

## دراسة تأثير بعض البارامترات على خصائص الخلايا الشمسية الهجينة قوامها بيروفسكايت

أ.د. حسن عبد الكريم سليمان\*

د.محمد كامل إبراهيم\*\*

مياس عبدالله رستم\*\*\*

(تاريخ الإيداع 2021 /9/18 - تاريخ النشر 2022 /6/7)

### □ ملخص □

قمنا في هذا البحث بنمذجة للخلية الشمسية التي قوامها مادة البيروفسكايت ( $CH_3NH_3PbBr_3$ ) ذات الفجوة الطاقةية  $1.93 eV$ . بلغت فيها كثافة تيار الدارة المقصورة  $J_{sc} = 9.3 mA/cm^2$ ، وجهد الدارة المفتوحة  $V_{oc} = 1.65 mV$ ، وكفاءة تحويل الطاقة  $POV = 12.55\%$  ومن ثم نمذجة للخلية الشمسية التي قوامها ( $CH_3NH_3SnI_3$ ) ذات الفجوة الطاقةية  $1.23 eV$ ، ومقارنة النتائج. ودراسة تأثير الفجوة الطاقةية على كفاءة الخلية في تحسين عملية امتصاص الفوتونات، ومن ثم دراسة تأثير كل من المقاومة التفرعية ( $R_{SH}$ ) و المقاومة التسلسلية ( $R_S$ ) على عامل الملء ( $FF$ ). تشير النتائج إلى أن النماذج التي أساسها مادة البيروفسكايت ( $CH_3NH_3SnI_3$ ) تزيد قيمة الكفاءة لتصل لحوالي 19% باستخدام نفس السماكة، وهذا يدل على أهميتها في تطبيقات الخلايا الفوتوفلطائية (PVC).

الكلمات المفتاحية: محاكاة، البيروفسكايت، نبيطة فوتوفلطائية، كفاءة الخلية، عامل الملء، مقاومة تسلسلية، مقاومة تفرعية، SCAPS-1D.

\*أستاذ-قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة طرطوس-طرطوس-سوريا.

\*\*أستاذ مساعد-قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة طرطوس-طرطوس-سوريا.

\*\*\*طالب دراسات عليا(ماجستير)-قسم الفيزياء-كلية العلوم-جامعة طرطوس-طرطوس-سوريا.

## Studying the effect of some parameters on the properties of hybrid perovskite solar cells

**Dr.Hasan Abed Alkarim Sliman\***

**Dr.Mohamed Ibrahim\*\***

**Mayas Abdullah Rustom\*\*\***

(Received 18/9/2021.Accepted 7/6/2022)

### □ABSTRACT □

In this paper we simulate a perovskite solar cell ( $CH_3NH_3PbBr_3$ ) with an energy band gap  $1.93\text{ eV}$ . The short circuit current density was  $J_{sc} = 9.3\text{ mA/cm}^2$ , open circuit voltage was  $V_{oc} = 1.65\text{ mV}$ . Then, we simulated a perovskite solar cell ( $CH_3NH_3SnI_3$ ) with an energy band gap  $1.23\text{ eV}$  and compared the result, and study the effect of the energy band gap on the efficiency of the cell in improving the process of absorbing photons. then studying the effect of each of the parallel resistance ( $R_{SH}$ ) and series resistance ( $R_S$ ) on the fill factor ( $FF$ ). The results indicate that the perovskite devices based on ( $CH_3NH_3SnI_3$ ) increase the value of the efficiency, where reaches about 19% using same thickness, This indicates its importance in solar cell applications.

Keywords: Simulinke, Perovskite, Photovoltaic device, Cell efficiency, Fill factor, Series resistance, Parallel resistance, SCAPS-1D.

---

\* Professor, Department of Physic, Fucly of Science, Tartous University, Tartous, Syria.

\*\*Assistant professor, Department of Physic, Fucly of Science, Tartous University, Tartous, Syria.

\*\*\*Postgraduate Student, Department of Physic, Fucly of Science, Tartous University, Tartous, Syria.

## مقدمة:

الطلب المتزايد على الطاقة ومحدودية مصادرها عالمياً من الوقود الأحفوري، والطاقة النووية التي تهدد كوكبنا كانت من أهم الأسباب التي دفعت للبحث عن مصادر طاقة بديلة للحد منها فاتجهت الأنظار نحو الطاقات المتجددة ولاسيما الطاقة الشمسية التي تتولد من مصدر طبيعي لا ينضب مع مرور الزمن، وهي طاقة نظيفة ومستدامة وصديقة للبيئة. لذلك كان لابد من الاستفادة من شدة الإشعاع الشمسي الساقط عليها وتحويله إلى طاقة كهربائية عبر نبائط خاصة هي الخلايا الفوتوفلطائية [1] والتي يدخل في تركيبها مواد متنوعة ذات خصائص مميزة ومن أهم تلك المواد مواد البيروفسكايت التي شهدت تطوراً سريعاً في الآونة الأخيرة لما تملكه من خصائص فريدة من نوعها والتي جذبت اهتمام العديد من الباحثين لمعرفةتها ودراستها.

تعود فكرة مواد البيروفسكايت للعالم الروسي ليف بيروفسكي عام 2009 وتم استخدامها لأول مرة في الخلايا الشمسية من قبل العالم kojima et al [2] كطبقة ماصة للضوء في الخلية الشمسية التي تدخل في تركيبها والتي أبدت فعالية عالية في امتصاص الفوتونات. من خصائصها المميزة الامتصاصية العالية للفوتونات وحركية حوامل الشحنة العالية والناقلية العالية للإلكترونات والثقوب والتي تزيد من كفاءتها وتحسن من أدائها حيث بلغت كفاءة تحويل الطاقة فيها حوالي 22% [3] بالإضافة لتكلفة الإنتاج المنخفضة مقارنة مع الخلايا الشمسية التي يدخل في تركيبها السليكون أو مواد أخرى تقليدية.

