الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة قاصدي مرباح ورقلة

كلية الرياضيات وعلوم المادة

قسم الفـــــيزياء

مذكرة ماستر أكاديمي

التخصص: فيزياء طاقوية

من إعداد الطلبة:

قمولي رفيدة

فرطاس سندس

تحت عنوان:

تحليل أداء خلية البيروفسكايت الشمسية CH3NH3SnI3 المزودة بطبقاتETL غير العضوية وذلك باستعمال برنامجSCAPS-1D

تاريخ المناقشة: 2026/06/09

أمام لجنة الأساتذة المتكونة من:

الزين عبد الله	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ محاضر.ب	رئيسا
تخة محمد	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ محاضر.ب	مناقشا
جريوي محمد	المدرسة العليا للأساتذة ورقلة	أستاذ محاضر. أ	مشرفا
سوداني محمد البار	جامعة قاصدي مرباح ورقلة	أستاذ تعليم عال. أ	مساعد مشرف

السنة الجامعية 2026/2025

إهـــداء

وآخِـرُ دَعْوَاهُم أَنِ "الحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ العَالَمِينَ" الحمد لله عند البدء وعند الختام من قال أنا لها نالها.

لقد كانت طريقا طويلة مليئة بالإخفاقات والنجاحات فخورين بكفاحنا لتحقيق أحلامنا

لحظة لطالما انتظرتها وحلمت بها في حكاية اكتملت فصولها إلى من علمني العطاء بدون انتظار إلى من أحمل اسمه بكل افتخار إلى من كللّه الله بالهيبة والوقار والدي العزيز.

إلى حبيبتي قرة عيني إلى القلب النابض إلى من كانت دعواتها الصادقة سر نجاحي أمي الغالية.

إلى إخوتي سندي في الحياة أدامكم الله ضلعا ثابتا لي، إلى كل أفراد عائلتي وإلى كل أصدقائي بدون استثناء إلى كل الأساتذة الأفاضل الذين قدموا لنا يد المساعدة.

إلى كل هؤلاء أهدي هذا العمل وفقني الله وإياكم إلى الخير

رفيدة

إهـــداء

إلى أمي الحبيبة،

التي منحتني الحب دون مقابل، وكانت دعواتها ترافقني في كل امتحان، وفي كل لحظة خوف أو تعب... إليكِ يا أمي.

إلى أبي الغالي،

الذي كان وجوده بقربي أعظم طمأنينة، وكان حضوره أمانًا، ودعمه سببًا في استمراري... إليك يا أبي.

ومهما كتبت من كلمات فلن أوفيكما حقكما، ففضلكما أكبر من أن يُختصر في العبارات. أسأل الله أن يحفظكما ويديمكما سندًا وعونًا مدى الحياة

إلى إخوتي أحبّائي،

الذين كانت معهم الأيام أخف، والنجاحات أجمل، والتعب أهون:

نورس، يوسف، إيناس، أسيل، محمد، سيدرا.

إلى عائلتي...

إلى الدفء الذي كلما أرهقتني الحياة عدت إليه مطمئنّة،

وإلى الوجوه التي كانت خلف كل خطوة نجاح أصل إليها دون أن تطلب شيئًا سوى أن تراني بخير.

إلى صديقاتي العزيزات،

اللواتي شاركنني هذه الرحلة بكل تفاصيلها، وكنّ لي أكثر من مجرد صديقات، بل أخوات حقيقيات في المواقف والمحبة والدعم.

اللهم احفظ صديقاتي الغاليات، وبارك لهن في أيامهن وأحلامهن، واجعل بيننا مودة لا تنقطع أبدًا

سنـدس

شكر وعرفان

بِسۡمِ ٱللَّهِ ٱلرَّحۡمَٰنِ ٱلرَّحِيمِ

في هذه اللحظة التي نختتم فيها مشوارا علميا حافلا بالجهد والمثابرة ، نتوجه أولا بحمد الله وشكره على توفيقه ورعايته التي صاحبتنا منذ بداية هذا العمل وحتى نهايته، فله الحمد والفضل في كل إنجاز حققناه

نتقدم بعد ذلك بجزيل الشكر وعظيم التقدير إلى مشرفنا الفاضل الأستاذ القدير جريوي محمد ، نظير ما قدمه لنا من دعم علمي وإرشادات قيمة، كان لها الأثر البالغ في توجيهنا وإثراء هذا البحث بملاحظاته البناءة ومتابعته المستمرة.

كما لا ننسى المشرف المساعد الأستاذ سوداني محمد البار الذي لم يبخل علينا هو الآخر بمساعدته وتوجيهه فله خالص الفضل والجزاء.

كما نعرب عن بالغ امتنانا واعتزازنا بأسرنا الكريمة التي ساندتنا دوما بدعمها .المعنوي والتشجيع المتواصل طوال سنوات الدراسة ، فكانوا السند الحقيقي في مسيرتنا العلمية، فلهم منا كل الشكر والعرفان.

نتوجه كذلك بخالص عبارات الشكر والتقدير لزملائنا وأصدقائنا، الذين لم يترددوا في تقديم يد العون والمساندة في مختلف مراحل البحث، فجزاهم الله عنا خير الجزاء، وبارك في جهودهم.

ولا يسعنا في هذا المقام إلا أن نعبر عن إجلالنا لبيت أهل النبوة عليهم السلام، الذين جسدوا أسمى معاني العلم والأخلاق ، وكانت حياتهم الطاهرة منارة نهتدي بها في درب السعي عن الحقيقة .

وفي الأخير نسأل الله تعالى أن يجعل هذا العمل شفيعا لنا يوم نسأل عن أعمارنا وشبابنا فيما أفنيناه، وأن يرزقنا الإخلاص في القول والعمل، وأن يزيدنا علما وأن ينفعنا بما علمنا، إنه سميع عليم، والحمد لله رب العالمين.

فهرس العناوين

المحتويات **الصفحة**

الإهداء.....
شكر وعرفان.....
فهرس المحتويات.....
قائمة الأشكال.....
قائمة الجداول.....
قائمة الرموز.....
مقدمة عامة..... 2

الجانب النظري الفصل الأول: الإشعاع الشمسي

I .المقدمة..... 6
I .2.الإشعاع الشمسي..... 6
I .3.ا لثابت الشمسي..... 8
I . 4. التوزيع الطيفي للإشعاع الشمسي..... 9
I . 5.الزوايا الشمسية..... 9
I .1.5. زاوية الميل الشمسي..... 9
I .5. 2. زاوية الارتفاع الشمسي..... 11
I .5. 3. زاوية الذروة..... 11
I .5. 4. زاوية السمت الرأسي..... 11
I .5. 5. زاوية الساعة الشمسية..... 21
I .5. 6. زاوية دائرة العرض للمنطقة..... 12
I .5. 7. زاوية خط الطول 13
I . 6. التوقيت الشمسي Tvs والمحليTL..... 41
I . 7. تحديد شروق وغروب الشمس..... 51
I . 8. الكتلة الهوائية الضوئية..... 61
I . 9. الإشعاع الشمسي على سطح الأرض..... 71

I .9. 1. الإشعاع المباشر..... 71
I .9. 2. الإشعاع المنتشر 71
I .9. 3. الإشعاع الكلي..... 81
I . الخاتمة..... 19

الفصل الثاني: الخلية الشمسية

II .المقدمة..... 21
II .1 .المواد نصف ناقلة..... 21
II .2. أنواع أنصاف النواقل..... 21
II .1.2. نصف ناقل النقي..... 21
II .2.2. نصف الناقل غير نقي (المطعم)..... 22
II .1.2.2. نصف ناقل من النوعN 23
II .2.2.2. نصف ناقل من النوع P..... 23
II 2-2-3- الوصلة الثنائية P–N..... 24
II .3. الخلية الشمسية..... 24
II .1.3. تركيب (بنية) الخلية الشمسية..... 25
II .2.3. وظيفة الخلية الشمسية..... 25
II .3.3. مبدأ عمل الخلية الشمسية..... 25
II .4.3. الخواص الكهربائية للخلية الشمسية..... 26
II .5.3. مردود الخلية الشمسية..... 28
II .6.3. أنواع الخلية الشمسية..... 28
II .7.3. مختلف عيوب الخلايا الشمسية..... 30
II .8.3.أهم التحسينات 30
II .9.3. أفاق التطوير 30
II .4. خلايا البيروفسكايت..... 31
II .1.4. آلية العمل في خلية البيروفسكايت الشمسية..... 32
II .2.4. أنواع هياكل خلايا البيروفسكايت الشمسية..... 33
II .3.4. طبقات النقل الوظيفية في خلايا البيروفسكايت الشمسية..... 34
II .4.4.التحسينات الحديثة في خلايا البيروفسكايت الشمسية..... 35
II . خاتمة 35

الفصل الثالث : تحليل ومناقشة النتائج

III- المقدمة..... 45

III-1 المعادلات المتعلقة بمحاكاة الخلايا الشمسية..... 45

III-1-1 معادلة بواسون 45

III-1-2 معادلة الاستمرارية..... 45

III-2- تعريف SCAPS..... 46

III-3 طريقة استخدام برنامج SCAPS-D1..... 46

III-3-1 الوسائط الخارجية المتعلقة بالخلية الشمسية..... 47

III-3-2 الطيف و الإضاءة..... 48

III-3-3 إعداد وتهيئة قياسات المحاكاة..... 49

III-3-4 تحديد نوع المشكلة..... 50

III-3-5 بدء الحساب..... 51

III-3-6 تسريع الحساب..... 52

III-3-7 تسريع العمل المسجل..... 52

III-4- دراسة مقارنة لتأثير طبقات نقل الإلكترونات(TiO2,SnO2,ZnO) على أداء خلايا البيروفسكايت الشمسية القائمة على القصدير 52

III-4-1بنية خلية البيروفسكايت القائمة على القصدير..... 52

III-4-2 محاكاة وتحسين البنية المقترحة 53

III-4-2-1 خصائص المواد المستعملة في هذه الدراسة 54

III-4-2-2- دراسة تأثير طبقة ثاني أكسيد التيتانيوم TiO2..... 55

III-4-2-2-1- تأثير سمك طبقة TiO2 على خصائص الخلية الشمسية..... 60

III-4-2-2-2- تأثير درجة الحرارة على خصائص الخلية الشمسية بوجود طبقة TiO2 66

III-4-2-3- دراسة تأثير طبقة ثنائي أكسيد القصدير SnO2 70

III-4-2-3-1- تأثير سمك طبقة SnO2 على خصائص الخلية الشمسية..... 74

III-4-2-3-2- تأثير درجة الحرارة على خصائص الخلية الشمسية بوجود طبقة SnO2 79

III-4-2-4 تأثير طبقة أكسيد الزنك ZnO..... 84

III-4-2-4-1- تأثير سمك طبقة ZnO على خصائص الخلية الشمسية..... 88

III-4-2-4-2 تأثير درجة الحرارة على خصائص الخلية الشمسية بوجود طبقة ZnO 93

III-4-3-المقارنة والمناقشة العامة للنتائج 99

- الخاتمة العامة 102

قائمة الأشكال

الشكل	العنوان	الصفحة
I –1	أبعاد وموضع الشمس والأرض.....	7
I –2	المسافة بين الشمس إلى الأرض.....	8
I –3	الثابت الشمسي I بدلالة اليوم من السنة.....	8
I –4	محاكاة إشعاع الجسم الأود لطيف الإشعاع الشمسي.....	9
I –5	زاوية االميل الشمسي.....	10
I –6	بيان تغيرات زاوية الميل	10
I –7	زاوية الارتفاع الشمسي والذروة والسمت الرأسي.....	12
I –8	زاوية السعة الشمسية ودائرة العرض للمنطقة.....	13
I –9	زاوية تحديد الموقع(زاوية خط العرض وزاوية خط الطول).....	14
I -10	بيان تغيرات التصحيح الزمني خلال أيام السنة.....	15
I -11	الكتلة الهوائية الضوئية	16
I -12	مخطط يمثل مركبات الإشعاع الشمسي التي تصل إلى سطح الأرض.....	18
II -1	رسم بياني لبلورة سيليكون نقي والروابط الإلكترونية فيه.....	22
II -2	بلورة الجرامنيوم المطعمة بالزرنيخ	23
II -3	بلورة الجرامنيوم المطعمة بالإنديوم.....	24
II -4	آلية عمل الخلية الشمسية.....	25
II -5	مخطط يمثل منحنيات الخصائص الكهربائية (I-V)و(P-V). للخلية الشمسية	26
II –6	دائرة مكافئة لخلية شمسية	27
II –7	دائرة مكافئة لخلية شمسية.....	27
II -8	خلية شمسية من نوع البيروفسكايت.....	32
III –1	أيقونة برنامج SCAPS.....	46
III –2	الواجهة الأساسية لبرنامج SCAPS.....	47
III –3	الوسائط الخارجية لعمل الخلية الشمسية.....	48
III –4	يمثل معلومات الإضاءة.....	48
III –5	اختيار ملف الطيف.....	48
III –6	لوحة القياسات.....	49
III –7	.نافذة مكونات الخلية الشمسية.....	50

8-III	تعبئة معلومات الطبقات المختلفة في خلية الطاقة الشمسية.....	51
9-III	رسم تخطيطي لهيكل خلية البيروفسكايت القصديرية.....	52
10-III	هيكل خلية البيروفسكايت الشمسية باعتبار TiO2 المادة الناقلة لبرنامج SCAPS	55
11-III	مخططات توزيع الطاقة والشحنات والتيار في خلية البيروفسكايت باعتبار TiO2 المادة الناقلة للإلكترونات.....	57
12-III	منحنى التيار – الجهد وتحليل تيارات (I-V) وتحليل تيارات إعادة التركيب	58
13-III	منحنى تغيرات (eta) بدلالة سمك طبقة النقل TiO2	60
14-III	منحنى تغيرات (Voc) بدلالة سمك طبقة النقل TiO2	60
15-III	منحنى تغيرات (Jsc) بدلالة سمك طبقة النقل TiO2	60
16-III	منحنى تغيرات (FF) بدلالة سمك طبقة النقل TiO2	60
17-III	منحنى تغيرات (V-MPP) بدلالة سمك طبقة النقل TiO2	61
18-III	منحنى تغيرات (J-MPP) بدلالة سمك طبقة النقل TiO2	61
19-III	منحنى تغيرات(eta) بدلالة درجة الحرارة.....	66
20-III	منحنى تغيرات(Voc) بدلالة درجة الحرارة.....	66
21-III	منحنى تغيرات(Jsc) بدلالة درجة الحرارة.....	66
22-III	منحنى تغيرات(FF) بدلالة درجة الحرارة.....	66
23-III	منحنى تغيرات(V-MPP) بدلالة درجة الحرارة.....	67
24-III	منحنى تغيرات(P-MPP) بدلالة درجة الحرارة.....	67
25-III	هيكل خلية البيروفسكايت الشمسية باعتبار SnO2 المادة الناقلة لبرنامج SCAPS	71
26-III	مخططات توزيع الطاقة والشحنات والتيار في خلية البيروفسكايت باعتبار SnO2 المادة الناقلة للإلكترونات.....	72
27-III	منحنى التيار – الجهد وتحليل تيارات (I-V) وتحليل تيارات إعادة التركيب	73
28-III	منحنى تغيرات (eta) بدلالة سمك طبقة النقل SnO2	74
29-III	منحنى تغيرات (Voc) بدلالة سمك طبقة النقل SnO2	74
30-III	منحنى تغيرات (Jsc) بدلالة سمك طبقة النقل SnO2	75
31-III	منحنى تغيرات (FF) بدلالة سمك طبقة النقل SnO2	75
32-III	منحنى تغيرات (V-MPP) بدلالة سمك طبقة النقل SnO2	75
33-III	منحنى تغيرات (J-MPP) بدلالة سمك طبقة النقل SnO2.....	75

III-34	منحنى تغيرات(eta) بدلالة درجة الحرارة.....	79
III-35	منحنى تغيرات(Voc) بدلالة درجة الحرارة.....	79
III-36	منحنى تغيرات(Jsc) بدلالة درجة الحرارة.....	80
III-37	منحنى تغيرات(FF) بدلالة درجة الحرارة.....	80
III-38	منحنى تغيرات(V-MPP) بدلالة درجة الحرارة.....	80
III-39	منحنى تغيرات(P-MPP) بدلالة درجة الحرارة.....	80
III-40	هيكل خلية البيروفسكايت الشمسية باعتبار ZnO المادة الناقلة لبرنامج SCAPS	84
III-41	مخططات توزيع الطاقة والشحنات والتيار في خلية البيروفسكايت باعتبار ZnO المادة الناقلة للإلكترونات.....	85
III-42	منحنى التيار – الجهد وتحليل تيارات (I-V) وتحليل تيارات إعادة التركيب	86
III-43	منحنى تغيرات (eta) بدلالة سمك طبقة النقل ZnO.....	88
III-44	منحنى تغيرات (Voc) بدلالة سمك طبقة النقل ZnO.....	88
III-45	منحنى تغيرات (Jsc) بدلالة سمك طبقة النقل ZnO	88
III-46	منحنى تغيرات (FF) بدلالة سمك طبقة النقل ZnO	88
III-47	منحنى تغيرات (V-MPP) بدلالة سمك طبقة النقل ZnO	89
III-48	منحنى تغيرات (J-MPP) بدلالة سمك طبقة النقل ZnO2.....	89
III-49	منحنى تغيرات(eta) بدلالة درجة الحرارة.....	93
III-50	منحنى تغيرات(Voc) بدلالة درجة الحرارة.....	93
III-51	منحنى تغيرات(Jsc) بدلالة درجة الحرارة.....	93
III-52	منحنى تغيرات(FF) بدلالة درجة الحرارة.....	93
III-53	منحنى تغيرات(V-MPP) بدلالة درجة الحرارة.....	93
III-54	منحنى تغيرات(P-MPP) بدلالة درجة الحرارة.....	93

قائمة الجداول

رقم الشكل	العنوان	الصفحة
I –1	جدول الإشعاع الشمسي الذي يصل سطح الأرض..... ...	7
I –2	جدول قيم معامل الاضطراب (انغيشتروم) وارتفاع الماء المكثف.....	18
III-1	جدول الخصائص الفيزيائية المستعملة لمحاكاة خلية البيروفسكايت الشمسية	54-53
III-2	جدول العيوب الفاصلة بين طبقات الخلية.....	54
III-3	جدول دالة الشغل للأقطاب (الخلفي والأمامي).....	55
III-4	جدول تأثير سمك طبقة TiO_2 على المعلمات الكهربائية للخلية الشمسية.....	65
III-5	جدول تغير معاملات الأداء الحرجة للخلية الشمسية بدلالة درجة الحرارة بوجود طبقةTiO_2	69
III-6	جدول تأثير سمك طبقة SnO_2 على المعلمات الكهربائية للخلية الشمسية.....	78
III-7	جدول تغير معاملات الأداء الحرجة للخلية الشمسية بدلالة درجة الحرارة بوجود طبقةSnO_2	83
III-8	جدول تأثير سمك طبقة ZnO على المعلمات الكهربائية للخلية الشمسية.....	91
III-9	جدول تغير معاملات الأداء الحرجة للخلية الشمسية بدلالة درجة الحرارة بوجود طبقة ZnO.....	96
III-10	جدول مقارنة الخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية باستعمال طبقات النقل الإلكتروني المختلفة	98

قائمة المقادير الفيزيائية:

الرمز	المقدار الفيزيائي	الوحدة في النظام الدولي
A	مساحة السطح.....	m^2
AM	الكتلة الهوائية الضوئية.....	/
B	معامل انغيشتروم (الاضطراب).....	/
C	سعة كهربائية.....	F
CB	نطاق التوصيل	eV
D	كثافة الشحنة.....	C/m^3
E	طاقة.....	J
E_t	معادلة التصحيح الزمني.....	min
F	قوة.....	N
FF	معامل التعبئة.....	%
G	موصلية كهربائية.....	S
H	زاوية الارتفاع الشمسي.....	°
I	شدة الاشعاع الشمسي المباشر.....	W / m^2
Jsc	تيار الدارة القصيرة.....	A
L	زاوية خط الطول للمنطقة.....	°
N	تركيز الإلكترونات.....	m^{-3}
Nj	رقم اليوم من السنة.....	/
P	تركيز الفجوات.....	m^{-3}
QE	الكفاءة الكمومية.....	%
T	درجة الحرارة.....	K
TVS	التوقيت الشمسي الحقيقي.....	h
TU	التوقيت العالمي.....	H
Voc	جهد الدارة المفتوحة.....	V
W	زاوية الساعة الشمسية.....	°
δ	زاوية الميل الشمسي.....	°
$\boldsymbol{\theta}$	زاوية الذروة.....	°
η	كفاءة الخلية الشمسية.....	%
λ	الطول الموجي.....	μm
σ	ثابت بولتزمان.....	

