# بدائل منخفضة التكلفة لطبقة نقل الثقوب-Spiro OMeTADفي خلايا البيروفسكايت الشمسية الخالية من الرصاص بالمحاكة العدديّة

محمد شرابي، موفّق رقيّة*، سعيد مندو
**قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة إدلب**
https://orcid.org/0009-0005-4075-9745

**الملخص:**

تُعدّ البيروفسكايت الخالية من الرصاص مثل $CsSnI_3$ مواد ماصّة واعدة للطاقة الشمسية المستدامة، إلا أنّ أداءها يتأثر بشكل كبير بخيار طبقة نقل الثقوب. في هذا البحث، استُعملت محاكاة **SCAPS-1D** (معايرة ببيانات تجريبية) لدراسة مجموعة واسعة من الطبقات **($Cu_2O$, CZTSe, CBTS, CuSCN, CuO, Spiro-IA, $MoO_3$, PTAA, GaAs, $CuSbS_2$, $MoS_2$, P3HT, PEDOT:PSS, CIS)** بوصفها بدائل منخفضة التكلفة لمركب**Spiro-OMeTAD** . أظهرت النتائج أنّ كثافة تيار القصر **(Jsc)** تراوحت بين **(30-32 mA/cm²)** لمعظم الحالات، بينما اختلف كمون الدارة المفتوحة**($V_{OC}$)** ومعامل الملء **(FF)** تبعًا لطبيعة المادة. حققت طبقات مثل **$Cu_2O$, CZTSe, CBTS** أعلى كفاءة **–20 ≈(PCE 21%) مع Voc≈0.91 V و FF≈70–72%**، تلتها **طبقات CuSCN, CuO, Spiro-IA** بكفاءة جيدة **(PCE≈19–20%)** مع **(Voc≈0.88–0.89 V)** و**(FF≈67–69%)**.أما طبقات **$MoO_3$, PTAA, GaAs** فقد سجلت كفاءة مقبولة **(PCE≈17–18%)** مع **(Voc≈0.88–0.90 V)** و**(FF≈63–66%)**، في حين اقتصرت طبقات **$CuSbS_2$, $MoS_2$, P3HT, PEDOT:PSS, CIS** على كفاءة منخفضة **(PCE≈15–16%)** مع **(Voc≈0.81–0.85 V)** و **(FF≈54–60%)**. تؤكد هذه الدراسة على وجود العديد من الطبقات كبدائل منخفضة التكلفة لطبقة **Spiro-OMeTAD**.

**الكلمات المفتاحية:**

خلايا بيروفسكايت الشمسيّة، خالية من الرصاص**$CsSnI_3$**، طبقة نقل الثقوب**HTL**، محاكاة **SCAPS-1D**، كفاءة تحويل الطاقة، **Spiro-OMeTAD**.


تاريخ إيداع البحث:2025/12/10
تاريخ قبوله للنشر:2026/01/19

# Low-Cost Alternatives for the Hole Transport Layer Spiro-OMeTAD in Lead-Free Perovskite Solar Cells Using Numerical Simulation

Mohammad Sharabi, Mwaffak Rukiah*, Saeed Mando

**Department of Physics Faculty of Science, Idlib University**

## Abstract

Lead-free perovskites such as **$CsSnI_3$** are promising absorber for sustainable solar energy; however, their performance is highly dependent on the choice of hole transport layer **(HTL)**. In this work, **SCAPS-1D simulations** (calibrated with experimental data) were employed to investigate a wide range of materials (**$Cu_2O$, CZTSe, CBTS, CuSCN, CuO, Spiro-IA, $MoO_3$, PTAA, GaAs, $CuSbS_2$, $MoS_2$, P3HT, PEDOT:PSS, CIS**) as low-cost alternatives to **Spiro-OMeTAD**. Results indicate that the short-circuit current density **(Jsc)** remained nearly constant in the range of (**30–32 mA/cm²**) for most cases, while the open-circuit voltage **(Voc)** and fill factor **(FF)** varied depending on the material. Materials such as **$Cu_2O$, CZTSe, and CBTS** achieved the highest efficiencies (**PCE ≈ 20–21%**) with (**Voc ≈ 0.91 V)** and **(FF ≈ 70–72%)**. They were followed by **CuSCN, CuO, and Spiro-IA**, which exhibited good efficiencies (**PCE ≈ 19–20%**) with **(Voc ≈ 0.88–0.89 V**) and **(FF ≈ 67–69%**). Other materials such as **$MoO_3$, PTAA, and GaAs** showed acceptable efficiencies (**PCE ≈ 17–18%**) with **(Voc ≈ 0.88–0.90 V)** and **(FF ≈ 63–66%)**, whereas **$CuSbS_2$, $MoS_2$, P3HT, PEDOT:PSS, and CIS** were lower efficiencies (**PCE ≈ 15–16%**) with **(Voc ≈ 0.81–0.85 V)** and (**FF ≈ 54–60%)**. This study confirms that the availability of several **HTL** layers that can serve as low-cost alternatives to **Spiro-OMeTAD**.

**Keywords:**

Perovskite solar cells, lead-free **$CsSnI_3$**, hole transport layer **(HTL)**, **SCAPS-1D**, power conversion efficiency **(PCE)**, **Spiro-OMeTAD**.

---

* Atomic Energy Commission of Syria.

## 1- المقدمة:

شهدت مجالات الطاقة الشمسية تطورًا سريعاً خلال العقدين الماضيين، مدفوعة بالحاجة العالمية إلى مصادر طاقة نظيفة ومستدامة. من بين مختلف المنظومات الكهروضوئية، برزت خلايا بيروفسكايت الشمسيّة **(PSCs)** بوصفها أحد الحلول الواعدة، إذ ارتفعت كفاءتها من **3.8%** إلى **25.2%** خلال اثنتي عشرة سنة[1,2].

هذا الإنجاز السريع يعكس الإمكانات الكبيرة لمواد البيروفسكايت الهالوجينية، التي تتميز بخصائص بصرية وإلكترونية استثنائية، مثل معامل امتصاص عالٍ، وانخفاض طاقة ربط الأزواج (إلكترون–ثقب)، وطول مسافات انتشار الشحنات، إضافة إلى فجوات طاقة مناسبة للتطبيقات الكهروضوئية[3].

رغم هذه المزايا، فإن معظم خلايا بيروفسكايت الشمسيّة عالية الكفاءة تعتمد على مركبات تحتوي على الرصاص، مثل **$MAPbI_3$**[1] و **$CsPbI_3$** . ما يثير مخاوف جديّة حول استدامة هذه التقنية على المدى الطويل[4,5]. لذلك، اتجهت الأبحاث مؤخرًا نحو تطوير بدائل خالية من الرصاص، تحافظ على الأداء العالي وتقلل الأثر البيئي.

في هذا السياق، برز **$CsSnI_3$** بوصفها أحد البدائل الواعدة لمركبات الرصاص في خلايا بيروفسكايت الشمسيّة. يمتاز هذا المركب بفجوة طاقة مباشرة تبلغ حوالي **(1.3 eV)**، وهو نطاق مثالي لامتصاص الطيف الشمسي[6]. إضافة إلى معامل امتصاص مرتفع وقدرة جيدة على نقل الشحنات، ما يجعله مناسباً للاستعمال بوصفه طبقة فعّالة ماصة للضوء. كما يمكن تصنيع **$CsSnI_3$** عند درجات حرارة منخفضة نسبيًا[7]، وهو ما يفتح المجال لتطبيقات جديدة مثل الخلايا المرنة والخلايا المزدوجة (الترادفيّة) **( Tandem Solar Cells)**[8,9]، هذه الخصائص تجعل من **$CsSnI_3$** خيارًا إستراتيجياً لتطوير خلايا بيروفسكايت شمسية خالية من الرصاص، صديقة للبيئة، وقابلة للتوسع الصناعي.

