

دراسة أثر التقادم الناجم عن التوتر على استطاعة الألواح الكهروضوئية (تطبيق محطة الكسوة)

هدلة زرزور^{1*} وسيم سعيد²

*1. طالبة دراسات عليا (ماجستير)، قسم هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق hadlh.zarzur@damascusuniversity.edu.sy

² مدرس، دكتور، قسم هندسة الطاقة الكهربائية، كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق، waseem.saeed@damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

يتم تصميم محطات أنظمة الطاقة الكهروضوئية المتصلة بالشبكة بسويات توتر مختلفة، والتي قد وصلت إلى حد 1500 فولط بهدف التقليل من الكلف الاقتصادية للمنظومات، لكن تبين ضمن ظروف التشغيل وجود مشاكل بسبب سويات التوتر المرتفعة، تم في هذا البحث دراسة انخفاض الاستطاعة الناتج عن سوية التوتر (التقادم الناجم عن التوتر)، وتطبيق حالة عملية على محطة الكسوة ذات سوية توتر 666 فولط، حيث تبين أن نسبة انخفاض الاستطاعة بسبب أثر التقادم الناجم عن التوتر في مدينة دمشق ذات المناخ الشبه جاف يتراوح بين (9-11)%، وهو ما يماثل أثر التقادم النظري طبقاً للنموذج الرياضي المدروس عند نفس الفترة، ومنه يمكن استخدام النموذج للتنبؤ بأثر الPID بهدف تصميم المنظومة بأفضل شكل.

الكلمات المفتاحية: الألواح الكهروضوئية السيليكونية، التقادم الناجم عن التوتر، توتر المنظومة، استطاعة الألواح.

تاريخ الإيداع : 2023/6/13

تاريخ القبول: 2023/8/8



حقوق النشر: جامعة دمشق

سورية، يحتفظ المؤلفون

بحقوق النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA

Studying The Effect of Potential Induced Degradation(PID)on Moudels Power(Case Studyat Al-Kiswah Station)

Hadlh Zarzour^{*1} Waseem Saeed²

¹*Graduate student (Master's level), Department of Electrical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University

hadlh.zarzour@damascusuniversity.edu.sy ،

² .Lecturer, PhD, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University waseem.saeed@damascusuniversity.edu.sy

Abstract:

This article investigates the phenomenon of Potential-Induced Degradation (PID) in photovoltaic systems connected to the grid. The aim is to analyze the capacity decrease resulting from high voltage levels used to minimize economic costs. The study focuses on a practical case conducted at Al-Kiswah station in

Damascus, characterized by a semi-arid climate. The findings reveal that the capacity decrease due to voltage-induced aging ranges from 9-11%. These results align with the predicted effect of theoretical aging based on a mathematical model employed in the study. The research demonstrates the potential of the model in predicting the impact of PID and facilitating the optimal design of solar energy systems. This study contributes to the understanding of PID and provides valuable insights for enhancing the performance and efficiency of photovoltaic systems in similar environments.

Keywords: Crystals Photovoltaic Panels, Potential Induced Degradation, Panel Power, Voltage System.

Received: 13/6/2023

Accepted: 8/8/2023



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a **CC BY- NC-SA**

المقدمة:

حدوث التقادم بقيمة تصل إلى 600 فولط عند درجة حرارة تصل إلى 80 درجة مئوية (Lausch, Naumann et al. 2014). وفي دراسة أخرى تم إجراء اختبارات على 4 أنواع مختلفة من الألواح الكهروضوئية مكونة من 60 خلية سيليكونية من النوع p مع 12 مجموعة مختلفة من المتغيرات بما فيها: (الجهد، درجة الحرارة والرطوبة). تم استخدام قطب كهربائي من الألمنيوم على كامل سطح اللوح مع تأريضه. ومن خلال تحليل البيانات التجريبية، تم اقتراح نموذج رياضي يقدم دقة تنبؤ مقبولة باستطاعة اللوح. تُظهر المعادلات الرياضية أن الحد الأقصى لفقد الاستطاعة يتعلق فقط بالجهد المطبق. وأن الألواح الكهروضوئية ستتوقف عن التدهور وتصل إلى أقصى فقد في الاستطاعة بينما تؤثر درجة الحرارة والرطوبة فقط على سرعة التدهور (Annigoni 2018). في عام 2015 تم اختبار 20 لوح كهروضوئي بتطبيق جهد ثابت (-1000 فولط). واشتقاق نموذج رياضي من بيانات تدهور استطاعة اللوح التي تم الحصول عليها بشكل شبه مستمر وإحصائي عن طريق قياس منحني الخصائص (تيار الظلام والجهد) ضمن غرفة المناخ واستنتاج الاستطاعة القصوى (Pmax). يساعد النموذج في التنبؤ بمعدلات وأوقات التدهور (P_{max} / P_{max_0}) كتابع لدرجة الحرارة والرطوبة (Hacke, Spataru et al. 2015). في عام 2016 تم تصنيع لوحين صغيرين بحجم (20 × 40 سم) في مختبر (EPFL PVLAB). تتميز جميع العينات بنوع الخلية نفسه، وهي خلايا تجارية أحادية سيليكونية البلورية من النوع p من ذات وصلة (p-n) واحدة. تم اختبار الخلايا ضمن غرفة المناخ وفقاً لاختبارات التقادم المسرعة المقترحة لـ PID في المواصفات الفنية (IEC TS 62804- 1: 2015). تم تغيير مستويات الإجهاد في كل اختبار من أجل نمذجة مساهمة كل من (الحرارة، الرطوبة، الجهد). هنا تم تمديد مدة الاختبارات إلى 192 ساعة، أي ضعف الوقت المحدد لـ 96 ساعة. يشابه هذا النموذج سابقه لكنه يأخذ بعين الاعتبار تأثير التوتر (Annigoni, Jankovec et al. 2016).

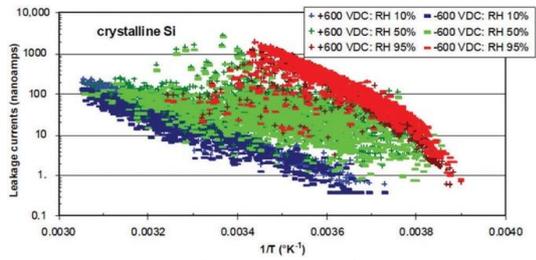
في أعقاب النمو السريع للطاقة الكهروضوئية وازدياد استطاعة وتوترات المنظومات الكهروضوئية ظهرت العديد من المخاوف حيال كفاءة وموثوقية أنظمة الطاقة الكهروضوئية. تضمن الشركات المصنعة في أغلب الأحيان 80% من الاستطاعة الاسمية للألواح لمدة 25 عاماً، إلا أن هذا الضمان لا يعتمد على فهم عميق لآليات تدهور الألواح. حيث لوحظ في العديد من المحطات انخفاض الاستطاعة المنتجة بنسبة قد تصل إلى 80% خلال السنوات الأولى من العمل مما أدى إلى حدوث فشل ذريع لهذه المنظومات وخسائر مالية ضخمة. والسبب في ذلك هو نوع من أنواع التقادم والمسمى بالتقادم الناجم عن التوتر.

2- الدراسات المرجعية (Literature Review): في دراسة مفصلة من معهد أبحاث الطاقة الكهروضوئية في سنغافورة وجامعة سنغافورة الوطنية والمختبر الوطني للطاقة المتجددة (NREL) ومركز فراونهوفر للخلايا الكهروضوئية للسيليكونية لعام 2017، تم تقديم دراسة نظرية حول أنواع التقادم الناجم عن التوتر تبعاً لتقنية الخلايا المستخدمة والعوامل المؤثرة سواء كانت بيئية أو تصميمية والحلول المقترحة للتخفيف من أثره (Luo, Khoo et al. 2017). وفي دراسة أخرى تم إجراء فحص مجهرى لخلية كهروضوئية مصابة بالتقادم من خلال المسح ببكل من المجهر الإلكتروني (Scanning Electron Microscopy)، مقياس الطيف الكتلي للأيونات الثانوية (Secondary Ion Mass Spectrometry)، المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) with Electron Beam Induced Current، وظهرت علاقة بين شوارد الصوديوم المتكدسة في أخطاء التراص والتقادم الناجم عن التوتر في الألواح الكهروضوئية من نوع (PID-s) (Naumann, Lausch et al. 2014). تستعرض مقالة أخرى طريقة لعكس أثر التقادم من نوع (PID-s) من خلال نشر ذرات الصوديوم خارج أخطاء التراصن طريق الاسترداد الحراري بتطبيق درجة حرارة عالية تصل على 250 درجة مئوية على خلية كهروضوئية أُجري عليها اختبار (PID) والاسترداد الكهربائي بتطبيق جهد معاكس للجهد الذي سبب