## أهمية البحث وأهدافه

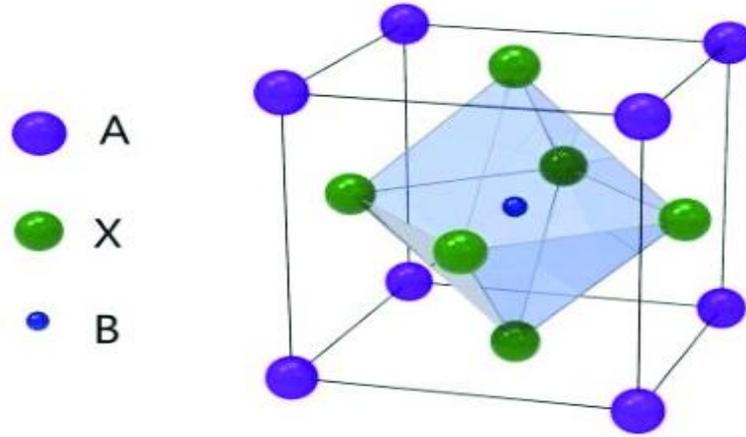
يهدف هذا البحث إلى محاكاة الخلية الفوتوفلطائية التي قوامها مادة البيروفسكايت ( $CH_3NH_3PbBr_3$ )، ومقارنتها مع خلية شمسية أخرى، وتبيان تأثير الفجوة الطاقية على كفاءة الخلية و تكمن أهمية بحثنا في التعرف على إحدى طرائق محاكاة الخلايا الشمسية القائمة على مواد البيروفسكايت، ودراسة تأثير كل من المقاومة التسلسلية والمقاومة التفرعية على معاملات الخلية، من خلال تحسين حركية حوامل الشحنة واستثمار أفضل للإشعاع الشمسي الساقط عليها، وكبح عمليات إعادة اتحاد حاملات الشحنة الكهربائية، مما يسمح بتحضير خلايا شمسية فعالة بمرود عالٍ وبتكلفة تصنيع منخفضة.

## منهجية البحث ومواده

أنجز هذا البحث باستخدام برنامج SCAPS-1D حيث تم نمذجة خلية شمسية اساسها مادة بيروفسكايت ذات فجوة طاقة كبيرة نسبياً، ومن ثم نمذجة خلية شمسية اساسها مادة بيروفسكايت ذات فجوة طاقة صغيرة نسبياً، ومقارنة النتائج من أجل دراسة تأثير الفجوة الطاقية على كفاءة الخلية.

## الدراسة الحسابية والنظرية

**بنية البيروفسكايت:** أي مادة لها بنية بلورية مماثلة للصيغة  $ABX_3$  تسمى بيروفسكايت. يمثل الهيكل البلوري الموضح في الشكل (1) بنية البيروفسكايت حيث A هو كاتيون كبير عضوي أو غير عضوي، B كاتيون أصغر غير عضوي مثل  $(Cu_2^+, Pb_2^+, Sn_2^+)$  أما  $X_3$  هو أيون من مجموعة الهالوجين مثل  $(Cl^-, Br^-, I^-)$  قادرة على الارتباط مع كل من الكاتيونات A و B [4]. مواد البيروفسكايت لها سلوك الكتروني ضوئي ممتاز مما يجعلها تعمل بشكل جيد كطبقة ماصة للضوء في خلايا الفوتوفلطائية، وبالتالي بديل بكفاءة أعلى من السيليكون.



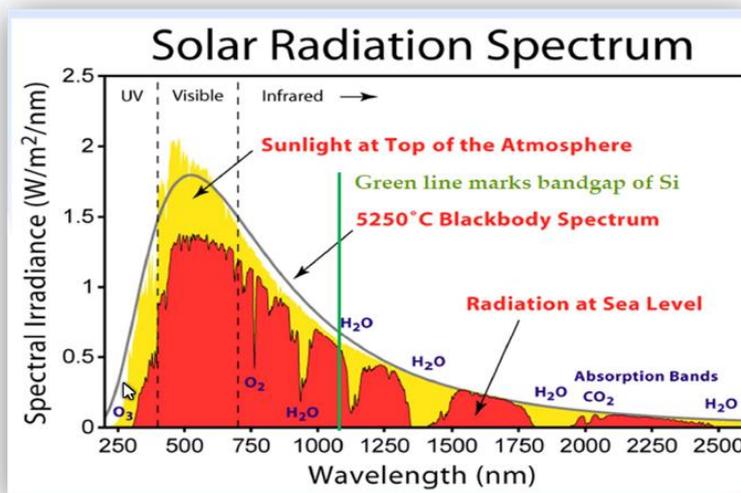
الشكل (1): يوضح البنية البلورية لمادة البيروفسكايت

يحتوي البيروفسكايت على نطاق فجوة طاقة مباشرة يتراوح من  $2.3 \text{ eV}$  إلى  $1.23 \text{ eV}$ ، مما يمنحها الخصائص البصرية اللازمة لامتصاص وتحويل فوتونات كل من الأشعة تحت الحمراء القريبة (NIR) والأشعة فوق البنفسجية (UV) إضافة إلى الضوء المرئي، والذي يمكن استثماره بواسطة طبقة البيروفسكايت كما هو موضح في الشكل (2) [5-7] حيث تنخفض كمية الأشعة قبل الوصول إلى سطح الأرض، ويعود ذلك إلى طول مسارها في الغلاف الجوي، المعبر عنه بما يعرف بكتلة الهواء. وبناءً على ما تقدم تمّ تقييم النبائط الفوتوفلطائية استناداً للجمعية الأمريكية للمختبرات والمواد (ASTM) [8,9]، التي حددت قياسين للتوزيع الطيفي وفق قيمة  $x$  للتوزيع الطيفي المعياري  $AMx$ ، حيث يسيّر الدليل  $x$  إلى طول مسار الإشعاع الشمسي عبر طبقة الأتموسفير، وكلما كانت الممرات أطول ازداد انحراف الضوء وامتصاصه، مما يؤدي إلى تغيير التوزيع الطيفي للضوء الذي تتلقاه النبيطة.