تُعد طبقة نقل الثقوب **HTL** عنصرًا جوهريًا في البنية الطبقية لخلايا البيروفسكايت الشمسية، إذ تتحكم بشكل مباشر في ديناميكية جمع ونقل الشحنات الموجبة، وتؤثر على جميع مؤشرات الأداء الكهروضوئي بما في ذلك جهد الدارة المفتوحة، وكثافة تيار الدارة المقصورة،

[1] MA مركب عضوي الميثيل أمونيوم $CH_3NH_3$



تاريخ إيداع البحث:2025/12/10
تاريخ قبوله للنشر:2026/01/19

ومعامل الملء، والكفاءة الكلية للجهاز[10]. ومن بين مختلف الطبقات المستعملة في هذا السياق، برز مركب **Spiro-OMeTAD**[2] كخيار قياسي نظرًا لأدائه العالي، توافقه الممتاز مع مستويات الطاقة للطبقة الماصة، وشفافيته البصرية التي تسمح بامتصاص فعال للضوء، إضافة إلى إمكانية تحسين خواصه الكهربائية عن طريق بعض الإضافات التي تزيد من الناقليّة وتعزز كفاءة جمع الثقوب[11,12]. هذه المزايا جعلت منه مادة مرجعية في معظم التصاميم التي حققت كفاءات قياسية عالميًا.

ومع ذلك، فإن التكلفة المرتفعة لمركب**Spiro-OMeTAD** ، إلى جانب محدوديّة استقراره على المدى الطويل، وحاجتها إلى الإشابة، وعدم استقرارها الحراري تُشكل عائقًا أمام اعتماده في التطبيقات التجارية واسعة النطاق[13]. لذلك، يُمثل البحث عن بدائل منخفضة التكلفة وأكثر استدامة خطوة استراتيجية ضمن مسار تطوير خلايا بيروفسكايت شمسية خالية من الرصاص، قادرة على الجمع بين الأداء العالي والجدوى الاقتصادية، بما يفتح المجال أمام تطبيقات صناعية واسعة النطاق.

## 2- المواد والطرق

### 2-1 المحاكاة العددية باستخدامSCAPS-1D

طوّر قسم الإلكترونيات والمعلوماتية **(ELIS)** في جامعة جِنت – بلجيكا برنامج **SCAPS-1D**، الذي يعتمد على معادلات فيزيائية دقيقة وواقعية، ما يتيح دراسة وتصميم مجموعة واسعة من البُنى المختلفة للأجهزة الكهروضوئية. **SCAPS-1D** . يعتمد هذا البرنامج على معادلات فيزيائية دقيقة وواقعية، ما يتيح تصميم ودراسة طيف واسع من البُنى المختلفة للأجهزة الكهروضوئية. يتمتع برنامج **SCAPS-1D**بمرونة كبيرة في محاكاة أداء الخلايا الشمسية، الأمر الذي يجعله أداة فعّالة لفهم الخصائص الفيزيائية وتقدير تأثير الطبقات والمواد المكوِّنة للخلية المدروسة[14,15].

يعتمد البرنامج على حل **معادلة بواسون** التي تصف التوزيع الكهروستاتيكي للجهد داخل البنية[16].

---

[2] مركب عضوي اسمه 2,2',7,7'-Tetrakis[N,N-di(4-methoxyphenyl) amino] -9,9'-spirobifluorene، وصيغته الكيميائية ($C_{81}H_{68}N_4O_8$) .

$$\frac{d^2}{dx^2}\Psi(\mathrm{x}) = \frac{q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r}[p(x) - n(x) + N_D - N_A + \rho_p - \rho_n] \qquad (1)$$

إذ تمثل **(ψ)**الكمون الكهربي، و **(εr)**السماحية النسبية، و**(ε0)** سماحية الفراغ، بينما يرمز **($N_D$)**و **($N_A$)**إلى تراكيز الشوائب المانحة والآخذة، و **(n)**و **(p)**إلى تراكيز الإلكترونات والثقوب، و **($\rho_p$)**و **($\rho_n$)**إلى كثافة الشحنة الإلكترونات والثقوب.

كما يعتمد البرنامج على **معادلات الاستمرارية** للإلكترونات والثقوب وتيارات الجرف والانتشار، والتي تصف توليد وإعادة اتحاد حوامل الشحنة[17]:

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{1}{q}\frac{\partial J_n}{\partial x} + (G_n - R_n) \qquad (2)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{1}{q}\frac{\partial J_p}{\partial x} + \left(G_p - R_p\right) \qquad (3)$$

$$J_n = q\mu_n nE + qD_n\frac{\partial n}{\partial x} \qquad (4)$$

$$J_p = q\mu_p pE - qD_p\frac{\partial p}{\partial x} \qquad (5)$$

إذ **($J_n$)**و **($J_p$)**تمثلان كثافة تيار الإلكترونات والثقوب، و **(G)**و **(R)**معدلات التوليد وإعادة الاتحاد.

إذ **($\mu_n$)**و **($\mu_p$)**تمثلان حركية الإلكترونات والثقوب، و **($D_n$)**و **(Dp)**معاملات الانتشار.

كما يقوم البرنامج بحساب مؤشرات الأداء الأساسية للخلية الشمسية.

ويمكن أن نعّرف **معامل الملء (FF)** بالعلاقة:

$$F_F = \frac{V_{mp} \times J_{mp}}{V_{oc} \times J_{sc}} = \frac{P_{max}}{V_{oc} \times J_{sc}} \qquad (6)$$

إذ**( $J_{mp}$)**و**( $V_{mp}$)** يمثلان كثافة التيار والجهد عند نقطة الاستطاعة العظمى، بينما يشير**( $J_{SC}$)**إلى كثافة تيار القصر و **($V_{OC}$)**إلى كمون الدارة المفتوحة.

أما **كفاءة الخليّة الشمسيّة (η)** فتُحسب وفق المعادلة:

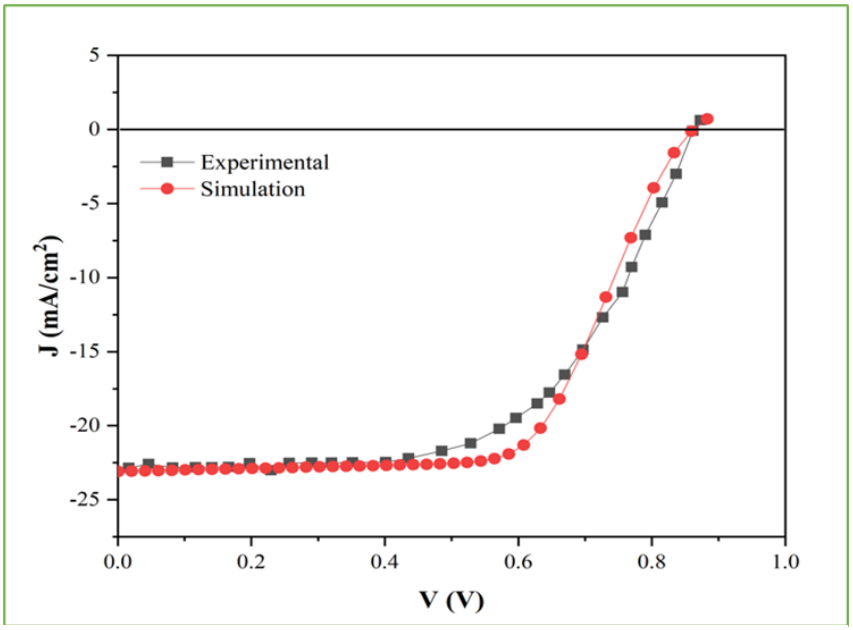

تاريخ إيداع البحث:2025/12/10
تاريخ قبوله للنشر:2026/01/19

$$\eta = \frac{V_{oc} \times I_{sc} \times F_F}{P_{in}} = \frac{P_{max}}{P_{in}} \qquad (7)$$

إذ **(Pin)** الاستطاعة الضوئية الداخلة، التي تعادل طيف الإشعاع القياسي **AM 1.5G** [18].

