مجلة الدراسات التربوية والعلمية - كلية التربية - الجامعة العراقية
العدد السابع والعشرون - المجلد الحادي عشر - علوم الفيزياء - آيار 2026 م
doi.org/10.52866/esj.2026.11.27.02

تحسين أداء خلية شمسية بيروفسكايتية $FA_{1-x}MA_xPbI_3$ باستخدام محاكاة SCAPS-1D

عمر احمد مولود[1*] ، معمر عبدالعزيز كامل[1]
1. قسم الفيزياء، كلية التربية للعلوم الصرفة، جامعة تكريت، تكريت، العراق.
* البحث مستل من رسالة ماجستير الباحث الأول.
الإيميل: OAMueps83@st.tu.edu.iq

مستخلص:

تتناول هذه الدراسة تحليل تأثير مجموعة من المتغيرات الفيزيائية والبنيوية على أداء الخلايا الشمسية البيروفسكايتية المعتمدة على مركب $FA_{1-x}MA_xPbI_3$ كطبقة امتصاص رئيسية، باستخدام برنامج المحاكاة SCAPS-1D. شملت الدراسة تأثير درجة الحرارة، مقاومة التوالي Rs، مقاومة التوازي Rsh، وتشويب طبقة الامتصاص وطبقات المواءمة والنفاذ والانعكاس، إضافةً إلى تأثير سُمك طبقة الامتصاص وسُمك طبقة المواءمة V_2O_5 على الخصائص الكهروضوئية الأساسية: Voc و Jsc و FF وكفاءة التحويل (η). أظهرت النتائج أن ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى انخفاض واضح في Voc و η بسبب زيادة تيار الإشباع العكسي وتضييق فجوة الطاقة، بينما بقي Jsc شبه ثابت. كما أدت زيادة Rs إلى تدهور FF والكفاءة نتيجة الفواقد الأومية، في حين أن رفع Rsh ساهم في تقليل تيارات التسريب وتحسين الأداء. بيّنت نتائج التشويب وجود مستوى أمثل لتشويب طبقة الامتصاص يحقق أعلى كفاءة، بينما تسبب التشويب العالي بزيادة إعادة الاتحاد وانخفاض Jsc. كما حسّن تشويب V_2O_5 و ITO استخلاص الحاملات وتقليل المقاومة، بينما كان تأثير تشويب CuO محدوداً. وأظهر تأثير السُمك أن زيادة سُمك الامتصاص ترفع Jsc والكفاءة، بينما زيادة سُمك المواءمة تقلل الأداء قليلاً. تؤكد الدراسة أن رفع كفاءة الخلية يتطلب توازناً مدروساً بين هذه العوامل.

الكلمات المفتاحية: بيروفسكايت، $FA_{1-x}MA_xPbI_3$، SCAPS-1D، التشويب (Doping)، مقاومة التوالي Rs، مقاومة التوازي Rsh، سُمك طبقة الامتصاص.

Performance Optimization of $FA_{1-x}MA_xPbI_3$ Perovskite Solar Cells Using SCAPS-1D Simulation

Omar Ahmed Mawloud[1], Muaamar A. kamil[1]
Department of Physics, College of Education for Pure Sciences, Tikrit University, Tikrit, Iraq.
Email: OAMueps83@st.tu.edu.iq

Abstract

This study analyzes the effect of a range of physical and structural variables on the performance of perovskite solar cells based on $FA_{1-x}MA_xPbI_3$ as the main absorber layer, using the SCAPS-1D simulation software. The study examined the effects of temperature, series resistance (Rs), parallel resistance (Rsh), doping of the absorber layer, and the conformation, transmission, and reflection layers, as well as the effect of absorber and conformation layer thickness (V_2O_5) on the fundamental photovoltaic characteristics: Voc, Jsc, FF, and efficiency (η). The results showed that increasing the temperature leads to a significant decrease in Voc and η due to an increase in reverse saturation current and a narrowing of the energy gap, while Jsc remained relatively constant. Increasing Rs also led to a deterioration in FF and efficiency due to ohmic losses, while increasing Rsh helped reduce leakage currents and improve performance. The doping results showed that an optimal level of absorption layer doping achieves the highest efficiency, while high doping resulted in increased recombination and decreased Jsc. V_2O_5 and ITO doping improved carrier extraction and reduced resistance, while the effect of CuO doping was limited. The thickness effect demonstrated that increasing the absorption thickness increased Jsc and efficiency, while increasing the alignment thickness slightly reduced performance. The study confirms that optimizing cell efficiency requires a carefully considered balance between these factors.

Keywords: Perovskite, $FA_{1-x}MA_xPbI_3$, SCAPS-1D, Doping, Series resistance Rs, Parallel resistance Rsh, Absorbance layer thickness.

1. المقدمة

تُعد الطاقة الشمسية مصدرًا أساسيًا للطاقة المتجددة عالميًا نظرًا لتوفرها الواسع وإمكاناتها في الحد من انبعاثات الكربون المرتبطة باحتراق الوقود الأحفوري. ومع التطورات المستمرة في تكنولوجيا الخلايا الشمسية برزت خلايا البيروفسكايت كواحدة من أكثر الفئات الواعدة من حيث تكلفة التصنيع وكفاءته لا سيما بالمقارنة مع الخلايا التقليدية مثل السيليكون أو الأنواع العضوية [2]. تستخدم خلايا البيروفسكايت مواد ذات بنية بلورية مشابهة لبنية معدن البيروفسكايت. تُصنف خلايا البيروفسكايت ضمن الجيل الثالث من الخلايا الشمسية. غالبًا ما تحمل الصيغة العامة ABX_3، حيث A كاتيون عضوي مثل $CH_3NH_3^+$، وB معدن ثنائي التكافؤ مثل Pb^{+2}، وX هالوجين مثل I^- أو Br^- [3]. يُعد امتصاص الضوء القوي، وثوابت العزل الكهربائي العالية وحركة الإلكترونات والفجوات الجيدة وفجوة الطاقة القابلة للتكوين بعضًا من الخصائص الكهربائية والبصرية المميزة لهذه المواد. [4] منذ عام 2009 حيث ارتفعت كفاءة خلايا البيروفسكايت الشمسية بشكل كبير من حوالي 3.8٪ إلى أكثر من 25٪ في أقل من عشر سنوات مما جذب اهتمامًا كبيرًا من الأوساط العلمية والتجارية [5].

وتُعد أساليب الإنتاج المُحسّنة والتعديلات على مكونات الخلية بما في ذلك طبقات النقل والتوصيل وتنظيم ظروف التبلور والتشويب أسباب هذا التحسن [6]. ولأنها تُمكّن من تحليل تأثير السُمك والتشويب والتغيرات بين الطبقات على الكفاءة دون الحاجة إلى تجارب مكلفة فإن المحاكاة العددية تُعد أداة مفيدة لتقييم أداء الخلايا الشمسية وتحسينه قبل النشر الفعلي [7].

وقد أثبتت الأبحاث أن تحقيق كفاءة عالية وتقليل الخسائر يعتمد بشكل كبير على نوع الطبقات الموصلة وكيفية اصطفاف مستويات طاقتها [8]. يُعد استخدام طبقة موصلة شفافة (TCO) مثل Azo أو ITO متبوعة بطبقة مُطابقة مثل CdS وطبقة من البيروفسكايت تعمل كممتص وطبقات لنقل الإلكترونات والفجوات من أهم التصميمات التي تم استخدامها [9]. يمكن تغيير تركيز التنشيط المثالي في طبقة الامتصاص والطبقات المطابقة بالإضافة إلى السُمك المثالي لكل طبقة لتحسين الأداء [10].

لا تزال الاستقرارية الكيميائية والتحلل تحت تأثير الحرارة والرطوبة يُشكلان مشكلةً على الرغم من التطورات الهائلة مما يُحفز التطوير المستمر في المواد وتقنيات الإنتاج [11].