للانعكاس باتجاه الواجهة ما بين السيليكون (Si) والطلاء المضاد للانعكاس لتخترق عيوب الكريستال، مما يؤدي إلى انخفاض مقاومة طبقة التوصيل وبالتالي انخفاض كفاءة الخلية، يبين الشكل (1) صور لخلية كهروضوئية على عمق 300 نانومتر مأخوذة بتقنية مطيافية تشتت الطاقة بالأشعة السينية (EDX) مع مسح شعاع الإلكترون (STEM) توضح الصور نوع الذرات المتكدسة ضمن خطأ التراص وهو (Na) بينما لم يتم الكشف عن وجود ذرات (O) أو (N) (Luo, Khoo et al. 2017).

2- العوامل المؤثرة:

1-1 درجة الحرارة:



الشكل (2) يمثل العلاقة بين مقلوب درجة الحرارة والتيار التسريب

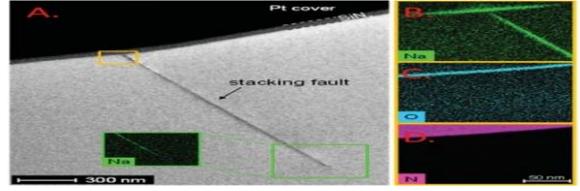
مع ارتفاع درجة الحرارة يتم تنشيط عملية انجراف أيونات الصوديوم مما يزيد من قيمة تيار التسريب، تختلف طاقة التنشيط باختلاف نوع الخلايا الكهروضوئية، لكن بشكل عام تُحدد بمجال من 0.7 إلى 0.9 فولط للألواح الكهروضوئية السيليكونية القياسية من النوع (p) عند مستويات الرطوبة النسبية العالية، تتبع العلاقة بين تيار التسريب ودرجة الحرارة علاقة من نوع أرينوس والتي يتم تمثيلها بشكل خطي بين تيار التسريب ومقلوب درجة الحرارة كما هو موضح في الشكل (2) أدناه عند ثلاث سويات رطوبة مختلفة (10%، 50%، 95%).

2-2 الرطوبة:

تعتبر الرطوبة عامل بيئي هام في دراسة أثر العوامل الجوية على تطور التقادم الناتج عن التوتر، يمكن تلخيص أثر الرطوبة بعدة طرق.

2-1 الأثر على مسارات التسريب في اللوح الكهروضوئي

في ظل الظروف الجافة، تكون الموصلية السطحية لزجاج الغطاء الأمامي منخفضة، وبالتالي تحدث تيارات التسريب بشكل أساسي عند حواف اللوح. على النقيض من ذلك، في ظل الرطوبة العالية أو الظروف الرطبة (مثل تكوين المطر أو



الشكل (1) صورة لخلية شمسية توضح تكديس ذرات الصوديوم ضمن خطأ التراص

وعليه سنقوم في هذه المقالة بالحديث عن التقادم الناتج عن التوتر في الخلايا السيليكونية البلورية والتي تهيم إلى حد كبير على سوق الألواح الكهروضوئية، من خلال تقديم دراسة نظرية حول كيفية حدوث التقادم الناتج عن التوتر في الألواح السيليكونية من نوع (P) وماهي العوامل المؤثرة، ومناقشة نماذج رياضية المحاكية للتقادم الناتج عن التوتر وتحديد أثر التقادم النظري ومقارنته مع النتائج العملية المأخوذة من محطة الكسوة الكهروضوئية.