**2-2 معايرة الخلية الشمسية المرجعية:**

استُعملت خلية شمسية مرجعية مصنَّعة فعليًا لها بنية طبقيّة تقليديّة للاعتماد عليها في معايرة المحاكاة تتكون هذه الخلية من بيروفسكايت **$CsSnI_3$** بوصفها مادة ماصّة، بسماكة **330nm**، مدمجة بين طبقة نقل الإلكترونات من **$TiO_2$** بسماكة **150 nm**وطبقة نقل الثقوب من **Spiro-OMeTAD** بسماكة**200 nm**، مع طبقة تلامس أمامية من **ITO** وطبقة تلامس خلفية من **Au**[19]. تهدف هذه المعايرة إلى توفير نقطة مقارنة معيارية للتصاميم التي ستُختبر لاحقاً لضمان دقة المحاكاة مقارنة بالنتائج التجريبيّة. أُجريت المحاكاة ببرنامج **SCAPS-1D**تحت ظروف معيارية، تشمل1) درجة حرارة محيطية تقارب **300 K**، 2) كثافة شدة ضوئية مقدارها **100 mW/cm²**،3) تردد **1 MHz**، وفق طيف الشمس القياسي **AM 1.5G**. وقد ضُبطت قيم مناسبة لكل من المقاومة التسلسلية **Rs** والمقاومة التفرعيّة **Rsh** ومعاملات إعادة الاتحاد، إضافة إلى اعتماد نموذج امتصاصية ملائم، وذلك




**الشكل (1) مقارنة بين منحنيات التيار–كمون (J–V) لنتائج المحاكاة والنتائج التجريبية**

بغية تحقيق تطابق جيد بين نتائج المحاكاة والنتائج التجريبية للخلية المرجعية. إذ يُظهر الجدول (1) التطابق شبه التام بين خصائص الخلية التجريبية والخلية المستعملة في النمذجة، مما يؤكد صحة المحاكاة بوصفها أساساً لدراسة تأثير طبقات نقل الثقوب على أداء خلايا ($CsSnI_3$).

**الجدول (1): الخصائص الكهروضوئية للخلية الشمسية من المحاكاة والقياسات التجريبية**

| الخاصيّة | $V_{OC}$ (V) | $J_{SC}$ (mA/cm$^2$) | FF (%) | PCE (%) |
|---|---|---|---|---|
| القيم المرجعيَة | 0.86 | 23.20 | 65.00 | 12.96 |
| قيم المحاكاة | 0.86 | 23.09 | 65.11 | 12.96 |

كما يَظهر أيضاً التطابق في نتائج النمذجة والقيم التجريبية الفعلية لخصائص الخلية الشمسيّة المعتمدة من خلال المخطط **(J-V)** الشكل (1).

### 2-3 التركيب البنيوي للخلية:

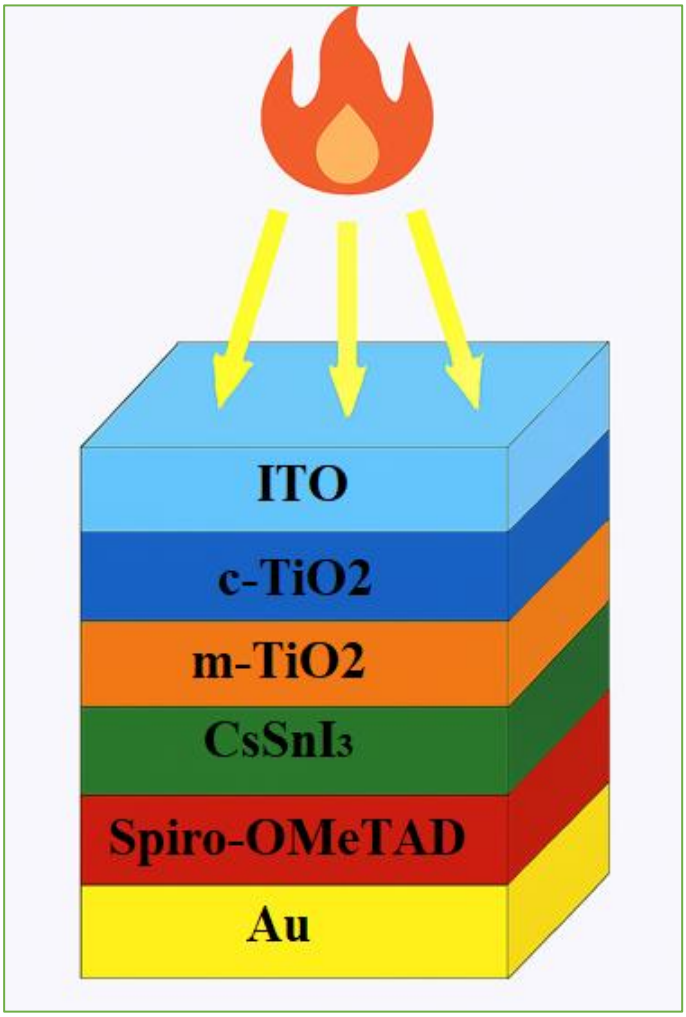
في هذه الدراسة مُثلت خلية شمسية واحدة ببنية تقليدية مستوية **n–i–p**، وقد اختير أكسيد القصدير المُشوب بالإنديوم **(ITO)** كطبقة اتصال أمامي شفافة، بينما استُعمل الذهب **(Au)**بوصفه طبقة اتصال خلفية معدنية. تتألف البنية الداخلية للخلية من طبقة ماصّة من $CsSnI_3$في المنطقة الوسطى**(i-region)** ، محاطة بطبقتين لنقل الشحنات:

- طبقة نقل ثقوب من **Spiro-OMeTAD**في جهة**p** [20,21].
- طبقتان لنقل الإلكترونات في جهة **n** طبقة $c\text{-}TiO_2$(تقليدية) وطبقة $m\text{-}TiO_2$ (مسامية).

مُثلت الطبقة المسامية $m\text{-}TiO_2$عددياً من خلال اعتماد تدرّج خطي للخصائص الفيزيائية عبر سماكتها، يبدأ من جهة الطبقة الماصّة وصولًا إلى الطبقة التقليدية$c\text{-}TiO_2$ ، وذلك بغية محاكاة الانتقال التدريجي في البنية وتحقيق توافق أفضل في نقل الإلكترونات عند الواجهة.عند تعريض الخلية للإضاءة، تتولّد الأزواج (إلكترون–ثقب) داخل طبقة $CsSnI_3$، إذ تنفصل هذه الأزواج عند الوصلات بين مناطق **n** و**p**. تنتقل الثقوب إلى طبقة نقل الثقوب**(Spiro-OMeTAD)** ، بينما تنتقل الإلكترونات إلى طبقتي $TiO_2$ ، ويسهم الحقل


تاريخ إيداع البحث:2025/12/10
تاريخ قبوله للنشر:2026/01/19

الكهربائي المتكوّن عند الواجهات بين الطبقات المختلفة في تسريع عملية فصل الأزواج وتحسين جمع حاملات الشحنة.




**الشكل (2) بنية الخلية الشمسية المعتمدة**

حُددت سماكة الطبقات وفق تصميم مدروس يوازن بين الامتصاص الضوئي وكفاءة النقل كما يلي:

- الطبقة الماصّة **800 nm.**
- طبقة نقل الثقوب**Spiro-OMeTAD 200 nm** .

- الطبقة المساميةm-$TiO_2$ 50 nm .
- الطبقة التقليديةc-$TiO_2$ 100 nm .

كما اعتُمدت القيم نفسها التي اعتُمدت خلال معايرة الخلية المرجعية بما في ذلك درجة الحرارة، وشدة الإضاءة، ومعامل الامتصاص، والمقاومات التسلسليّة والتفرعيّة، ومعاملات إعادة اتحاد.

نُظِمَت جميع الخصائص الفيزيائية والبارامترات المتعلقة بالطبقات المكوِّنة للخلية الشمسية، بما في ذلك: السماكة، فجوة الطاقة، الألفة الإلكترونية، كثافة الشوائب، كثافة العيوب، ثابت العزل، ومعاملات حركية الإلكترونات والثقوب، وعُرضت بشكل مُفصّل في الجدول(2) . اعتمدت الدراسة على قيمة ثابتة للسرعة الحراريّة لجميع الطبقات بمقدار **($1\times10^7$ cm/s)** [22]،في حين حُدّد تابع العمل لطبقة الاتصال الخلفي **(Au)** بقيمة **(5.1 eV)** [23].