Φ	كمية الحرارة.....	J
φ	زاوية دائرة العرض للمنطقة.....	°
J-MPP	تيار نقطة الاستطاعة العظمى	mA/cm^2
V-MPP	جهد نقطة الاستطاعة العظمى	V

المقدمة العامة

المقدمة العامة:

يشهد العالم في السنوات الأخيرة تزايدا مستمرا في الطلب على الطاقة نتيجة التطور الصناعي والتكنولوجي والنمو السكاني المتسارع. وتشير الإحصائيات العالمية إلى أن الاستهلاك الطاقوي تجاوز حاليا 100 مليون برميل نفط مكافئ يوميا، وسط توقعات بارتفاعه بنسبة تقارب 25% بحلول سنة 2040. كما أن الاعتماد الكبير على الوقود الأحفوري أدى إلى ارتفاع انبعاث ثاني أكسيد الكربون، حيث تساهم مصادر الطاقة التقليدية بنسبة معتبرة من الغازات المسببة للاحتباس الحراري، الأمر الذي تسبب في ظهور العديد من المشكلات البيئية والمناخية. لذلك أصبح البحث عن مصادر طاقة متجددة ونظيفة ضرورة حتمية لتحقيق التنمية المستدامة وتقليل التأثيرات السلبية على البيئة **[1]**.

وتعتبر الطاقة الشمسية من أبرز مصادر الطاقة المتجددة وأكثرها انتشارا، حيث تتميز بكونها مصدرا طبيعيا دائما ونظيفا لا يسبب تلوثا بيئيا. فالإشعاع الشمسي يمثل المصدر الأساسي لمعظم أشكال الطاقة الموجودة على سطح الأرض. كما يلعب دورا مهما في الحفاظ على التوازن الحراري والمناخي للكوكب. وقد ساهم التطور العلمي في استغلال هذه الطاقة بطرق حديثة وفعالة، خاصة عن طريق الخلايا الشمسية التي تعمل على تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية يمكن استخدامها في العديد من المجالات المختلفة.

وتعد الشمس من أعظم النعم التي سخرها الله سبحانه وتعالى للإنسان، فهي المصدر الرئيسي للطاقة على سطح الأرض، كما تلعب دورا أساسيا في استمرار الحياة وتحقيق التوازن البيئي والمناخي. وقد أشار القرآن الكريم إلى أهمية الشمس وعظيم فضلها في عدة مواضع، لما لها من أثر مباشر في حياة الكائنات الحية واستمرارية الظواهر الطبيعية، قال الله تعالى: ﴿ وَسَخَّرَ لَكُمُ الشَّمْسَ وَالْقَمَرَ دَائِبَيْنِ ﴾ [إبراهيم الآية 33].

شهدت الخلايا الشمسية تطورا ملحوظا عبر السنوات، حيث انتقلت من الخلايا التقليدية المعتمدة على السيليكون إلى تقنيات أكثر تطورا وفعالية. ومن بين أكثر التقنيات التي لاقت اهتماما كبيرا في السنوات الأخيرة خلايا البيروفسكايت الشمسية، وذلك بفضل خصائصها الكهروضوئية المميزة، مثل معامل الامتصاص المرتفع للضوء، وسهولة تصنيعها، وإمكانية الحصول على كفاءات تحويل عالية بتكاليف أقل مقارنة بالخلايا التقليدية. كما تتميز هذه الخلايا بإمكانية تعديل تركيبها وتحسين أدائها من خلال تغيير المواد المكونة لطبقاتها المختلفة.

ورغم المزايا العديدة التي حققتها خلايا البيروفسكايت، فإن اعتماد أغلبها على مركبات الرصاص يطرح إشكالية بيئية وصحية بسبب السمية العالية لهذا العنصر، خاصة عند تعرض الخلايا للتلف أو أثناء عمليات التصنيع والتخلص منها. لذلك اتجهت العديد من الدراسات الحديثة إلى البحث عن بدائل أقل ضررا وأكثر أمانا، ومن أبرز هذه البدائل خلايا البيروفسكايت المعتمدة على القصدير (Sn)، والتي تعد من الحلول الواعدة في مجال الخلايا الشمسية الصديقة للبيئة، لما تتمتع به من خصائص كهربائية وبصرية جيدة وقدرتها على امتصاص الضوء بكفاءة مناسبة**[2]**.

ومن العوامل الأساسية المؤثرة على أداء خلايا البيروفسكايت وجود طبقة نقل الإلكترونات المعروفة ب ETL(Electron Transport Layer)، والتي تتمثل وظيفتها في نقل الإلكترونات وتقليل إعادة اتحاد الشحنات، مما يساهم في رفع كفاءة الخلية وتحسين استقرارها، وتختلف خصائص الخلية الشمسية باختلاف المادة المستعملة في هذه الطبقة، لذلك أصبح اختيار مادة ETL المناسبة من أهم النقاط التي تركز عليها الأبحاث الحديثة. ومن بين المواد الأكثر استخداما في هذا المجال نجد ZnO وTiO_2 وSnO_2 ، حيث تتميز كل مادة بخواص كهربائية وبصرية مختلفة تؤثر بشكل مباشر على أداء الخلية الشمسية وكفاءتها النهائية **[3]**.

في هذا العمل، سيتم دراسة ومحاكاة خلية شمسية من نوع بيروفسكايت القصدير باستعمال برنامج SCAPS-1D، مع التركيز على تحليل تأثير تغيير طبقة ETL بين المواد ZnO وTiO_2 وSnO_2 على الخصائص الكهربائية وأداء الخلية. كما تهدف هذه الدراسة إلى مقارنة النتائج المحصل عليها من حيث الكفاءة ومعامل الامتلاء وجهد الدارة المفتوحة وكثافة التيار، من أجل تحديد المادة الأكثر ملاءمة لتحسين أداء الخلية الشمسية.

وقد تم تقسيم هذا البحث إلى ثلاثة فصول رئيسية مترابطة، حيث يتناول الفصل الأول مفهوم الإشعاع الشمسي و يتضمن الفصل الثاني معلومات عامة حول أشباه الموصلات والخلايا الشمسية مع تفصيل خاص بخلايا البيروفسكايت، وأما الفصل الثالث فيتضمن نتائج المحاكاة العددية باستخدام برنامج SCAPS-1D، مع تحليل النتائج ومقارنتها من أجل تقييم تأثير كل مادة من مواد ETL على أداء الخلية الشمسية المدروسة.

المصادر والمراجع:

[1] Ritchie, H. and Roser, M., Energy, Our World in Data. Available at:

https://ourworldindata.org/energy

[2] Tin-Based Perovskite Solar Cells, Nature Communications, 2024. Available at:

https://www.nature.com/articles/s41467-024-53713-4

[3] Li, X. et al., Tin-Based Perovskite solar Cells and Electron Transport Layers, Journal of Materials Chemistry A, 2021.

الفصل الأول

الإشعاع الشمسي

مقدمة:

تستقبل كل النقاط الجغرافية على سطح الأرض الإشعاع الشمسي من شروق الشمس وحتى مغيبها، وتخضع الطاقة الشمسية الناتجة عن ذلك إلى تغيرات مستمرة ناتجة عن تغير الزاوية الشمسية الناتجة عن الحركة الدورية بين الشمس والأرض، مما يؤدي إلى اختلاف شدة الإشعاع وذلك تبعا لموضع الإشعاع من سطح الأرض، والحيز الزمني سواء على مدار اليوم (من شروق الشمس إلى غروبها) وعلى مدار السنة (فصول السنة)، وبغية تقدير شدة الإشعاع الشمسي التي تنعكس على سطح الأرض، فإننا نتطرق في هذا الفصل إلى تحديد مختلف الزوايا الشمسية، بالإضافة إلى عبارات تقدير قيمة الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض وذلك من خلال التحويل الحراري والكهروضوئي لمختلف التطبيقات التقنية للطاقة الشمسية.

I -2- الإشعاع الشمسي:

يعرف الإشعاع الشمسي على أنه الطاقة المنبعثة من الشمس نتيجة لتفاعلات الاندماج النووي الحراري التي تحدث في مركزها، حيث تتحول نوى الهيدروجين إلى هيليوم مع فقدان جزء من الكتلة يقدر بحوالي 4 مليون طن كل ثانية، يقابلها انبعاث طاقة تقدر استطاعتها بحوالي $3.8 \times 10^{26}\mathrm{W}$. تنتقل هذه الطاقة عبر الفضاء على شكل إشعاع كهرومغناطيسي وتصل إلى سطح الأرض خلال مدة تقارب 8 دقائق و20 ثانية، وتبلغ شدة الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي حوالي $1353\ W/\mathrm{m}^2$ وهو ما يعرف بالثابت الشمسي، في حين تصل قيمتها المتوسطة المتساقطة على سطح الأرض إلى نحو $1000\ K/\mathrm{m}^2$، أما عند سطح الشمس فتبلغ كثافة تدفق الطاقة حوالي $63.3\ MW/\mathrm{m}^2$ وفقا لقانون ستيفان-بولتزمان، وتقدر درجة حرارة سطحها بحوالي $5000\ K$ **[1]**، في حين تصل درجة حرارة مركزها بين $(5000 - 5778)\mathrm{K}$.

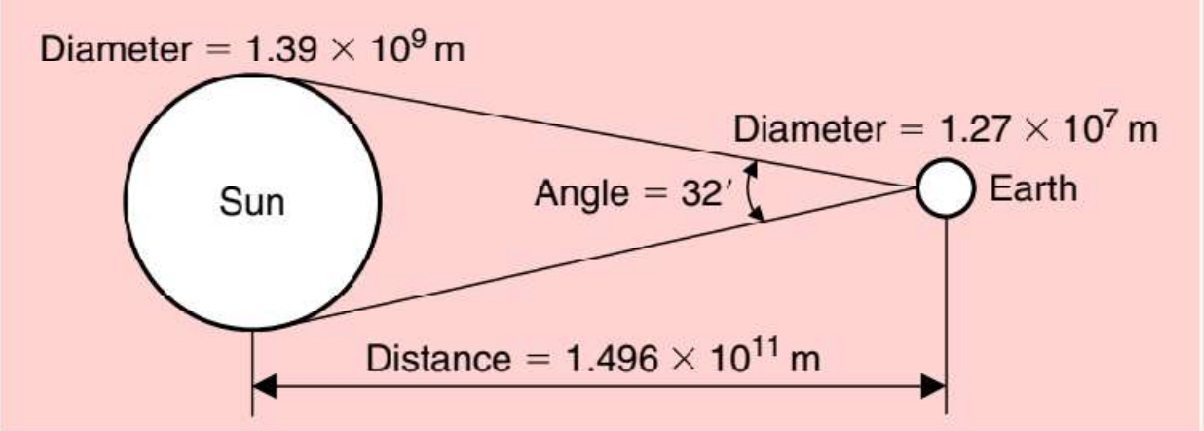
يتم حساب تدفق الطاقة التي تشعها الشمس (باعتبارها جسم أسود) وفقا لقانون ستيفان -بولتزمان:

$$\emptyset = \sigma \mathrm{TS}^4(4\pi \mathrm{RS}^2) \qquad (\mathrm{I} - 1)$$

حيث: Ts: درجة حرارتها و Rs: نصف قطرها وσ: يمثل ثابت ستيفان بولتزمان، ويعطى :

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8}\ \frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m}^2\mathrm{K}^4} \qquad (\mathrm{I} - 2)$$

عند مشاهدة القطر الظاهري لشمس من على سطح الأرض يقدر بحوالي 32 دقيقة ($0.53°$)، كما هو موضح في الشكل(I -**1**).



الشكل(I -1):أبعاد وموضع الشمس والأرض[2].

يمكن استخدام الزاوية المجسمة التي ترى من خلالها الشمس لتحديد الجزء الذي تشغله الشمس بالنسبة للأرض، ويمكن حسابها باستخدام هذه العلاقة:

Ang

يمتد الطيف الشمسي الواصل إلى الأرض ضمن مجال الأطوال الموجية من إلى :

$\lambda \in [0.3 - 3]\ \mu m$ حيث يتوزع تقريبا إلى:

($\lambda < 0.38\mu m$) الأشعة فوق البنفسجية.

($\lambda \in [0.38 - 0.78]\ \mu m$) الأشعة المرئية.

الأشعة تحت الحمراء($\lambda \geq 0.78\mu m$) الأشعة تحت الحمراء.

ويعد هذا الإشعاع المصدر الرئيسي للطاقة الطبيعية المؤثرة في الأنظمة المناخية والبيئية على سطح الأرض.

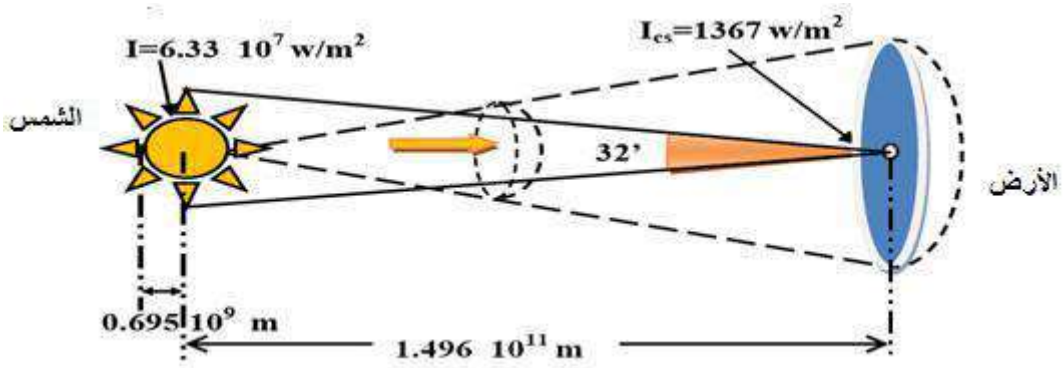
وتتركز معظم هذه الطاقة في كل من الإشعاع المرئي والأشعة تحت الحمراء ذات الطول الموجي القريب من المرئي كما هو موضح في الجدول(I -1).

الجدول(I -1): الإشعاع الشمسي الذي يصل سطح الأرض[3].

المجال	الطول الموجي μm	النسبة %	شدة الإشعاع الشمسي W/m^2
الأشعة الفوق البنفسجية *UV*	$0.38 >$	7	95
الأشعة المرئية *visible*	0.78-0.38	47.29	640
الأشعة تحت الحمراء *IR*	3.0-0.78	45.71	618

I -3- الثابت الشمسي:

هو مقدار شدة الإشعاع الشمسي الذي يتدفق على سطح عمودي خارج الغلاف الجوي، عند المسافة المتوسطة بين الأرض والشمس، والتي تقدر بـ$1.496 \times 10^{11} m$. حيث تقدر قيمة الثابت الشمسي عند هذه المسافة بحوالي$I_0 = 1367 W/m^2$ **[4]**، كما يوضح الشكل(I -2).



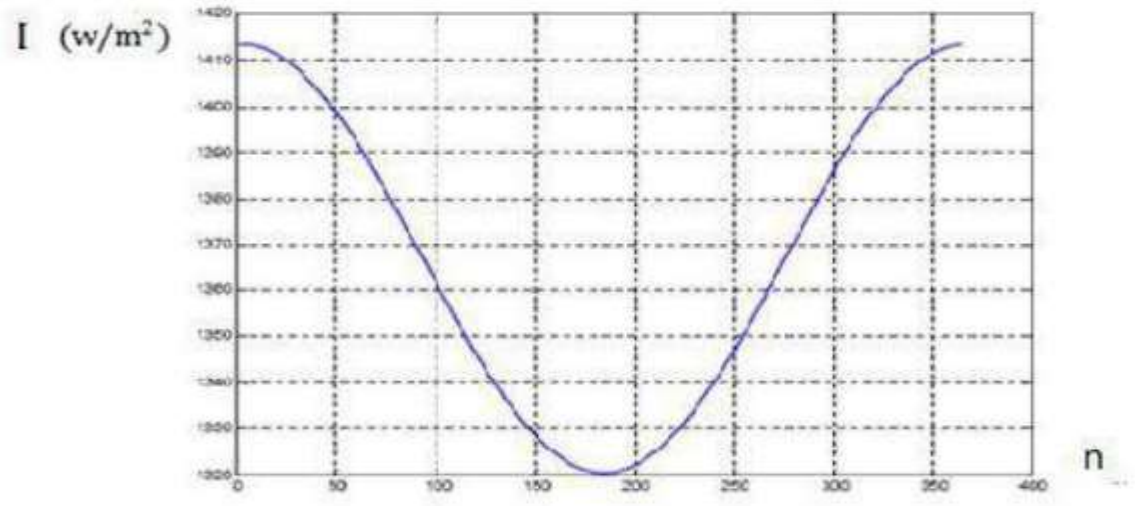
الشكل (I -2):المسافة بين الشمس إلى الأرض[5]

تعطى علاقة تصحيح الثابت الشمسي خلال أيام السنة بالمعادلة:[6]

$$I = I_0[1 + 0.034\cos[(\mathrm{Nj} - 2)\frac{360}{365}]] \qquad (\mathrm{I} - 3)$$

حيث *Nj* يمثل رقم اليوم من السنة الشمسي (*Nj=1*,2 ,...,365)

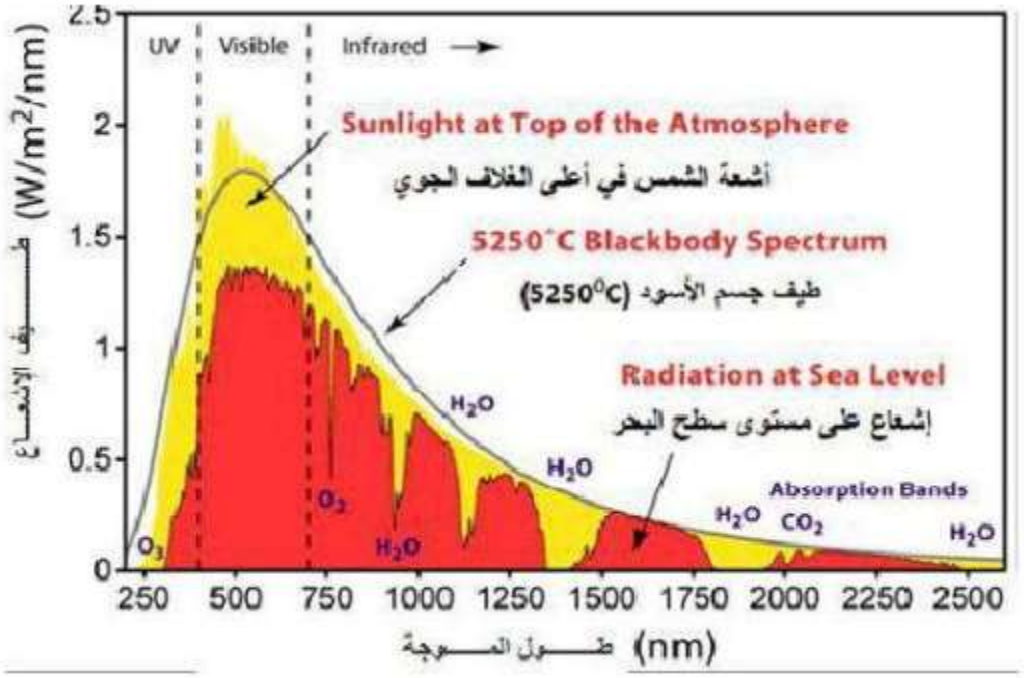
والموضحة قيمته بالمنحنى البياني في الشكل (I -3).



الشكل(I -3): الثابت الشمسي I بدلالة اليوم من السنة**[7]**.