1- التقادم الناتج عن التوتر (PID):

التقادم الناتج عن التوتر (PID) هو نوع من التقادم يصيب الألواح الكهروضوئية السيليكونية بسبب وجود فرق توتر بين الخلية الكهروضوئية وهيكل اللوح، مما يؤدي إلى مرور تيارات تسريبية ضمن الخلية الكهروضوئية، تساهم في تلف الخلية ونقصان مردودها بشكل كبير خلال فترة زمنية قصيرة (Molto, Oh et al. 2023).

أكثر نوع من أنواع التقادم الناتج عن التوتر (PID) شيوعاً، يحدث في الخلايا السيليكونية من نوع (P) يسمى بـ PID-shunting (PID-s) وهذا لأنه يرتبط ارتباطاً وثيقاً بكل من المقاومة التفرعية (shunt resistance- Rsh) والتيار الإشباع العكسي في الظلام (dark saturation current) (Luo, Khoo et al. 2017).

يُلاحظ في هذا النوع انخفاض لقيمة المقاومة التفرعية، وازدياد تيار الإشباع العكسي في الظلام تبعاً لإعادة ارتباط الشحنات في منطقة الشحنة الفراغية (space-charge region)، ولعامل المثالية (ideality factor). تلعب ذرات الصوديوم الموجودة في الزجاج المغلف للوح الكهروضوئي دوراً بارزاً في حدوث هذا النوع من التقادم. عندما تكون الخلية الكهروضوئية السيليكونية من نوع (P) منحازة سلباً بالنسبة للأرض وبسبب وجود فرق التوتر تنجرف أيونات الصوديوم الموجبة (Na⁺) عبر طبقة الطلاء المضاد

V: التوتر بالفولط
RH: الرطوبة النسبية
 $A=6.0188 \times 10^{-5} (h^{-2} \cdot V^{-1})$ معامل اصطدام الجزيئات
B=4.43 ثابت

$$E_a = 0.86 (ev) \text{ طاقة التنشيط}$$

$$k = 8.617 \times 10^{-5} (ev \cdot k^{-1}) \text{ ثابت بولتزمان}$$

T: درجة الحرارة بالكلفن

t: الزمن بالساعة

تم أخذ متوسط درجة الحرارة 22 درجة مئوية والرطوبة 40% لمدينة دمشق وتطبيق النموذج الرياضي المعطى بالمعادلة (1) بعد مرور ثلاث سنوات بمعدل 8 ساعات كهروضوئية يومياً.

3-1 تأثير سوية التوتر:

من أجل دراسة تأثير سوية التوتر على مدى ثلاث سنوات ستقوم بتغيير التوتر (100-1500) فولط مع حرارة وسطية 22 درجة مئوية ورطوبة 40%. يبين جدول (1) تغير نسبة انخفاض الاستطاعة مع سوية التوتر.

الجدول (1) نسبة انخفاض الاستطاعة مع سوية التوتر

$P_{max}/P_{max=0}$	t (h)	V(v)
0.988	8640	100
0.977	8640	200
0.965	8640	300
0.954	8640	400
0.943	8640	500
0.931	8640	600
0.920	8640	700
0.91	8640	800
0.9	8640	900
0.89	8640	1000
0.87	8640	1100
0.86	8640	1200
0.85	8640	1300
0.84	8640	1400
0.83	8640	1500

نلاحظ من الجدول السابق أنه مع زيادة سوية التوتر تتخفف قيمة $P_{max}/P_{max=0}$ ، أي تتخفف استطاعة المولدة من المنظومة. وبعد مرور ثلاث سنوات نجد أن الاستطاعة في

الندى)، يتم تشكيل مسار موصل كهربائياً بدرجة عالية نسبياً على الزجاج الأمامي وهو ما لا يحدث عموماً في الرطوبة المنخفضة (Luo, Khoo et al. 2017).