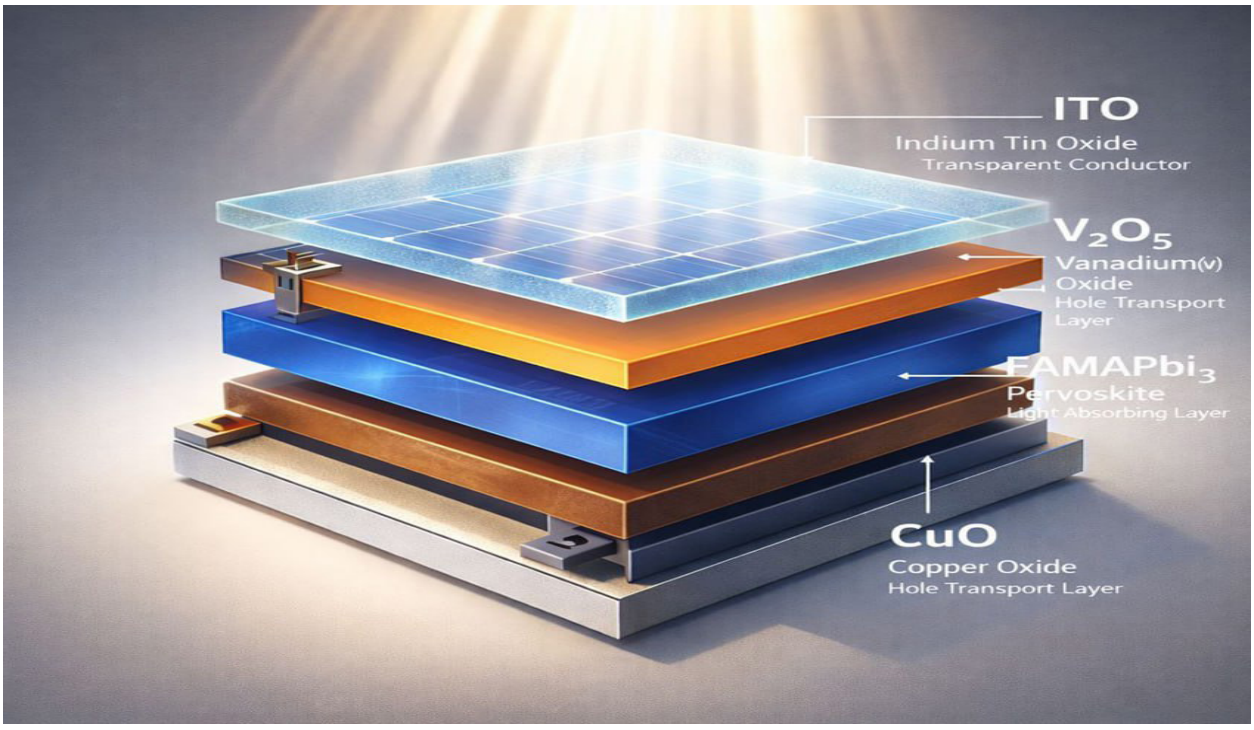
يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير تغير درجات الحرارة ومقاومة التوالي والتوازي وكذلك تأثير تغير كثافة العيوب على طبقات الخلية الشمسية ودراسة تغيير سُمك طبقة الامتصاص وطبقة الموائمة على الأداء الكهروضوئي للخلية الشمسية في برنامج SCAPS-1D، من خلال تحليل التغير في قيم الجهد والتيار والكفاءة.

2. المحاكاة وتركيب الخلية

في هذه المرحلة، تم تحليل أداء الخلية الشمسية باستخدام برنامج المحاكاة مع اعتماد مساحة منطقة فعالة مقدارها ($1cm^2$) لحساب الخصائص الكهروضوئية للخلية بما في ذلك كثافة التيار وفولطية الدائرة المفتوحة وعامل الملء وكفاءة

التحويل. تم ضبط إعدادات الخلية الشمسية في برنامج SCAPS-1D وفق القيم الظاهرة في واجهة المحاكاة، وذلك لضمان الحصول على منحنيات بدقة ووضوح. حيث جرى تثبيت درجة الحرارة عند 300 كلفن وضبط التردد الابتدائي عند 1000 هرتز ضمن ظروف التشغيل القياسية. كما ثُبِّت عدد النقاط الحسابية عند 5 نقاط في خيار Working point.

أما الإضاءة فقد حُدِّدت وفق الطيف القياسي AM1.5G بشدة إشعاع مقدارها 1000 واط/ م^2 من جهة اليسار، بينما حُددت قيمة النفاذية (Trans-mission) بـ 100٪ دون استخدام أي مرشحات ضوئية إضافية. وفي قسم Action List خُصص المسح الكهربائي (I–V sweep) ليبدأ من جهد 0.0 فولت وحتى 1.2 فولت بخطوة مقدارها 0.02 فولت وبعدد نقاط يبلغ 61 نقطة، مع تفعيل خيار الإيقاف عند جهد الدائرة المفتوحة. (Stop af-ter Voc) حيث يوضح الشكل (1) تركيب الخلية الشمسية التي تمت محاكاتها في هذا البحث كذلك يوضح الجدول (1) معلمات الخلية المستخدمة في هذا البحث.



الشكل (1): تركيب الخلية الشمسية.

الجدول (1): يبين معلمات الخلية المستخدمة في هذا البحث.

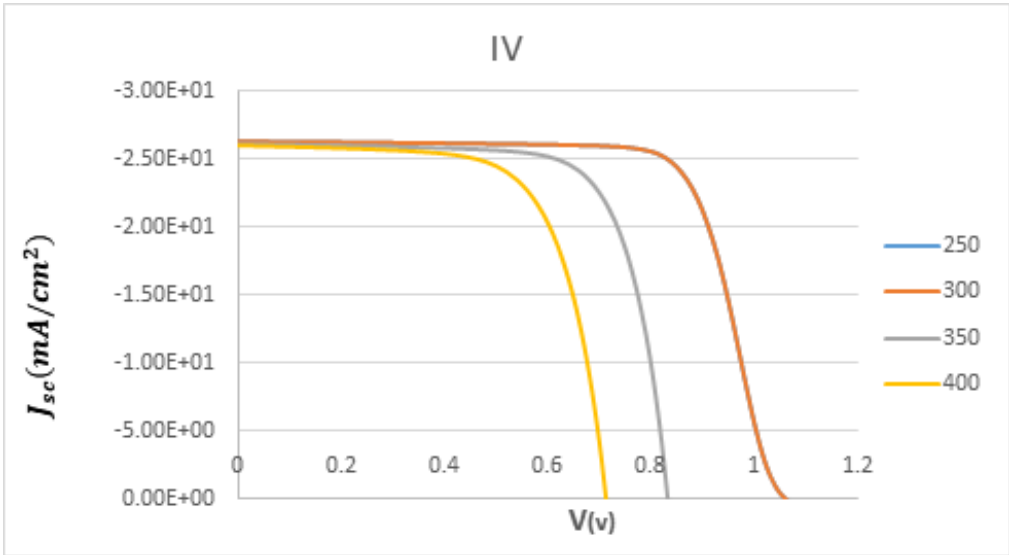
parameters	Symbol (unit)	V_2O_5 [12]	*cuo* [13]	ITO [14]	FA-MA-pbl3 [15]
Thickness	W(μm)	0.5	0.03	2	2.00
Band gap	Eg(eV)	2.3	2.1	3.600	1.550
Electron affinity	x(eV)	3.99	3.2	4.100	3.900
Dielectric permittivity	C_r	4.28	7.11	10.000	32.000
CB effective density of states	N_c (cm^{-3})	2.2E18	2.2E20	2.000E+19	2.800E+20
VB effectiv density of states	N_V (cm^{-3})	1.8E19	5.5E19	1.800E+19	2.900E+20
Electron thermal velocity	V_n (*cm/s*)	1E7	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7
Hole thermal velocity	V_p (*cm/s*)	1E7	1.000E+7	1.000E+7	1.000E+7
Electron mobility	μ_n ($cm^2/V.s$)	1.26	3.4	5.000E+1	1.180E+1
Hole mobility	μ_P ($cm^2/V.s$)	34.5	3.4	7.500E+1	1.180E+1
Shallow uniform donor density	N_D (cm^{-3})	1E19	0	1.000E+20	0.000E+0
Shallow uniform accepter density	N_A (cm^{-3})	0	1E18	0	1.000E+15

3- النتائج والمناقشة

3-1 تأثير تغير درجة الحرارة على اداء الخلية الشمسية

تم تغيير درجة الحرارة (-23^{0}C-400K) بمقدار50 عند كل قراءة من أجل دراسة تأثير تغيير درجة الحرارة على خواص المنحنى (J-V)، فعند درجة الحرارة (250K) فان قيمة فولطية الدائرة المفتوحة 1.06(V) وكثافة تيار الدائرة القصيرة (26.27 mA/cm^2) اما عامل الملئ فقد بلغت نسبته (74.62٪) وكفاءة التحويل (20.79٪) حيث وجد أن ارتفاع درجة الحرارة يؤثر سلباً على خصائص المنحنى (J-V) .اما عند درجة الحرارة العالية (400K) فيؤدي إلى انخفاض(Voc) الى (0.71 v) وانخفاض الكفاءة الكلية للخلية الشمسية الى (12.71٪) في حين تزداد قيمة كثافة تيار الدائرة القصيرة (Jsc) بشكل طفيف الى (25.99 mA/cm^2) بسبب زيادة الحاملات الحرارية يقلل من كثافة تيار الدائرة القصيرة او يبقي ثابت تقريبا [17] ، اما قيمة عامل الملئ (68.57٪). أن زيادة درجة الحرارة تُقلل من فرق الجهد في منطقة الوصلة وتزيد من التيار العكسي المشبّع (J_0) فيؤدي إلى نقصان الجهد الكلي الناتج عن الخلية. أن زيادة تركيز الحاملات الذاتية (Intrinsic carriers) مع الحرارة تؤدي إلى تقليل جهد الحاجز بين منطقتي P و N وبالتالي انخفاض كفاءة التحويل الكهروضوئي [16]. من نتائج ارتفاع درجة الحرارة أيضاً زيادة تيار التسرب (Leakage current) الناتج من الحاملات الأقلية مما يؤدي إلى زيادة الخسائر وتقليل