يُعيّن طول مسار الأشعة بالمعامل  $x$  المعرّف بالعلاقة الآتية:

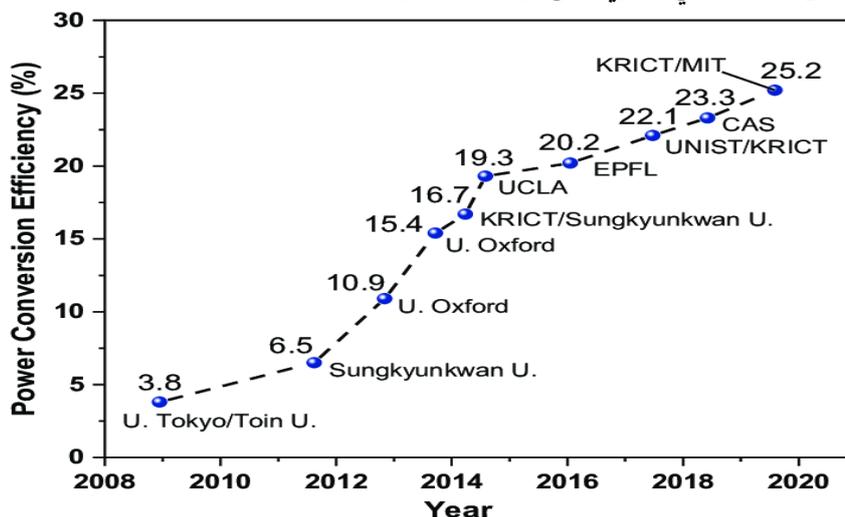
$$x = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (1)$$

حيث  $\theta_z$  تمثل الزاوية الشمسية. وتجدر الإشارة إلى أنه كلما كان المسار  $x$  أطول كانت كتلة الهواء أكبر والطيف  $AM1.5$  يمثل الإشعاع المقابل للطيف الشمسي على سطح الأرض: يحدد  $AM1.5$  من أجل النبائط الكهروضوئية (PVD) التي تملك سطح يميل بزاوية  $37^\circ$  عن مسار الأشعة الشمسية [8]. يمثل الطيف  $AM0$  الإشعاع المقابل للطيف الشمسي خارج الغلاف الجوي مع كامل الإشعاع الكلي  $1353 \text{ W/m}^2$  الذي يمكن أن يقرب بإشعاع الجسم الأسود عند الدرجة  $5900 \text{ K}$  (يشع الجسم الأسود ويمتص جميع الأطوال الموجية للطيف الكهرومغناطيسي، ويمثل التوزيع الطيفي للأطوال الموجية لإشعاع الجسم الأسود وفق قانون بلانك). والشكل (2) يوضح طيف إشعاع الجسم الأسود، وطيف الإشعاع الشمسي  $AM0$  للتطبيقات الفضائية، والطيف  $AM1.5$  للتطبيقات على سطح الأرض وفق ASTM.



الشكل (2): يوضح طيف الإشعاع الشمسي المعياري [8]

لقد شهدت الخلايا الشمسية التي قوامها مواد البيروفسكايت تطوراً سريعاً مقارنةً بنظيراتها السليكونية حيث ارتفعت كفاءتها من 3.8% إلى 25.2% [10] خلال الأعوام من الـ 2008 إلى الـ 2020 كما هو موضح في الشكل (3) حيث نلاحظ التحسن السريع لكفاءة هذه الخلايا مما جعلها منافساً للخلايا السليكونية لكن هناك عدة تحديات حالة دون انتشارها واستخدامها ومن أهم هذه التحديات سمية الرصاص الداخل في تركيبها وعدم استقرارها لفترات طويلة (التدهور في الخصائص) و من أجل التغلب على هذه العقبات يجب استخدام القصدير كبديل للرصاص ودراسة تأثيره على أداء الخلية ودراسة العوامل المؤثرة على استقرارها حيث تم في هذا البحث استبدال طبقة البيروفسكايت التي تحوي على بروميد الرصاص بالطبقة التي تحتوي على يوديد القصدير.



الشكل (3): يوضح تطور الكفاءة للخلايا الشمسية من نوع بيروفسكايت

### نمذجة ومحاكاة الخلية الشمسية:

يمكن أن توضح النمذجة العمليات الفيزيائية للنموذج المدروس وفهم آلية عمل النبيطة وتأثير تغير البارامترات على أداء الخلية.