تناولت الدراسات السابقة أهميّة طبقة نقل الثقوب على أداء خلايا البيروفسكايت الشمسية، على سبيل المثال إحدى المقالات[24] درست طبقات عدة اتصال خلفي **(Ag, Cr, Cu, Ni, Pt)** مع وبدون طبقة نقل ثقوب لتحديد أفضل البدائل.

أما المقالة[25] فهي الأقرب من حيث بنية الجهاز إلى هذا العمل، حيث اعتمدت على إدراج العيوب السطحية بين الطبقات ضمن نموذج المحاكاة ومعايرة خليّة شمسيّة تجريبيّة مرجعيّة. في المقابل، يقدم هذا العمل تمثيلاً أكثر واقعية للخسائر الفيزيائية، من خلال تضمين تأثيرات إعادة الاتحاد الإشعاعي وخسائر اتحاد أوجر. كما أن طبقة نقل الإلكترونات في الدراسة المرجعية مُثلت بوصفها طبقة واحدة تقليدية، بينما يعتمد هذا العمل على بنية مزدوجة تشمل طبقة m-$TiO_2$ المسامية وطبقةc-$TiO_2$ ، إذ مُثلت الطبقة المساميّة m-$TiO_2$ على شكل تدرج للخصائص الفيزيائية بين الطبقة الماصة $CsSnI_3$وطبقة c-$TiO_2$ لتحسين محاكات انتقال الإلكترونات. إضافة إلى ذلك، يركّز هذا العمل على تقييم بدائل منخفضة التكلفة لطبقة **Spiro-OMeTAD** تصلح للإنتاج التجاري مستقبلاً، مع إمكانيّة تطوير أدائها بحيث تقترب من كفاءة هذه الطبقة أو تتحسن عنها، مما يعزز جدوى البحث في التطبيقات الصناعيّة.


تاريخ إيداع البحث:2025/12/10
تاريخ قبوله للنشر:2026/01/19

**الجدول (2): الخصائص الفيزيائية والبارامترات المعتمدة لطبقات خلية بيروفسكايت الشمسية المبنية على $CsSnI_3$.**

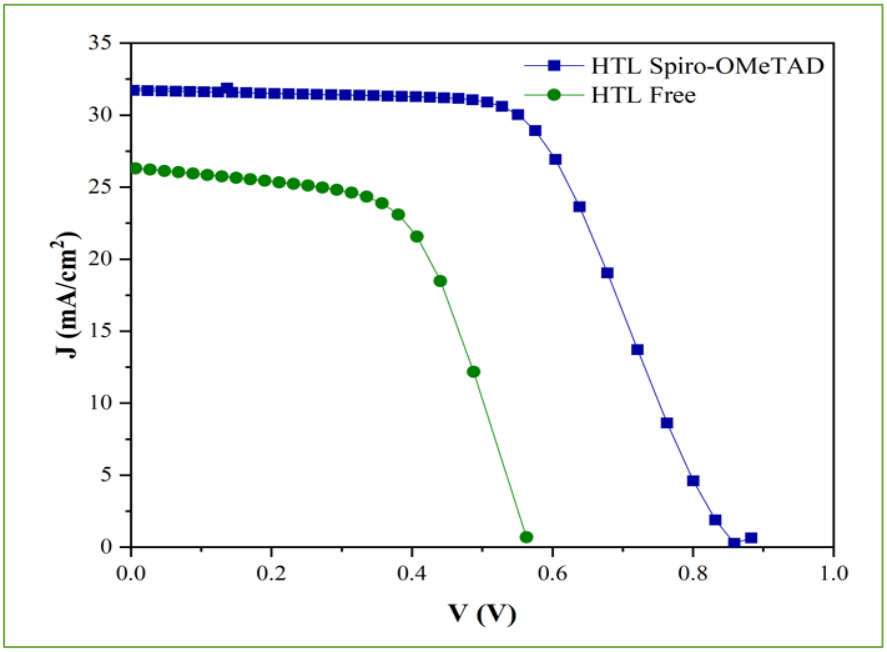
| Spiro-OMeTAD | $CsSnI_3$ | $TiO_2$ | ITO | الخاصية الفيزيائية |
|---|---|---|---|---|
| 200 | 800 | 150 | 500 | السماكة (nm) |
| 3 | 1.27 | 3.2 | 3.5 | $E_g\ (eV)$ |
| 2.45 | 4.47 | 4 | 4 | $\chi\ (eV)$ |
| 3 | 18 | 9 | 9 | $\varepsilon_r$ |
| $2.2 \times 10^{+18}$ | $1.0 \times 10^{+19}$ | $1.0 \times 10^{+21}$ | $2.2 \times 10^{+18}$ | $N_C\ (cm^{-3})$ |
| $1.9 \times 10^{+19}$ | $1.0 \times 10^{+19}$ | $2.0 \times 10^{+20}$ | $2.2 \times 10^{+18}$ | $N_V\ (cm^{-3})$ |
| $2.0 \times 10^{-4}$ | 4.37 | 20 | 20 | $\mu_n$ $(cm^2.V^{-1}.s^{-1})$ |
| $2.0 \times 10^{-4}$ | 4.37 | 10 | 10 | $\mu_p$ $(cm^2.V^{-1}.s^{-1})$ |
| $2.0 \times 10^{+18}$ | $1.8 \times 10^{+16}$ | 0 | 0 | $N_A\ (cm^{-3})$ |
| 0 | 0 | $5.0 \times 10^{+19}$ | $1.0 \times 10^{+21}$ | $N_D\ (cm^{-3})$ |
| $1.0 \times 10^{+15}$ | $1.0 \times 10^{+13}$ | $1.0 \times 10^{+17}$ | $1.0 \times 10^{+15}$ | $N_t\ (cm^{-3})$ |
| [25] | [25] | [25] | [26] | المرجع |

## 3- النتائج والمناقشة

### 3-1 أثر طبقة نقل الثقوب على أداء الخلية المرجعية:

لتوضيح الأثر الفعلي لطبقة نقل الثقوب **HTL** على أداء الخلية الشمسية المرجعية، أُجريت محاكاة للبنية نفسها بعد حذف طبقة **Spiro-OMeTAD**، مع الحفاظ على جميع المعاملات والشروط التشغيلية الأخرى ثابتة.

أظهرت النتائج في حال عدم وجود طبقة نقل ثقوب كفاءةً قدرها **(PCE = 8.95%)**، مع جهد دارة مفتوحة نحو **($V_{OC}$ = 0.559 V)**، وكثافة تيار الدارة المقصورة

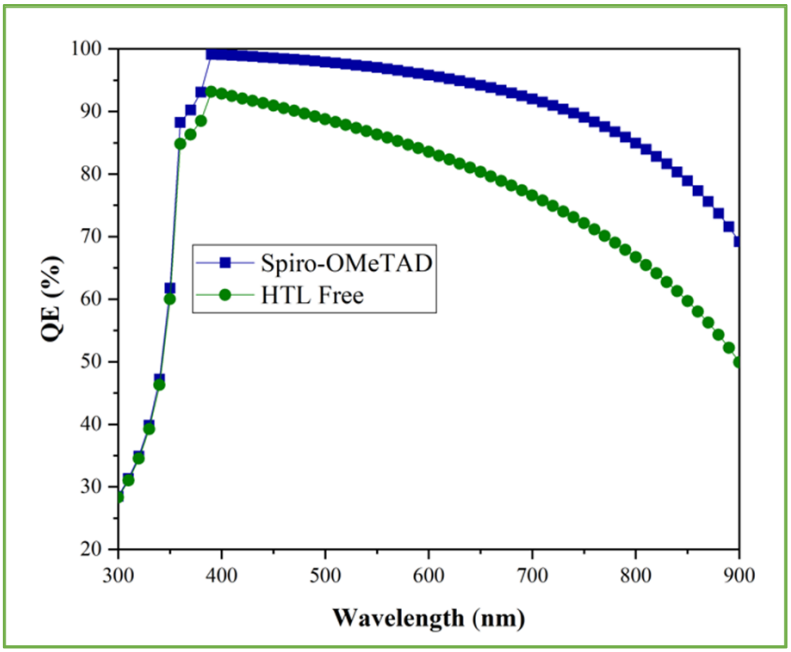



**الشكل (3) مقارنة منحنيات J–V للخلية الشمسية المرجعية في حالتي وجود وغياب طبقة HTL**

**($J_{SC}$ = 26.53 mA/cm²)**، ومعامل ملء يساوي **(FF =60.21%)**، كما يتضح في الشكل (3). إنّ مقارنة منحنيي **(J–V)** للحالتين مع **HTL** وبدون **HTL** تُظهر انخفاضًا ملحوظًا في جميع الخصائص الكهروضوئية عند غياب طبقة**HTL** ، ما يبرز أهميتها في تحسين أداء الخلية الشمسية.