2-2-2 الأثر على قيمة تيار التسريب:

مع زيادة مستوى الرطوبة يزداد تيار التسريب، حيث يلاحظ أن تيار التسريب في الأيام الممطرة يزداد بمقدار ضعفي التيار المقاس في الأيام المشمسة. علاوة على ذلك، فقد لوحظ في كثير من الأحيان أن تيار التسريب غالباً ما يرتفع خلال الصباح الباكر بسبب تكاثف الندى. بعد شروق الشمس، تزداد درجة حرارة اللوح بسبب الإشعاع الشمسي وتصبح أعلى من درجة الحرارة المحيطة. هذا يقلل من الرطوبة في المناخ المحيط في اللوح الكهروضوئي (Luo, Khoo et al. 2017).

3-2 توتر المنظومة:

تعتمد تأثيرات (PID) على قطبية وقيمة الجهد المطبق في المنظومة الكهروضوئية. بالنسبة للألواح الكهروضوئية السيليكونية القياسية، فإنه من الممكن أن تكون الخلايا الكهروضوئية المنحازة سلباً عرضة لـ PID-s في حين أن تلك المنحازة بشكل إيجابي قد تتأثر بآليات مختلفة. أما بالنسبة لقيمة الجهد المطبق على سلسلة الألواح الكهروضوئية فإن شدة PID تزداد مع زيادة الجهد المطبق.

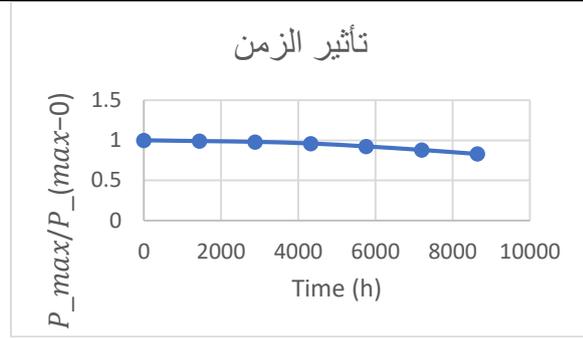
3- محاكاة أثر التقادم:

هناك عدة نماذج لتوصيف أثر التقادم، سيتم أخذ نموذج يدرس تأثير التوتر والزمن ودرجة الحرارة والرطوبة، والتأكد من دقته ومدى إمكانية تطبيقه على أرض الواقع. حيث يُعبر عن التقادم الناجم عن التوتر بالنسبة بين الاستطاعة العظمى بعد مرور فترة زمنية والاستطاعة العظمى الابتدائية $\frac{P_{max}(t)}{P_{max}(0)}$. تعطى هذه النسبة بالعلاقة (1) كتابع للتوتر ودرجة الحرارة والرطوبة مع الزمن بدون الأخذ بعين الاعتبار عملية الاسترداد التي قد تحصل في ظروف الحرارة الجافة.

$$\frac{P_{max}(t)}{P_{max}(0)} = 1 - C_v \cdot V \quad (1)$$

حيث

$$C_v(T, RH, t) = A \cdot e^{\frac{-E_a}{k \cdot T}} \cdot RH^B \cdot t^2 \quad (2)$$



الشكل (4) العلاقة التربيعية بين الزمن ونسبة انخفاض الاستطاعة

4-الإجراء التنفيذي:

قمنا باستحصال بيانات من محطة الكسوة الكهروضوئية على مدى ثلاث سنوات، حيث تم الحصول على الاستطاعات المولدة لكل سلسلة على حدة مربوطة على مدخل المعرج الكهروضوئي و شدة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة للوح الكهروضوئي و درجة الحرارة المحيطة والرطوبة النسبية لكامل المحطة.