I -4- التوزيع الطيفي للإشعاع الشمسي:

يتوزع الطيف الإشعاعي الشمسي خارج نطاق الغلاف الجوي في مجال يتراوح بين μm(50-0.2)، في حين ينحصر هذا المجال بينμm(0.3-3)على سطح الأرض، ويعود ذلك إلى تشتت وتوزع الإشعاع الشمسي أثناء تسربها عبر مكونات الغلاف الجوي والمتمثلة في جزيئات الهواء، وبخار الماء والغبار، وحسب نظرية رايلي فإن درجة الإنتشار ترتبط بعدد الجسيمات التي يخترقها الإشعاع الشمسي وكذا حجم هذه الجسيمات مقارنة بالطول الموجي للإشعاع الشمسي، وانطلاقا من ذلك فإن تشتت رايلي يكون كبير في الأطوال الموجية القصيرة والتي لا تتجاوز μm(0.6)، ويتم إمتصاص الأشعة فوق البنفسجية القصيرة أقل من μm(0.29) من طرف الأوزون، وتمتص الأشعة الحمراء من طرف بخار الماء وثاني أكسيد الكربون (CO_2)**[3]**. ويمكن توضيح ذلك أكثر من خلال الرسم البياني التالي:



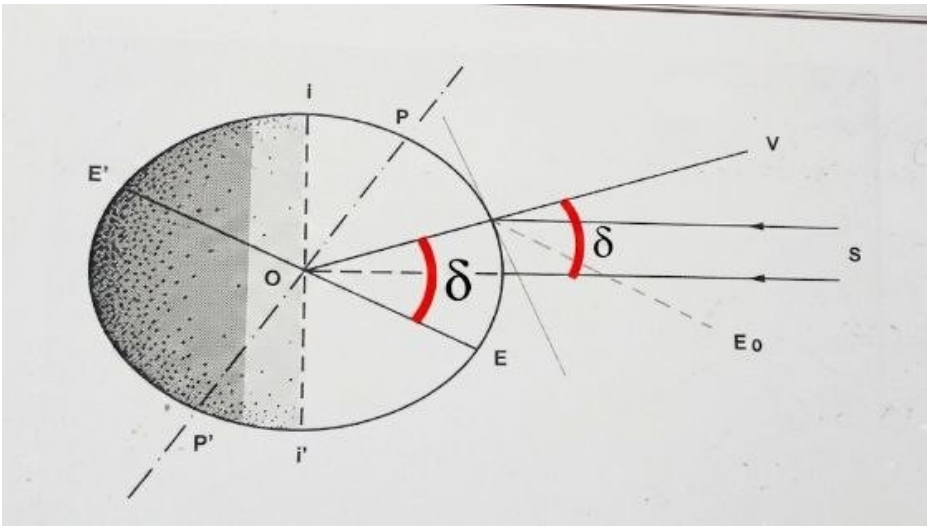
الشكل(I -4): محاكاة إشعاع الجسم الأسود لطيف الإشعاع الشمسي**[8]**.

I -5- الزوايا الشمسية:

تلعب الزوايا الشمسية دورا أساسيا في دراسة الإشعاع الشمسي، حيث تسمح بتحديد موضع الشمس بالنسبة لسطح الأرض في أي وقت ومكان، ويعتمد حساب كمية الإشعاع الشمسي المستقبل على معرفة هذه الزوايا بدقة، ومن هذه الزوايا:

I -5-1- زاوية الميل الشمسي:

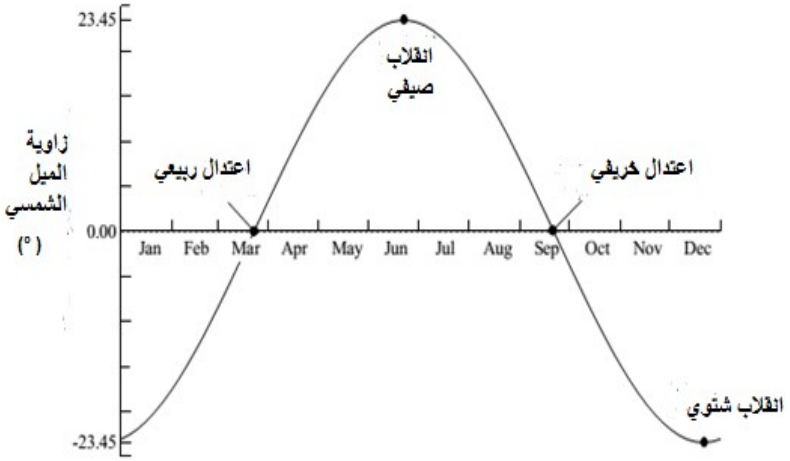
هي الزاوية المحصورة بين أشعة الشمس ومستوى خط الاستواء الأرضي، وهي تتغير على مدار السنة نتيجة ميل محور دوران الأرض حول الشمس تأخذ قيمتها الأدنى(23.45-) في الانقلاب الشتوي (21ديسمبر) حيث تبلغ قيمتها العظمى(23.45+) في الانقلاب الصيفي (21جوان)**[9]**، بينما تنعدم في الاعتدال الربيعي(21مارس) والخريفي (21سبتمبر)، كما هو موضح في الشكل(I -5).



الشكل(I -5): زاوية الميل الشمسي**[10]**.

تعطى زاوية الميل الشمسي في كل يوم من السنة بالعلاقة التالية:

$$\delta = 23.45° \sin\frac{360}{365}(284 + Nj) \qquad (I - 4)$$



الشكل (I -6): بيان تغيرات زاوية الميل**[11]**

I -2-5- زاوية الارتفاع h :

هي الزاوية المحصورة بين أشعة الشمس والمستوى الأفقي عند نقطة معينة على سطح الأرض، وهي تمثل ارتفاع الشمس في السماء بالنسبة للأفق، وتكون قيمة زاوية الارتفاع h=0 عند شروق وغروب الشمس**[11]**. كما يبين الشكل(I -7).

وتبلغ قيمتها العظمى عند الزوال الشمسي، وتعطى بالعلاقة.

$$\sinh = \sin\varphi * \sin\delta + \cos\varphi * \cos\delta * \cos\omega \qquad (I - 5)$$

حيث φ زاوية خط العرض.

و ω زاوية الساعة.

I -5-3- زاوية الذروة θ_z :

هي الزاوية المتشكلة بين الشعاع الشمسي الساقط على نقطة معينة من سطح الأرض والخط العمودي على المستوى الأفقي عند تلك النقطة، كما يبين الشكل (I -7).

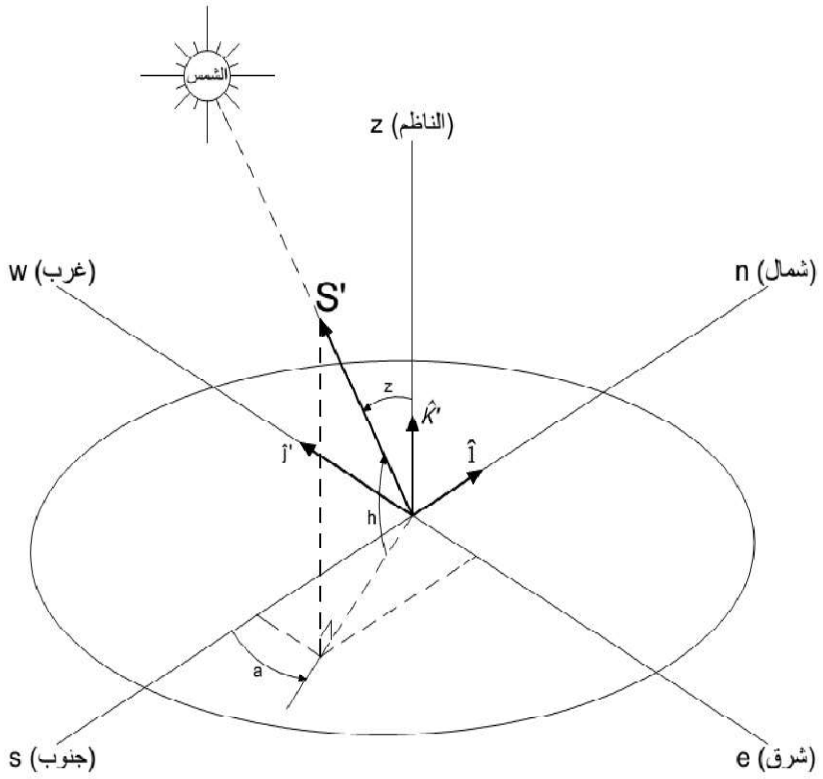
وتعطى بالعلاقة التالية:

$$\theta z + h = 90° \qquad (6 - I)$$

I -5-4- زاوية السمت الرأسي *a* :

هي الزاوية التي يشكلها مسقط الشعاع الشمسي الساقط عند نقطة معينة على سطح الأرض مع المستوى الأفقي، وذلك بالنسبة للمحور الموجه نحو الجنوب في تلك النقطة. تكون هذه الزاوية موجبة إذا كان الاتجاه نحو الغرب، وسالبة إذا كان الاتجاه نحو الشرق**[12]**،كما هو مبين في الشكل(I - 7).وتعطى بالعلاقة التالية:

$$\cos a = \frac{\sinh * \sin\varphi - si\ \delta}{\cosh * \cos\varphi} \qquad (I - 7)$$



الشكل(I -7):زاوية الارتفاع الشمسي والذروة و السمت الرأسي(معلم سطح أرضي)**[11]**.

I -5-5- زاوية الساعة الشمسية ω:

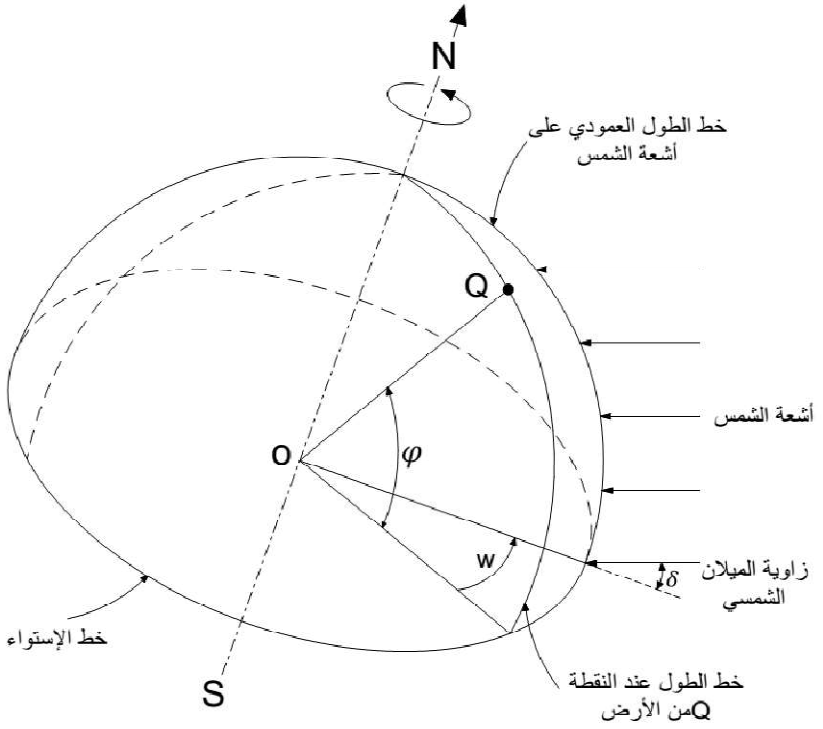
هي الزاوية الناتجة عن دوران الأرض بحيث يصبح خط الزوال في نقطة معينة موازيا لمسار الأشعة الشمسية حيث يكون: 24h=360° أو 1h=15°، مع اعتبار الزوال عند الساعة 12:00 ظهرا كنقطة البداية**[13]**. وتعطى عبارتها بالعلاقة التالية:

$$\omega = 15(\mathrm{TVs} - 12) \qquad (\ \mathrm{I}\ - 8)$$

حيث TVs هو التوقيت الشمسي الحقيقي، ويعتبر الزوال الشمسي في المنطقة عند الساعة 12:00 زوالا (ω=0) تكون سالبة صباحا وموجبة مساء، كما هو موضح في الشكل(I -8).

I -5-6- زاوية دائرة العرض للمنطقة φ :

هي زاوية تحدد موضع نقطة معينة على سطح الأرض، وتعرف بأنها الزاوية المحصورة بين خط الاستواء والخط الواصل بين مركز الأرض وتلك النقطة. تقاس هذه الزاوية على سطح الأرض، وتكون موجبة إذا كانت المنطقة شمال خط الاستواء، وسالبة إذا كانت جنوبه**[9]**. الشكل(I -8).



الشكل(I -8): زاوية الساعة الشمسية ودائرة العرض للمنطقة**[14]**.

ويتعلق التوقيت الشمسي الحقيقي (TVS) بالتوقيت المحلي للمنطقة بالعلاقة:

$$\mathrm{TVS} = \mathrm{TU} + \mathrm{Et} + \frac{L}{15} \qquad (\mathrm{I} - 9)$$

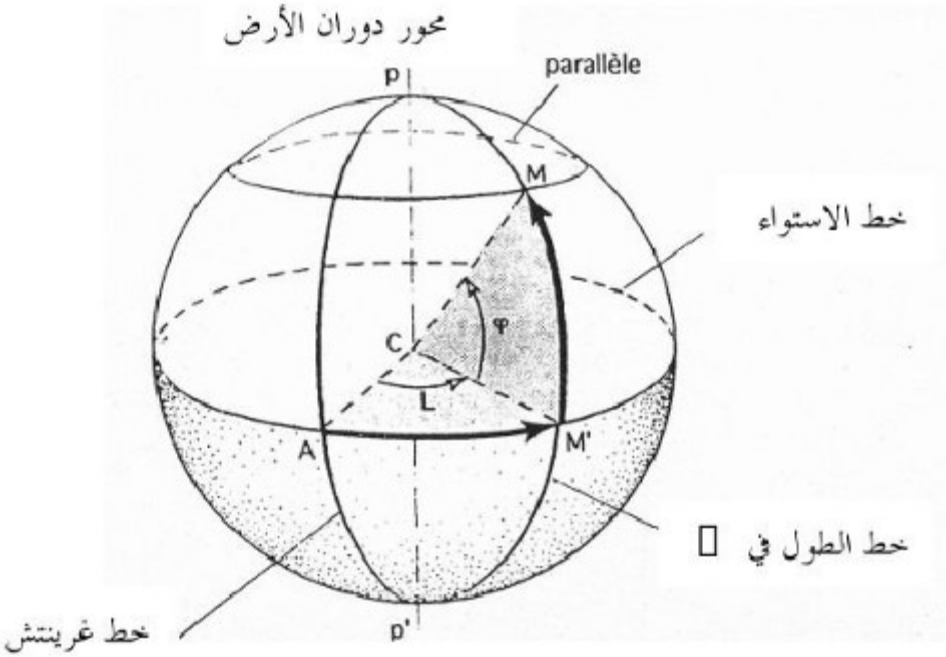
حيث TU التوقيت العالمي (خط الزوال المار عبر خط غرينيتش Greenwich)

Et: معادلة التصحيح الزمني

L: خط الطول للمنطقة حيث $L > 0$ شرقا و $\mathrm{L} < 0$ غربا

I -5-7- زاوية خط الطول L:

هي الزاوية التي يصنعها خط الطول المار بالمنطقة مع خط الطول المار ببلدة غرينيتش البريطانية الذي نعتبره خط الصفر، وتقرأ الزاوية موجبة شرقا وسالبة غربا.وتنحصر قيمتها ما بين: $L \in [-180°, +180°]$. كما هي موضحة في الشكل(I -9).



الشكل(I -9): زاوية تحديد الموقع(زاوية خط العرضφ وزاوية خط الطولL)**[9]**.

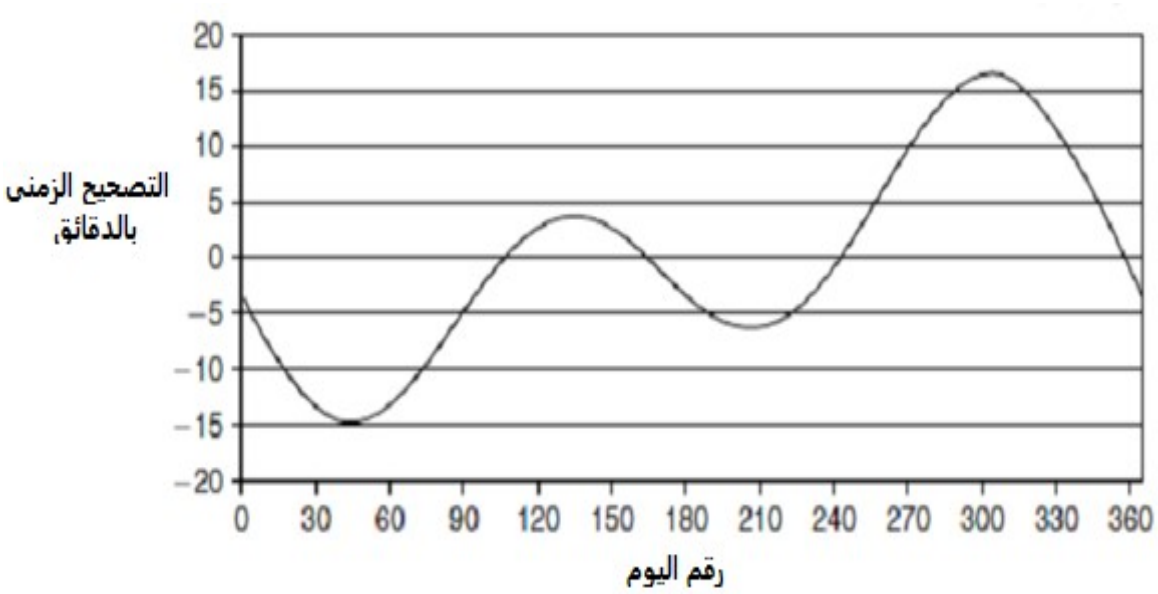
I -6- التوقيت الشمسي Tvs والمحلي T_L:

يختلف التوقيت المحلي للمنطقة عن التوقيت الشمسي ويتعلق الفرق بين التوقيتين على ثلاث عوامل:

- الفرق بين خطي الطول للمنطقة والخط المرجعي للتوقيت المحلي (خط غرينيتش).
- التصحيح الزمني (المعادلة الزمنية) ET والمعبر عن الاضطراب الناتج عن حركة الأرض والذي يعطى بالعلاقة التالية بالدقائق**[15]**:

$$ET = 9.87\sin[2.\frac{360}{365}(\mathrm{Nj}-81)] - 7.53\cos\left[\frac{360}{365}(\mathrm{Nj}-81)\right] - 1.5\sin[\frac{360}{365}(Nj-81)] \qquad (\mathrm{I}-10)$$

ويعطي البيان كما هو موضح في الشكل(I -10) تغيرات التصحيح الزمني خلال أيام السنة.



الشكل(I -10): بيان تغيرات التصحيح الزمني خلال أيام السنة**[16]**.

- تغيير التصحيح الناتج عن تغيير التوقيت المحلي (الصيفي, الشتوي) مقارنة بتوقيت غرينيتش الذي قيمته في الجزائر C=-1 وعليه تعطى علاقة التوقيت الشمسي Tvs**[17]**:

حيث L زاوية خط الطول التي تقع عليه المنطقة وتكون موجبة إذا كانت المنطقة شرق خط غرينيتش بينما تكون سالبة غرب خط غرينيتش.

والعدد 15: هو درجة لكل ساعة عند التحرك (شرق-غرب) على نفس دائرة العرض، أي 1 درجة ل4 دقائق أي مسافة(111Km) (شرق-غرب) لكل درجة عند دائرة خط الاستواء $\varphi = 0$ و (96Km) عن دائرة العرض المارة عبر مدينة ورقلة $\varphi = 31.57$.