هناك عدة برامج تستخدم في محاكاة الخلايا الشمسية من أهمها ( SILVACO - TCAD - SCAPS) وفي هذا البحث سوف نستخدم برنامج الـ SCAPS-1D لمحاكاة الخلية الشمسية التي قوامها البيروفسكايت حيث تم تصميم وتطوير هذا البرنامج من قبل مجموعة من الباحثين في جامعة جينت (Gent). يعتمد هذا البرنامج بشكل أساسي على:

$$1 - \text{معادلة بواسون:} \quad \frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = \frac{e}{\epsilon_0\epsilon_r} (p(x) - n(x) + N_D + N_A + p_p \cdot p_n) \quad (2)$$

حيث:  $\phi$  الكمون الكهربائي الساكن،  $\epsilon_r$  و  $\epsilon_0$  السماحية النسبية و سماحية الخلاء على الترتيب،  $e$  شحنة الإلكترون،  $p$ ،  $n$  تركيز الإلكترونات والثقوب الحرة على الترتيب،  $p_p$ ،  $p_n$  تركيز الإلكترونات و الثقوب على الترتيب،  $N_D$ ،  $N_A$  تركيز الشوائب للمانحات والآخذات.

2- معادلتى تيار الانسياب من أجل الإلكترونات والثقوب على الترتيب:

$$J_n = D_n \frac{dn}{dx} + \mu_n n \frac{d\phi}{dx} \quad (3)$$

$$J_p = D_p \frac{dp}{dx} + \mu_p p \frac{d\phi}{dx} \quad (4)$$

حيث:  $J_n$  كثافة تيار الإلكترونات،  $J_p$  كثافة تيار الثقوب،  $D_p$  و  $D_n$  معامل انتشار الإلكترونات و الثقوب على الترتيب،  $\mu_p$  و  $\mu_n$  حركية الإلكترونات والثقوب على الترتيب.

3- معادلتى الاستمرارية من أجل الإلكترونات والثقوب على الترتيب:

$$\frac{dJ_n}{dx} = G - R \quad (5)$$

$$\frac{dJ_p}{dx} = G - R \quad (6)$$

$G$  معدل التوليد،  $R$  معدل إعادة الاتحاد.

الخلية الشمسية المستخدمة في هذا البحث من النوع n-i-p حيث تم إيداع الطبقة الماصة للضوء بين طبقة من ثنائي أكسيد التيتانيوم ( $TiO_2$ ) كطبقة ناقلة للإلكترونات (ETL) وطبقة من المادة Spiro-OMeTAD كطبقة ناقلة للثقوب (HTL).

### خصائص المواد المستخدمة في المحاكات:

تم نمذجة الخليتين الشمسيتين وفق المواصفات المذكورة في الجدول (1) عند شدة إشعاع شمسي ثابتة  $E = 1000 \text{ W/m}^2$ ، ودرجة حرارة ثابتة  $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ، باستخدام برنامج SCAPS-1D. يوضح الشكل (4) الطبقات المستخدمة في عملية المحاكاة باستخدام برنامج الـ SCAPS-1D تأسيساً على العلاقات (2) - (6):

الجدول (1):

Characteristics	SnO <sub>2</sub> :F	TiO <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> SnI <sub>3</sub>	CH <sub>3</sub> NH <sub>3</sub> PbBr <sub>3</sub>	Spiro-OMeTAD
Thickness (nm)	500	50	400	400	300
Band gab (eV) E <sub>g</sub>	3.5	3.2	1.23	1.93	2.9
Electron affinity (eV) $\chi$	4	4.26	4.17	3.7	2.2
Dielectric permittivity $\epsilon_r$	9	75	10	75	3
CB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )	$2.2 \times 10^{17}$	$2 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{17}$	$2.5 \times 10^{18}$
VB effective density of states (1/cm <sup>3</sup> )	$2.2 \times 10^{16}$	$1.8 \times 10^{19}$	$1 \times 10^{18}$	$1 \times 10^{17}$	$1.8 \times 10^{19}$
electron thermal velocity (cm/s)	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
hole thermal velocity (cm/s)	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$	$1 \times 10^7$
electron mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	20	$2 \times 10^4$	1.6	2.1	$2 \times 10^{-4}$
hole mobility (cm <sup>2</sup> /Vs)	10	$1 \times 10^3$	1.6	2.4	$2 \times 10^{-4}$
shallow uniform donor density N <sub>D</sub> (1/cm <sup>3</sup> )	$1 \times 10^{15}$	$6 \times 10^{19}$	$3 \times 10^{17}$	$1 \times 10^{16}$	0
shallow uniform acceptor density N <sub>A</sub> (1/cm <sup>3</sup> )	0	0	$3 \times 10^{17}$	$1 \times 10^{16}$	$1 \times 10^{22}$

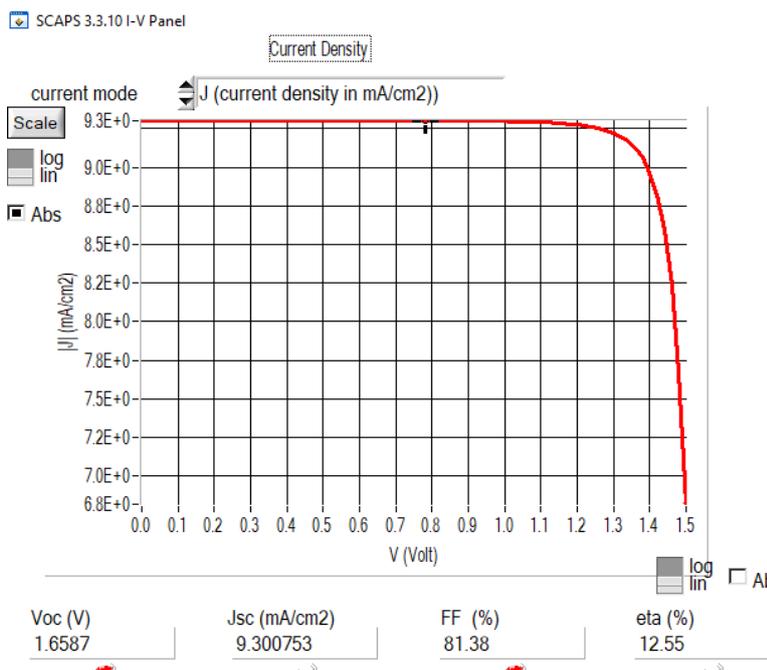
النموذج الأول الذي تم إدخاله هو: Glass/SnO<sub>2</sub>: F/TiO<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>SnI<sub>3</sub>/Spiro – OMeTAD/Au

والنموذج الثاني: Glass/SnO<sub>2</sub>: F/TiO<sub>2</sub>/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub>/Spiro – OMeTAD/Au، مع العلم أن تابع العمل للذهب (Au) هو  $5.1 \text{ eV}$ ، وعند تشغيل البرنامج نحصل على نموذج الخليتين الشمسيتين الموضحين في الشكل (4).

