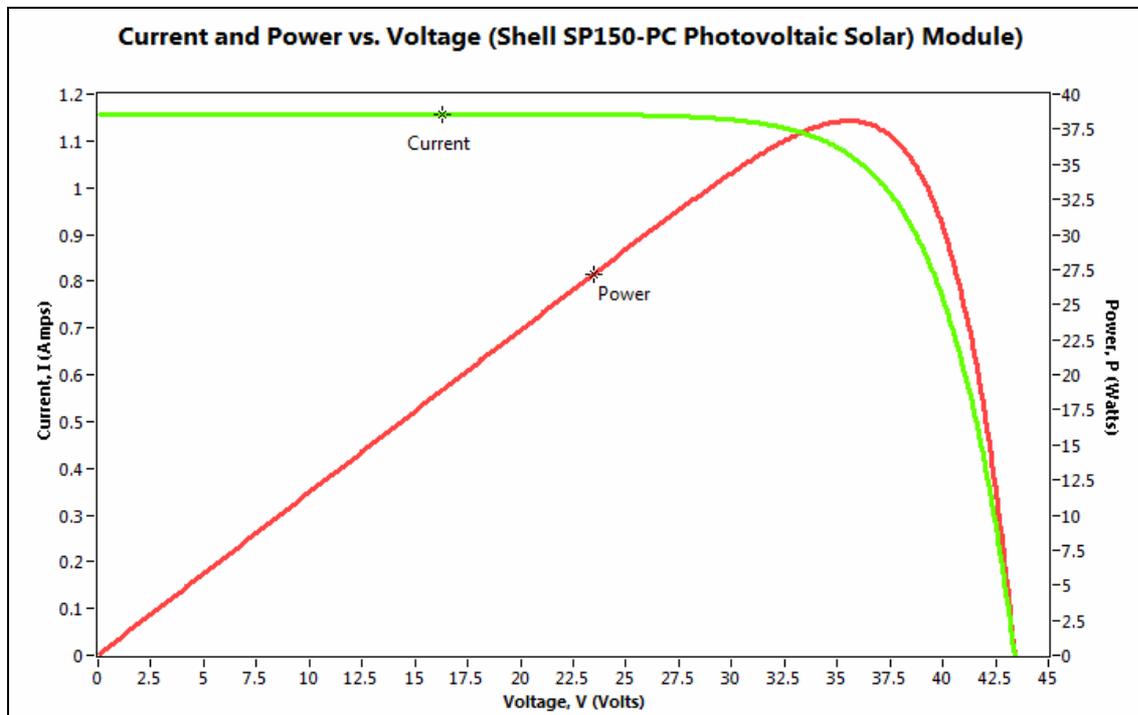
اعتمدت منحنيات خصائص I-V و P-V والقيم الواردة في نشرة الصانع لاختبار النموذج الرياضي للاقط الكهروضوئي وللمحاكي. بدايةً يمكن مقارنة نقطة التشغيل

بناءً على ماسبق يمكن القول: إنَّ النموذج الرياضي الذي نوَقِشَ في ورقة العمل هذه يعطي نتائج دقيقة جداً مما يمكن من اعتماده واستخدامه في مختلف دراسات الطاقة الشمسية الكهروضوئية وبحوثها. وكذلك تظهر فعالية استخدام الحزمة البرمجية LabView في المحاكاة في هذه التطبيقات.

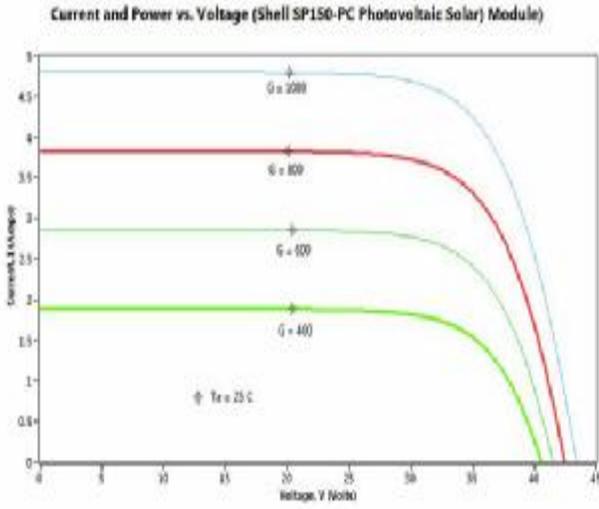
ونقترح أن يجري البحث في بناء محاكيات أخرى للمبدلات DC/DC و AC/DC و DC/AC ووحدات التخزين كالبطاريات لاستكمال العناصر اللازمة لبحوث الطاقة الشمسية الكهروضوئية باستخدام الحزمة البرمجية LabView.

المتلى للاقط الكهروضوئي عند الشروط القياسية مع نتائج المحاكى، إذ إنَّ جهد الدارة المفتوحة و تيار القصر متطابقان تماماً ونقطة التشغيل المتلى وفق النشرة هي $P_m=150\text{ w}$ و $V_{pm}=34\text{ V}$ و $I_{pm}=4.4\text{ A}$ أما وفق النموذج الرياضي فهي: $P_m=149.15$ و $V_{pm}=34\text{ V}$ و $I_{pm}=4.39\text{ A}$.