معامل الملء (Fill Factor) وكلما ارتفعت درجة الحرارة ازداد معدل إعادة الاتحاد داخل الخلية وهو ما يقلل من الجهد الكلي ويزيد من الفقد في الطاقة [18].كما أن زيادة درجة الحرارة تسبب انخفاضاً في فجوة الطاقة (Band Gap) للمادة شبه الموصلة مما يزيد من امتصاص الفوتونات ذات الطاقة المنخفضة نسبيّاً، ولكن في الوقت نفسه يؤدي إلى تقليل فرق الجهد المتولد وعليه فإن الزيادة الحرارية ينتج عنها في النهاية انخفاض في القدرة القصوى الناتجة من الخلية الشمسية [19]. توضح الدراسات أن درجة الحرارة العالية تُحدث تغيّراً واضحاً في منحنيات (J–V) وفي أداء الخلايا الشمسية عموماً كما في الشكل (2)، حيث يؤدي ارتفاعها إلى انخفاض الجهد والتيار معاً وزيادة الخسائر الحرارية ما يؤدي إلى انخفاض الكفاءة الكلية بشكل ملحوظ[20] .

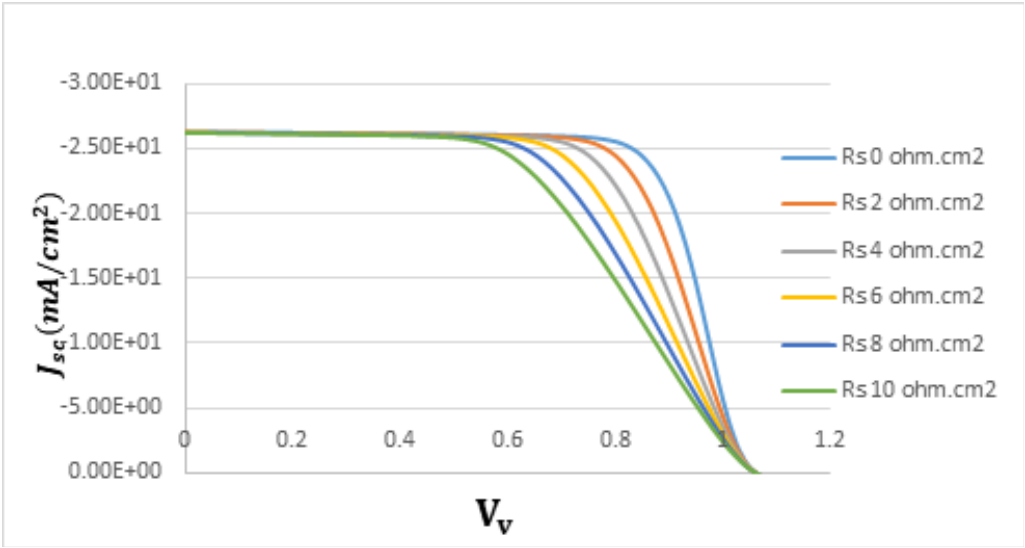


الشكل (2): تأثير درجة الحرارة T(k) على خواص منحني الفولطية V(volt) وكثافة التيار(J)

3-2. تأثير مقاومة التوالي على اداء الخلية الشمسية

تم دراسة تأثير مقاومة التوالي على أداء الخلية الشمسية حيث تم إجراء عملية محاكاة للخلية المحسنة من خلال تغير مقاومة التوالي وتضمن هذا التغير قيم ضمن المدى (0-10 ($ohm.cm^2$)) بمقدار 2 عند كل قراءة ومن المعروف أن مقاومة التوالي تسبب خسائر في الطاقة للخلايا الكهروضوئية ولهذا تنخفض قيمة كل من عامل الملء (FF) وتيار الدائرة القصيرة (Isc) وفولتية الدائرة المفتوحة (Voc) وكفاء التحويل (η) للخلية مع زيادة خسائر الطاقة، والجدول يبين مخرجات الخلية بعد تغير مقاومة التوالي R_S للخلية المحسنة حيث نلاحظ أن فولتية الدائرة المفتوحة تبقى قيمتها ثابتة لا تتغير كلما زادت مقاومة التوالي حيث كانت قيمتها (1.06 V) وأما كثافة تيار الدائرة القصير فإن قيمته تنخفض انخفاض بسيط كلما زادت مقاومة التوالي حيث انخفضت من (26.27 mA/cm^2) عندما لا توجد مقاومة توالي أي قيمتها صفر إلى (26.21 mA/cm^2) عند أعلى قيمة لمقاومة التوالي وبالنسبة لكفاءة التحويل تنخفض قيمتها كلما زادت مقاومة

التوالي حيث انخفضت من (٪ 20.79) عندما تكون قيمة مقاومة التوالي صفر إلى (٪ 14.90) عندما تكون مقاومة التوالي (10Ω) وكذلك عامل الملء تنخفض قيمته كلما زادت مقاومة التوالي حيث انخفضت من (٪74.62) عندما تكون مقاومة التوالي قيمتها صفر إلى (٪ 53.64) عندما تكون مقاومة التوالي قيمتها (10Ω) بسبب ازدياد الهبوط الأومي في الجهد الناتج عن مقاومة التوالي، مما يقلل الجهد الفعّال عبر الوصلة ويضعف عملية جمع الحاملات الأقلية المتولدة ضوئياً، فتزداد إعادة الاتحاد وينخفض عامل الملء وكفاء التحويل وتيار الدائرة القصير والشكل(3) يبين مدى تأثير مقاومة التوالي على كفاءة الخلية حيث تم الحصول على أفضل النتائج عندما تكون مقاومة التوالي قيمتها صفر حيث سُجلت كفاءة التحويل (٪ 20.79) وعامل الملء (٪74.62) وتيار الدائرة القصير(26.27 mA/cm^2) وفولتية الدائرة المفتوحة (1.06V).

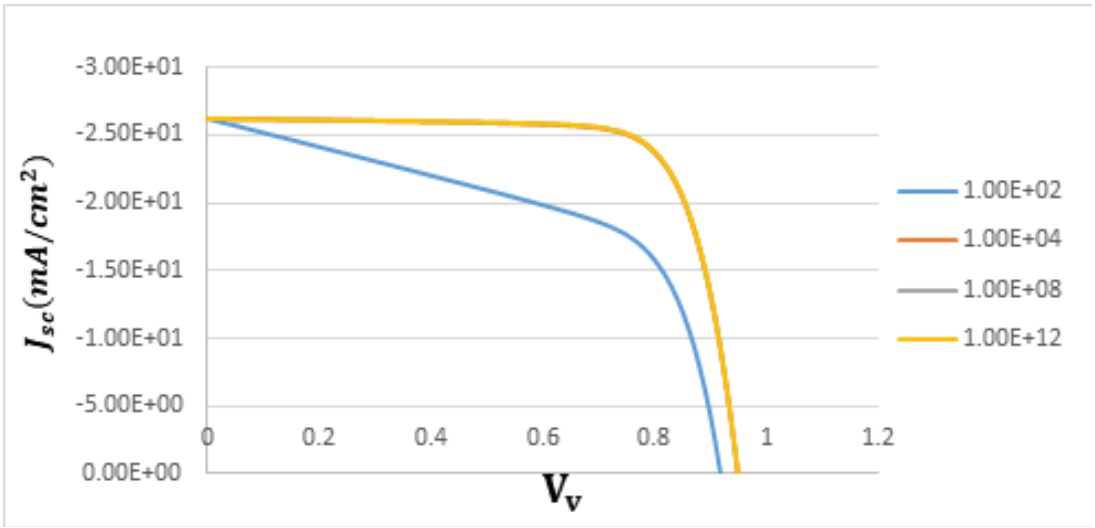


الشكل (3): تأثير مقاومة التوالي على خواص منحني (I-V).