I -7- تحديد توقيت شروق وغروب الشمس:

عند الشروق والغروب تكون زاوية الارتفاع الشمسي h تساوي صفر، مما يعني أن الشعاع الشمسي سيكون منطبقا على سطح الأرض**[18]**.

$$h = 0 \rightarrow \sin(h) = 0 \qquad (\mathrm{I} - 12)$$

ومن هنا يمكننا حساب قيمة زاوية الساعة الشمسية Ws للشروق أو الغروب:

$$Ws = \cos^{-1}(-\tan\varphi * \tan\delta) \qquad (\mathrm{I} - 13)$$

وبالتالي يكون التوقيت الشمسي للشروق:

$$TVSsunset = 12 - \frac{Ws}{15} \qquad (I - 14)$$

والتوقيت الشمسي للغروب:

$$TVSsunset = 12 + \frac{Ws}{15} \qquad (I - 15)$$

ومنه يمكننا أن نحسب مدة التشميس خلال النهار بالعلاقة التالية:

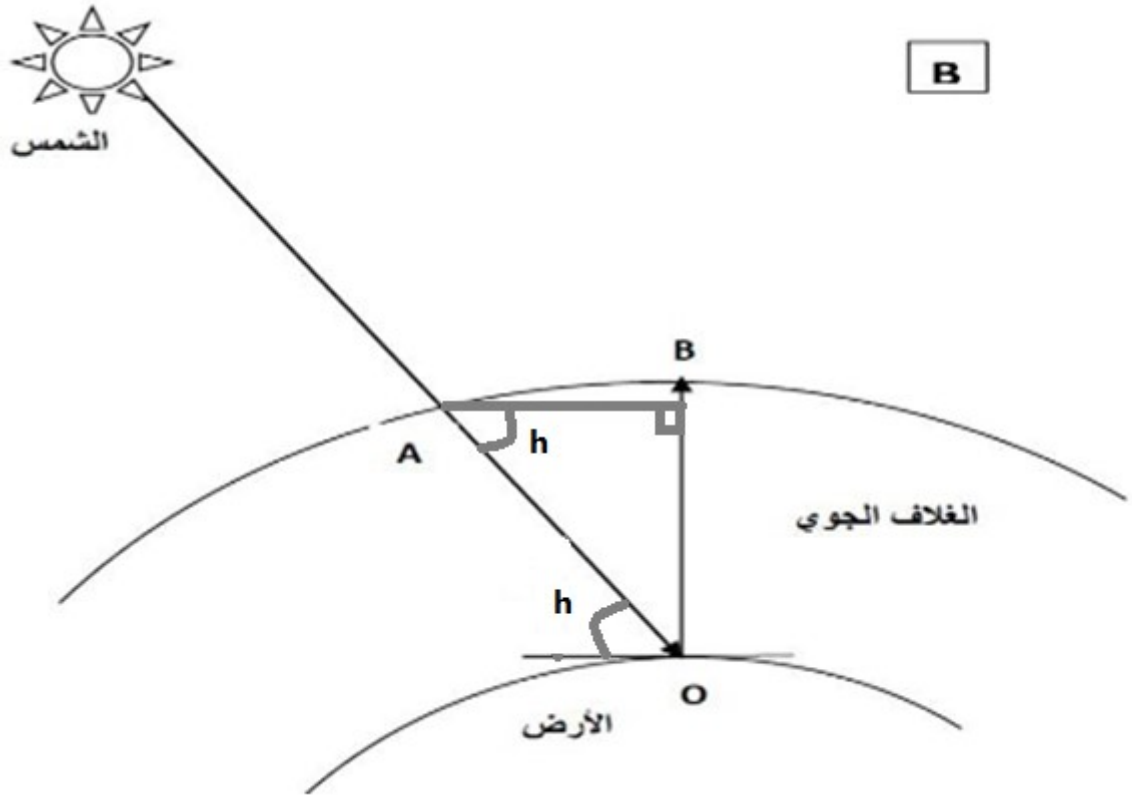
$$\Delta = 2\frac{|Ws|}{15} \qquad (I - 16)$$

I -8- الكتلة الهوائية الضوئية:

هي النسبة بين طول المسار الذي يقطعه الإشعاع الشمسي خلال الغلاف الجوي عند موقع معين على سطح الأرض، والمسار الذي يقطعه عندما تكون الشمس عمودية على الموقع، مع اعتبار أن الموقع يقع في مستوى سطح البحر**[11]**، كما يبين الشكل(I -11).

تساوي الكتلة الهوائية الضوئية واحدا عندما تكون الشمس عمودية على الموقع، وبالتالي تعطى بالعلاقة التالية:

في حالة أشعة الشمس الناظمية (h=90°) فان(AM=1).



الشكل(I -11):الكتلة الهوائية الضوئية**[11]**.

I -9- الإشعاع الشمسي على سطح الأرض:

إن الإشعاع الشمسي الذي يستقبله سطح الأرض يمثل جزءا من الطاقة المنبعثة من الشمس، والتي تخترق طبقات الغلاف الجوي المحيطة بالكوكب. يمر هذا الإشعاع عبر عدة مراحل، حيث يرتد جزء منه عائدا إلى الفضاء الخارجي، بينما يمر الجزء المتبقي إلى داخل الغلاف الجوي. يتم امتصاص كمية من هذا الإشعاع بواسطة غازات وعناصر الغلاف الجوي، ويتشتت جزء آخر نتيجة اصطدامه بالسحب وذرات الغبار، ليصل ما تبقى منه في النهاية إلى سطح الأرض بشكل مباشر، كما هو موضح في الشكل(1-12).

I -9-1- الإشعاع المباشر:

تعطى عبارة الإشعاع الشمسي المباشر القادم من الشمس إلى سطح الأرض بشكل منتظم بعد دخوله الغلاف الجوي بالعلاقة التالية**[19]**:

$$I_b = I[a_0 + a_1\, e^{-K.AM}] \qquad (\mathrm{I}-18)$$

حيث a_0 a_1 K ثوابت تجريبية تعطى من طرف *Duffie* و *Beckman* بالعلاقات التالية**[18]**:

$$a_0 = 0.94[0.4237 - 0.00821(6 - Z)^2] \qquad (\mathrm{I}-19)$$

$$a_1 = 0.98[0.5055 - 0.00595(6.5 - Z)^2] \qquad (I - 20)$$

$$K = 1.02[0.2711 - 0.01858(2.5 - Z)^2] \qquad (I - 21)$$

حيث:

Z: ارتفاع المنطقة فوق سطح البحر معبرا عنها بالكيلومتر Km.

Am: الكتلة الهوائية الضوئية.

I: الثابت الشمسي، أما في حالة الإشعاع الشمسي المباشر الذي يرتد بزاوية ***i*** على سطح مائل تعطى بالعلاقة التالية:

I_b: شدة الإشعاع المباشر الساقط عموديا.

I_{bt}: شدة الإشعاع المباشر الساقط بزاوية ميل (i).

I -9-2- الإشعاع الشمسي المنتشر:

وهو الناتج عن تشتت الإشعاع الشمسي بفعل مكونات الغلاف الجوي، وتعطى عبارته في حالة سطح أفقي بالعلاقة**[20]**:

$$I_d = I[0.2710 - 0.2939(a_0 + a_1\, e^{-K.AM})] \sin h \qquad (I - 23)$$

I –9-3- الإشعاع الكلي:

هو مجموع الإشعاع الشمسي المباشر والمنتشر ويحسب في حالة الإشعاع ناظمي $i=0$ بالعلاقة التالية:

$$G = (1270 - 56T_L)(\sin h)^{\frac{TL+36}{33}} \qquad (I - 24)$$

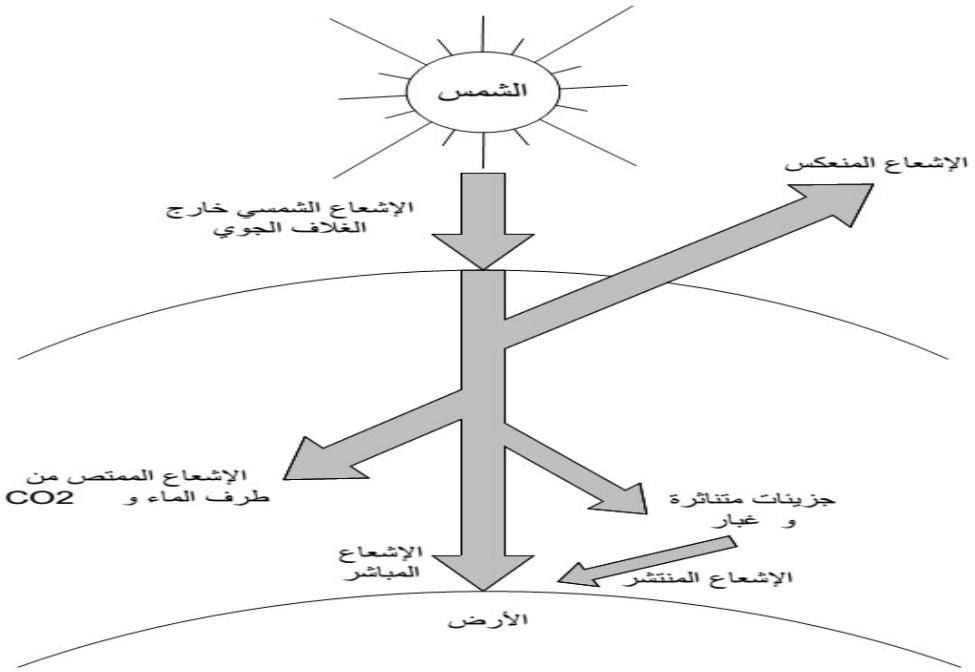
حيث T_L معامل العكارة(Atmospheric Turbidity) للغلاف الجوي، والذي به يتم تمييز الغلاف الجوي في المنطقة، ترتبط قيمته بنسبة الحبيبات الصلبة العالقة في الجو وبنسبة تواجد بخار الماء فيه. يتم حساب قيمته المتوسطة باستخدام العلاقة التالية:

$$T_L = 2.5 + 16\beta A + 0.5 ln\omega \qquad (I - 25)$$

حيث β_A معامل أنغيشتروم و ω سمك الماء المكثف وقيمتها تتغير حسب الحالة الجوية، كما هو موضح في الجدول(I -2).

الجدول(I -2): قيم معامل الاضطراب وارتفاع الماء المكثف**[21]**.

	سماء مضطربة	سماء متوسطة	سماء صافية
	0.2	0.1	0.05
	5cm	*2cm*	*1cm*



الشكل(I -12): يمثل مركبات الإشعاع الشمسي التي تصل إلى سطح الأرض**[11]**.

الخاتمة:

في هذا الفصل تم استعراض المفاهيم الأساسية المرتبطة بالإشعاع الشمسي وتفاعله مع الغلاف الجوي، حيث تبين أن الزوايا الشمسية تلعب دورا مهما في تحديد كمية الطاقة الواصلة إلى سطح الأرض، كما تم توضيح تأثير الكتلة الهوائية (AM) في تعديل شدة الإشعاع نتيجة ظواهر الامتصاص والتشتت. كما تم التطرق إلى التوزيع الطيفي للإشعاع الشمسي وأهميته في فهم الطاقة المتاحة لفهم التطبيقات المختلفة، ويمثل هذا الإطار قاعدة أساسية للانتقال إلى دراسة الخلايا الشمسية وآلية عملها.

المراجع والمصادر:

[1]-*Kreith F,Kreider JF. Principles of solar engineering. New York :Mc Graw-Hilli;1978*

[2]-DR. Saeed Jabbar Abbas; Dept.physics; Collage of Science,2024-2025.

[3]-John R. Howell,R. Bannerot, G. Vliet,"Solar-Thermal Energy Systems",

Copyright by Mc Graw - Hilli, Inc.1982.

[4] -Gueymard,C.,2004."The sun's total and spectral irradiance for solar energy

applications and solar radiation models ". Solar energy,76(4),pp.423-453.

[5] -Rahmani Djalloul, Analyse d'un systéme de concentration solaire Pour La

Production d'hydrogéne (cas de l'Algerie),Mémoire Magister, Université Hassiba Benbouali-Chlef,2011-2012.

[6]- Capdrou. M,1987. Atlas Solaire de l'Algérie, Modèles Théoriques et Expérimentaux. Volumel, Tome 2; Office des Publications Universitaires ,Algérie.

[7]- JA Duffie, w a Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, edited by JohnWiley & Sons ,2013.

[8]- مريم ازهر علي غالب، تقييم كفاءة خلية شمسية من مادة السيليكون ذات أخاديد مختلفة الشكل باستخدام برنامج، زيماكس.

[9]- Gisomont Slaire Et Transferts En Ergetique. Alian. Ricaud.Jan2011.

[10]- Yves Jannot, Thermique Solaire, October2003.

[11]- سوداني محمد البار، تحقيق علمي لمركز شمسي أسطواني مكافئ ذي غطاء زجاجي، أطروحة دكتوراه، جامعة ورقلة، 2018.

[12]-Solar Electricity", Second edition, University of Tomas Markvart,"

Southamton, UK, Madrid, Jon Wiley and sons Ltd. ISBN,2000.

[13]-الطاقة الشمسية، مجلة علمية، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم التقنية سبتمبر 1995.

[14]-stine,W.B., and Harrigan,R.W.,1985. Solar Energy Fundamentals and Design:

With Computer Applications. Wiley-Interscience, Apr.

[15]-Woolf, H. M.,1968."On the Computation of Solar Evaluation Angles and the

Determination of Sunrise and Sunset Times". National Aeronautics and Space Administration Report NASA TM-X-164, USA.

[16]- S. a. Kalogirou, Solar Energy Engineering: Proesses and Systems, second Edi. 2013,p.840.

[17]-الطاقة الشمسية و استخداماتها–محمد أحمد سيد خليل– دار الكتب العلمية لنشر والتوزيع القاهرة

[18]- Iqbal, M., "An Introduction to Solar Radiation ", Academic, Toronto(1983).

[19] -Shah A.,S. C. Kaushik,S.N Garg,"Computation of beam Solar Radtiation at Normal Incidence Using Artificial Neural Network ", Renewable Energy 31 (2006)1483-1491.

[20]-Geyer M., Stine B. William "Power from the Sun" Copyright©2001 by J.T.Lyle Center.

[21]- Pierre Henir Communay. Héliothermique le gisement solaire methods et calculs, ISBN 2-84139-036-5(France) ,2002.

الفصل الثاني

الخلية الشمسية

مقدمة:

تعد أنصاف النواقل من الركائز الأساسية في فيزياء المواد والإلكترونيات الحديثة، حيث تتميز بخصائص كهربائية وسيطة بين المواد الموصلة والعازلة، مما يسمح بالتحكم في حركة الشحنات الكهربائية داخلها بدقة عالية. وقد أدى ذلك إلى استخدامها الواسع في العديد من التطبيقات التكنولوجية.

ومن أهم تطبيقات أنصاف النواقل الخلايا الشمسية، التي تعتمد على تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية عبر ظاهرة التأثير الكهروضوئي في الوصلات نصف الناقلة. وتعد هذه التقنية من أبرز مجالات استغلال الطاقات المتجددة، نظرا لاعتمادها على مصدر طاقة مستمر ومتجدد. وفي هذا الفصل سيتم التطرق إلى البنية الفيزيائية لأنصاف النواقل وخصائصها، ثم دراسة مبدأ عمل الخلايا الشمسية والعوامل المؤثرة على أدائها.

II -1- المواد نصف ناقلة:

تعرف بأنها مواد عازلة عند درجات الحرارة المنخفضة، لكنها تمتلك قدرة على التوصيل الكهربائي عند ارتفاع درجة حرارتها. وتتأثر توصيلية شبه الموصل بعوامل خارجية مثل الضوء والمجال الكهرومغناطيسي، وتؤثر فيها كذلك وجود كميات ضئيلة من الذرات الشائبة **[1]**.

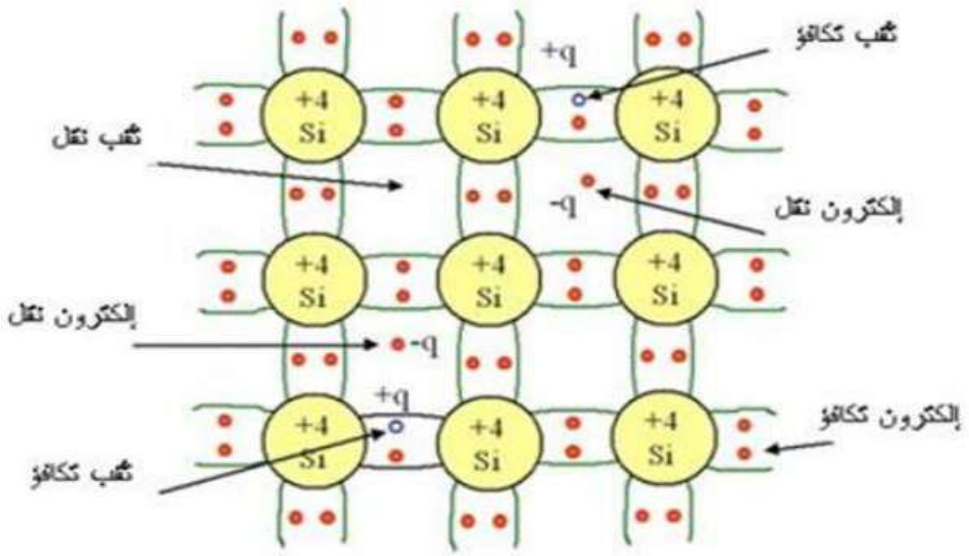
وتتميز هذه المواد بتركيب بلوري منتظم، حيث ترتبط ذراتها بروابط تساهمية، أي أن إلكترونات التكافؤ تكون مرتبطة داخل الشبكة البلورية. وعند درجات حرارة منخفضة جدا قريبة من الصفر المطلق (273- درجة مئوية) تكون هذه الإلكترونات مرتبطة ولا يحدث توصيل، لكن عند تزويدها بطاقة حرارية تتحرر بعض الإلكترونات وتنتقل إلى نطاق التوصيل تاركة فجوات، مما يسمح بمرور التيار الكهربائي**[2]**.

كما أن للمواد نصف الناقلة أهمية كبيرة في التطبيقات الإلكترونية، نظرا لحساسيتها الكبيرة للتغيرات الخارجية. ويمكن التحكم في خصائصها بإضافة شوائب بكميات مدروسة فيما يعرف بعملية التطعيم، مما يؤدي إلى زيادة عدد حاملات الشحنة. ومن أشهر هذه المواد السيليكون Si والجرمانيوم Ge. ويستعملان بشكل واسع في الصناعة الإلكترونية**[3]**.

II -2- أنواع أنصاف النواقل:

II -2-1- نصف الناقل النقي:

هو مادة تكون عازلة عند درجة حرارة الصفر المطلق، لكنها تمتلك قدرة على التوصيل الكهربائي عند ارتفاع درجة حرارتها أو عند وجود كميات ضئيلة من الذرات الشائبة أو حدوث عيوب في تركيبها البلوري، وطبقا لنظرية الحزم في المواد الصلبة، تحتوي هذه المواد على حزمتين من الطاقة: حزمة التكافؤ التي تكون ممتلئة تماما بالإلكترونات ، وحزمة التوصيل التي تكون فارغة. وعند رفع درجة الحرارة إلى قيمة أعلى من الصفر المطلق، تكتسب بعض الإلكترونات طاقة كافية أكبر أو مساوية لطاقة فجوة الحزم، فتنتقل من حزمة التكافؤ إلى حزمة التوصيل. وتترك وراءها أماكن شاغرة تسمى فجوات. وبهذا يتولد عدد متساو من الإلكترونات والفجوات، أي أن كثافة الإلكترونات في حزمة التوصيل تساوي كثافة الفجوات في حزمة التكافؤ. يمثل الشكل (II -1) بلورة سيلكون نقية ونتيجة ارتفاع درجة الحرارة استطاع إلكترون التكافؤ أن يخرج من مداره ليصبح إلكترونا حر الحركة وترك مكانه السابق بتواجد ثقب وتكسير الرابطة التساهمية في موضع تكوين الثقب، إن زيادة درجة الحرارة تؤدي إلى زيادة توالد أزواج الإلكترونات والثقوب وبالتالي زيادة التيار**[4]**.



الشكل(Ⅱ-1): رسم بياني لبلورة سيليكون نقي والروابط الإلكترونية فيه.

- مستوى فيرمي في شبه الموصل النقي:

يعرف مستوى فيرمي بأنه مستوى الطاقة الذي تكون عنده احتمالية إشغال الحالة الإلكترونية بالإلكترونات مساوية لـ50% عند التوازن الحراري. ويعطى بالعلاقة الآتية:

$$Ef = \frac{EC+EV}{2} + \frac{3}{4} KT\ ln\left(\frac{mh}{me}\right) \qquad (\text{Ⅱ} - \mathbf{1})$$

إذ أن:

Ec: مستوى الطاقة عند حافة حزمة التوصيل.

Ev: مستوى الطاقة عند حافة حزمة التكافؤ.

K: ثابت بولتزمان.

mh: الكتلة الفعالة للفجوات.

me: الكتلة الفعالة للإلكترونات.