تاريخ إيداع البحث:2025/12/10
تاريخ قبوله للنشر:2026/01/19

كذلك يظهر هذا التحسّن بوضوح من خلال المردود الكوانتي الخارجي **(QE)** كما هو موضح في الشكل (4)، إذ تُظهر الخلية المزودة بطبقة **HTL** قيماً أعلى عبر معظم النطاق الطيفي مقارنةً بالخلية بدون هذه الطبقة.




**الشكل (4) مقارنة المردود الكوانتي الخارجي QE للخلية الشمسية المرجعية المزودة بطبقة نقل الثقوب HTLوالخلية بدون هذه الطبقة، موضحًا أثر وجودها على الاستجابة الطيفية.**

يُشكّل تعديل طبقة نقل الثقوب **HTL** محورًا أساسيًا في هذا العمل البحثي، لما لها أثر مباشر في تحديد الخصائص الكهروضوئية والأداء العام للخلية الشمسية. إذ تتحكم هذه الطبقة في كفاءة جمع ونقل الشحنات الموجبة، وتؤثر على جهد الدارة المفتوحة، وكثافة تيار الدارة المقصورة، ومعامل الملء، ومن ثمَّ على الكفاءة الكلية للجهاز. ومن هذا المنطلق، فإن دراسة تأثير تغيير هذه الطبقة تمثل خطوة ضرورية لفهم آليات تحسين الأداء. وتُعد مادة **Spiro-OMeTAD**من أكثر الطبقات شيوعًا في هذا المجال، إلا أن ارتفاع تكلفتها يشكل عائقًا أمام التطبيقات واسعة النطاق. لذلك، يسعى هذا العمل إلى استكشاف بدائل أكثر اقتصادية، مع الحفاظ على كفاءة الأداء، ضمن مسار التحسينات المقترحة للبنية الكاملة للخلية الشمسيّة.

**3-2 تقييم بدائل طبقة نقل الثقوب باستعمال طبقات مختلفة HTL:**

في هذه المرحلة من الدراســـة، ثُبتت طبقة نقل الإلكترونات **ETL** المكوّنة من البنية المزدوجة**$c\text{-}TiO_2/m\text{-}TiO_2$** ، مع إبقاء باقي مكونات الخلية الشمسية ثابتة، وذلك لضمان أن أي تغير في الأداء يعود حصريًا إلى تغيير نوع طبقة نقل الثقوب**HTL** .

استبدالت طبقة نقل الثقوب**HTL** تدريجيًا بمجموعة من الطبقات المختلفة بهدف دراسة تأثير كل منها على الأداء الكهروضوئي للخلية الشمسية، إذ أبقينا السماكة كما هي في الخلية التي تعتمد على طبقة **Spiro-OMeTAD** في الخلية المرجعية **(200nm)**، وشملت هذه الطبقات:

- **مواد عضوية (Spiro-IA, PTTA).**
- **مواد غير عضوية ( CuI, CuSCN, $CuSbS_2$, CZTSSe,CBTS, CIS, $MoS_2$, GaAs, $Cu_2O$, CuO, $MoO_3$).**
- **بوليمرات ($P_3HT$, PEDOT:PSS).**

اختيرت هذه الطبقات لتمثل طيفًا واسعًا من الخصائص الفيزيائية والكيميائية، بما في ذلك اختلاف فجوات الطاقة، ومحاذاة مستويات الطاقة مع طبقة الممتص، وتنوع البنية البلورية بين العضوية وغير العضوية، إضافةً إلى تباين الناقلية الكهربائية ونفاذيّة الضوء. هذا التنوع يتيح إجراء تقييم شامل لأداء الخلية الشمسية تحت نفس ظروف المحاكاة، ويساعد على تحديد الطبقة التي تحقق أفضل توازن بين الكفاءة والاستقرار والتكلفة، مما يعزز من موثوقية النتائج المستخلصة ويُبرز إمكانات كل مادة كبديل محتمل لطبقة نقل الثقوب التقليدية، إذ إن خصائص جميع الطبقات مبينة في الجدول (3)، وتجدر الإشارة أن قيم الخصائص الفيزيائية المدرجة تمثل قيماً تقريبية يمكن أن تتغير في ظروف التصنيع الفعلي. إذ قد تختلف الخصائص الفيزيائية والكهربائية لطبقة نقل الثقوب تبعاً لطبيعة البنية، سواء كانت على شكل فيلم رقيق أو مادةBulk ، لكن تغيرات هذه القيم كان لها أثر طفيف على تغير ميزات الخلية الشمسية. أما بالنسبة لطبقة **Spiro-IA** أُخذت قيمة عرض المجال المحظور **($E_g$)**، وقيمة الألفة الإلكترونيّة **($\chi$)** من المرجع فقط وبقيت باقي القيم مساوية لقيم **Spiro-OMeTAD** وذلك لعدم توفر المعلومات الكافية.


تاريخ إيداع البحث:2025/12/10
تاريخ قبوله للنشر:2026/01/19

**الجدول (3): الخصائص الفيزيائية والبارامترات المعتمدة لطبقات نقل الثقوب HTL.**

| $CuSbS_2$ | CuI | $Cu_2O$ | CuSCN | Spiro-IA | الخاصية الفيزيائية |
|---|---|---|---|---|---|
| 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | السماكة (nm) |
| 1.58 | 3.1 | 2.2 | 3.8 | 2.54 | $E_g\ (eV)$ |
| 4.2 | 2.1 | 3.4 | 1.4 | 2.7 | $\chi\ (eV)$ |
| 14.6 | 6.5 | 7.5 | 10 | 3 | $\varepsilon_r$ |
| $2.0 \times 10^{+18}$ | $2.8 \times 10^{+19}$ | $2.0 \times 10^{+19}$ | $2.8 \times 10^{+19}$ | $2.2 \times 10^{+18}$ | $N_C\ (cm^{-3})$ |
| $1.0 \times 10^{+19}$ | $1.0 \times 10^{+19}$ | $1.0 \times 10^{+19}$ | $1.8 \times 10^{+18}$ | $1.9 \times 10^{+19}$ | $N_V\ (cm^{-3})$ |
| 49 | 100 | 200 | 100 | $2.0 \times 10^{-4}$ | $\mu_n\ (cm^2.V^{-1}.s^{-1})$ |
| 49 | 43.9 | 80 | 25 | $2.0 \times 10^{-4}$ | $\mu_p\ (cm^2.V^{-1}.s^{-1})$ |
| $1.0 \times 10^{+18}$ | $1.0 \times 10^{+18}$ | $1.0 \times 10^{+18}$ | $1.8 \times 10^{+18}$ | $2.0 \times 10^{+18}$ | $N_A\ (cm^{-3})$ |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | $N_D\ (cm^{-3})$ |
| $1.0 \times 10^{+15}$ | $1.0 \times 10^{+15}$ | $1.0 \times 10^{+15}$ | $1.0 \times 10^{+15}$ | $1.0 \times 10^{+15}$ | $N_t\ (cm^{-3})$ |
| [25] | [25] | [25] | [25] | [13] | المرجع |