3-3. تأثير مقاومة التوازي على اداء الخلية الشمسية

تمت دراسة تأثير تغيير قيم (R_{sh}) على خصائص خلية البيروفسكايت مع تحليل التغيرات في كل من جهد الدائرة المفتوحة وتيار الدائرة القصيرة وعامل الملئ وكفاءة التحويل، حيث تمت دراسة تأثير المقاومة ما بين (10^2 -10^{12} $ohm.cm^2$) وتبين ان زيادة مقدارها يؤدي الى زيادة بسيطة في مقدار (V_{OC}) حيث ارتفع من (0.9179 v) عند (ohm.$R_{sh}=10^2$ cm^2) إلى نحو (0.9491 v) عند قيم العالية (10^{12} $ohm.cm^2$). إن انخفاض (R_{sh}) يؤدي إلى زيادة تيار التسرب داخل الخلية وهذا يرفع التيار العكسي J_o وبالتالي ينخفض (V_{OC}) ، أما عند ارتفاع (R_{sh}) سينخفض تيار التسرب ويقل (J_o) مما ينتج جهد دائرة مفتوحة أعلى . وعند قيم (R_{sh}) العالية جدا تبدأ (V_{OC}) بالوصول إلى حالة التشبع، وهو ما يفسر بقاء القيمة ثابتة تقريبا فوق (ohm.10^8 cm^2). اما بالنسبة لتيار الدائرة القصيرة فان قيمته تبقى ثابته لعدم اعتماده على مقاومة التوازي

ومقداره ($26.22\ mA/cm^2$) ، اما FF فعند قيم (R_{sh}) المنخفضة ($10^2\ \Omega\cdot cm^2$) يكون تيار التسريب كبيراً مما يؤدي إلى انخفاض الجهد والتيار عند نقطة القدرة العظمى، وبالتالي ينخفض عامل الملء إلى حوالي ٪54.9 ومع زيادة مقاومة التوازي الى ($10^{12}\ ohm.cm^2$) تقل مسارات التسريب ويتحسن شكل منحنى (J–V) الشكل (4) ليصبح أقرب إلى الشكل المثالي، مما يؤدي إلى ارتفاع عامل الملء إلى حوالي ٪76.76. وبما أن (J_{SC}) بقي ثابتاً وارتفع FF بشكل ملحوظ، فإن الزيادة في الكفاءة تعود أساساً إلى تحسن عامل الملء .



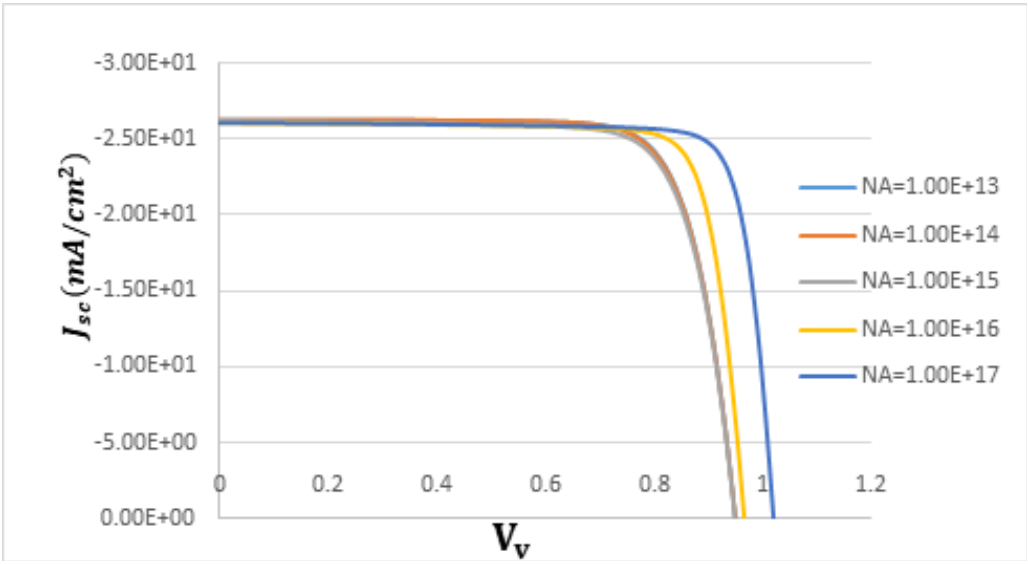
الشكل (4): يوضح تأثير مقاومة التوازي على خواص منحني (I-V).

3-4. تأثير تغيير تركيز التشويب على طبقات الخلية الشمسية

3-4-1 تأثير تشويب طبقة الامتصاص

في هذه المرحلة تم تغيير تركيز التشويب من النوع P (N_A) في طبقة الامتصاص (FAMAP-bl_3) على أداء الخلية الشمسية. وقد جرى تغيير تركيز التشويب ضمن مدى واسع يتراوح من ($10^{13}\ cm^{-3}$) إلى ($10^{17}\ cm^{-3}$) حتى يتم دراسة تأثيره على كلٍّ من: (FF، η، J_{SC}، V_{OC}) فعند اقل تركيز للتشويب ($10^{13}\ cm^{-3}$) بلغت قيمة ($V_{OC}=0.949V$) و($J_{SC}=26.22\ mA/cm^2$) وعامل الملئ (٪77.88) بينما كانت كفاءة الخلية (٪19.43). اما عند زيادة تركيز التشويب من النوع P إلى ($10^{16}\ cm^{-3}$) و ($10^{17}\ cm^{-3}$) يرتفع تركيز الفجوات في منطقة الاستنزاف مما أدى إلى زيادة واضحة في ($V_{OC}=1.019V$)، حيث ان شدة التشويب تتناسب طردياً مع (V_{OC}) حسب العلاقة [21] ($V_{OC} \propto \ln \frac{N_A}{n_i}$) وعلى الرغم من زيادة الفولطية الا ان (J_{SC}) يتناقص عند التشويب العالي ($26.06\ mA/cm^2$) ويعود ذلك الى ان زيادة تركيز الشوائب تعمل على زيادة تركيز الثقوب والالكترونات المتولدة ضوئيا ومع زيادتها كثيراً فانها تولد مستويات طاقة جديدة داخل الفجوة الطاقة تعمل كفخاخ للحاملات، حيث الالكترونات

والفجوات التي تم توليدها بواسطة الضوء قد تقع في هذه الفخاخ قبل ان تصل للأقطاب وعليه فان عدد الحاملات التي تصل الى الأقطاب ينخفض وبالتالي ينخفض تيار الدائرة القصيرة على الرغم من ان شدة الضوء ثابتة[22]. اما عامل الملئ فيمر بمرحلتين عند التشويب المنخفض والمتوسط ينخفض FF لان كمية الشوائب قليلة وبعض الالكترونات تفقد بسبب إعادة التركيب وبالتالي فان التيار يقل وتصبح المقاومة اعلى فيقل عامل الملئ ، ومع زيادة التشويب الى المستوى المثالي ($N_A \geq 10^{16}\ cm^{-3}$) يؤدي ذلك إلى تعديل موضع مستوى فيرمي وتحسين محاذاة مستويات الطاقة عند واجهات الطبقة الماصة مع طبقات النقل، مما يقلل حواجز الاستخلاص ومقاومة التلامس، فيسهل جمع الإلكترونات والفجوات المتولدة ضوئياً، وتنخفض المقاومة الداخلية، وبالتالي يزداد عامل الملء. (83.87٪) كما في الشكل (5) [23] ، وعلى الرغم من انخفاض Jsc مع التشويب العالي، فإن الكفاءة النهائية تتحسن بسبب الارتفاع في Voc والارتفاع اللاحق في FF عند الوصول إلى مستوى التشويب الأمثل لتصل الى (22.28٪ = η) ، وتشير النتائج الى ان التشويب المعتدل يحقق توازن افضل مما يؤدي الى زيادة الكفاءة[24] .