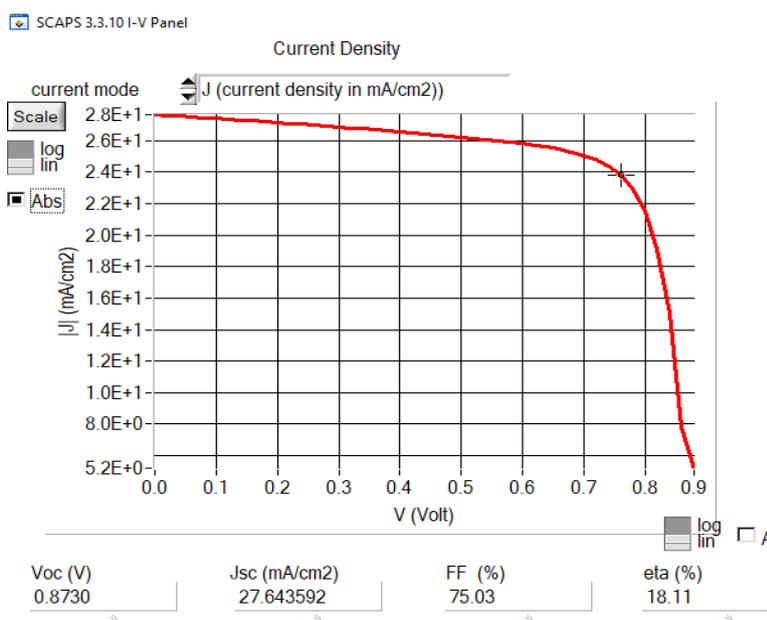
يوضح الشكلين (5) و(6) النتائج التي تم الحصول عليها من أجل الخليتين  $(CH_3NH_3PbBr_3)$ ،  $(CH_3NH_3SnI_3)$  على الترتيب، اللذان يمثلان علاقة تيار الخلية الشمسية بدلالة جهدها.



الشكل (4): يوضح واجهة برنامج الـ SCAPS-1D وأسماء الطبقات المستخدمة.



الشكل(5): يوضح منحني (جهد-تيار) للخلية  $(CH_3NH_3PbBr_3)$



الشكل(6): يوضح منحني (جهد-تيار) للخلية  $(CH_3NH_3SnI_3)$

نلاحظ من الشكلين الخاصية المميزة (تيار - جهد) (دراسة تغيرات التيار كتابع لجهد اللوح) أن الخلية الشمسية التي تحتوي على المركب  $(CH_3NH_3SnI_3)$  كطبقة ماصة للضوء تبدي كفاءة أكبر بكثير من الخلية الشمسية التي تحتوي على المركب  $(CH_3NH_3PbBr_3)$  كطبقة ماصة للضوء ويعود ذلك إلى الاختلاف الكبير في الفجوة الطاقية لكل من المركبين حيث المركب ذو الفجوة الطاقية الأصغر يمكن أن يمتص الفوتونات الموافقة لمجال أطوال موجية أكثر من المركب ذو الفجوة الطاقية الأكبر.

والجدولين (2) و (3) يوضح النتائج التي تم الحصول عليها لكل من المركبين:

الجدول (2):

$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF%	Efficiency %
9.3	1.65	81.38	12.55

الجدول (3):

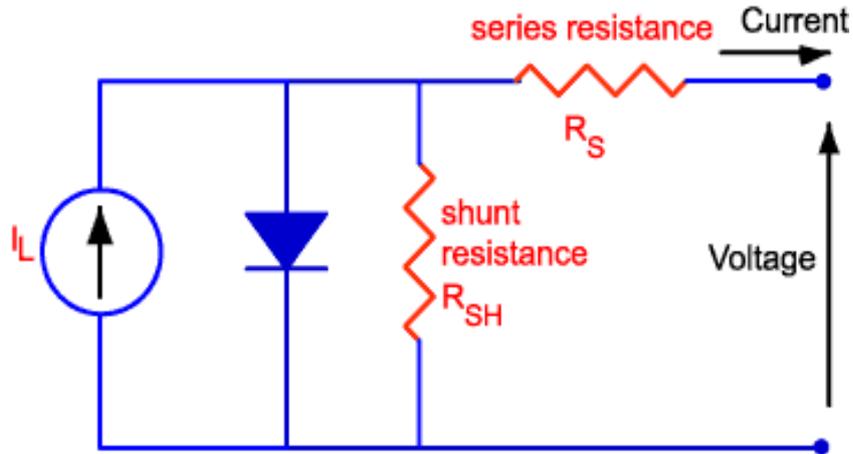
$J_{sc}$ (mA/cm <sup>2</sup> )	$V_{oc}$ (V)	FF%	Efficiency %
27.64	0.87	75.03	18.11

تأثير كل من المقاومة التسلسلية والمقاومة التفرعية على عامل الملء:

تتألف الدارة الكهربائية المكافئة للوح الشمسي من مصدر تيارٍ موصولٍ على النقرع مع اللوح الشمسي، ومقاومة تفرعية  $R_{SH}$ ، بالإضافة لمقاومة تسلسلية  $R_S$ ، كما هو موضح في الشكل (7) الذي يمثل الدارة الكهربائية المكافئة للخلية الشمسية [12]، وبالأخذ بعين الاعتبار وجود المقاومتين التسلسلية والتفرعية فإن مميزة جهد-تيار تعطى بالعلاقة [12]:

$$I = I_L - I_0 \exp\left(\frac{q(V + IR_S)}{nkT} - 1\right) - \frac{(V + IR_S)}{R_{SH}} \quad (7)$$

حيث  $I_L$  التيار المتولد ضوئياً  $I_0$  كثافة تيار الإشباع،  $R_{SH}$  المقاومة التفرعية الموصولة على التوازي مع اللوح الشمسي، و  $R_S$  المقاومة التسلسلية، و  $n$  عامل المثالية، و  $k$  ثابت بولتزمان، و  $T$  درجة حرارة الوسط وتقدر بالكلفن،  $V$  فرق الكمون المتولد بين قطبي الخلية. تنشأ المقاومة التسلسلية نتيجة العيوب بين السطوح الفاصلة بينما تنشأ المقاومة التفرعية نتيجة عيوب في التصنيع (أي في الطبقة نفسها).



الشكل (7) يوضح الدارة المكافئة للخلية الشمسية مع الأخذ بعين الاعتبار كل من المقاومة التسلسلية والتفرعية [11].

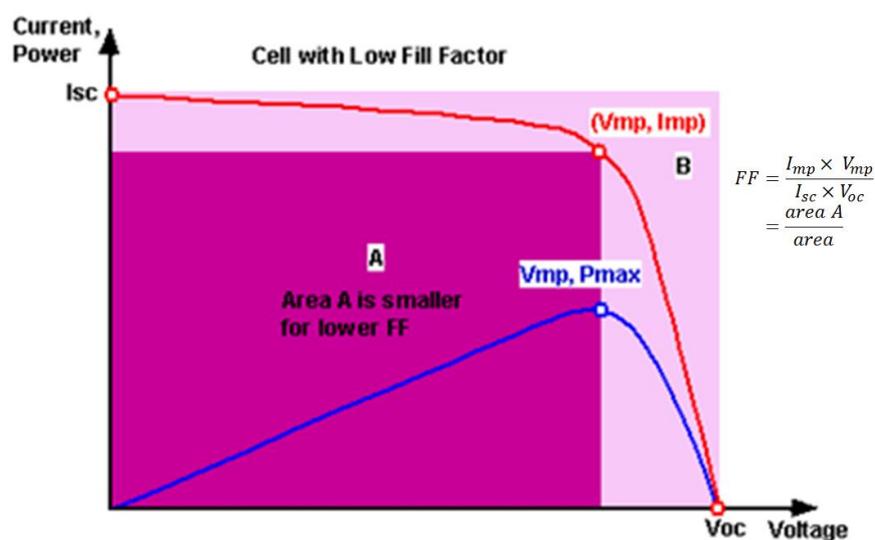
### عامل الملء :

عادة ما يكون عامل الملء (FF) مقياساً لكفاءة الخلايا الشمسية، ويعرف بأنه النسبة بين الاستطاعة العظمى ( $P_{max}$ ) مقسوماً على [ جهد الدارة المفتوحة ( $V_{oc}$ ) مضروباً في تيار القصر ( $I_{sc}$ )، أي:

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

حيث:  $V_{oc}$  جهد الدارة المفتوحة (Open Circuit Voltage) هو أعلى جهد يمكن تولده الخلية الشمسية في ظل ظروف الاختبار القياسية، نظراً لعدم وجود حمل متصل مع طرفي الخلية الشمسية، بالتالي لا ينتج أي تيار.  $I_{sc}$  تيار الدارة المقصورة (Short Circuit Current) هو أقصى تيار يمكن أن تولده الخلية الشمسية في حال انعدام المقاومة أو قربها من الصفر.

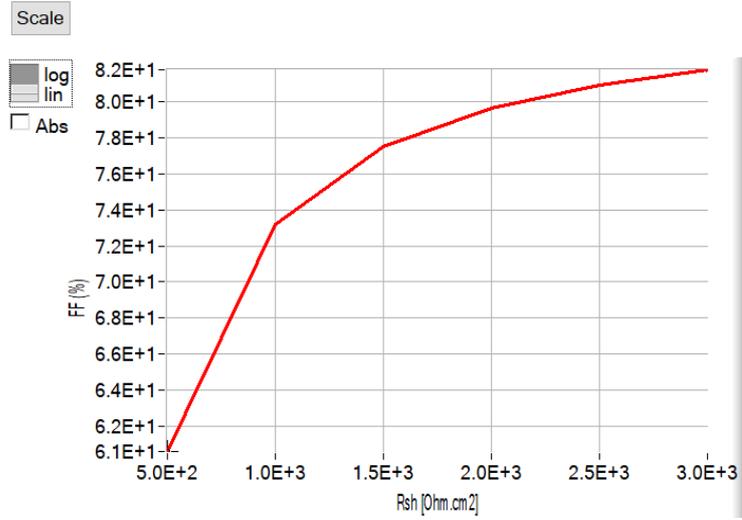
$P_{max}$  الاستطاعة العظمى ويقصد بها أعلى استطاعة تستطيع الخلية إنتاجها عند العمل تحت ظروف الاختبار القياسية، حيث هي حاصل ضرب جهد العمل  $V_{mp}$  في تيار العمل  $I_{mp}$ . وكما هو موضح في الشكل التالي (8)، نلاحظ أن قيمة التيار  $I_{sc}$  أعلى من قيمة التيار  $I_{mp}$  وكذلك قيمة الجهد  $V_{oc}$  أعلى من قيمة الجهد  $V_{mp}$ .