تبلغ استطاعة المحطة 1.25 ميغاواط، مكونة من 49 معرج

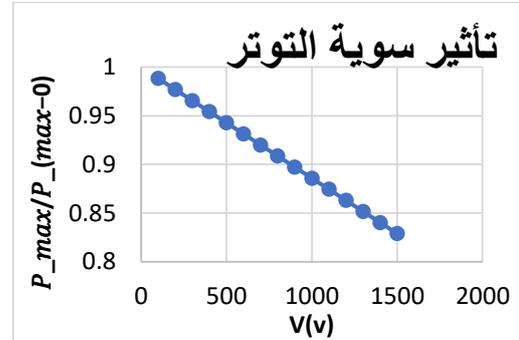
كهروضوئي ماركة SMA باستطاعة 25KW للمعرج الواحد، يتميز المعرج بمدخلين MPPT على كل مدخل لإسلاسلتين من الألواح أو ثلاثة. يوضح الجدول التالي مواصفات المعرج (3).

الجدول (3) مواصفات المعرج

P (AC)	2500 (w)
VDC MAX	1000 (v)
VDC MPP	390 – 800 (V)
ISC PV	43 A / 43A
IAC MAX	36.2 A

يبلغ عدد الألواح في المحطة 5130 لوح كهروضوئي، قمنا بدراسة وتحليل أثر التقادم الناتج عن التوتر على مجموعة الألواح (54 لوح) المربوطة مع إحدى مداخل المعرج رقم (40) ذي التوتر 666 فولط، المدخل المدروس مكون من ثلاث سلاسل مربوطة على التفرع وكل سلسلة تتألف من 18 لوح كهروضوئي من إنتاج شركة سولاريك ويوضح الجدول (4) المواصفات الاسمية للوح.

المنظومة ذات سوية التوتر 1500 انخفضت بنسبة 17% بفعل أثر التقادم الناتج عن التوتر. يبين الشكل (3) العلاقة الخطية بين توتر المنظومة ونسبة انخفاض الاستطاعة.



الشكل (3) العلاقة بين توتر المنظومة الشمسية ونسبة انخفاض الاستطاعة

3-2 تأثير الزمن:

من أجل دراسة تأثير الزمن سنقوم بتطبيق النموذج عند نفس سوية التوتر 1500 فولط كل ست أشهر لمدة ثلاث سنوات مع تثبيت درجة الحرارة والرطوبة عند القيم الوسطى التي تم أخذها سابقاً. يبين جدول (2) تغير نسبة انخفاض الاستطاعة مع الزمن.

الجدول (2) نسبة انخفاض الاستطاعة مع الزمن

P_{max}/P_{max-0}	t (h)
1	0
0.99	1440
0.981	2880
0.96	4320
0.924	5760
0.88	7200
0.83	8640

نلاحظ من الجدول أنه في السنة الأولى انخفضت الاستطاعة بنسبة 1.9% وبالسنة الثانية بنسبة 5.7% وبالسنة الثالثة بنسبة 9.4% ليصبح الإجمالي خلال ثلاث سنوات 17%. مع رسم القيم نحصل على المنحني (4) ويبين المنحني العلاقة التربيعية للزمن مع نسبة انخفاض الاستطاعة.

الجدول (7) نتائج المحاكاة

(P _{max} -/P _{max-0}) cal	Date
0.99	02.01.2019
0.99	01.06.2019
0.99	01.01.2020
0.98	01.06.2020
0.97	01.01.2021
0.95	01.06.2021
0.92	01.12.2021

نلاحظ اختلاف بين النسبة المحسوبة والمقاسة والسبب يعود إلى وجود أنواع عديدة من أسباب انخفاض المردود منها التقادم الناجم عن التوتر PID، التقادم الناجم عن الضوء (LID) الذي يحصل في السنوات الأولى من التركيب بنسبة 7%، التقادم السنوي الناجم عن 5%/year، بالإضافة إلى انخفاض الاستطاعة بفعل المعامل الحراري. يبلغ المعامل الحراري للألواح المختبرة -0.59% لكل درجة حرارة تشغيل إضافية، والذي تم حسابه في دراسة سابقة لمحطة الكسوة والذي يختلف عن القيمة المعطاة للوح والتي كانت -0.42%.