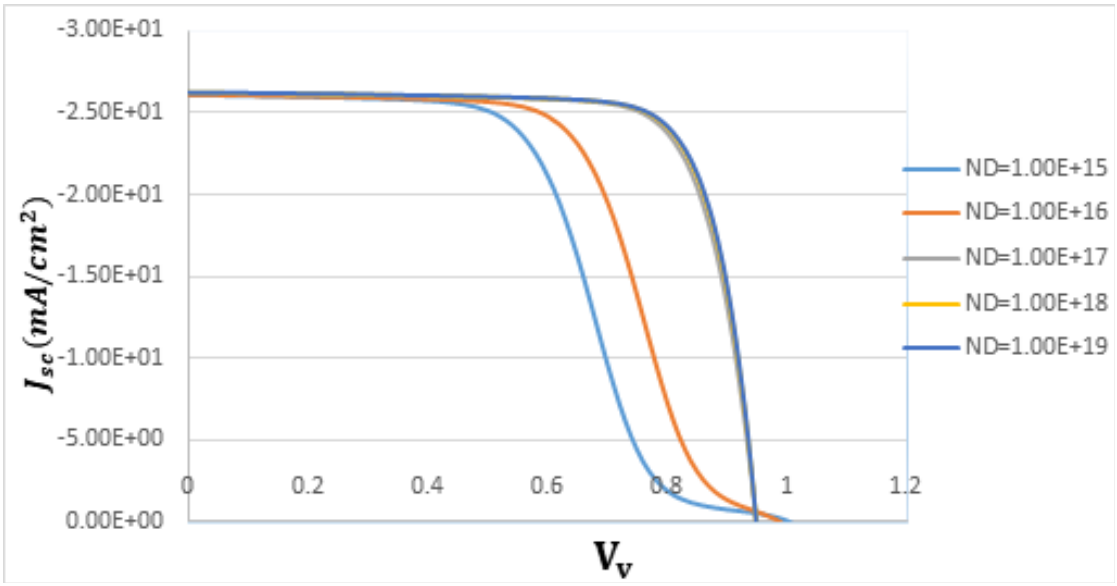


الشكل (5): خواص منحني JV عند تغيير تركيز التشويب في طبقة الامتصاص.

3-4-2 تأثير تشويب طبقة الموائمة

تم تحليل تأثير تغيير تركيز التشويب من النوع N (N_D) في طبقة الموائمة (V_2O_5) على أداء الخلية الشمسية. حيث تم التغيير في تراكيز الشوائب ضمن مدى يتراوح من ($10^{13}\ cm^{-3}$ - $10^{17}\ cm^{-3}$) ليتم دراسة تأثيره على كل من جهد الدائرة المفتوحة وتيار الدائرة القصيرة وعامل الملئ والكفاءة. عند البدء في عملية تشويب V_2O_5 تتحسن قدرة الطبقة على نقل الثقوب فيقل تراكم الشحنات عند الواجهة فتنخفض إعادة التركيب وهذا يؤدي إلى

ارتفاع الجهد الداخلي وبالتالي ارتفاع (Voc) ولذلك نلاحظ زيادة مستمرة في فولطية الدائرة المفتوحة مع زيادة تركيز التشويب الى (V_{OC}=0.955V) وبعدها استقر. اما تيار الدائرة القصيرة فيرتفع قليلاً جداً ثم يستقرعند (25.967 mA/cm^2)، وتفسير ذلك عندما يتم زيادة التشويب في طبقة الموائمة يزداد تركيز الشحنات شحنات بشكل كبير وهذا يسبب زيادة عملية إعادة الاتحاد بين الالكترونات والفجوات عند الجهة بين (V_2O_5) والبيروفسكايت ولكن قسم من هذه الشحنات يضيع قبل ان يصل للقطب وبالتالي ينخفض التيار، اما قيمة عامل الملئ فتبلغ (71.30٪) والكفاءة (17.68٪). وعندما يزداد التشويب الى (cm^{-3} 10^{16}) و (cm^{-3} 10^{17}) يحصل تحسين قوي لمحاذات مستويات الطاقة بين (V_2O_5) والبيروفسكايت فيصبح سحب للإلكترونات والفجوات اسهل واسرع وعندها تقل المقاومة ويقل إعادة التركيب لان الشحنات تعبر بسرعة اكبر فيزداد (mA/cm^2 J_{SC}=26.28) . اما (F.F) فيتحسن بشكل واضح مع زيادة التشويب، ففي بداية التشويب نقل الشحنات يكون غير مثالي لذلك (F.F) منخفض ومع زيادة التشويب تصبح الطبقة اكثر قدرة على استخراج الفجوات فتقل المقاومة اما إعادة التركيب فيكون اقل لذلك يرتفع FF بشكل حاد وواضح عند (cm^{-3} 10^{16}) و(cm^{-3} 10^{17}) لتصل قيمته الى (85.90٪) . اما الكفاءة (η) فترتفع بقوة الى حوالي (22.49٪) مع زيادة التشويب لان الكفاءة تعتمد على عامل الملء. وحسب الشكل(6).

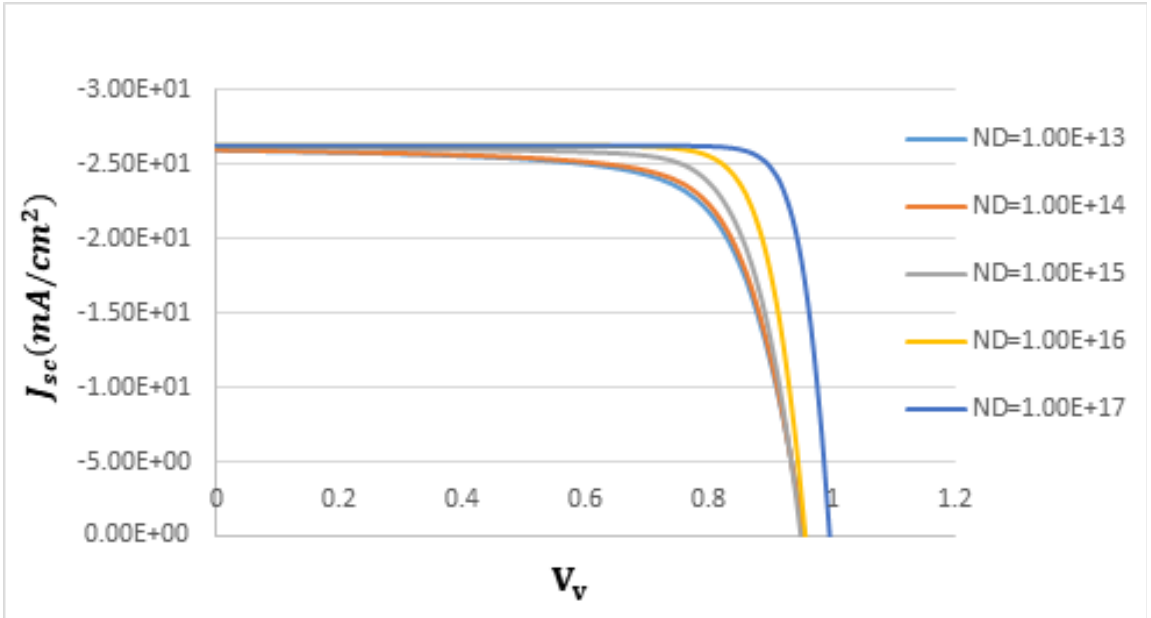


الشكل (6): خواص منحني IV عند تغيير تشويب طبقة الموائمة .

3-4-3 تأثير تشويب طبقة النفاذ (ITO)

تم تحليل تأثير تغيير تركيز التشويب من النوع N(N_D) في طبقة النفاذ (ITO) على أداء الخلية الشمسية. حيث تم تغيير تركيز التشويب من (cm^{-3} 10^{13}) إلى (cm^{-3} 10^{17}) لكي يتم دراسة تأثيره على كلٍّ من: جهد الدائرة المفتوحة وتيار