وعندما تكون (me=mh) فإن مستوى فيرمي يكون في وسط فجوة الطاقة الممنوعة.

$$Ef = \frac{EC+EV}{2} \qquad (\text{Ⅱ} - \mathbf{2})$$

- و عند اختيار حافة حزمة التكافؤ مرجعا للطاقة (Ev=0) ، يصبح مستوى فيرمي في منتصف فجوة الطاقة ويعطى بالعلاقة:

$$Ef = \frac{\text{Eg}}{2} \qquad (\text{Ⅱ} - \mathbf{3})$$

إذ أن Eg : فجوة الطاقة. **[5]**

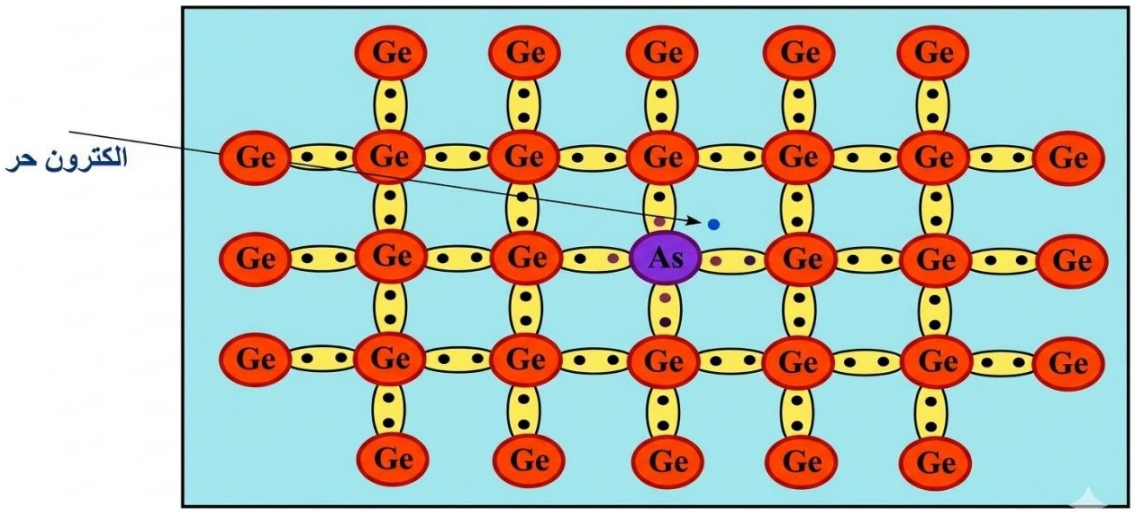
II - 2-2- نصف الناقل الغير نقي(المطعم):

هي عبارة عن مواد شبه موصلة نقية أضيفت إليها كميات دقيقة ومدروسة من ذرات مادة أخرى تسمى "الشوائب"، وذلك عبر عملية تقنية تعرف ب "التطعيم". تهدف هذه العملية إلى إحداث تعديل عميق وجذري في الخصائص الكهربائية للمادة الأصلية، حيث تعمل الذرات المضافة (سواء كانت خماسية أو ثلاثية التكافؤ) على زيادة كثافة حاملات الشحنة من إلكترونات وفجوات بصورة كبيرة تفوق تلك الناشئة حراريا، مما يرفع من كفاءة الناقلية النوعية للمادة ويجعلها صالحة للاستخدام في التطبيقات الإلكترونية (الدايودات والترانزستورات وما إلى ذلك). وتتم عملية التطعيم عادة بنسبة ضئيلة جدا تقدر بذرة شائبة واحدة لكل مليون ذرة من المادة النقية، وهو ما يكفي لتغيير السلوك الكهربائي للمادة دون المساس بخصائصها الفيزيائية والكيميائية الأساسية. وبناء على نوع الشوائب المضافة وطبيعة حاملات الشحنة المسيطرة، يوجد نوعان رئيسيان من أشباه الموصلات غير النقية وهما: النوع (N) والنوع (P)**[6] [7]**.

II -2-2-1- شبه الموصل من النوع N :

يتميز بأن عملية التوصيل الكهربائي فيه تعتمد بشكل أساسي على الإلكترونات الحرة، والتي تمثل حاملات الشحنة الأكثرية، في حين تعتبر الفجوات في هذا النوع حاملات شحنة أقلية. ورغم وفرة الشحنات الحرة السالبة، إلا أن البلورة في مجملها تظل متعادلة كهربائيا.

ويتم تحضير هذا النوع عن طريق تطعيم مادة شبه موصلة نقية (مثل السيليكون أو الجرمانيوم) بذرات شوائب خماسية التكافؤ، ومن أمثلتها: الفسفور، الزرنيخ، أو الأنتيمون. وتعتمد آلية التفاعل على ارتباط أربعة من إلكترونات التكافؤ للذرة الشائبة مع ذرات شبه الموصل المجاورة بروابط تساهمية، بينما يتبقى الإلكترون الخامس حرا (ذو شحنة سالبة)، حيث ينتقل بسهولة إلى عصابة النقل ليساهم بفعالية في عملية التوصيل الكهربائي**[7][8]**.

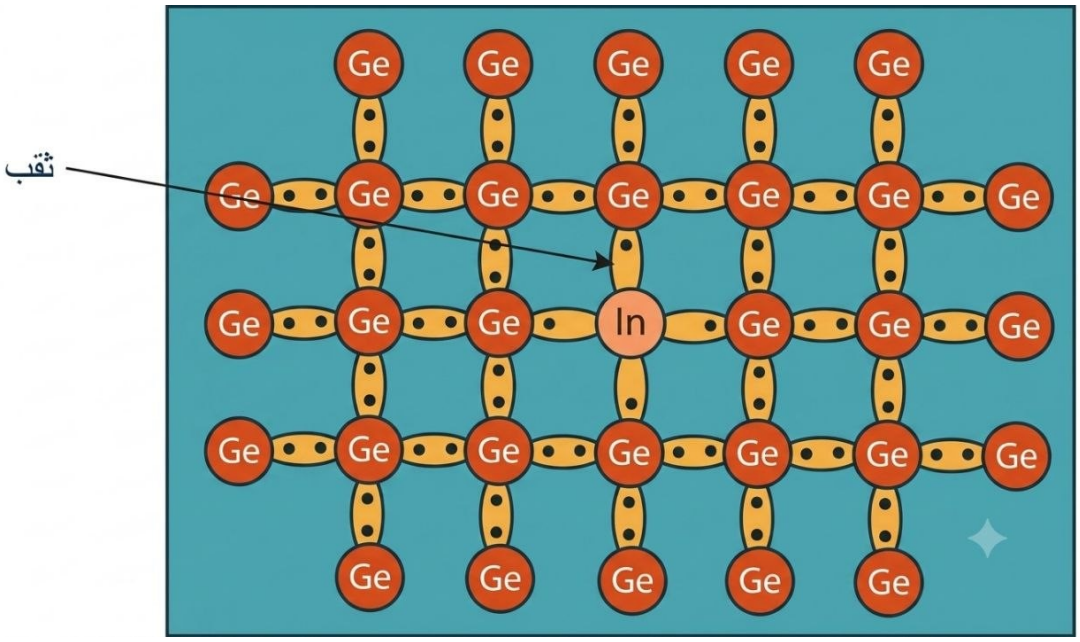


الشكل(II -2): بلورة الجرمانيوم المطعمة بالزرنيخ (شبه موصل من النوع N).

II -2-2-2- شبه الموصل من النوع P:

تصنع أشباه الموصلات من النوع P عن طريق تطعيم بلورة شبه موصل نقي (مثل السيليكون أو الجرمانيوم) بذرات شوائب ثلاثية التكافؤ(أي تمتلك ثلاثة إلكترونات في مدارها الأخير)، ومن أمثلتها:الإنديوم أوالبورون أوالألمنيوم أوالغاليوم.

وتعتمد آلية التفاعل هنا على قيام هذه الذرات الثلاثية بتكوين ثلاث روابط تساهمية فقط مع ذرات شبه الموصل المجاور، مما يترك رابطة رابعة غير مكتملة. هذا النقص يؤدي إلى نشوء ما يسمى ب "الفجوة"، وهي موقع شاغر يمتلك شحنة موجبة قوية تجذب الإلكترونات من الروابط المجاورة. في هذا النوع تعد الفجوات هي حاملات الشحنة الأكثرية والمسؤولة بشكل أساسي عن التيار الكهربائي، في حين تمثل الإلكترونات الحرة حاملات الشحنة الأقلية. ومع زيادة تركيز ذرات الشوائب المضافة، يزداد عدد الفجوات المتولدة، مما يؤدي إلى رفع الناقلية الكهربائية للبلورة. ورغم ذلك، تظل البلورة في مجملها متعادلة كهربائيا، حيث تتحول ذرات الشوائب إلى أيونات سالبة ثابتة داخل الهيكل البلوري**[7][8]**.



الشكل(II -3): بلورة الجرمانيم المطعمة بالإنديوم(شبه موصل من النوع P).

II -2-2-3- الوصلة الثنائية P-N:

تتكون الوصلة الثنائية PN من بلورة شبه موصل مطعمة جزئيا بشوائب مانحة (من النوع N) وأخرى مستقبلة (من النوع P). عند وضع المنطقتين في تماس، تنتقل الإلكترونات من منطقة N نحو منطقة P بينما تنتقل الفجوات في الاتجاه المعاكس من خلال طبقة تسمى طبقة النفاذ(هي المنطقة الفاصلة بين الثقوب والإلكترونات الحرة المنتشرة على طرفي الوصلة)، ويكون هذا الانتقال من الأكثر تركيز إلى الأقل تركيز. مما يؤدي إلى حدوث تيار انتشار. نتيجة لذلك تتكون قرب الحد الفاصل منطقة تسمى منطقة الاستنزاف تخلو تقريبا من الحوامل الحرة، وتحتوي على أيونات موجبة وسالبة ثابتة مكانيا. ينشأ عبر هذه المنطقة مجال كهربائي داخلي يعاكس حركة الانتشار، ويؤدي إلى ظهور فرق جهد يعرف بجهد الحاجز. عند تحقيق التوازن تتساوى تيارات الانتشار والانجراف، فينعدم التيار الصافي. في حالة الاستقطاب الأمامي ينخفض عرض منطقة الاستنزاف ويزداد مرور التيار، بينما في الاستقطاب العكسي يزداد عرضها وترتفع مقاومة الوصلة، ولا يسمح إلا بمرور تيار تسرب ضعيف جدا**[9][10][11]**.

II -3- الخلية الشمسية:

تعرف الخلية الشمسية على أنها جهاز فوتوفولطائي يقوم بتحويل الطاقة الضوئية القادمة من الشمس مباشرة إلى طاقة كهربائية قابلة للاستعمال. وتعتمد الخلية في عملها على الخاصية الكهروضوئية للمواد شبه الموصلة، إذ تتكون أساسا من وصلة ثنائية (PN) ناتجة عن دمج نصف ناقل من النوع (P) مع نصف ناقل من النوع (N). عند تعرض الخلية للإشعاع الشمسي، تمتص الفوتونات طاقتها، وإذا كانت هذه الطاقة كافية لتجاوز (فجوة الطاقة) فإنها تحرر الإلكترونات من الروابط الذرية، مما يؤدي إلى تكون أزواج (إلكترون- فجوة). وبفضل المجال الكهربائي الداخلي في منطقة الوصلة، تنفصل هذه الشحنات الكهربائية وتتجه نحو الأقطاب المختلفة، حيث تتجمع عند السطحين الأمامي والخلفي للخلية. فتتولد بذلك قوة دافعة كهربائية يمكن استغلالها في دوائر خارجية لتوفير تيار كهربائي مستمر. تستخدم الخلايا الشمسية في تطبيقات متعددة (كالقطاع الزراعي، الصناعي والطبي...)، ما يجعلها من أهم تقنيات الطاقات المتجددة في الوقت الراهن**[12][13][14]**.

II -3-1- تركيب (بنية) الخلية الشمسية:

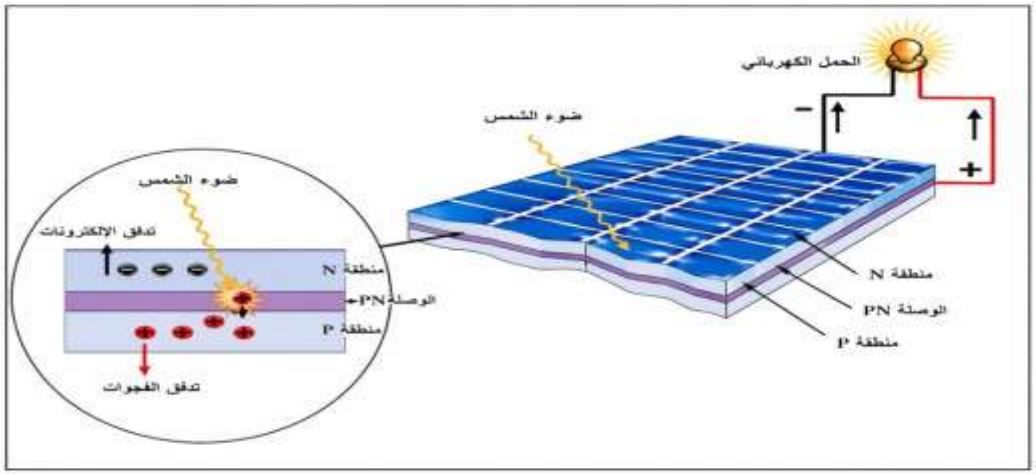
تتكون الخلية الشمسية من عدة طبقات من المواد شبه الموصلة، وغالبا ما يستعمل السيليكون كمادة أساسية في تصنيعها. توضع على سطح الخلية طبقة مضادة للانعكاس تهدف إلى تقليل انعكاس الإشعاع الشمسي وزيادة كمية الضوء الممتص. أسفل هذه الطبقة توجد طبقتان من شبه الموصل، الأولى من النوع N المطعم بشوائب مانحة للإلكترونات، والثانية من النوع P المطعم بشوائب مستقبلة للإلكترونات. عند تماس هاتين الطبقتين تتشكل وصلة PN التي تلعب دورا أساسيا في فصل الشحنات الكهربائية المتولدة نتيجة امتصاص الضوء. كما تحتوي الخلية الشمسية على أقطاب كهربائية أمامية، تصمم عادة شكل أصابع معدنية دقيقة (Finger-like grid) لتقليل حجب الضوء الساقط مع ضمان جمع الشحنات بكفاءة، بالإضافة إلى أقطاب خلفية، و تعمل جميعها على جمع الشحنات ونقل التيار الكهربائي نحو الدارة الخارجية**[15][16]**.

II -3-2- وظيفة الخلية الشمسية:

تعد الخلية الشمسية من أهم تطبيقات الطاقات المتجددة، حيث تتمثل وظيفتها الأساسية في تحويل الطاقة الضوئية القادمة من الشمس إلى طاقة كهربائية بشكل مباشر. تعتمد هذه العملية على ظاهرة التأثير الكهروضوئي التي تحدث في المواد شبه الموصلة، حيث يؤدي سقوط الفوتونات على سطح الخلية إلى تحرير الإلكترونات وتوليد أزواج (إلكترون-فجوة) داخل المادة. وبفضل وجود مجال كهربائي داخلي في الوصلة الثنائية، يتم فصل هذه الشحنات وتوجيهها نحو الأقطاب، مما يسمح بمرور تيار كهربائي في الدارة الخارجية واستغلاله في تشغيل مختلف الأجهزة الكهربائية**[17]**.

II -3-3- مبدأ عمل الخلية الشمسية:

تعتمد الخلية الشمسية في عملها على ظاهرة التحويل الكهروضوئي، حيث تتكون أساسا من وصلة ثنائية من نوع PN ذات مساحة مناسبة لاستقبال الإشعاع الشمسي. عند سقوط الفوتونات الضوئية على سطح الخلية يمتص جزء منها داخل المادة شبه الناقلة، مما يؤدي إلى إثارة الإلكترونات وانتقالها من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل، وبالتالي تتولد أزواج من الإلكترون-الثقب. نتيجة لوجود المجال الكهربائي الداخلي في منطقة الوصلة PN يتم فصل هذه الأزواج، حيث تتجه الإلكترونات نحو المنطقة N بينما تنتقل الثقوب نحو المنطقة P. يؤدي هذا الانفصال إلى حركة الشحنات الكهربائية عبر الدارة الخارجية، مما يولد تيارا كهربائيا يعرف بالتيار الكهروضوئي، والذي تزداد شدته بزيادة شدة الإشعاع الساقط على الخلية**[18]**.

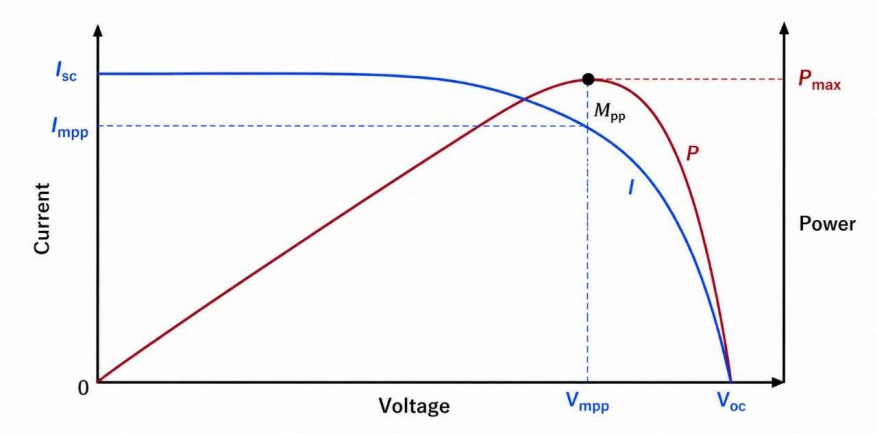


الشكل(II -4): آلية عمل الخلية الشمسية**[19]**.

II -4-3- الخواص الكهربائية للخلية الشمسية:

تتميز الخلية الشمسية بمجموعة من الخصائص الكهربائية التي تحدد أداءها عند تعرضها للإشعاع الشمسي، حيث تعتمد هذه الخصائص على شدة الإضاءة ودرجة الحرارة وطبيعة المادة شبه الموصلة المستعملة في تصنيع الخلية.

عند سقوط الضوء على الخلية الشمسية تتولد أزواج إلكترون- فجوة نتيجة الظاهرة الكهروضوئية، مما يؤدي إلى توليد تيار كهربائي وفرق جهد بين طرفي الخلية، ويمكن تمثيل العلاقة بين التيار والجهد بواسطة منحنى التيار-الجهد (I-V Curve) ومنحنى الاستطاعة (P-V curve) الذي يوضح أهم القيم المميزة للخلية**[20]**. كما يوضح الشكل(II -5)**[21]**.



الشكل(II -5): يمثل منحنيات الخصائص الكهربائية (I-V) و(P-V) للخلية الشمسية.

- ومن أهم الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية تيار القصر(I_{sc}) وهو أكبر قيمة للتيار يمكن أن تعطيها الخلية عندما يكون الجهد بين طرفيها مساويا للصفر، أي عند حدوث قصر في الدارة الكهربائية. وتزداد قيمة تيار القصر بزيادة شدة الإشعاع الشمسي الساقط على سطح الخلية، كما تتأثر بمساحة الخلية ودرجة حرارتها**[22]**.

- أما جهد الدارة المفتوحة (V_{oc}) فهو أكبر قيمة للجهد يمكن الحصول عليها عندما تكون الدارة مفتوحة ولا يمر أي تيار في الحمل، وفي هذه الحالة يكون التيار مساويا للصفر. تتغير قيمة جهد

الدارة المفتوحة بشكل طفيف مع تغير شدة الإشعاع، لكنها تتأثر بدرجة الحرارة حيث تنخفض بارتفاعها**[22]**.

- كما توجد نقطة مهمة على منحنى التيار-الجهد تسمى نقطة الاستطاعة العظمى (Maximum Power Point-MPP)، وهي النقطة التي تكون عندها القدرة الكهربائية المنتجة من الخلية أكبر ما يمكن. عند هذه النقطة يكون لكل من التيار والجهد قيمتان خاصتان تسمى Impp و Vmpp، وتحسب القدرة بالعلاقة**[23]**:

$$Pmax = Vmp \times Imp \qquad (\text{II} - 4)$$

وتستعمل هذه النقطة لتحديد أفضل حالة تشغيل للخلية الشمسية.