الجدول (3) :الخصائص الفيزيائية والبارامترات المعتمدة لطبقات نقل الثقوب HTL.

| الخاصية الفيزيائية | CZTSe | CBTS | CuO | $MoS_2$ | $MoO_3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| السماكة (nm) | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| $E_g\ (eV)$ | 4.46 | 1.9 | 1.51 | 1.29 | 3 |
| $\chi\ (eV)$ | 1.0 | 3.6 | 4.07 | 4.2 | 2.3 |
| $\varepsilon_r$ | 9.1 | 5.4 | 18.1 | 13.6 | 5.7 |
| $N_C\ (cm^{-3})$ | $2.2 \times 10^{+18}$ | $2.2 \times 10^{+18}$ | $2.2 \times 10^{+19}$ | $2.2 \times 10^{+18}$ | $4.386 \times 10^{+19}$ |
| $N_V\ (cm^{-3})$ | $1.8 \times 10^{+19}$ | $1.8 \times 10^{+19}$ | $5.5 \times 10^{+20}$ | $1.8 \times 10^{+19}$ | $4.343 \times 10^{+19}$ |
| $\mu_n$ $(cm^2.V^{-1}.s^{-1})$ | 145 | 30 | 100 | 100 | $1.0 \times 10^{-4}$ |
| $\mu_p$ $(cm^2.V^{-1}.s^{-1})$ | 40 | 10 | 0.1 | 150 | $1.0 \times 10^{-4}$ |
| $N_A\ (cm^{-3})$ | $5.0 \times 10^{+16}$ | $1.0 \times 10^{+18}$ | $1.0 \times 10^{+18}$ | $1.0 \times 10^{+17}$ | $1.0 \times 10^{+18}$ |
| $N_D\ (cm^{-3})$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $N_t\ (cm^{-3})$ | $1.0 \times 10^{+15}$ | $1.0 \times 10^{+15}$ | $1.0 \times 10^{+15}$ | $1.0 \times 10^{+15}$ | $1.5 \times 10^{+17}$ |
| المرجع | [25] | [25] | [25] | [25] | [25] |


تاريخ إيداع البحث:2025/12/10
تاريخ قبوله للنشر:2026/01/19

**الجدول (3) الخصائص الفيزيائية والبارامترات المعتمدة لطبقات نقل الثقوب HTL.**

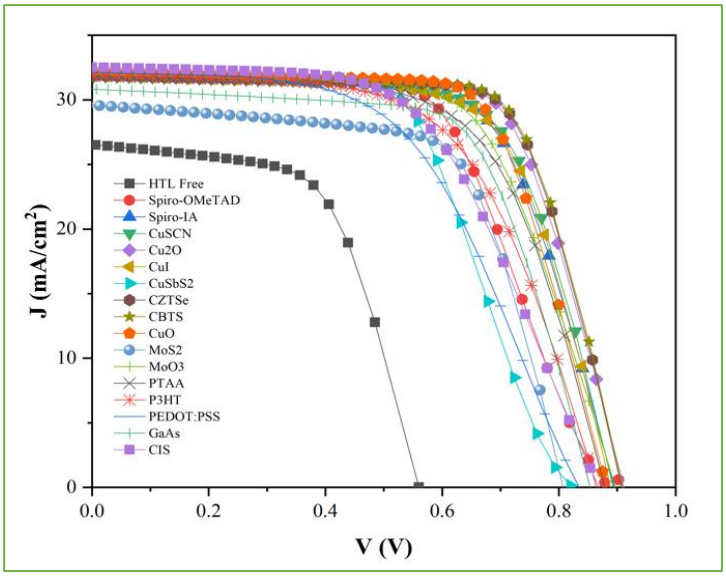
| الخاصية الفيزيائية | PTAA | $P_3HT$ | PEDOT:PSS | GaAs | CIS |
|---|---|---|---|---|---|
| السماكة (nm) | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| $E_g\ (eV)$ | 2.96 | 1.7 | 1.6 | 1.42 | 1.5 |
| $\chi\ (eV)$ | 2.3 | 3.5 | 3.4 | 4.07 | 3.55 |
| $\varepsilon_r$ | 9 | 3 | 3 | 12.9 | 13.6 |
| $N_C\ (cm^{-3})$ | $1.0 \times 10^{+21}$ | $2.0 \times 10^{+21}$ | $2.2 \times 10^{+18}$ | $2.2 \times 10^{+18}$ | $1.0 \times 10^{+19}$ |
| $N_V\ (cm^{-3})$ | $1.0 \times 10^{+21}$ | $2.0 \times 10^{+21}$ | $1.8 \times 10^{+19}$ | $1.8 \times 10^{+19}$ | $1.0 \times 10^{+18}$ |
| $\mu_n$ $(cm^2.V^{-1}.s^{-1})$ | 1 | $1.8 \times 10^{-3}$ | $4.5 \times 10^{-2}$ | 8500 | 25 |
| $\mu_p$ $(cm^2.V^{-1}.s^{-1})$ | 40 | $1.86 \times 10^{-2}$ | $4.5 \times 10^{-2}$ | 400 | 25 |
| $N_A\ (cm^{-3})$ | $1.0 \times 10^{+18}$ | $1.0 \times 10^{+18}$ | $1.0 \times 10^{+18}$ | $1.0 \times 10^{+11}$ | $1.3 \times 10^{+18}$ |
| $N_D\ (cm^{-3})$ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| $N_t\ (cm^{-3})$ | $1.0 \times 10^{+15}$ | $1.0 \times 10^{+15}$ | $1.0 \times 10^{+15}$ | $1.0 \times 10^{+15}$ | $1.0 \times 10^{+15}$ |
| المرجع | [25] | [25] | [25] | [27] | [28] |

**الجدول (4) نتائج المحاكاة لأداء الخلية الشمسية باستخدام طبقة مختلفة كطبقة نقل ثقوب HTL.**

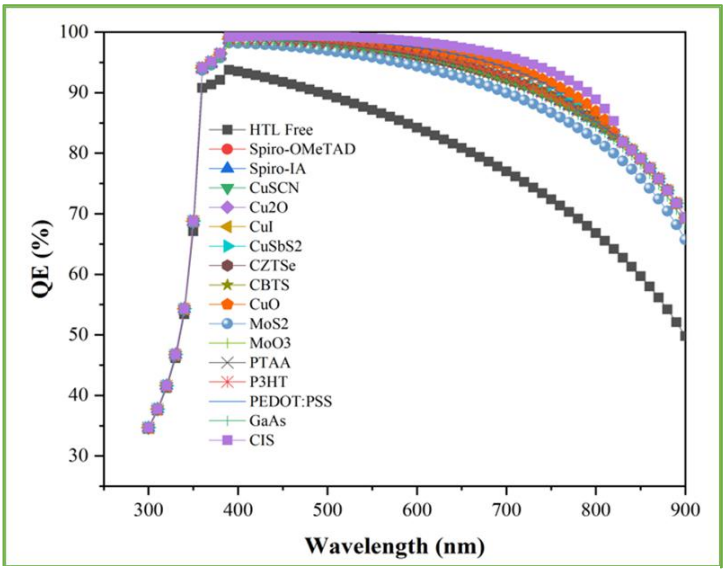
| طبقة نقل الثقوب(HTL) | $V_{OC}\ (V)$ | $J_{SC}\ (mA.cm^{-2})$ | $FF$ % | $PCE$ % |
|---|---|---|---|---|
| **HTL-free** | 0.56 | 26.53 | 60.21 | 8.95 |
| **Spiro-OMeTAD** | 0.88 | 31.85 | 61.67 | 17.42 |
| **Spiro-IA** | 0.89 | 31.85 | 67.60 | 19.29 |
| **CuSCN** | 0.89 | 31.85 | 68.38 | 19.51 |
| **$Cu_2O$** | 0.91 | 31.91 | 70.72 | 20.59 |
| **CuI** | 0.89 | 31.85 | 67.82 | 19.26 |
| **$CuSbS_2$** | 0.82 | 32.19 | 60.16 | 15.94 |
| **CZTSe** | 0.91 | 31.86 | 71.60 | 20.78 |
| **CBTS** | 0.91 | 31.97 | 71.66 | 20.91 |
| **CuO** | 0.88 | 32.21 | 69.65 | 19.78 |
| **$MoS_2$** | 0.81 | 29.58 | 66.48 | 15.93 |
| **$MoO_3$** | 0.90 | 31.85 | 65.50 | 18.72 |
| **PTAA** | 0.88 | 31.85 | 63.93 | 17.91 |
| **$P_3HT$** | 0.86 | 31.90 | 60.28 | 16.64 |
| **PEDOT:PSS** | 0.83 | 32.13 | 54.72 | 14.67 |
| **GaAs** | 0.85 | 30.82 | 66.94 | 17.64 |
| **CIS** | 0.87 | 32.53 | 57.10 | 16.13 |