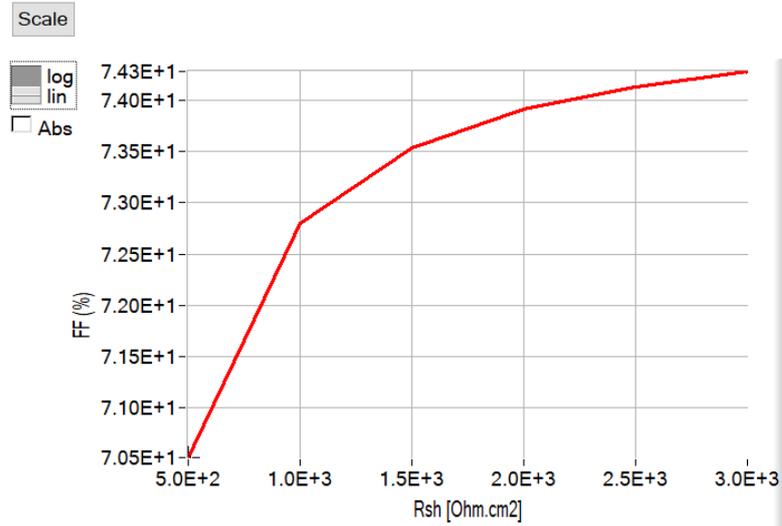
الشكل (٨) يوضح عامل الملء للخلايا الشمسية

تم إدخال قيم الـ  $R_{SH}$  من الـ 500 إلى 3000 بمقدار زيادة (500). تم الحصول على النتائج الموضحة بالشكلين (9) و(10):

SCAPS 3.3.10 Result of batch recording Panel

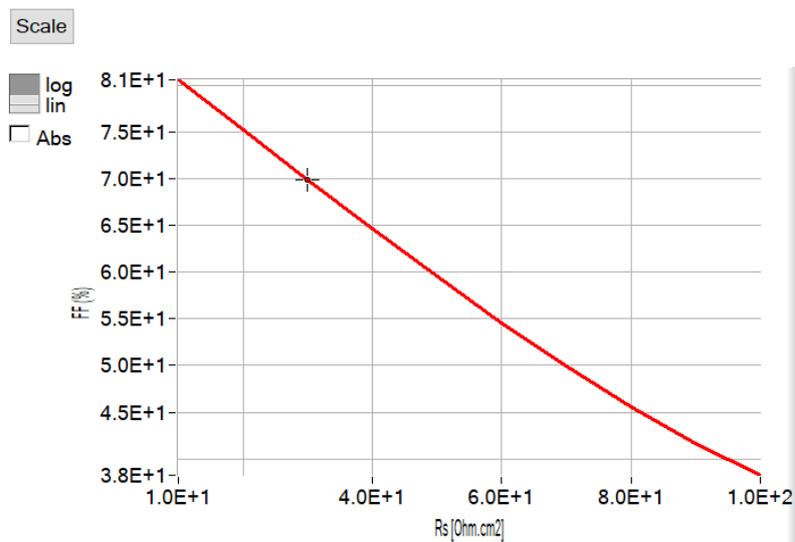
الشكل (9) يوضح تأثير المقاومة التفرعية على عامل الملاء للخلية (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbBr<sub>3</sub>)

SCAPS 3.3.10 Result of batch recording Panel

الشكل (10) يوضح تأثير المقاومة التفرعية على عامل الملاء للخلية (CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>SnI<sub>3</sub>)

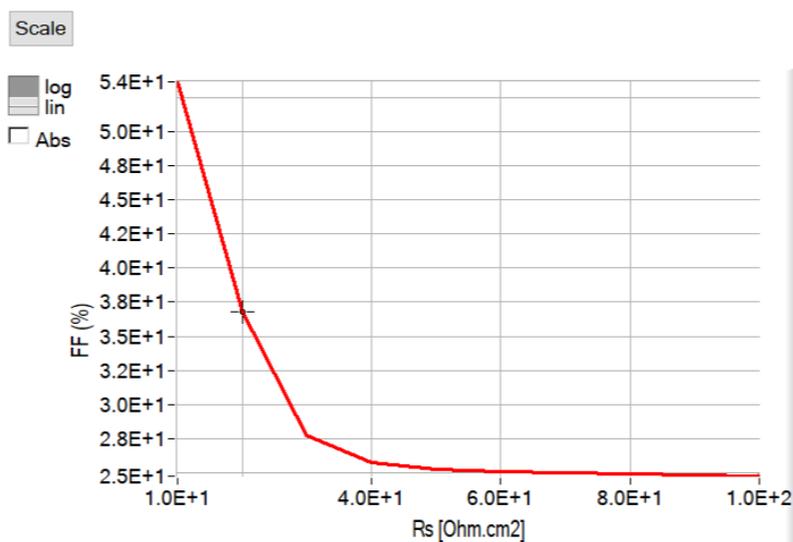
- من الواضح أن تأثير المقاومة التفرعية على كلا من التركيبين مماثل حيث يوضح الشكلان (9) و(10) أن زيادة المقاومة التفرعية يزداد عامل الملاء لأن عند ازدياد قيم R<sub>SH</sub> يزداد التيار كما هو مبين بالعلاقة (7) والذي يتناسب طردياً مع عامل الملاء كما هو موضح بالعلاقة (8).
- بعدها تم إدخال القيم R<sub>S</sub> من الـ 10 إلى الـ 100 بمقدار زيادة (10)