نلاحظ من الجدول، أن نسبة انخفاض الاستطاعة مع الأخذ بعين الاعتبار جميع عوامل التقادم تصل إلى 71% بعد ثلاث سنوات. مع إزالة أثر العوامل الأخرى والتي تقدر كما ذكرنا بـ 20% نحصل على نسبة انخفاض الاستطاعة بتأثير الـ PID إلى بين 9 و 11%، وهي تطابق تقريباً النسبة المحسوبة باستخدام النموذج الرياضي كما في الجدول (7). وهو ما يجب تجنبه عند تصميم المنظومات الكهروضوئية.

كما نلاحظ من الجدول أن أقصى فقد للاستطاعة كان في الشهر الأول من السنة، ووصل إلى قيمة 35% كون الرطوبة عالية فيها تصل إلى أكثر من 60%. بينما تساعد درجات الحرارة في الصيف على عكس أثر الـ PID (الاسترداد الحراري) مما يخفف من أثره.

يُعزى الفرق بين النتائج النظرية المتوقعة والنتائج الفعلية في أرض الواقع إلى عدة أسباب:

الجدول (4) المواصفات الاسمية للوح

P MAX	250 W
V mp	29.66 V
V oc	37.8 V
I mp	8.42 A
I sc	8.92 A

الفاصل الزمني بين القراءات 15 يوم من سنة 2019 حتى 2021، يتم تلخيص النتائج كما في الجدول (5) التالي والذي يتضمن قيم الرطوبة النسبية ودرجة الحرارة بالكيلفن وشدة الإشعاع الشمسي w/m².

الجدول (5) قيم الرطوبة والحرارة الوسطية والإشعاع الشمسي

sol.irradiance(w/m ²)	T(K)	%RH	Date
200	284.5	81	02.01.2019
966	311.9	30	01.06.2019
654	288.7	82	01.01.2020
1015	307.3	42	01.06.2020
600	308	60	01.01.2021
1102	311.7	37	01.06.2021
660	294.1	56	01.12.2021

كما يبين الجدول التالي (6) قيم الاستطاعة المستمرة المولدة على مدخل المعرج P_{max-pro} والاستطاعة العظمى المتوقع توليدها والتي تم حسابها تبعاً للظروف الجوية P_{max-est} والنسبة بينهما.

الجدول (6) قيم الاستطاعات الموافقة

(P _{max-est} /P _{max-mec})	P _{max-est} (W)	P _{max-pro} (W)	Date
0.85	3636	3072	02.01.2019
0.89	10771	9683	01.06.2019
0.68	11112	7583	01.01.2020
0.82	12939	10613	01.06.2020
0.65	10119	6656	01.01.2021
0.75	13787	10584	01.06.2021
0.71	10891	7807	01.12.2021

بتطبيق النموذج الرياضي المعطى بالمعادلة (1) على محطة الكسوة (V=666 v, RH=40%, T=22°) للتنبؤ بقيمة التقادم الناجم عن التوتر نحصل على النتائج التالية جدول (7).

- في الأنظمة الكهروضوئية التي تعتمد على ألواح كهروضوئية من نوع (p) ومعرج ذو المحول يكون الحل لتجنب ظاهرة الـ (PID-s) وهو تأريض القطب السالب للمعرج مما يضمن أن تكون جميع الألواح منحازة إيجابياً بالنسبة للأرض. أما عند استخدام معرج بدون محول يمكن تطبيق جهد انحياز عكسي (على سبيل المثال +1000 فولط) على الألواح أثناء الليل، تساهم هذه العملية في تسريع استعادة الألواح الكهروضوئية وتجديد الكفاءة الكهروضوئية المفقودة خلال النهار.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم التمويل (501100020595).

1- تعتمد النماذج الرياضية بشكل رئيسي على التجارب في الأماكن المغلقة، حيث توفر غرفة المناخ بيئة مستقرة نسبياً. أما الظروف البيئية على أرض الواقع تتغير باستمرار، مما يؤثر على دقة التوقعات.

2- درجة حرارة اللوح الكهروضوئي على أرض الواقع أعلى من درجة الحرارة المحيطة، وخلال النهار (دون تساقط المطر)، يكون مستوى الرطوبة على سطح اللوح الكهروضوئي أقل من مستوى الرطوبة في الجو المحيط.