تاريخ إيداع البحث:2025/12/10
تاريخ قبوله للنشر:2026/01/19

يبيّن الجدول (4) قيم نتائج أداء الخلية الشمسيّة لطبقات نقل ثقوب مختلفة، كما ويبين الشكل (5) المخطط **(J-V)** لهذه الخلايا، ويبين الشكل (6) تغير المردود الكوانتي **(QE)** بدلالة طول الموجة لكافة الخلايا المدروسة.




**الشكل (5) منحنيات التيار–الجهد (J–V) للخلية الشمسية باستخدام طبقات مختلفة لنقل ثقوب(HTL)**




**الشكل (6) منحنيات المردود الكمي الخارجي (QE) للخلية الشمسية باستخدام طبقات مختلفة لنقل ثقوب(HTL)**

أظهرت النتائج أنّ هناك مجموعة من طبقات نقل الثقوب يمكن تصنيفها ضمن **الطبقات الجيدة**، إذ تراوحت كفاءتها بين **19%** و**21%**، مع جهد دارة مفتوحة بحدود**–0.88 0.91 V**، وتيار قصر يقارب**31.8–32.21 mA/cm²** ، ومعامل ملء مرتفع يتراوح بين **67–72%**وتشمل هذه الفئة طبقات مثل **$Cu_2O$, CuI**، **CZTSe**، **CBTS**، **CuSCN**، **CuO**، و**Spiro-IA**، والتي أثبتت قدرتها على تحقيق أداء قوي وأعلى من طبقة نقل الثقوب المراد استبدالها **Spiro-OMeTAD**.

أما **الطبقات المقبولة** فقد سجلت كفاءة في حدود**18–17%** ، مع جهد دارة مفتوحة يقارب **0.88–0.90 V**، وتيار قصر في مجال**31–32 mA/cm²** ، ومعامل ملء متوسط بين **63–66%**وتشمل هذه المجموعة طبقات مثل **$MoO_3$**، **PTAA**، و**GaAs**، والتي تُظهر أداءً جيدًا لكنه أقل من الطبقات الجيدة والتي يمكن اعتبارها ضمن بدائل طبقة **Spiro-OMeTAD** خصوصا إذا ما أجري عليها بعض عمليات التحسين الإضافيّة.

في المقابل، هناك **طبقات غير مناسبة** سجلت كفاءة منخفضة تقارب**15–16%** ، مع جهد دارة مفتوحة في حدود**0.81–0.85 V** ، وتيار قصر يقارب**29–32 mA/cm²** ، ومعامل ملء منخفض بين **54–60%** وتشمل هذه الفئة **$CuSbS_2$**، **$MoS_2$**، **P3HT**، **PEDOT:PSS**، و**CIS**، والتي أظهرت قصورًا واضحًا في الأداء وتحتاج إلى مزيد من العمل والتطوير قبل أن تصبح بدائل عملية قابلة للتطبيق.

## 4- الاستنتاجات

خلصت هذه الدراسة إلى أن أداء خلايا البيروفسكايت الشمسية الخالية من الرصاص، المعتمدة على**$CsSnI_3$** ، يتأثر بشكل أساسي بنوع طبقة نقل الثقوب المستعملة، نظراً لأثرها المباشر في محاذاة مستويات الطاقة وكفاءة جمع الشحنات. أظهرت نتائج المحاكاة أن بعض الطبقات غير العضوية والنصف ناقلة مثل **$Cu_2O$**، **CZTSe**، و **CBTS**حققت كفاءة مرتفعة تقارب **20–21%** مع جهد دارة مفتوحة **(Voc ≈ 0.91 V)** ومعامل ملء **(FF ≈ 70–72%)**، ما يجعلها أفضل البدائل وأكثرها ملاءمةً. في المقابل، سجلت طبقات أخرى مثل **$MoO_3$**، **PTAA**، و **GaAs**كفاءة مقبولة في حدود **% 18–17**مع قيم **(Voc ≈ 0.88–0.90 V)** و**(FF ≈ 63–66%)**، ما يشير إلى إمكانية تطويرها لتصبح


تاريخ إيداع البحث:2025/12/10
تاريخ قبوله للنشر:2026/01/19

خيارات عملية كبديل لطبقة **Spiro-OMeTAD**. أما الطبقات ذات الأداء المنخفض مثل **$CuSbS_2$**، **$MoS_2$**، **P3HT**، **PEDOT:PSS**، **CIS**فقد اقتصرت كفاءتها على **15–16%**مع **Voc** منخفض (**0.81–0.85 V** ≈) ومعامل ملء ضعيف (**60–54%**≈)، ما يؤكد الحاجة إلى تطويرها لتصبح مناسبة قبل اعتمادها بوصفها بدائل.

تُبرز هذه النتائج أن اختيار طبقة نقل الثقوب لا يقل أهمية عن تصميم الطبقات الأخرى في البنية الكاملة للخلية الشمسية، إذ يُسهم بشكل مباشر في تحسين جهد الدارة المفتوحة **(Voc)**ومعامل الملء **(FF)** ومن ثمَّ الكفاءة الكلية. كما أن التركيز على الطبقات غير العضوية وأنصاف النواقل ذات الكفاءة المرتفعة يُمثل مساراً واعداً لتحقيق التوازن بين الأداء العالي والاستقرار والجدوى الاقتصادية. وفي هذا السياق، فإن اعتماد بدائل منخفضة التكلفة مقارنةً بمركب **Spiro-OMeTAD**، مثل الأكاسيد المعدنية **($Cu_2O$, $MoO_3$)** أو أنصاف النواقل الكبريتية**(CBTS, CZTSe)**، يُعد خطوة إستراتيجية لتقليل التكاليف مع الحفاظ على مستويات كفاءة جيدة، في المقابل يُعد تطوير الطبقات ذات الأداء المنخفض ضرورة لتوسيع قاعدة البدائل المتاحة وتحقيق مرونة أكبر في التصميم. ومع التركيز أنه يوجد طبقات مثل **(CBTS, CZTSe, GaAs)** تُستعمل تقليداً بوصفها طبقات ماصة في الخلايا الشمسيّة وأبرزنا إمكانية استعمالها بوصفها طبقة بديلة لنقل الثقوب ولكن بشكل نظري حيث يمكن أن تعاني عملياً من العديد من المشاكل والمعوقات، كذلك لدينا طبقة **($Cu_2O$)** لاتزال غير مستقرة في خلايا بيروفسكايت الشمسية. إن دمج هذه الاعتبارات ضمن نموذج المحاكاة يمنح رؤية أكثر واقعية ويُسهم في توجيه الجهود البحثية نحو تطوير خلايا بيروفسكايت خالية من الرصاص تجمع بين الكفاءة العالية والاستدامة الإنتاجية، مع جدوى اقتصادية أكبر في التطبيقات الصناعية واسعة النطاق.