- الدارة المكافئة للخلية:

الخلية الشمسية في الظلام هي صمام ثنائي. في الحالة المثالية، لذلك فإن التيار المار فيها يوصف بمعادلة شوكلي للديود. يعطى التيار المتدفق في الخلية بالعلاقة**[24]**:

$$I = Is\left[exp\left(\frac{q.V}{n.K.T}\right) - 1\right] \qquad (\text{II} - 5)$$

حيث Is: تيار التشبع العكسي

عند سقوط الضوء على الخلية، يتولد تيار ضوئي Iph يعاكس اتجاه تيار الديود، وبحسب قانون كيرشوف للتيارات يكون:

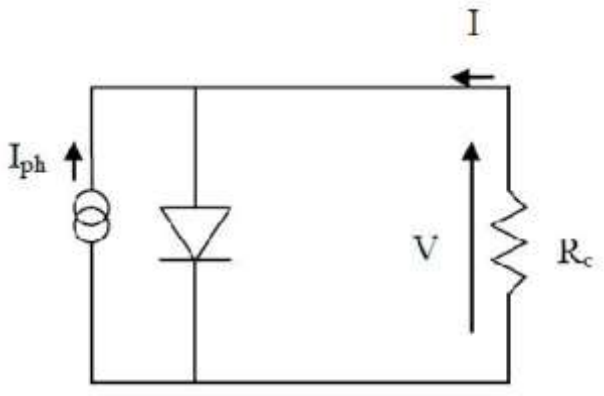
$$I = I_{ph} - I_D$$

وبالتعويض عن تيار الديود من معادلة شوكلي:

$$I_D = Is\left[exp\left(\frac{q.V}{n.K.T}\right) - 1\right]$$

نحصل على:

$$I = I_{ph} - Is\left[exp\left(\frac{q.V}{n.K.T}\right) - 1\right] \qquad (\text{II} - 6)$$



الشكل(II -6): دائرة مكافئة لخلية شمسية

Rc: مقاومة الحمل المتصل بالخلية.

في الواقع، يجب إضافة مقاومة متسلسلة كهربائية Rs لتمثيل مقاومة أسلاك التوصيل. ويجب إضافة المقاومة الموازية Rp والذي يأخذ في الاعتبار الدوائر القصيرة في الخلية (الشكل). ترجع هذه الدوائر القصيرة في الخلية إلى تنظيم المواد وإلى التيارات الضائعة .

n: عامل المثالية للدايود.

حسب قانون أوم، يكون تيار التسرب عبر المقاومة المتوازية:

كما يصبح الجهد المطبق على الديود:

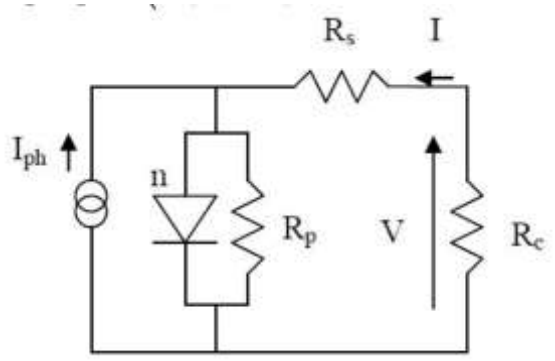
ومن ثم يصبح تيار الديود:

$$I = Is\left[exp\left(\frac{q(V+IRs)}{n.K.T}\right) - 1\right]$$

وبتطبيق قانون كيرشوف للتيارات:

وبالتعويض عن I_D و I_P نحصل على:

$$I = I_{ph} - I_s\left[exp\left(\frac{q(V+IRs)}{n.K.T}\right) - 1\right] - \frac{V+IRs}{Rp} \qquad (\text{II} - 7)$$



الشكل(II -7): الدائرة المكافئة لخلية شمسية

- ومن الخصائص المهمة كذلك معامل الشكل (Fill Factor-FF) الذي يعبر عن جودة الخلية الشمسية، ويحسب من نسبة القدرة العظمى إلى حاصل ضرب تيار القصر في جهد الدارة المفتوحة كالآتي**[25]**:

$$FF = \frac{Pmax}{\text{PT}} = \frac{Vmax \times Imax}{\text{VCO} \times \text{Ic}} \qquad (\text{II} - 8)$$

وكلما كانت قيمته أكبر كانت الخلية ذات مردود أفضل.

II -3-5- مردود الخلية الشمسية:

يعد المردود (η) المعيار الأساسي لتقييم جودة الخلية الشمسية، ويعبر عن قدرة الخلية على تحويل الطاقة الضوئية الممتصة إلى طاقة كهربائية مفيدة. ويعطى رياضيا بنسبة الاستطاعة الكهربائية القصوى (Pmax) واستطاعة الإشعاع الشمسي الساقط (Pin)، وفق العلاقة التالية:

$$\eta = \frac{\text{Pmax}}{\text{Pin}} = \frac{V_{CO}.\text{Icc.FF}}{\text{G.S}} \qquad (\text{II} - 9)$$

حيث أن: S: سطح الخلية(m^2)

G: شدة الإشعاع(W/m^2)

حيث أن قيمة المردود تتأثر مباشرة بالخصائص الأساسية للخلية الشمسية:

Voc: جهد الدارة المفتوحة.

Isc: تيار الدارة القصيرة.

FF: عامل الشكل(Fill Factor).

من الناحية التقنية، يتغير هذا المردود بتغير حمولة الدارة الكهربائية، فهو ينعدم في حالتي الدارة المفتوحة (I=0) والدارة القصيرة (V=0). ويصل إلى قيمته المثلى فقط عند نقطة الاستطاعة القصوى**[26]**.

II -3-6- أنواع الخلية الشمسية :

تصنف الخلايا الشمسية عادة حسب نوع المادة شبه الموصلة المستعملة في تصنيعها، حيث يجب أن تمتلك هذه المواد خصائص فيزيائية وكهربائية تسمح بامتصاص ضوء الشمس وتحويله إلى طاقة كهربائية بكفاءة جيدة. وتختلف أنواع الخلايا الشمسية من حيث طريقة التصنيع، السمك، الكفاءة، والتكلفة، لذلك تم تطوير عدة تقنيات من أجل تحسين أداء الخلايا وتقليل تكلفة إنتاجها**[8][27]**.

يمكن أن تصنع الخلايا الشمسية من طبقة واحدة من مادة ماصة للضوء، أو من عدة طبقات مختلفة تستعمل لزيادة امتصاص الإشعاع الشمسي وتحسين عملية فصل الشحنات الكهربائية، كما أن بعض الخلايا تصمم للعمل في الظروف العادية على سطح الأرض، في حين يتم تطوير أنواع أخرى لتستعمل في تطبيقات خاصة تتطلب كفاءة عالية أو وزنا خفيفا.

وبشكل عام تقسم الخلايا الشمسية إلى ثلاثة أجيال رئيسية، يختلف كل جيل عن الآخر من حيث المواد المستعملة وتقنيات التصنيع ودرجة الكفاءة، وهي الجيل الأول، والجيل الثاني، والجيل الثالث، وسيتم التطرق إلى هذه الأجيال بالتفصيل في الفقرات التالية**[8][28]**.

أولا: الجيل الأول- خلايا السيليكون البلوري:

يعتبر الجيل الأول من الخلايا الشمسية الأكثر استعمالا في الأنظمة الكهروضوئية، حيث تصنع أساسا من السيليكون البلوري (Crystalline Silicon)، الذي يتميز بقدرته العالية على تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية.

تشمل هذه الخلايا نوعين رئيسيين هما السيليكون أحادي البلورة(Mono-Si) والسيليكون متعدد البلورات (Poly-Si)، وتتميز بكفاءة تحويل مرتفعة وعمر افتراضي طويل مقارنة بباقي الأنواع.

ورغم أن هذا النوع يتميز بنسبة كفاءة مستقرة ومرتفعة نسبيا مقارنة بغيره من التقنيات التجارية، إلا أن عملية تصنيعه تتطلب كمية كبيرة من السيليكون وتقنيات معقدة، مما يؤدي إلى ارتفاع تكلفة الإنتاج، لذلك تعتبر خلايا الجيل الأول الأعلى كفاءة والأكثر انتشارا في التطبيقات العملية **[8] [29][30]**.

ثانيا: الجيل الثاني- الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة:

ظهر الجيل الثاني من الخلايا الشمسية من أجل تقليل تكلفة التصنيع واستهلاك المواد، ويعتمد على تقنية الأغشية الرقيقة(Thin Film)، حيث يتم ترسيب طبقات رقيقة من المواد شبه الموصلة فوق قواعد زجاجية أو بلاستيكية باستعمال تقنيات حديثة.

تتميز هذه الخلايا بخفة الوزن وسهولة التصنيع وإمكانية استخدامها في تطبيقات متعددة، كما تحتاج إلى كمية أقل من المادة الفعالة مقارنة بخلايا الجيل الأول. ومن أشهر أنواع هذا الجيل السيليكون غير المتبلور(a-Si)، وتيلوريد الكادميوم(CdTe)، وسيلينيد النحاس والإنديوم والغاليوم(CIGS).

لكن كفاءة هذه الخلايا تكون أقل نسبيا بسبب صغر سماكة الطبقة الماصة للضوء، مما يؤدي إلى امتصاص أقل للإشعاع الشمسي مقارنة بالخلايا البلورية**[8][28][31]**.

ثالثا: الجيل الثالث- الخلايا الشمسية المتطورة:

يمثل الجيل الثالث من الخلايا الشمسية مرحلة متقدمة في تطوير تكنولوجيا الخلايا الكهروضوئية، حيث يعتمد على مواد وتقنيات حديثة مازالت في طور البحث والتطوير، وتهدف هذه التقنيات إلى تقليل تكلفة الإنتاج وتحسين كفاءة التحويل الطاقوي مقارنة بالأجيال السابقة.

يتميز هذا الجيل بإمكانية تصنيع خلايا خفيفة الوزن ومرنة، حيث يمكن ترسيب الطبقات الفعالة على قواعد بلاستيكية أو مواد رقيقة، مما يسمح باستخدامها في التطبيقات المحمولة والأسطح المنحنية، كما تتميز بسهولة التصنيع وانخفاض استهلاك المواد شبه موصلة**[8]**.

ومن أهم أنواع خلايا الجيل الثالث الخلايا الشمسية الصبغية (DSSC)، والخلايا العضوية (Polymer Solar Cells)، وخلايا النقاط الكمومية (Quantum Dot Cells)، إضافة إلى خلايا البيروفسكايت(Perovskite Solar Cells)، التي تعتمد على مواد ذات بنية بلورية من الصيغة العامة ABX_3 ، وقد سميت بهذا الاسم نسبة إلى معدن تيتانات الكالسيوم ($CaTiO_2$)الذي يمتلك نفس البنية البلورية. ومن أشهر المواد المستخدمة في هذا لنوع هاليد الرصاص السيزومي ($CsPbI_3$)، وتمتاز هذه الخلايا بكفاءة تحويل مرتفعة مقارنة بباقي خلايا الجيل الثالث، إلا أنها لا تزال تواجه تحديات تتمثل في سمية الرصاص ومشكلة عدم الاستقرار، خاصة عند التعرض للرطوبة والحرارة**[31]**.

ورغم المزايا التي يتميز بها هذا النوع إلا أن كفاءته مازالت أقل في بعض الأنواع مقارنة بخلايا السيليكون البلوري، كما أن العمر الافتراضي لهذه الخلايا يكون عادة أقصر بسبب تأثر المواد المستعملة بالعوامل الخارجية كالرطوبة ودرجة الحرارة، لذلك مازالت هذه الخلايا في مرحلة التطوير والتجارب لتحسين أدائها وزيادة استقرارها على المدى الطويل**[27][28]**.

II -3-7- مختلف عيوب الخلايا الشمسية (Drawbacks):

تتفاوت العيوب حسب التقنية المستخدمة، وأهمها:

- التكلفة العالية: خاصة في خلايا السيليكون البلوري بسبب استهلاك الطاقة الكبير في عمليات التنقية والتصنيع**[29][32]**.
- السمية والندرة: استخدام مواد سامة مثل "الكادميوم" في خلايا CdTe، أو مواد نادرة وغالية في القشرة الأرضية مثل "الإنديوم و الغاليوم" في خلايا CIGS **[28][33]**.
- ضعف الاستقرار (Instability): تعاني تقنيات الجيل الثالث (مثل الخلايا الصبغية والعضوية) من قصر العمر التشغيلي وتأثرها السريع بالرطوبة والحرارة العالية**[31]**.
- انخفاض الكفاءة في المساحات الكبيرة: غالبا ما تكون الكفاءة المسجلة في المخبر عالية، لكنها تنخفض بشكل ملحوظ عند تصنيع ألواح كبيرة للاستخدام التجاري.

II -3-8- أهم التحسينات (Key Improvements):

شهدت التكنولوجيا تطورات كبيرة لتحسين الأداء، منها:

- تقنية التعدد (Multi-junction Cells): دمج أكثر من طبقة ماصة لامتصاص طيف أوسع من الضوء الشمسي، مما مكن من كسر حدود الكفاءة التقليدية**[28][32]**.
- تكنولوجيا النانو (Nanotechnology): استخدام الأسلاك والجسيمات النانونية لتحسين امتصاص الفوتونات وتقليل كمية المواد الخام المستخدمة.
- تحسين الشفافية والمرونة: تطوير خلايا رقيقة جدا ومرنة يمكن دمجها في واجهات المباني والنوافذ (BIPV) بدلا من الألواح الصلبة التقليدية**[35]**.
- خلايا البيروفسكايت: تعتبر أهم تحسين حديث نظرا لكفاءتها التي ارتفعت بسرعة مذهلة في وقت قصير وتكلفة إنتاجها المنخفضة**[33]**.

II -3-9- أفاق التطوير(Future Prospects):

يركز المستقبل على جعل الطاقة الشمسية المصدر الأول للطاقة عالميا من خلال:

- التصنيع الشامل ومنخفض التكلفة: الاعتماد على تقنيات الطباعة الكيميائية

(Roll-to-roll) التي تتيح إنتاج الخلايا بسرعة هائلة مثل طباعة الورق.

- الوصول إلى الكفاءة القصوى: العمل على تجاوز حد شوكلي وكويسر "Shockley-Queisser limit" (هو أقصى كفاءة نظرية يمكن أن تصل لها الخلية ذات الوصلة الواحدة Single-) (Junction Solar Cell η=33.7%) من خلال تطوير مواد هجينة تجمع بين السيليكون و البيروفسكايت **[30][34]**.
- الاستدامة البيئية: التوجه نحو استخدام مواد "خضراء" غير سامة ومتوفرة بكثرة لضمان سهولة إعادة تدوير الألواح مستقبلا.

– تحسين الأداء في المناطق الحارة: تطوير خلايا ذات معامل حراري منخفض لتعمل بكفاءة عالية في المناطق الصحراوية**[28]**.

II -4- خلايا البيروفسكايت:

تعد خلايا البيروفسكايت الشمسية (Perovskite Solar Cells)، من أكثر التقنيات الواعدة في مجال الخلايا الكهروضوئية نظرا لتكلفتها المنخفضة وكفاءتها المرتفعة**[36][37]**. وتعتمد هذه التكنولوجيا في أصلها على الخلايا الشمسية المحسسة بالحالة الصلبة، والتي تطورت من نموذج خلايا Gratzel المحسسة بالصبغة ((Dye-Sensitized Solar Cell (1991)**[38]**. ففي عام 1991، قدم الباحث O'Regan و Gratzel تصميما حقق كفاءة 7%، مما ألهم الباحثين لاحقا لاستبدال الصبغة بمواد البيروفسكايت الهجينة (عضوية-غير عضوية) التي تتميز بخواص استثنائية في امتصاص الضوء ونقل الشحنات ومنخفضة الكلفة، ومرنة وصديقة للبيئة**[39]**.

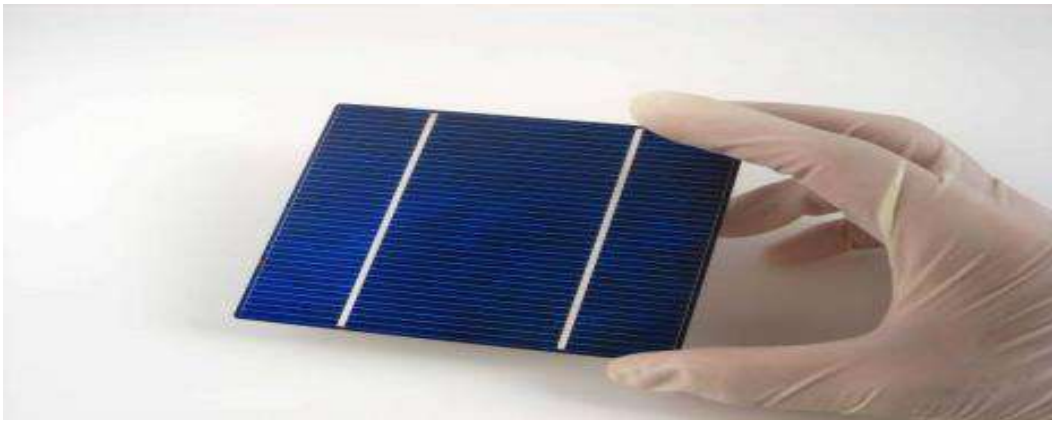
وتشترك هذه المركبات في صيغة كيميائية عامة هي ABX_3**[40]**، حيث يمثل هذا الهيكل البلوري ترتيبا دقيقا للمكونات التي تمنح المادة خصائصها الفريدة:

- الموقع (A): يشغله الكاتيون العضوي، مثل ميثيل الأمونيوم($CH_3NH_3^+$)**[36]**.
- الموقع (B): يشغله المعدن في مركز البنية الثمانية السطوح، وهو القصدير (Sn^{2+}) كبديل مستدام وصديق للبيئة**[36]**.
- الموقع (X): تشغله أنيونات الهاليد مثل اليود (I^-) التي تتواجد في زوايا الشكل ثماني السطوح**[36]**.

تاريخيا، سجل Miyasaka و Kojima أول ظهور لهذه الخلايا عام 2009 بكفاءة متواضعة (3.8%) نتيجة استخدام الإلكتروليتات السائلة التي أدت لتحلل المادة بسرعة**[41][37]**. ومع استمرار الأبحاث، حقق Park و Gratzel قفزة في عام 2012 باستخدام مواد نقل ثقوب صلبة (spiro-OMeTAD) رفعت الكفاءة إلى 9.7%**[42][43]**. وفي عام 2013، أثبت Snaith إمكانية استخدام بنية مسطحة (Planar structure) بدلا من البنى المسامية، مما سهل عملية التصنيع بشكل كبير**[44][45]**.

توالت التحسينات الكبيرة في الكفاءة عبر سنوات قليلة، حيث سجل فريق Seok كفاءات متصاعدة وصلت إلى 16.2% و 17.9% في عام 2014**[46][47]**. وبحلول عام 2016، قدم Saliba ابتكار الكاتيونات المتعددة الذي رفع الكفاءة إلى 21.1%مع استقرارية ملحوظة**[48]**. وفي عام 2017، تم الوصول إلى كفاءات تتجاوز 22%**[49]**، مع نجاحات هامة في تصنيع وحدات كهروضوئية كبيرة (بمساحة$100cm^2$) حققت استقرارا تشغيليا يزيد عن عام كامل**[50]**.

إن التوجه نحو استخدام القصدير (Sn) في صيغة $CH_3NH_3SnI_3$ يمثل الجيل الجديد من هذه الخلايا، حيث يهدف البحث الحالي إلى ضبط الخواص البلورية والبصرية لهذه المادة للوصول إلى كفاءات عالية مع الحفاظ على مبدأ الاستدامة البيئية وتقليل السمية.



الشكل(II -8): الخلية الشمسية من نوع البيروفسكايت

II -4-1- آلية عمل خلية البيروفسكايت الشمسية:

تعتمد خلايا البيروفسكايت الشمسية (PSCs) في عملها على مجموعة من العمليات الفيزيائية المتتابعة التي تهدف إلى تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية بمعدلات كفاءة شهدت تطورا ملحوظا وسريعا في السنوات الأخيرة. ويمكن تلخيص هذه الآلية في المراحل التالية:

II -4-1-1- توليد حوامل الشحنة(الإلكترونات و الفجوات):

عند سقوط الفوتونات على طبقة البيروفسكايت (المادة الممتصة)، تقوم هذه الأخيرة بامتصاص الطاقة الضوئية، مما يؤدي إلى توليد أزواج إلكترون-فجوة (إكسيتونات). تتميز مواد البيروفسكايت بانخفاض طاقة ارتباط الإكسيتون (أقل من 50mev عند درجة حرارة الغرفة)**[36]**، مما يسمح بانفصال هذه الأزواج إلى حاملات شحنة حرة خلال زمن قصير جدا (في حدود أجزاء من البيكوثانية)**[51]**.