SCAPS 3.3.10 Result of batch recording Panel



الشكل (11) يوضح تأثير المقاومة التسلسلية على عامل الملء للخلية ( $CH_3NH_3PbBr_3$ )

SCAPS 3.3.10 Result of batch recording Panel



الشكل (12) يوضح تأثير المقاومة التسلسلية على عامل الملء للخلية ( $CH_3NH_3SnI_3$ )

بينما الشكلين (11) و(12) يظهر العكس بالنسبة للمقاومة التسلسلية حيث ينخفض عامل الملء بازديادها حيث تنخفض قيمة التيار في العلاقة (7) وبالتالي انخفاض لقيم عامل الملء العلاقة (8). وفي كلا الحالتين ومن أجل معامل ملء كبير للخلية نحتاج مقاومة تسلسلية أصغر ومقاومة تفرعية أعظمية.

## النتائج والمناقشة:

نلاحظ ازدياد كثافة التيار عند استبدال الطبقة الماصة للضوء ( $CH_3NH_3PbBr_3$ ) بالطبقة ( $CH_3NH_3SnI_3$ ) بمقدار  $18.34\text{mA/cm}^2$ ، والكفاءة تزداد بحوالي 5.56%. وذلك بنفس الشروط التي تمت فيها النمذجة لكلتا الخليتين عند درجة حرارة وشدة إشعاع ثابتين ويعود السبب في ذلك إلى الفجوة الطاقية الصغيرة نسبياً التي تتمتع بها المادة ( $CH_3NH_3SnI_3$ ) مما يسمح لها بامتصاص أكبر عدد ممكن من فوتونات الطيف المرئي، مع الملاحظة أن الفجوة الطاقية التي يتمتع بها هذا المركب تقترب من الفجوة الطاقية للسليكون.

كما نلاحظ من الشكل (10) أن الانخفاض بقيم المقاومة التفرعية في المركب الذي يحتوي على يوديد القصدير يقلل من قيمة عامل الملء بحوالي 4.5% بينما في المركب الذي يحوي بروميد الرصاص يقللها بحوالي 15% مما يدل على استقرار وثبات أكبر للمركب ( $CH_3NH_3SnI_3$ ) أمام هذه التغيرات. أما في الشكل (12) نلاحظ انخفاض حاد لقيمة عامل الملء للمركب ( $CH_3NH_3SnI_3$ ) عند ازدياد قيم المقاومة التسلسلية.

## الاستنتاجات والتوصيات:

يتمتع المركب ( $CH_3NH_3SnI_3$ ) بفجوة طاقة صغيرة نسبياً مما يعطي أهمية كبيرة في تطبيقات الخلايا الفوتوفولطائية، كما وتحقق كفاءة أعلى بالنسبة للخلايا الأخرى. وفي نهاية هذا البحث تجدر الإشارة إلى أهمية دراسة كيفية التحكم بكل من المقاومة التسلسلية والتفرعية من أجل الحصول على أكبر كفاءة ممكنة وذلك من خلال موائمة الطبقات المستخدمة في اللوح الشمسي. كما يوصى بدراسة تأثير أطوال موجية محددة من الطيف الشمسي والعمل على حجب المجال الغير مرغوب به من خلال دراسة استخدام طبقات شفافة تمتص الأطوال غير المرغوبة دون غيرها.

## المراجع

- [1] Ryad, M.;Martin, Siefan,R;GunTHER,S."Comparison of Modelled and Measured Tilted Solar Irradiation for Photovoltaic Applications"; MDPI,Energies, Received:9 August2017;Accepted:16October 2017;published:25october (2017).
- [2] A. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, T. Miyasaka, *Organometal halide perovskites as visible- light sensitizers for photovoltaic cells*, J. Am. Chem. Soc. 131 (2009) 6050–6051.
- [3] L. Meng, J. You, Y. Yang, *Addressing the stability issue of perovskite solar cells for commercial applications*, Nat. Commun. 9 (2018), 5265.
- [4] M. A. Green, A. Ho-Baillie, H. J. Snaith, Nat. Photonics 2014, 8, 506.
- [5] Yin WJ, Yang JH, Kang J, Yan Y, and Wei SH. *Halide perovskite materials for Solar cells: a theoretical review*. J Mater. Chem. A. 2014.
- [6] Walsh A, Watson GW. *The origin of the stereochemically active Pb (II) lone Pair: DFT calculations on PbO and PbS* Journal of Solid-State Chemistry. 2005; 178: 1422–1428.
- [7] Walsh A, Payne DJ, Egdell RG, and Watson GW. *Stereochemistry of post-Transition metal oxides: revision of the classical lone pair model*. Chem. Soc. Rev. 2011; 40: 4455 446.
- [8] Villalva MG, Gazoli JR, Ruppert Filho E. *Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays*. IEEE Transactions on power electronics. 2009 May;24(5):1198-208.
- [9] Würfel, P and Uli, W." *Physics of solar cells: from basic principles to advanced concepts*". John Wiley & Sons, 2016.
- [10] Hong Duc Pham, Terry Chien-jen, Sagar M. Jain, Gregory J. Wilson. *"Development of Dopant-Free Organic Hole Transprting Materials for perovskite Solar Cells "*. ReserchGate.January 2020.
- [11] [http://www.pveducation.org.](http://www.pveducation.org/) /
- [12] Jan Willem Schüttauf, *Thin Film Silicon Triple Junction Solar Cells: Device Characterization and Simulated Outdoor Performance*, Universiteit Utrecht, Physics of Devices, 2007.01, NWS-I-2007-6.