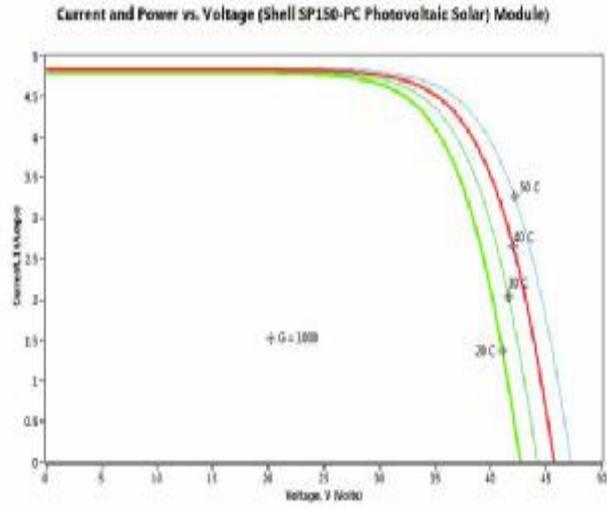
أما قيم تيار القصر عند قيم مختلفة لشدة الإشعاع الشمسي فإن الخطأ لا يتعدى قيمة 1%. وبالنسبة إلى أداء النموذج عند تغيّرات درجة الحرارة فنلاحظ أن الخطأ بحساب قيمة جهد الدارة المفتوحة لا يتعدى 0.8%، والخطأ في تيار القصر لا يتعدى 1%.



الشكل (9) منحنى الخصائص المميزة للاقط عند الشروط النظامية

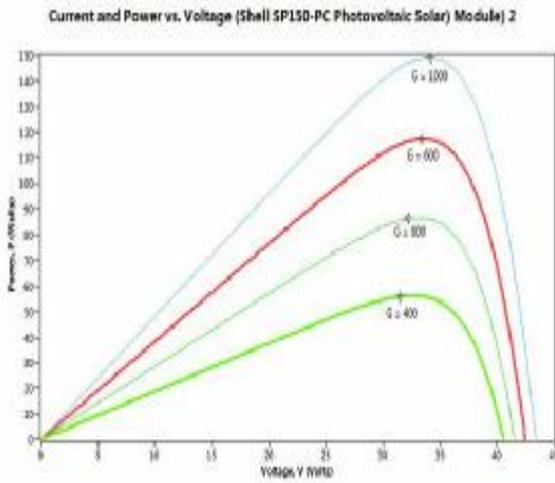


(B)

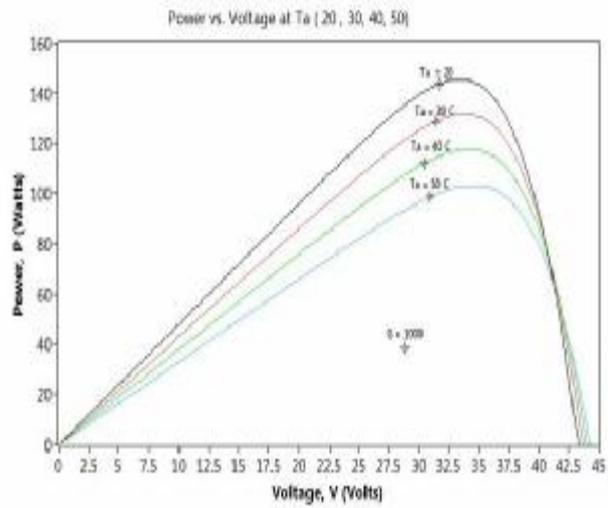


(A)

الشكل (10) منحنيات I-V تبعاً لدرجة الحرارة ($G=1000 \text{ W/ m}^2$) الشكل (A) أو تبعاً لتغير G عند ($T=25 \text{ C}^0$) الشكل (B)



(B)



(A)

الشكل (11) منحنيات P-V تبعاً لدرجة الحرارة ($G=1000 \text{ W/ m}^2$) الشكل (A) أو تبعاً لتغير G عند ($T=25 \text{ C}^0$) الشكل (B)

المراجع:

1. Patel, M.: Wind and Solar Power System. CRC Press, New York (1999)
2. Lagorse, J., Paire, D., Miraoui, A.: Sizing optimization of a stand-alone street lighting system powered by a hybrid system using fuel cell, PV, and battery. *Renewable Energy* 34, 683 - 691 (2009)
3. S. Diaf, D.: A methodology for optimal sizing of autonomous hybrid PV/wind system. *Energy Policy*, 5708–5718 (2007)
4. Uzunoglu, M., Onar, O. C., Alam, M. S.: Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications. *Renewable Energy*, 509–520 (2009)
5. Al-Shatter, T., Eskander, M., El-Hagry, M.: Energy flow and management of a hybrid wind/PV/fuel cell generation system. *Energy Conversion and Management* 47, 1264-1280 (2006)
6. Hernández, M.: HIERARCHICAL CONTROL OF HYBRID POWER SYSTEMS. UNIVERSITY OF PUERTO RICO (2007)
7. Quaschnig, V.: Understanding Renewable Energy Systems. EARTHSCAN, London (2005)
8. Li, C.-H., Zhu, X.-J., Cao, G.-Y., Su, S.: Dynamic modeling and sizing optimization of stand-alone photovoltaic power systems using hybrid energy storage technology. *Renewable Energy* 34, 815-826 (2009)
9. Chedid, R., Rahman, S.: A decision support technique for the design of hybrid solar wind power systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion* 13, 76–83 (1988)
10. Golder, A.: Photovoltaic Generator Modeling for Large Scale Distribution System Studies. Master Theses, Drexel University, Drexel (2006)
11. Idriss, A.: Study on computerized energy management control system and applied it on industrial company. Master Thesis, Damascus University, Damascus (2008)