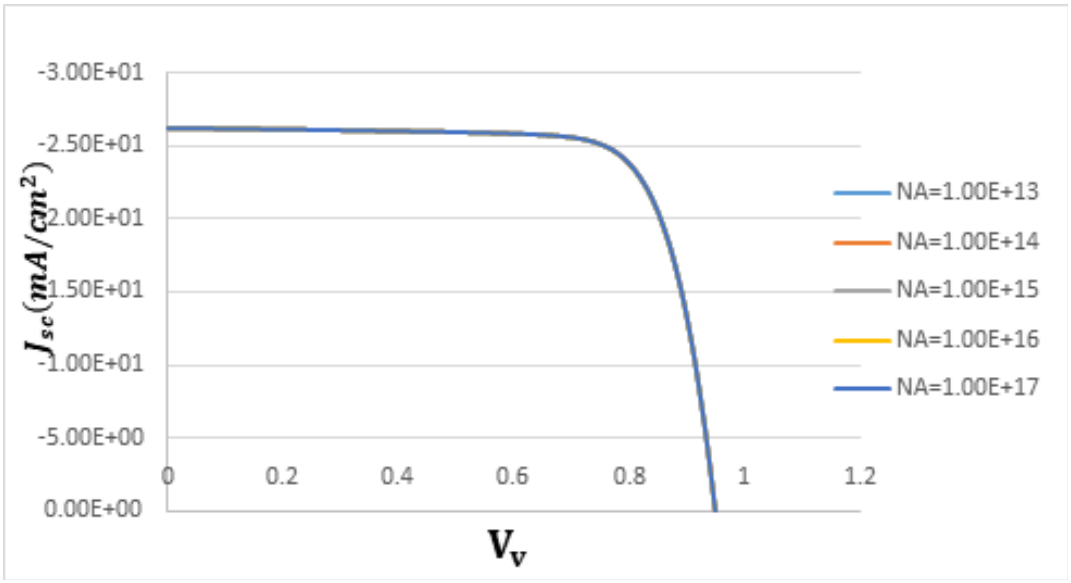
الدائرة القصيرة وعامل الملئ والكفاءة، ولكي نفسر تغيير هذه القيم في طبقة الموائمة (ITO) على أداء خلية بيروفسكايت الشمسية PSC ، نفترض أن التشويب يتراوح من ($10^{15}\ cm^{-3}$) إلى ($10^{19}\ cm^{-3}$) والشكل (6) يوضح العلاقة بين الفولطية وكثافة التيار بكثافة تشويب مختلفة. عند البدء في عملية التشويب ($10^{15}\ cm^{-3}$) فان مقدار ($V_{OC}=1.00V$)، في حين كانت قيمة كثافة تيار الدائرة القصيرة ($26.097\ mA/cm^2$) اما عامل الملئ فبلغت قيمته (٪ 50.27) بينما بلغت كفاءة التحويل (٪ 13.18) ومع زيادة التشويب الى اعلى قيمة مدروسة ($10^{19}\ cm^{-3}$) نلاحظ تناقص في جهد الدائرة المفتوحة حيث بلغت قيمتها ($V_{OC}=0.94V$) في حين ارتفع تيار الدائرة القصيرة الى ($26.266\ mA/cm^2$) وارتفاع عامل الملئ بشكل ملحوظ الى (٪ 77.76) مما أدى الى تحسن الكفاءة النهائية لتبلغ (٪ 19.37) ويعود تناقص (V_{OC}) عند زيادة التشويب لان زيادة التشويب تعمل على زيادة عملية إعادة التركيب وهذا بدوره يرفع مقدار تيار التشبع العكسي (J_o) وبالتالي تقل فولطية الدائرة المفتوحة حسب ، اما تيار الدائرة القصيرة (J_{SC}) فيزداد مقداره لان زيادة التشويب (N_D) تعني زيادة التوصيلية وبالتالي تقل المقاومة (R_S) فيمر التيار بسهوله اكبر. اما عامل الملئ فيعتمد بشكل كبير على مقاومة التوالي (R_S) فعندما تقل المقاومة بزيادة التشويب، يزداد عامل الملئ ، اما الكفاءة (η) نلاحظ انها تزداد على الرغم من تناقص (V_{OC}) لكن هذا التناقص يكون قليل مقارنة مع الزيادة القليلة في التيار، ولكن زيادة عامل الملئ كبيرة لذا فان زيادة FF وحدها كافية لرفع الكفاءة. عند زيادة التشويب لطبقة النفاذ فان أداء الخلية يتحسن ومن الواضح انه عندما تكون كثافة التشويب اقل من ($10^{19}\ cm^{-3}$) يصبح تأثير التشويب على المنحني (IV) ضعيفاً.



الشكل (7): خواص منحني IV عند تغيير تشويب طبقة النفاذ.

3-4-4 تأثير تشويب طبقة الانعكاس (*cuo*)

هنا تم تحليل تأثير تغيير تركيز التشويب من النوع P (N_A) في طبقة الانعكاس (*cuo*) على أداء الخلية الشمسية. حيث تم تغيير التشويب ضمن مدى يتراوح من (10^{13} cm^{-3}) إلى (10^{17} cm^{-3}) وتم دراسة تأثيره على كلٍّ من: جهد الدائرة المفتوحة وتيار الدائرة القصيرة وعامل الملئ والكفاءة. بينت النتائج أن تغيير تركيز التشويب (N_A) في طبقة الانعكاس لا يسبب تغيّر واضح في أداء الخلية الشمسية. حيث يبقى Voc ثابتاً لان الأزواج الالكترونية الأساسية تتولد في طبقة الامتصاص، وان معدل إعادة التركيب داخل طبقة الامتصاص ثابت حيث ان تيار التشبع العكسي يكون ثابتاً لهذا نلاحظ ان (V_{OC}=0.949v) لكل الحالات. اما (J_{SC}) فيبقى ثابتاً ايضاً لان التيار يعتمد على امتصاص الضوء (والامتصاص ثابت) فلا يحصل انتقال للشحنات داخل الامتصاص والانعكاس الامامي والخلفي لا يتغير وكما ذكرنا أعلاه فان هذه الطبقة لا تؤثر بشكل واضح على توليد الأزواج الأساسية لذلك نلاحظ ان قيم (J_{SC} =26.227 mA/cm^2) تقريباً، كما لوحظ تحسّن طفيف في FF لان زيادة تشويب طبقة الانعكاس تعني زيادة التوصيلية الكهربائية لهذه الطبقة فكلما زاد التشويب زادت التوصيلية وقلت المقاومة. اما الكفاءة فقد ارتفعت بسبب ارتفاع عامل الملئ بثبوت V_{OC} و J_{SC} .



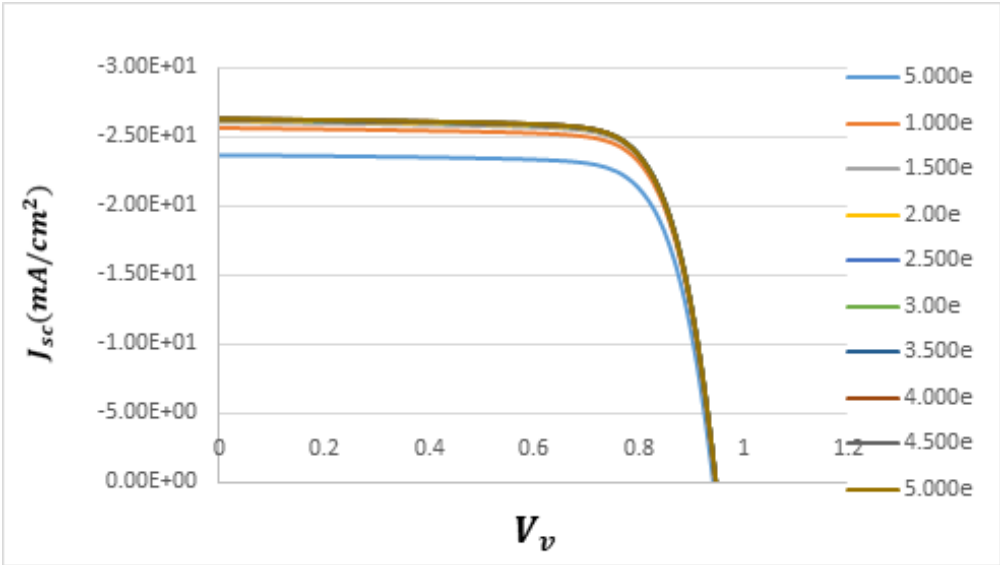
الشكل (8): خواص منحني IV عند تغيير تشويب طبقة الانعكاس.

3-5 تأثير تغيير السُمك

3-5-1 تأثير تغيير سُمك طبقة الامتصاص ($FAMAPbI_3$)

تعتبر طبقة الامتصاص في خلية البيروفسكايت هي المسؤولة عن امتصاص الضوء وتكوين الأزواج (الإلكترون- فجوة). تم تغيير سُمك طبقة الامتصاص (0.5 – 5 µm) لدراسة تأثيره على كل من FF ، Voc، Jsc و η . فعند اقل سُمك مدروس (0.5 µm) بلغت قيمة جهد الدائرة المفتوحة (0.943V) وتيار الدائرة القصيرة (mA/cm^2