3- تستمر الألواح الكهروضوئية في غرفة المناخ بالتقادم، بينما يُلاحظ عكس أثر الـ PID في المناخات الحارة وفي الليل على أرض الواقع.

4- تؤثر عوامل أخرى على أرض الواقع مثل التلوث وتكاثف الندى على الـ PID.

5- النتائج:

تم دراسة أثر التقادم الناجم عن التوتر على محطة الكسوة ذات توتر 666 فولط ومقارنته مع نتائج النموذج الرياضي وتبين لنا أنه يمكن استخدام النموذج للتنبؤ بأثر الـ PID بهدف تصميم المنظومات الكهروضوئية ذات التوترات العالية بأفضل شكل من خلال اختيار أماكن تركيب تتميز بظروف جوية مناسبة واستخدام ألواح (Anti PID) وتحديد نظام التأريض الأنسب وغيره.

6- الخاتمة:

- بينت الدراسة أن تصميم المنظومة وتحديد سوية التوتر هو عامل مهم في انخفاض استطاعة التوليد على خرج الألواح الأمر الذي يؤثر على إنتاجية النظم الكهروضوئية. كما يجب معرفة الظروف الجوية للمنطقة المراد تركيب المنظومة فيها لتلافي تأثير الرطوبة والحرارة وتصميم المنظومة بأفضل شكل.

- هناك طرق كثيرة للتخفيف من أثر التقادم الناجم عن التوتر (PID) بما فيها زيادة معامل الانكسار لطبقة الطلاء المضاد للانعكاس أو استبدال زجاج سيليكات الصودا والجير بزجاج تجاري بديل له خصائص فيزيائية أفضل أو من خلال استخدام مواد تغليف مصنعة من بوليمر بلاستيكي حراري شفاف وعازل كهربائياً ذو نفاذية عالية ومقاومة حرارية منخفضة، يمنع تسرب الرطوبة ونفاذها إلى الخلية الكهروضوئية.

7-Naumann, V., D. Lausch, A. Hähnel, J. Bauer, O. Breitenstein, A. Graff, M. Werner, S. Swatek, S. Großer and J. Bagdahn (2014). "Explanation of potential-induced degradation of the shunting type by Na decoration of stacking faults in Si solar cells." *Solar Energy Materials and Solar Cells*120: 383-389.

References:

1-Annigoni, E. (2018). Reliability of Photovoltaic Modules from Indoor Testing to Long-term Performance Prediction, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.

2- Annigoni, E., M. Jankovec, F. Galliano, H. Y. Li, L.-E. Perret-Aebi, F. Sculati-Meillaud, A. Virtuani and C. Ballif (2016). Modeling potential-induced degradation (PID) in crystalline silicon solar cells: from accelerated-aging laboratory testing to outdoor prediction.

3-Hacke, P., S. Spataru, K. Terwilliger, G. Perrin, S. Glick, S. Kurtz and J. Wohlgemuth (2015). "Accelerated testing and modeling of potential-induced degradation as a function of temperature and relative humidity." *IEEE Journal of Photovoltaics*5(6): 1549-1553.

4-Lausch, D., V. Naumann, A. Graff, A. Hähnel, O. Breitenstein, C. Hagenndorf and J. Bagdahn (2014). "Sodium outdiffusion from stacking faults as root cause for the recovery process of potential-induced degradation (PID)." *Energy Procedia*55: 486-493.

5-Luo, W., Y. S. Khoo, P. Hacke, V. Naumann, D. Lausch, S. P. Harvey, J. P. Singh, J. Chai, Y. Wang and A. G. Aberle (2017). "Potential-induced degradation in photovoltaic modules: a critical review." *Energy & Environmental Science*10(1): 43-68.

6-Molto, C., J. Oh, F. I. Mahmood, M. Li, P. Hacke, F. Li, R. Smith, D. Colvin, M. Matam and C. DiRubio (2023). "Review of Potential-Induced Degradation in Bifacial Photovoltaic Modules." *Energy Technology*11(4): 2200943.