II -4-1-2- نقل حوامل الشحنة:

بعد توليد أزواج الإلكترون-الفجوة داخل طبقة البيروفسكايت، تنتقل هذه الحوامل عبر طبقات مخصصة لنقل الشحنة. حيث تتجه الإلكترونات نحو طبقة نقل الإلكترونات (Electron Transport Layer) مثل PCBM، $C_{72}H_{14}O_2$ ، في حين تنتقل الفجوات إلى طبقة نقل الثقوب (Hole Transport Layer) مثل Spiro-OMeTAD أو PEDOT :PSS. وتعتمد فعالية عملية النقل على مدى توافق ومحاذاة مستويات الطاقة بين طبقة البيروفسكايت وطبقات النقل المجاورة.

ولضمان انتقال الشحنات بكفاءة وتقليل خسائر إعادة الاتحاد، ينبغي أن يكون مستوى نطاق التوصيل (CB) في مادة البيروفسكايت أعلى من مستوى نطاق التوصيل في طبقة ETL ، بينما يكون مستوى نطاق التكافؤ (VB)في البيروفسكايت أدنى من نظيره في طبقة HTL ، مما يسهل استخلاص الإلكترونات والثقوب بصورة فعالة**[36]**.

II -4-1-4-3- استخلاص وجمع الشحنات:

بعد انتقال الشحنات عبر الطبقات الوظيفية وتجاوز الحواجز البينية، يتم نقلها عبر واجهات الاتصال الانتقائية ليتم استخلاصها بواسطة الأقطاب الكهربائية المعنية، مما يؤدي إلى توليد تيار كهربائي في الدارة الخارجية**[52]**.

II -4-1-4-4- العمليات الغير مرغوب فيها:

يمكن أن تحدث بعض الظواهر التي تؤثر سلبا على كفاءة الخلية، من بينها:

- إعادة اتحاد حاملات الشحنة المتولدة ضوئيا (Recombination)**[53]**.
- انتقال الشحنة العكسي عند الواجهات البينية بين البيروفسكايت وطبقات النقل (HTL أو ETL)**[54][55]**.
- حدوث تماس مباشر بين طبقتي HTL و ETL**[51]**.

II -4-2- أنواع هياكل خلايا البيروفسكايت الشمسية:

شهدت التصاميم الهيكلية لخلايا البيروفسكايت تطورا ملحوظا منذ ظهورها الأول، حيث سعى الباحثون لتحسين كفاءة جمع الشحنات واستقرار الأداء. ويمكن تصنيف هذه الهياكل بشكل أساسي إلى نوعين رئيسيين:

II -4-2-4-1-الهياكل المسامية (Mesoscopic Structures):

تعد هذه الهياكل الامتداد الطبيعي لتطبيقات الخلايا الشمسية المحسسة بالصبغة (DSSCs). يعتمد هذا التصميم على استخدام طبقة مسامية رقيقة من ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) تعمل كجامع للإلكترونات. في هذا النوع، يتم ترسيب مادة البيروفسكايت (المادة الممتصة الأساسية) داخل مسامات هذه الطبقة، ثم تغطى بطبقة صلبة ناقلة للثقوب (HTL) مثل مادة "Spiro-OMeTAD"، ويتوج الهيكل بقطب معدني.

- المميزات: يتميز هذا الهيكل بأداء مستقر وكفاءة مقبولة.
- العيوب: يتطلب معالجة حرارية عالية تصل إلى (450-500°C) لتحضير الطبقة المسامية، مما قد يحد من استخدامه مع بعض الركائز.

II -4-2-4-2-الهياكل المستوية (Planar Heterojunction Structures):

في هذا التصميم، يتم وضع طبقة البيروفسكايت بشكل مسطح ومنتظم بين طبقتين مخصصتين لنقل الشحنات (الإلكترونات والثقوب)، وينقسم هذا النوع إلى ترتيبين:

- **الهيكل العادي (n-i-p structure):** يبدأ الترتيب من الأسفل بقطب موصل شفاف (FTO أو ITO)، تتبعه طبقة نقل الإلكترونات (ETL) المكونة عادة من (TiO_2 أو SnO_2)، ثم طبقة البيروفسكايت النشطة، تليها طبقة نقل الثقوب (HTL)، وأخيرا القطب المعدني.
- **الهيكل المقلوب(p-i-n structure):** يعتمد نفس المبدأ السابق ولكن مع عكس ترتيب طبقات النقل (ETL و HTL).
- أهم ميزة: إمكانية تصنيعه في درجات حرارة منخفضة (أقل من 150C°)، مما يجعله مثاليا للتطبيقات على الركائز المرنة والخفيفة.

II -4-2-3-التوجهات الهيكلية الحديثة:

ظهرت لاحقا تصاميم تهدف إلى تبسيط عملية التصنيع وخفض التكلفة، ومن أبرزها:

- **الخلايا الخالية من طبقة نقل الثقوب(HTL-free)**: حيث يتم وضع القطب المعدني مباشرة فوق طبقة البيروفسكايت.
- **الخلايا الخالية من طبقة نقل الإلكترونات(ETL-free):** يتم فيها الاستغناء عن ال ETL ووضع البيروفسكايت فوق القطب الشفاف مباشرة.
- **الخلايا ثنائية القطب (Ambipolar):** تعتمد على الخصائص الفريدة لمادة البيروفسكايت التي تمكنها من نقل كل من الإلكترونات والثقوب ذاتيا دون الحاجة لطبقات نقل وسيطة معقدة,**[56][57][58]**.

II -4-3- طبقات النقل الوظيفية في خلايا البيروفسكايت الشمسية:

تعد طبقتا نقل الإلكترونات (ETL) ونقل الثقوب (HTL) من العناصر الأساسية في تركيب خلايا البيروفسكايت الشمسية، إذ تؤديان دورا مهما في تنظيم حركة الشحنات داخل الخلية. وتعمل هذه الطبقات على توجيه الإلكترونات والثقوب نحو الأقطاب المناسبة، مع تقليل فرص إعادة الاتحاد، مما يساهم في رفع كفاءة الخلية وتحسين أدائها العام.

II -4-3- 1-طبقة نقل الإلكترونات (ETL):

في الخلايا الشمسية ذات البنية التقليدية من النوع (n-i-p)، توضع هذه الطبقة عادة بين طبقة البيروفسكايت والقطب الأمامي، وتعمل على انتقاء الإلكترونات ونقلها نحو القطب المناسب، مع الحد من انتقال الثقوب في الاتجاه المعاكس، مما يساهم في تقليل إعادة اتحاد الشحنات وتحسين كفاءة الجهاز. ومن أكثر المواد استخداما في هذا النوع من البنى ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2)، نظرا لخصائصه المناسبة في نقل الإلكترونات واستقراره الجيد.

أما في البنية المقلوبة ذات الترتيب p-i-n، فتؤدي طبقة نقل الإلكترونات الوظيفة نفسها من حيث جمع الإلكترونات وتسهيل انتقالها، في هذا النوع يتم اعتماد مواد عضوية مثل Phenyl (PCBM) C_{61}-butyric acid– لكونها لا تتطلب معالجة حرارية عالية. مؤخرا تم التوجه نحو أكاسيد معدنية بتقنية النانو كبدائل منخفضة الحرارة Methyl Ester **[59][60]**.

II -4-3- 2- طبقة نقل الثقوب (HTL):

تقوم هذه الطبقة بجمع الثقوب المتولدة في طبقة البيروفسكايت ونقلها باتجاه القطب الخلفي (المصعد)، مع حجب الإلكترونات في نفس الوقت. وتعد هذه الطبقة ضرورية لتحسين الانتقائية في نقل الشحنات وتقليل الفواقد الناتجة عن التقاء الإلكترونات بالثقوب. ومن أشهر المواد المستخدمة فيها Spiro-OMeTAD، ويتم تحسين توصيلية الطبقة وذلك عبر مزجها مع شوارد الليثيوم (Li-TFSI).

أما في الخلايا المقلوبة فتستخدم طبقات بوليمرية مثل PEDOT:PSS (p-i-n) وأحيانا أكاسيد النيكل NiOx **[60][61]** .

II-4-3- 3-بدائل HTL اللاعضوية:

إلى جانب المواد التقليدية، ظهرت في السنوات الأخيرة مواد غير عضوية ولا معدنية أثبتت فاعلية جيدة في تحسين استقرار الخلايا الشمسية. ومن أمثلتها أكسيد النيكل (NiOx) وأكسيد النحاس (CuO) وكبريتيد النحاس (CuSCN)، حيث تمتاز هذه المواد بقدرتها على نقل الثقوب بكفاءة جيدة، مع إسهامها في تعزيز الاستقرار الحراري والحد من التدهور الذي قد يصيب الخلية أثناء التشغيل**[61]**.

II-4-4- التحسينات الحديثة في خلايا البيروفسكايت الشمسية:

شهدت خلايا البيروفسكايت الشمسية في السنوات الأخيرة اهتماما كبيرا من قبل الباحثين، نظرا لما تمتلكه من خصائص واعدة تجعلها من أكثر التقنيات الكهروضوئية تطورا. وقد تركزت معظم الجهود البحثية على رفع كفاءة هذه الخلايا وتحسين استقرارها، وذلك من خلال تطوير المواد المكونة للبنية الفعالة، ولا سيما طبقة البيروفسكايت نفسها والطبقات الناقلة للشحنات.

كما أظهرت الدراسات أن تحسين خصائص هذه الطبقات يساهم بشكل مباشر في تقليل الفواقد الناتجة عن إعادة اتحاد الشحنات، وبالتالي رفع مردود الخلية وتحسين أدائها العام. وفي هذا السياق يهدف هذا البحث إلى دراسة سبل تحسين طبقة نقل الإلكترونات من خلال تغيير المواد المستخدمة فيها، بما يسمح بتحقيق استخلاص أفضل للإلكترونات ونقل أكثر كفاءة، مما ينعكس إيجابا على أداء الخلية ويرفع من كفاءتها النهائية**[62]**.

الخاتمة:

في ختام هذا الفصل، تم التطرق إلى المفاهيم الأساسية لأنصاف النواقل باعتبارها الركيزة الأساسية لعمل الخلايا الشمسية، حيث تم توضيح خصائصها الفيزيائية وآليات نقل الشحنة فيها، مما سمح بفهم مبدأ عمل الخلايا الشمسية التقليدية. كما تم التركيز على خلايا البيروفسكايت الشمسية بوصفها من أحدث التقنيات الواعدة، من خلال دراسة بنيتها البلورية وآلية عملها، إضافة إلى مختلف هياكلها والطبقات الوظيفية المكونة لها مع إبراز دور كل طبقة في تحسين كفاءة الأداء. وفي الأخير، تم عرض أبرز التحسينات الحديثة التي تهدف إلى رفع الكفاءة والاستقرار وتقليل التكلفة، وهو ما يجعل هذه الخلايا خيارا مستقبليا مهما في مجال الطاقات المتجددة، رغم التحديات التي لا تزال تتطلب مزيدا من البحث والتطوير.

المراجع والمصادر:

[1] جعرون فاطمة وجغوبي اكرام، تغذية منزل عن طريق لوح شمسي فوتوضوئي، مذكرة ماستر أكاديمي تخصص فيزياء طاقوية وطاقات متجددة جامعة قاصدي مرباح ورقلة، 2018.

[2]سعود يوسف عياش، نكنولوجيا الطاقة البديلة، عالم المعرفة الكويت فبراير1981.

[3] بوعزة فاطمة الزهراء ورحماني عايدة، دراسة ظاهرة النقل الإلكتروني في أشباه الموصلات تطبيق: صمام ثنائي السيليكون، مذكرة ماستر أكاديمي تخصص فيزياء طاقوية وطاقات متجددة جامعة قاصدي مرباح ورقلة، 2022.

[4] م مؤيد فايز القواسمة، كتاب أشباه الموصلات، مكتب المجتمع العربي للنشر والتوزيع، عمان، 2006.

[5] S.O.Kasap, “Principles of Electronic Materials and Devices”, 2nd ed. (McGraw-Hill,New York),2002.

[6] .د.فاروق كامل تقلا، مقدمة في فيزياء أشباه الموصلات، جامعة الإمام محمد بن سعود الإسلامية،2024.

[7] S.M.Sze, Physics of Semiconductor Devices,2nd Edition, Wiley,1981.

[8] Simon M. Sze & Kwok K. Ng, Physics of Semiconductor Devices, 3rd Edition, Wiley,2006.

[9] كتاب الطاقة البديلة مصادرها واستخداماتها-د.سمير سعدون مصطفى، د.بلال عبد الله ناصر، أ.محمود خضر سليمان-دار اليازوريا العلمية للنشر والتوزيع-الأردن2011م.

[10] J. Singh, Semiconductor Physics and Devices, 3rd Edition, McGraw-Hill,2007.

[11] Diriba Gonfa Tolasa,"The Physics of Semiconductor Devices: Principles, Applications, and Innovations ," ***American Journal of Physics and Applications***, vol. 13,no.1,pp.6-16,2025.[Online].

Available : https://doi.org/10.11648/j.ajpa.20251301.13

[12] كتاب الإلكترونيات-أ.د.صابر رفاعي-أم القرى(كتاب إلكتروني).

[13] http://WWW.marefa.org/%D8%AE%D9%84%D8%A7%D9%8A%D8%A7-%D8%B4%D9%85%D8%B3%D9%8A%D8%A9

[14] U.S.Department of Energy,“Solar Photovoltaic Cell Basics,” Office of Energy Efficiency & Renewable Energy,2020.[Online].

Available: https://WWW.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics

[15] أب محمد عمارة، الطاقة في القرن الواحد وعشرون (الطبعة الأولى) القاهرة- جمهورية مصرية العربية المكتبة الأكاديمية، صفحة 27-28-29 ، بتصرف.

[16] Solar cell ELECTRONICS" www.britannica.com.Retrieved ,"Edited 15-5-2018.

[17]أسامة أحمد العاني، الخلايا الكهروضوئية، ص3-4.

[18] بو عبد الله، عبد الغني."محاكاة رقمية لتأثير الطبقة Sb في تقليص العيوب في الخلية الشمسيةCIGS ". رسالة دكتورا في العلوم، تخصص: علوم المادة، جامعة محمد خيضر-بسكرة، كلية العلوم والتكنولوجيا، قسم الفيزياء، الجزائر.

[19] ديدة صفاء وراشدي أميرة، مساهمة لدراسة تأثير تغير المناخ على الطاقة الشمسية وإيجاد حلول للتخفيف منها في منطقة ورقلة، مذكرة مقدمة لنيل شهادة ماستر أكاديمي تخصص فيزياء طاقوية، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، 2021.

[20] PV Education, Solar Cell I-V Characteristics , Available at: https://www.pveducation.org

[21] http://muslims-res.com

[22] محمد أحمد سيد خليل، الطاقة الشمسية واستخداماتها، دار الكتب العلمية للنشر والتوزيع القاهرة.

[23] Anne Kaminski, Mathieu Monville2" Energie photovoltaique Filière physique des Composants Nanostructurés phelma " Septembre(2010).

[24] J.C. Bernède. Organic photovoltaic cells: history, principle and techniques. J. Chil. Chem. Soc. 53,n°3,2008.

[25] Mme Azizi Amina-«Modélisation optimisation d'un système de produtcion d'énergie photovoltaique avec un système de stockage hybride»-Thèse de doctorat –Université Badji Mokhtar-Annaba-2019.

[26] عبد الباسط على صالح كرمان – توليد القدرة الكهربائية من الطاقة الشمسية-"أنظمة الطاقة الفولتضوئية"- مركز الدراسات الوحدة العربية- 2011.

[27] IEEE Journal of Photovoltaics, IEEE Photonics Society, ISSN: 2156-3403.

[Online]. Available: https://ieeephotonics.org/publications/journal-of-photovoltaics/ [Accessed: May 6, 2025].

[28] A. Luque and S. Hegedus (Eds.), *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2nd ed., Wiley,2011.*

[29] M.A. Green, “Silicon photovoltaic modules: a brief history of the first 50 years,” Prog. Photovolt: Res. Appl., vol. 13, no. 5,pp.447-455,2005.

[30]J. Nelson, The Physics of Solar Cells, Imperial College Press,2003.

[31] M.A. Green, Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy .

[32] M.A. Green,"Photovoltaic cell efficiency tables (version 53)," Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol.27,no.1,pp.3-12,2019.

[33] M.I.H. Ansari, A.Prochowicz, M.M. Tavakoli, and J.L. Proft,"A review on recent development of lead-free perovskite solar cell," Journal of Energy chemistry,vol.27,no.3,pp.672-689,2018.

[34] W.Shockley and H.J.Queisser," Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells," Journal of Applied Physics,vol.32,no.3,pp.510-519,1961.

[35]B.P.Jelle," Building Integrated Photovoltaics: A review," Energy and Buildings, vol.123, pp.204-242,2016.

[36] S.D. Stranks and H.J. Snaith, "Metal-halide perovskites for photovoltaic and light-emitting devices," Nature Nanotechnology, vol.10,pp.391-402,2015.

[37] A. Abate,"A review on perovskite solar cell (PSCs), materials and applications," Materials Today Energy,vol.20,2021,Art.no.100660.

[38] N.-Gyu. Park,perovskite solar cells:an emerging photovoltaic technology, Materials Today,vol 18,66-72.(2015).

[39] O'Regan B, Gratzel M A Iow-cost, high-efficiency solar cell based on dye-sensitizd colloidal TiO2 films. Nature 353(6346):737-740.(1991).

[40] Farzaneh et al, M.R.F, Bulk heterojunction polymer solar cell and perovskite solar cell: concepts,materials, current status, and opto-electronic properties. Sol. Energy 173,407-424.(2018).

[41] Kojima,A.,Teshima,K., Shirai, Y., Miyasaka, T, Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells. J.Am.Chem. SOC. 131,6050-6051.(2009).

[42] Kim HS et all. Lead iodide perovskite sensitized all-solide-state submicaron thin film mesocopic solar cell with efficiency exceeding 9%. Sci Rep, 2:591. (2012).

[43] T.Miyasaka et al.,"Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells ," J.Am. Chem.Soc .,vol. 131, no. 17,pp.6050-6051,2009.

[44] Liu, M.,Johnston, M.B.,& Snaith, H.J. Efficient planar heterojunction perovskite solar cells by vapour de position. Nature,501(7467),395.(2013).

[45] J.-H. Im, C.-R.Lee, S.-W.Lee,S.-W.Park,and N.-G.Park,"6.5% efficient perovskite quantum-dot-sensitized solar cell,"Nanoscale, vol.3,no. 10,pp. 4088-4093,2011.

[46] Green, M.A., Ho-Baillie,A.,& Snaith, H.J.The emergence of perovskite solar cells. Nature Photonics, 8(7),(2014).

[47] Saliba, M et al. Cesium-containing triple cation perovskite solar cells: improved stability, reproducibility and high efficiency. Energy & Environmental Science, 9(6),1989-1997.(2016).

[48]Yang, W.S et al. Iodide management in formamidinium-lead-halide-based perovskite layers for efficient solar cells. Science,356(6345),1376-1379.(2017).

[49] Simya OK, Mahaboobbatcha A, Balachander K. Compositional grading of CZTSSe alloy using exponential and uniform grading laws in SCAPS-1D simulation. Superlattices and Microstructures. Apr 1,92:285-93.(2016).

[50]A. Mei et al.,"A hole-conductor-free,fully printable mesoscopic perovskite solar cell with high stability,"Science,vol.345,no.6194,pp.295-298,2014.

[51] Slavney, A. H., Smaha, R. W., Smith, I.C., Jaffe, A.,Umeyama, D.,& karunadasa, H. I(2017). Chemical approaches to addressing the instability and toxicity of lead-halide perovskite absorbers. *Inorganic chemistry*,56(1),46-55.

[52] Wang, X., Zhang, T., Lou, Y., & Zhao, Y. (2019). All-inorganic lead-free perovskites for optoelectronic application. *Materials chemistry frontiers*, 3(3),365-375.