23.70) بينما كان عامل الملئ (٪ 76.87) وبلغت كفاءة الخلية (٪ 17.19) ، ومع زيادة السُمك الى اعلى قيمة مدروسة (5 μm) بقيت قيمة V_{OC} ثابتة، بينما ارتفع تيار الدائرة القصيرة الى (mA/cm^2 26.34) في حين انخفض عامل الملئ بشكل طفيف ليصل الى (٪ 76.401) لترتفع الكفاءة النهائية الى (٪ 19.109) يتبين لنا ان J_{SC} يزداد بشكل واضح بزيادة سُمك طبقة الامتصاص ويُعد هذا السلوك متوقعاً من الناحية الفيزيائية وذلك لارتباط J_{SC} المباشر بعملية امتصاص الضوء وتوليد الشحنات داخل المادة، ان J_{SC} يعتمد على كمية الضوء الممتصة داخل طبقة البيروفسكايت حسب العلاقة ($I_{abs} = I_O(1 - e^{-\alpha d})$ [25] ومع زيادة السُمك تزداد قدرة الطبقة على امتصاص الفوتونات وتقل كمية الضوء النافذ مما يؤدي الى زيادة عدد الأزواج (الكترون – فجوة) المتولدة ونتيجة لذلك يزداد معدل توليد حاملات الشحنة وبالتالي يرتفع تيار الدائرة القصيرة وفق العلاقة ($J_{sc}\alpha\ G\ (d)$) كما أن مادة البيروفسكايت تمتلك طول انتشار كبير لحاملات الشحنة، الأمر الذي يسمح باستخلاص الإلكترونات والفجوات بكفاءة عالية حتى في الطبقات السميكة دون زيادة كبيرة في معدّلات إعادة التركيب. وهذا يفسّر استمرار ارتفاع Jsc مع زيادة السُمك ضمن المدى المستخدم دون أن يتعرض لتدهور أو تشبع مبكر. اما V_{OC} فان قيمتها ثابته على الرغم من الزيادة الكبيرة في سُمك طبقة الامتصاص ويمكن تفسير ذلك بالاعتماد على الأساس الفيزيائي لعمل الخلية، حيث يعَرف جهد الدائرة المفتوحة على انه الجهد الناتج من عدم مرور أي تيار كهربائي وبما ان زيادة السُمك أدت الى ارتفاع قيمة Jsc نتيجة زيادة الامتصاص الضوئي، الا ان هذه الزيادة لم تكن كافية لتغيير في V_{OC} لان العامل المسيطر في هذه المعادلة هو تيار الاشباع J_0 أي معدل إعادة تركيب الالكترونات والفجوات، وبما ان مادة البيروفسكايت تمتلك طول انتشار كبير للشحنات ومعدلات إعادة تركيب منخفضة ضمن مدى السُمك المستخدم، فان J_0 بقي ثابتاً تقريباً وبالتالي ثبوت V_{OC} ، اما عامل الملئ فتشير نتائج الدراسة إلى أنه لم يُظهر تحسناً مع زيادة سمك طبقة الامتصاص، بل بقي شبه ثابت مع ميل بسيط للانخفاض عند السُمك الكبير . هذا السلوك يُعزى إلى زيادة الخسائر الكهربائية الداخلية وخصوصاً مقاومة التوالي الناتجة عن زيادة طول مسار انتقال حاملات الشحنة داخل الطبقة السميكة. كما أن زيادة حجم المادة قد تؤدي إلى ارتفاع احتمالية إعادة التركيب الحجمية أثناء تشغيل الخلية قرب نقطة القدرة العظمى، مما ينعكس سلباً على شكل منحني (التيار–الفولتية) الشكل (8) ويحدَ من تحسن عامل الملء. وبالتالي فإن زيادة الامتصاص الضوئي وحدها لا تؤدي بالضرورة إلى تحسن FF، كونه يعتمد أساساً على كفاءة النقل وجودة التلامس الكهربائي. أظهرت النتائج تحسناً واضحاً في كفاءة التحويل الكهروضوئي مع زيادة سُمك طبقة الامتصاص، ويعود هذا التحسن بشكل رئيسي إلى زيادة تيار الدائرة القصيرة، في حين بقي جهد الدائرة المفتوحة ثابتاً تقريباً ولم يُسهم عامل الملء في هذا التحسن. وبما أن الكفاءة تعتمد على حاصل ضرب Voc وJsc وFF حسب العلاقة (10) فإن الزيادة في كانت العامل المسيطر في رفع الكفاءة الكلية للخلية ضمن مدى السُمك المدروس.



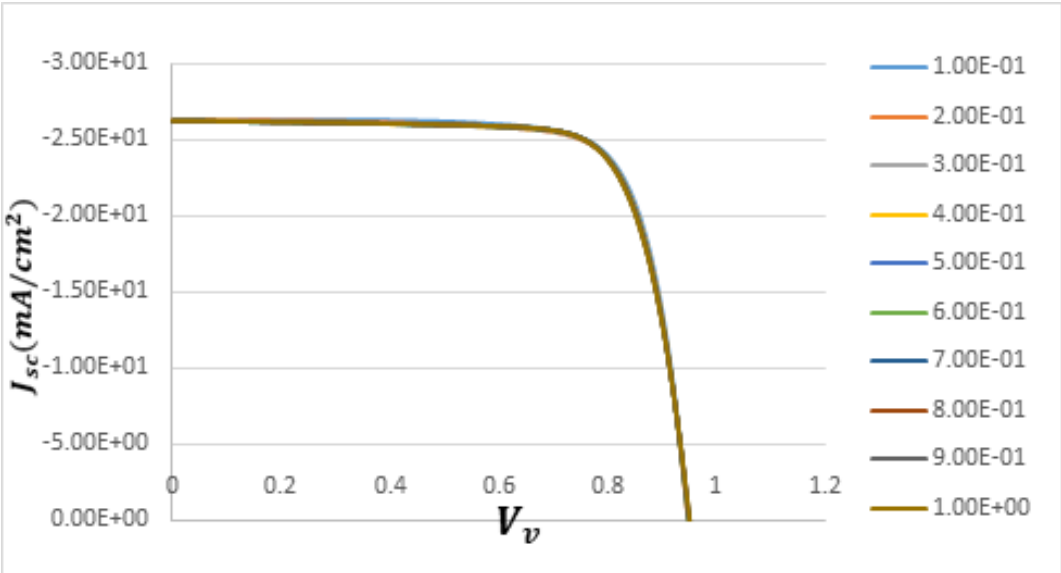
الشكل (8): يوضح تأثير تغيير سُمك طبقة الامتصاص على منحني (I-V).

3-5-2 تأثير تغيير سُمك طبقة الموائمة (V_2O_5)

تمت دراسة تأثير تغيير سمك طبقة الموائمة (CdS) على أداء الخلية الشمسية تعتبر هذه الطبقة مهمة في تحقيق مواءمة الطاقة وتقليل فقد الشحنات عند الواجهة بين الطبقة الشفافة (ITO) وطبقة الامتصاص ($FAMAPbI_3$) وقد تم تغيير السمك من (0.1 µm) إلى (1 µm) لدراسة أثر ذلك على الخصائص الكهروضوئية للخلية، والشكل (9) يوضح العلاقة بين منحني IV. أن قيمة V_{OC} تبقى شبه ثابتة مع زيادة سُمك طبقة V_2O_5، حيث ارتفعت ارتفاعاً طفيفاً من (0.948 V إلى 0.951v) وهذا السلوك يعود إلى أن جهد الدائرة المفتوحة يعتمد أساساً على فجوة الطاقة للطبقة الماصة ومعدل إعادة التركيب الحجمية، وبما أن تغيير سُمك طبقة نقل الثقوب لا يؤثر بشكل مباشر على فجوة الطاقة أو كثافة العيوب الحجمية في طبقة الامتصاص، فإن تيار الإشباع العكسي J_o يبقى شبه ثابت، مما يؤدي إلى استقرار قيمة V_{OC} أما الزيادة الطفيفة فتُعزى إلى تحسن محاذاة مستويات الطاقة وتقليل إعادة التركيب السطحي عند واجهة الامتصاص مع زيادة السمك. اما J_{SC} فيُلاحظ انخفاض طفيف جداً في قيمة J_{SC} مع زيادة السمك، حيث انخفض من (26.303 إلى 26.228 mA/cm²) ويرتبط هذا الانخفاض بزيادة المسافة التي تقطعها الثقوب داخل طبقة V_2O_5، مما يؤدي إلى زيادة المقاومة الأومية واحتمالية إعادة التركيب أثناء النقل. وبما أن طبقة (V_2O_5) لا تُسهم في امتصاص الضوء فإن زيادة سُمكها لا تؤدي إلى توليد إضافي للحاملات، بل قد تحد من كفاءة جمعها ومع ذلك، يبقى الانخفاض محدوداً بسبب الموصلية الجيدة نسبياً للمادة ضمن مدى السماكات المدروسة. اما عامل الملء (FF) فيتغير من (76.928٪) الى (76.345٪) حسب سُمك طبقة V_2O_5 في الخلايا الشمسية وليس بشكل ثابت فبزيادة السُمك يزداد FF ليصل إلى أعلى قيمة عند السماكات المتوسطة، ثم يبدأ بالانخفاض إذا زاد

السمك أكثر والسبب الرئيسي هو تأثير مقاومة التوالي ومقاومة التوازي. فعندما يكون سُمك الطبقة صغير تكون غير مكتملة وغير متساوية فينتج عن ذلك تسريب للتيار فينخفض FF. اما عندما يكون سُمك الطبقة متوسط تصبح متجانسة وتغطي السطح بشكل أفضل فيقل التسريب ويزيد FF إلى أقصى حد. وعند السماكات الكبيرة تصبح الطبقة سميكة جدًا فيزداد صعوبة مرور التيار الكهربائي بسبب المقاومة الداخلية، فينخفض FF مرة أخرى. حيث يتبين أن قيم V_{OC} و J_{SC} تبقى ثابتة تقريبًا ، بينما يحدث انخفاض طفيف في بعض القيم الأخرى. لذلك يكون العامل الأساسي المؤثر في تغير الكفاءة هو عامل الملء حيث تظهر النتائج أن قيمة للكفاءة عند اقل سُمك تبلغ (19.188٪) لتهبط إلى(19.044٪) عند اعلى سُمك لذا تنخفض الكفاءة بسبب زيادة المقاومة الداخلية وانخفاض FF .