## 5-المراجع


[1] "Best Research-Cell Efficiency Chart | Photovoltaic Research | NREL." Accessed: Nov. 27, 2025. [Online]. Available: https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency

[2] B. Khagendra Prasad Phulara and P. D. Salvatore Fava A Dissertation, "DESIGN AND ANALYSIS OF LEAD-FREE PEROVSKITE BASED SOLAR CELL DEVICES IN STANDALONE AND TANDEM CONFIGURATION," 2022. [Online]. Available: www.pveducation.org

[3] C. Q. Xia *et al.*, "Limits to Electrical Mobility in Lead-Halide Perovskite Semiconductors," *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 12, no. 14, pp. 3607–3617, Apr. 2021, doi: 10.1021/acs.jpclett.1c00619.

[4] S. Zhao, W. Cai, H. Wang, Z. Zang, and J. Chen, "All-Inorganic Lead-Free Perovskite(-Like) Single Crystals: Synthesis, Properties, and Applications," May 01, 2021, *John Wiley and Sons Inc*. doi: 10.1002/smtd.202001308.

[5] W. Li, T. Mi, T. Tian, M. Yang, and H. Pang, "Mitigating Lead Toxicity in Halide Perovskite Solar Cells: Strategies for Sustainable Development," Apr. 01, 2025, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/inorganics13040123.

[6] T. Ye *et al.*, "Ambient-Air-Stable Lead-Free CsSnI3Solar Cells with Greater than 7.5% Efficiency," *J Am Chem Soc*, vol. 143, no. 11, pp. 4319–4328, Mar. 2021, doi: 10.1021/jacs.0c13069.

[7] M. K. Hossain *et al.*, "Deep Insights into the Coupled Optoelectronic and Photovoltaic Analysis of Lead-Free CsSnI3 Perovskite-Based Solar Cell Using DFT Calculations and SCAPS-1D Simulations," *ACS Omega*, vol. 8, no. 25, pp. 22466–22485, Jun. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c00306.

[8] M. T. Islam *et al.*, "Investigation of CsSn0.5Ge0.5I3-on-Si Tandem Solar Device Utilizing SCAPS Simulation," *IEEE Trans Electron Devices*, vol. 68, no. 2, pp. 618–625, Feb. 2021, doi: 10.1109/TED.2020.3045383.

[9] W. Tang, T. Liu, and O. Fenwick, "High thermoelectric performance based on CsSnI3 thin films with improved stability," *J Mater Chem A Mater*, vol. 10, no. 13, pp. 7020–7028, Mar. 2022, doi: 10.1039/d1ta11093d.



تاريخ إيداع البحث:2025/12/10
تاريخ قبوله للنشر:2026/01/19

[10] A. Shpatz Dayan and L. Etgar, “Study of Electron Transport Layer-Free and Hole Transport Layer-Free Inverted Perovskite Solar Cells,” *Solar RRL*, vol. 6, no. 1, Jan. 2022, doi: 10.1002/solr.202100578.

[11] L. Nakka, Y. Cheng, A. G. Aberle, and F. Lin, “Analytical Review of Spiro-OMeTAD Hole Transport Materials: Paths Toward Stable and Efficient Perovskite Solar Cells,” Aug. 01, 2022, *John Wiley and Sons Inc*. doi: 10.1002/aesr.202200045.

[12] F. M. Rombach, S. A. Haque, and T. J. Macdonald, “Lessons learned from spiro-OMeTAD and PTAA in perovskite solar cells,” Oct. 01, 2021, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/d1ee02095a.

[13] I. M. Abdellah *et al.*, “Facile and low-cost synthesis of a novel dopant-free hole transporting material that rivals Spiro-OMeTAD for high efficiency perovskite solar cells,” *Sustain Energy Fuels*, vol. 5, no. 1, pp. 199–211, Jan. 2021, doi: 10.1039/d0se01323d.

[14] M. F. Rahman *et al.*, “Concurrent investigation of antimony chalcogenide (Sb2Se3 and Sb2S3)-based solar cells with a potential WS2 electron transport layer,” *Heliyon*, vol. 8, no. 12, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12034.

[15] M. F. Rahman *et al.*, “Design and numerical analysis of CIGS-based solar cell with V2O5as the BSF layer to enhance photovoltaic performance,” *AIP Adv*, vol. 13, no. 4, Apr. 2023, doi: 10.1063/5.0138354.

[16] R. A. Jabr, M. Hamad, and Y. M. Mohanna, “Newton-Raphson solution of Poisson’s equation in a pn diode.”

[17] M. F. Wahid *et al.*, “Performance Enhancement of Lead-Free CsSnI3 Perovskite Solar Cell: Design and Simulation With Different Electron Transport Layers,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 8296–8312, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3352444.

[18] M. K. Hossain *et al.*, “Effect of dye extracting solvents and sensitization time on photovoltaic performance of natural dye sensitized solar cells,” *Results Phys*, vol. 7, pp. 1516–1523, 2017, doi: 10.1016/j.rinp.2017.04.011.

[19] L. J. Chen, C. R. Lee, Y. J. Chuang, Z. H. Wu, and C. Chen, “Synthesis and Optical Properties of Lead-Free Cesium Tin Halide Perovskite Quantum Rods with High-Performance Solar Cell Application,” *Journal of Physical Chemistry Letters*, vol. 7, no. 24, pp. 5028–5035, Dec. 2016, doi: 10.1021/acs.jpclett.6b02344.

[20] J. H. Noh, N. J. Jeon, Y. C. Choi, M. K. Nazeeruddin, M. Grätzel, and S. Il Seok, “Nanostructured TiO2/CH3NH3PbI3

heterojunction solar cells employing spiro-OMeTAD/Co-complex as hole-transporting material," *J Mater Chem A Mater*, vol. 1, no. 38, pp. 11842–11847, Oct. 2013, doi: 10.1039/c3ta12681a.

[21] "Spiro-OMeTAD (Spiro-MeOTAD) | 207739-72-8, >99.0% | Ossila." Accessed: Nov. 27, 2025. [Online]. Available: https://www.ossila.com/products/spiro-ometad

[22] R. Tala-Ighil Zaïr, C. Oudjehani, and K. Tighilt, "SCAPS Simulation for Perovskite Solar Cell," *Journal of Solar Energy Research Updates*, vol. 8, pp. 21–26, Oct. 2025, doi: 10.31875/2410-2199.2021.08.3.

[23] O. A. Muhammed, D. Eli, P. H. Boduku, J. Tasiu, M. S. Ahmad, and N. Usman, "Modeling and simulation of lead-free perovskite solar cell using scaps-1D," *East European Journal of Physics*, vol. 2021, no. 2, pp. 146–154, 2021, doi: 10.26565/2312-4334-2021-2-12.

[24] E. Danladi *et al.*, "Impact of hole transport material on perovskite solar cells with different metal electrode: A SCAPS-1D simulation insight," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16838.

[25] S. M. Seyed-Talebi, M. Mahmoudi, and C. H. Lee, "A Comprehensive Study of CsSnI3-Based Perovskite Solar Cells with Different Hole Transporting Layers and Back Contacts," *Micromachines (Basel)*, vol. 14, no. 8, Aug. 2023, doi: 10.3390/mi14081562.

[26] M. K. Hossain *et al.*, "Deep Insights into the Coupled Optoelectronic and Photovoltaic Analysis of Lead-Free CsSnI3 Perovskite-Based Solar Cell Using DFT Calculations and SCAPS-1D Simulations," *ACS Omega*, vol. 8, no. 25, pp. 22466–22485, Jun. 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c00306.

[27] I. Qasim *et al.*, "Attainment of Stable (FTO/ZnO/CdS/CH3NH3SnI3/GaAs/Au) Perovskite Solar Cell With Above 23% Photovoltaic Performance Using Solar Capacitance Simulator," Aug. 10, 2021. doi: 10.21203/rs.3.rs-731428/v1.

[28] M. Hasanzadeh Azar *et al.*, "SCAPS Empowered Machine Learning Modelling of Perovskite Solar Cells: Predictive Design of Active Layer and Hole Transport Materials," *Photonics*, vol. 10, No. 3, Mar. 2023, doi: 10.3390/photonics10030271.



تاريخ إيداع البحث:2025/12/10
تاريخ قبوله للنشر:2026/01/19