.



الشكل (9): يوضح تأثير تغيير سُمك طبقة الموائمة على منحني (I-V)

4- الاستنتاجات

أظهرت نتائج المحاكاة أن ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى تدهور ملحوظ في أداء الخلية الشمسية، إذ ينخفض كل من جهد الدائرة المفتوحة والكفاءة الكلية نتيجة زيادة تيار الإشباع العكسي وتضييق فجوة الطاقة وارتفاع معدلات إعادة الاتحاد الحراري داخل طبقة الامتصاص، في حين يبقى تيار الدائرة القصيرة شبه ثابت مع تغيرات طفيفة. كما بيّنت الدراسة أن زيادة مقاومة التوالي Rs ترفع الفواقد الأومية داخل الخلية مما يسبب انخفاضاً واضحاً في عامل الملء والكفاءة مع تراجع بسيط في تيار الدائرة القصيرة، بينما يبقى جهد الدائرة المفتوحة شبه ثابت. في المقابل، فإن زيادة مقاومة التوازي Rsh تقلل تيارات التسريب وتخفض تيار الإشباع العكسي، الأمر الذي يؤدي إلى تحسن جهد الدائرة المفتوحة ومعامل الملء وبالتالي ارتفاع الكفاءة

حتى الوصول إلى حالة التشبع عند القيم العالية جداً لـ Rsh. كذلك أوضحت النتائج أن التشويب المتكامل لجميع طبقات الخلية يؤثر مباشرة في الأداء الكهروضوئي، حيث يحقق التشويب المعتدل تحسناً في محاذاة مستويات الطاقة واستخلاص الحاملات وتقليل إعادة الاتحاد مما يرفع عامل الملء والكفاءة، بينما يؤدي التشويب العالي جداً إلى زيادة مراكز الفخاخ وإعادة الاتحاد والحد من التحسن. إضافةً إلى ذلك، فإن التحكم بسماكات الطبقات المختلفة، ولاسيما طبقة الامتصاص وطبقة المواءمة، يلعب دوراً حاسماً في تحسين امتصاص الضوء وكفاءة جمع الحاملات وزيادة تيار الدائرة القصيرة والكفاءة الكلية عند السماكات المثلى، في حين أن السماكات الكبيرة ترفع المقاومة الداخلية وتزيد احتمالية إعادة الاتحاد مما يحد من تحسن عامل الملء والكفاءة. وبصورة عامة، تؤكد هذه النتائج أن الوصول إلى أعلى أداء لخلايا $FA_{1-x}MA_xPbI_3$ يتطلب تحقيق توازن دقيق بين العوامل الحرارية والمقاومات الداخلية ومستويات التشويب والسماكات المثلى، إذ إن أي ابتعاد عن هذه القيم يؤدي إلى تراجع واضح في الخصائص الكهروضوئية للخلية.

المصادر

1. A. Yassine, M. A. M. Hassan, M. El-Naggar, and S. A. Omer, "Effects of series and shunt resistances on the performance of PV panel under temperature variations," in *2025 IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, Riyadh, Saudi Arabia, 2025, pp. XXX–XXX, doi: 10.1109/ICRERAxxxxxx.2025.8066772.
2. M. Saliba et al., "Perovskite solar cells: from the laboratory to the market," Science, vol. 375, no. 6580, pp. 302–306, Jan. 2022. doi: 10.1126/science.abj0905
3. D. Yang, R. Yang, Q. Ren, X. Zhu, and S. Yang, "Simulation and optimization of perovskite solar cells: Recent progress and future challenges," Nano Energy, vol. 80, p. 105526, Jan. 2021. doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105526.
4. A. Walsh, "Principles of defect physics in photovoltaic materials," Nature Reviews Materials, vol. 6, no. 12, pp. 926–944, Dec. 2021. doi: 10.1038/s41578-021-00331-z.
5. W. Ke, G. Fang, and Y. Qin, "Recent developments and perspectives on highly efficient perovskite solar cells," J. Mater. Chem. A, vol. 10, no. 1, pp. 10–36, Jan. 2022. doi: 10.1039/D1TA08728K.
6. H. J. Snaith, "Present status and future prospects of perovskite photovoltaics," Nature Materials, vol. 17, pp. 372–376, Apr. 2018. doi: 10.1038/s41563-018-0071-z.
7. NREL, "Best Research-Cell Efficiency Chart," National Renewable Energy Laboratory, 2024. [Online]. Available: https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html
8. J. A. Márquez et al., "Optical modeling and simulation of photogeneration rate in perovskite solar cells using finite element methods," Solar Energy Mater. Sol. Cells, vol. 230, p. 111234, May 2021. doi: 10.1016/j.solmat.2021.111234.
9. M. K. Nazeeruddin and M. Grätzel, "Perovskite solar cells: The birth of a new era

line Solar Cell. Journal of Nepal Physical Society, 2015.
18. Libra, M. et al. Temperature Changes of I-V Characteristics of Photovoltaic Cells as a Consequence of the Fermi Energy Level Shift. Research in Agricultural Engineering, 2017
19. Adeeb, J. et al. Temperature Effect on Performance of Different Solar Cell Technologies. Journal of Environmental Engineering, 2019.
20. Shaker, A. et al. Examining the Influence of Thermal Effects on Solar Cells. Sustainable Energy Research (SpringerOpen), 2024.
21. P. Schulz et al., Revealing the Doping Density in Perovskite Solar Cells and Its Impact on Device Performance, Applied Physics Reviews, 2018.
22. K. Zhu & N.-G. Park, Doping and Energy Level Engineering in Perovskite Solar Cells, Journal of Physical Chemistry Letters, 2021.
23. J. Werner et al., Effect of Doping on Carrier Collection and FF in Thin-Film Solar Cells, Journal of Applied Physics.
24. M. Burgelman et al., SCAPS-1D Simulation of Thin-Film Solar Cells, University of Gent.
25. S. Rühle, "Solar cell efficiency tables (version 57)," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 29, no. 1, pp. 3–15, 2021.

in photovoltaics," Beilstein J. Nanotechnol., vol. 12, pp. 1901–1920, 2021. doi: 10.3762/bjnano.12.147.
10. W. Shockley and W. T. Read, "Statistics of the Recombinations of Holes and Electrons," Phys. Rev., vol. 87, no. 5, pp. 835–842, Sep. 1952. doi: 10.1103/PhysRev.87.835.
11. M. A. Green, "Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells," Prog. Photovolt. Res. Appl., vol. 29, no. 5, pp. 407–417, May 2021. doi: 10.1002/pip.3384.
12. H. W. Chen et al., "A light-irradiation-stable perovskite solar cell with efficiency over 22%," Adv. Energy Mater., vol. 11, no. 1, p. 2001839, Jan. 2021. doi: 10.1002/aenm.202001839.
13. S. H. Park et al., "Layer thickness optimization for planar perovskite solar cells," Sol. Energy Mater. Sol. Cells, vol. 211, pp. 70–77, Mar. 2020. doi: 10.1016/j.solmat.2020.110534.
14. K. Domanski et al., "Not all that glitters is stable: A closer look at mixed-cation halide perovskites," ACS Energy Lett., vol. 2, no. 4, pp. 902–909, Apr. 2017. doi: 10.1021/acsenergylett.7b00205.
15. Delft University of Technology. Solar Energy: The Physics and Engineering of Photovoltaic Conversion, Technologies and Systems. OpenCourseWare (Sections 9.1–9.3
16. Ossila Ltd. Low Device Metrics in Solar Cells: Causes and Solutions.
17. Karki, N. et al. Effect of Temperature on the I-V Characteristics of a Polycrystal-