[53]Su, P.,Liu, Y., Zhang, J., Chen, C., Yang, B., Zhang, C.,& Zhao, X.(2020). Pb-based perovskite solar cells and the underlying pollution behind clean energy: Dynamic leaching of toxic substances from discarded perovskite solar cells. *The Journal of Physical chemistry Letters*,11(8),2812-2817.

[54] Babayigit, A., Ethirajan, A., Muller, M.,& Conings, B. (2016). Toxicity of organomet al halide perovskite solar cells. *Nature materials*,15(3),247-251.

[55] Gollino, L.,& Pauporté, T.(2021). Lead- Less Halide Perovskite solar Cells. Solar RRL,5(3),2000616.

[56] خلايا البيروفسكايت الشمسية:تطور سريع وتحديات مستمرة،" سولارابيك, 2024.

[57] مقدمة لخلية البيروفسكايت الشمسية DS ،الطاقة الجديدة "، 2021".

[58] إيجابيات وسلبيات Perovskite لتطبيقات الخلايا الشمسية Alicosolar2023

[59] هيئة الطاقة الذرية السورية Perovskite-Si tandem solar cells

" الخلايا الترادفية بيروفسكايت-سليكون, متاح على:

http://aec.org.sy/azanis/pdf/162-1.pdf

[60]كلية التربية للعلوم الصرفة – جامعة بغداد، " تصميم خلية شمسية سليكونية ذات أخاديد تلامس سطحها " ، رسالة ماجستير.

[61] محاكاة رقمية لتأثير الطبقة Sb

على أداء الخلية الشمسيةCu(In,Ga)Se2 ، رسالة دكتوراه، جامعة بسكرة، 2020

[62] Afre, R.A.,& Pugliese, D.(2024). Perovskite Solar Cells: A Review of the Latest Advances in Materials, Fabrication Techniques, and Stability Enhancement Strategies. Micromachines, 15(2),192.

https://doi.org/10.3390/mi15020192

.

الفصل الثالث

تحليل ومناقشة النتائج

مقدمة:

يعالج هذا الفصل الجانب التجريبي الافتراضي لمذكرتنا، حيث سنركز على نمذجة ومحاكاة أداء الخلية الشمسية من نوع "البيروفسكايت" باستخدام البرنامج الأكاديمي SCAPS. نبدأ أولا بعرض المبادئ الفيزيائية التي يعتمد عليها البرنامج في نمذجة الخلايا، مع تبيان كيفية ضبط البنية واختيار المعايير والمؤشرات اللازمة لكل طبقة.

سيكون الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إجراء تحليل مقارن من خلال تغيير المواد المكونة لطبقة نقل الإلكترونات (ETL)، وذلك بهدف استنتاج المادة الأمثل التي تضمن استقرارا وكفاءة أعلى للخلية. وفي الختام، سنقوم بعرض النتائج المحصل عليها وتحليلها، لمناقشة تأثير تغيير مادة طبقة نقل الإلكترونات على الخصائص الكهروضوئية للخلية، وتحديد التشكيلة التي تحقق أفضل أداء مستقر.

Ⅲ-1- المعادلات الأساسية المتعلقة بمحاكاة الخلية الشمسية:

ترتكز المحاكاة العددية للخلية الشمسية على حل جملة معادلات رياضية متعلقة بالكمون الكهروستاتيكي وكثافة حاملات الشحنة، والتي تلخص أهم الظواهر الفيزيائية التي تحدث داخل الخلية الشمسية.

Ⅲ-1-1- معادلة بواسون:

تمثل لنا ظواهر الكهروستاتيكية التي تحدث داخل الخلية الشمسية ويمكن تعبير عليها رياضيا بالمعادلة التالية[1]:

$$\nabla\Psi(x,t) = \frac{q}{\varepsilon 0 \varepsilon r}\left(\mathrm{p}(x,t) - n(x,t) + N_D^+ - N_D^- + \rho t(x,t)\right) \qquad (\text{Ⅲ} - 1)$$

حيث:

(Ψ) : يمثل الحقل الكهروساكن، $(\varepsilon 0, \varepsilon r)$يمثل كل من السماحية الكهربائية النسبية وفي الفراغ على التوالي، q الشحنة العنصرية، n,p تمثل كل من كثافة الإلكترونات والثقوب على التوالي، $N_D^+,\ N_D^-$ تمثل تركيز الأيونات المانحة والمستقبلة، ρ_t تمثل الفرق بين الشحن من النوع n,p .

Ⅲ-1-2- معادلة الاستمرارية:

تعبر معادلة الاستمرارية عن حالة كل من الإلكترونات والثقوب إما يتم نقلها، أو أن تتراكم، كما يمكن أن تتولد أو تتلاشى وفقا للمعادلات التالية[2].

حالة الإلكترونات:

$$\frac{1}{\mathrm{q}}\nabla \mathrm{jn}(x,t) = Rn(x,t) + \frac{\partial n(x,t)}{\partial t} - Gn(x,t) \qquad (\text{Ⅲ} - 2)$$

حالة الثقوب:

$$\frac{1}{\mathrm{q}}\nabla \mathrm{jn}(x,t) = RP(x,t) + \frac{\partial P(x,t)}{\partial t} - GP(x,t) \qquad (\text{Ⅲ} - 3)$$

حيث: R يمثل معدل الالتحام إلكترون-ثقب ، G يمثل التوليد.

III-2- تعريف SCAPS:

يعرف SCAPS-1D (محاكي بعد واحد للخلية الشمسية) يعمل تحت نظام تشغيل Windows وهو برنامج مجاني متاح لجميع البحوث الخاصة بالكهروضوئية، يستخدم البرنامج بشكل أساسي لمحاكاة السعة الكهربائية للخلية الشمسية وتحليل خصائصها المختلفة، وهو فعال جدا في نمذجة الخلايا ذات الأغشية الرقيقة (Thin Films) مثل خلايا CdTe، والخلايا الشمسية البلورية وغير البلورية، بالإضافة إلى الخلايا العضوية وخلايا Perovskite.

في هذا الجزء، سنقوم بمحاكاة الخلية الشمسية من نوع "بيروفسكايت" باستخدام هذا البرنامج، الذي تم تطويره في قسم الإلكترونيات ونظم المعلومات بجامعة "جنت" (Ghent University) في بلجيكا [3][4][5].

يوفر البرنامج إمكانية إجراء تحليل عددي دقيق لأداء وخصائص الخلايا الشمسية تحت إعدادات مختلفة، حيث يسمح بحساب واستخراج النتائج التالية:

جهد الدارة المفتوحة(Voc)، كثافة تيار الدارة القصيرة(Jsc)، معامل الشكل(FF)، كفاءة التحويل الطاقوي(η)، الخاصية(جهد-تيار)(I-V)، المردود الكمي(QE)، معادلات التوليد والاتحاد.

وقد ساهم في تطوير هذا البرنامج نخبة من الباحثين، نذكر منهم: أليكس نيومي جيرس، مارك بورجلمان، كوين ديكوك وستيفان ديغريف. كما يتميز البرنامج باحتوائه على قاعدة بيانات غنية تسمح بتغيير عدة معاملات فيزيائية للخلية مثل:

- الفجوة الطاقية ومستوى الامتصاص(Nc,Nv,Eg).

- السماحية الكهربائية والشغل المكتبي(ε,χ).

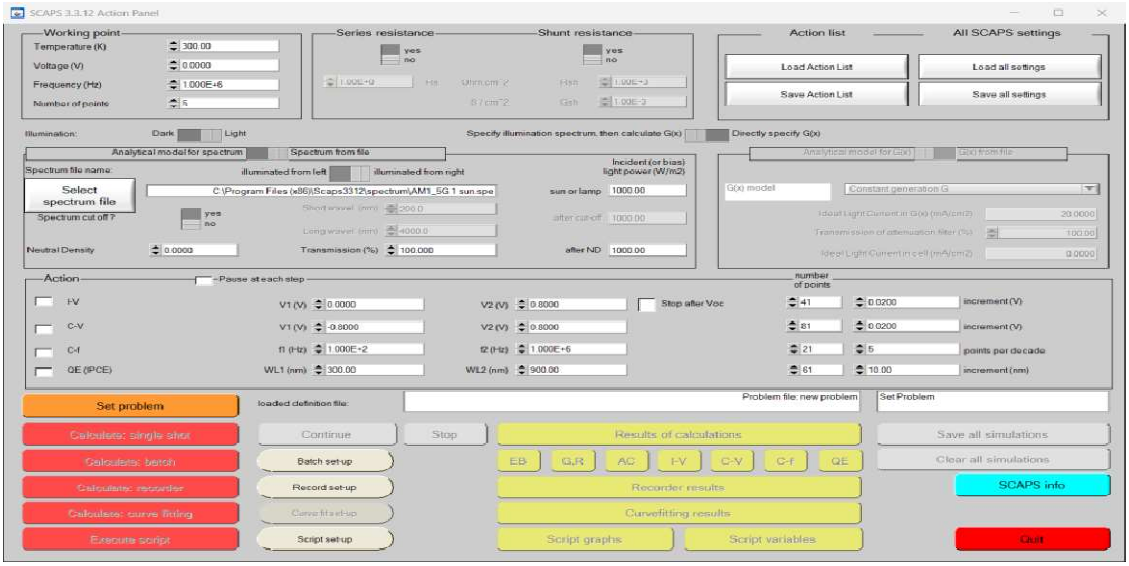
- حركية الناقلات($\mu n, \mu p$).

- الجهد الحراري للثقوب والإلكترونات($Vthp, Vthn$).

III-3- طريقة استخدام برنامج SCAPS D1:

الشكل(III-1): أيقونة برنامج SCAPS

انقر فوق الرمز أعلاه على سطح المكتب كما مبين في الشكل (III-1)، أو انقر نقرا مزدوجا فوق الملف SCAPS 3.3.10 في مدير الملفات أو أي إصدار آخر يفتح SCAPS بلوحة الإجراءات. هناك لوحات مخصصة للإجراءات الأساسية تتمثل في الشكل(III-2):



الشكل(Ⅲ-2): الواجهة الأساسية لبرنامج SCAPS

1- تشغيل SCAPC.

2- تحديد المشكلة والهندسة والمواد وكافة خصائص الخلية الشمسية قيد الدراسة.

3- توضيح الظروف التي يتم إجراء المحاكاة فيها(حدد نقطة التشغيل).

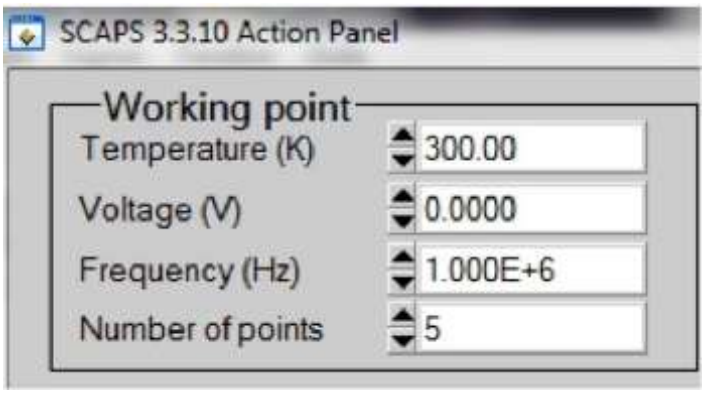
4- أشر إلى القياس المراد(المميز) محاكاته.

5- ابدأ العملية الحسابية.

6- اعرض منحنيات المحاكاة.

Ⅲ-3-1- الوسائط الخارجية المتعلقة بالخلية الشمسية:

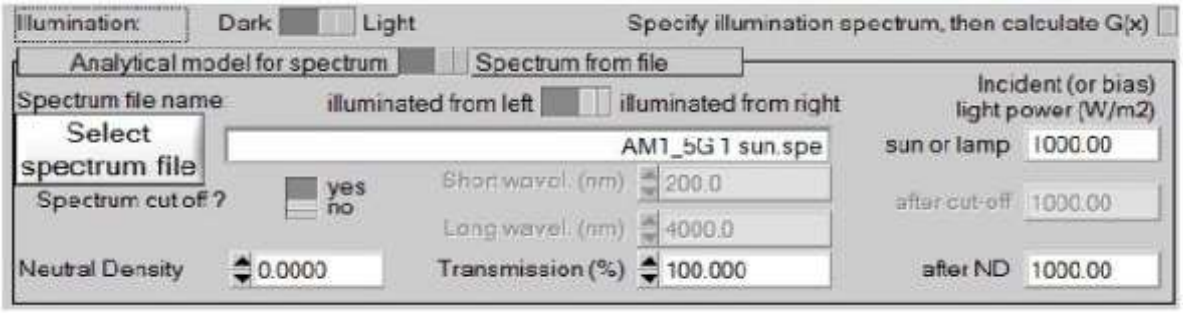
نقوم بعدها بتحديد بعض الوسائط الخارجية المتعلقة بعمل الخلية الشمسية كتثبيت درجة الحرارة الخارجية T(K)، فرق الكمون(V)، التردد(F(Hz، وعدد النقاط التكرارية المستعملة في الحساب كما يظهر في الشكل(Ⅲ-3):



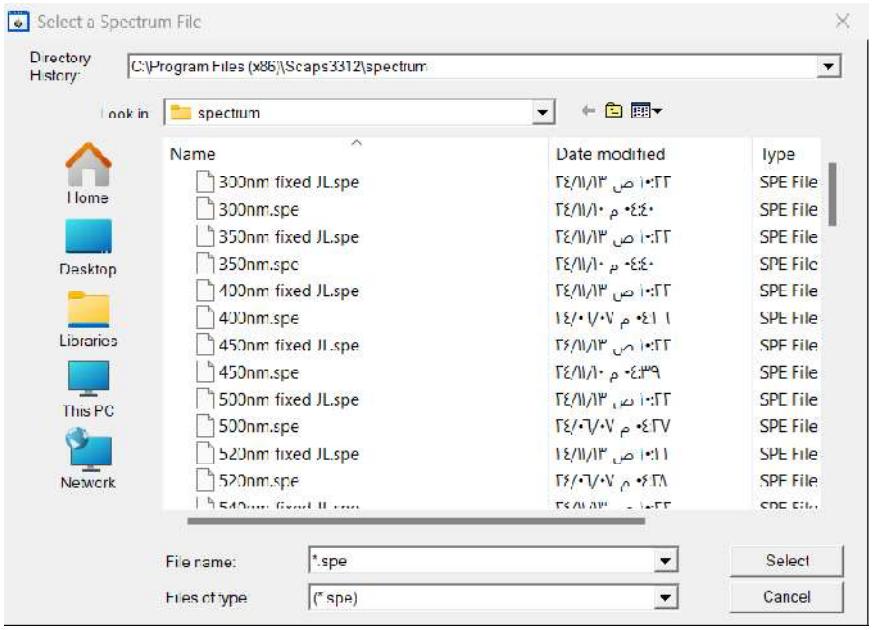
الشكل(Ⅲ-3): الوسائط الخارجية لعمل الخلية الشمسية

III-3-2- الطيف والإضاءة:

يتم اختيار حالة المحاكاة وفقا للإضاءة، إما في الظلام أو تحت الضوء، مع تحديد ملف الطيف المناسب من قاعدة بيانات SCAPS، والتي تحتوي على مجموعة من ملفات الأطياف المتاحة للاستخدام ضمن المحاكاة، كما هو موضح في الشكل(III-4).



الشكل(III-4): يمثل معلومات الإضاءة



الشكل(III-5): اختيار ملف الطيف

III-3-3- إعداد وتهيئة قياسات المحاكاة:

في هذا الجزء الخاص بالإجراءات داخل لوحة SCAPS، يستطيع المستخدم أن يختار واحد أو أكثر من القياسات التالية لإجراء المحاكاة:

- منحنى التيار-الجهد (I-V)
- منحنى السعة-الجهد (C-V)
- منحنى السعة-التردد (C-f)
- منحنى الكمية الطيفية (QE(λ))

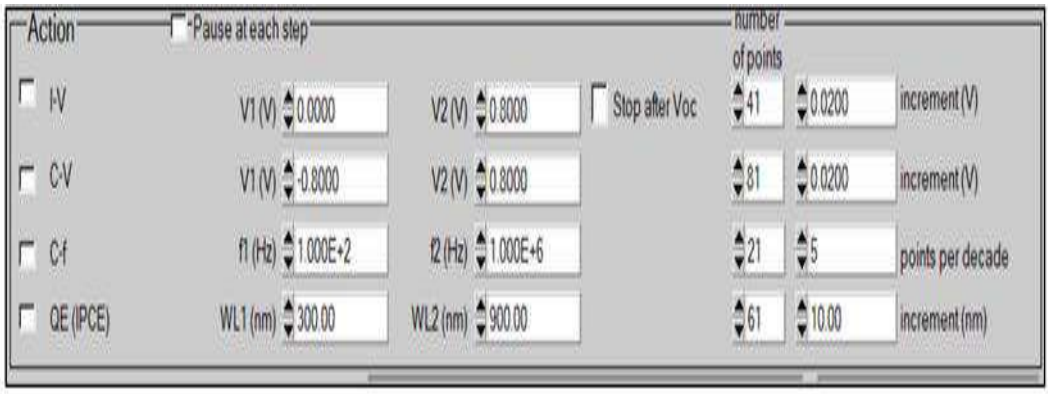
ويمكن كذلك تعديل:

- قيمة البداية (Start Value)

- قيمة النهاية (End Value)

- عدد الخطوات (Number of Steps)

وهذه التعديلات يمكن تطبيقها لكل قياس حسب الحاجة.



الشكل(Ⅲ-6): لوحة القياسات

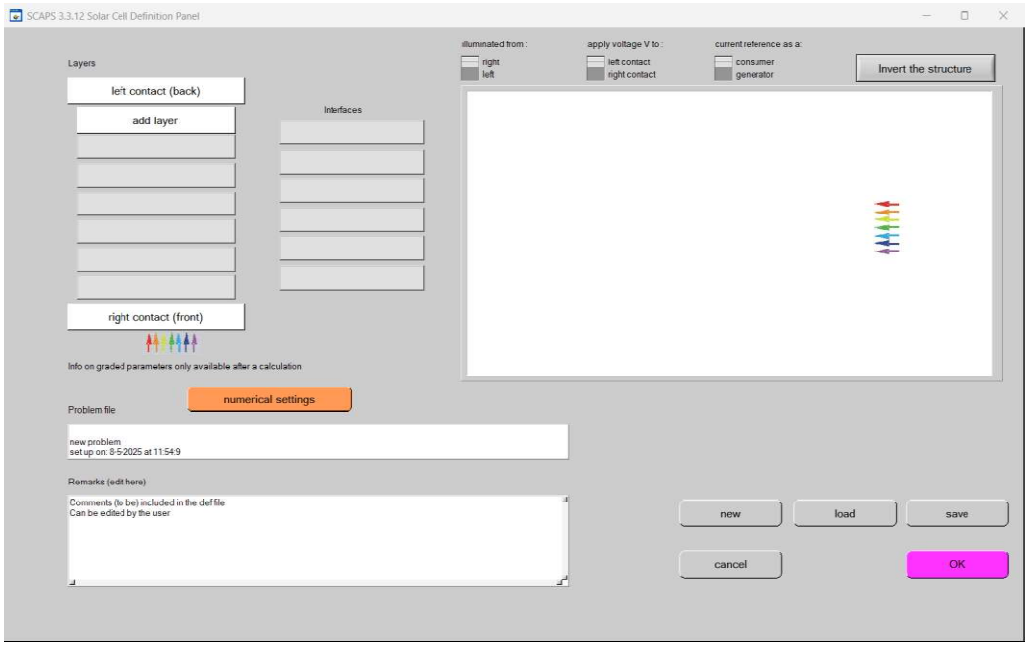
ملاحظات:

- من الأفضل، خصوصا في التجارب الأولى، تنفيذ محاكاة واحدة في كل مرة مع وضع خطوات متتابعة لتفادي البطء أو أي أخطاء ممكن تنتج عن تعقيد النموذج أو ضعف أداء الحاسوب.

- بعض القياسات فيها حسابات ضمنية لقياسات ثانية، مثلا محاكاة C-V تحسب تلقائيا منحنى I-V، فلا تحتاج تشغيله بشكل منفصل.

Ⅲ-4-3- تحديد نوع المشكلة (Set problem):

عند النقر على زر تحديد نوع المشكل (Set problem) مباشرة سيأخذك البرنامج إلى النافذة الأساسية الثانية المتعلقة بشكل الخلية وعدد الطبقات والخواص الفيزيائية لكل طبقة كما هو موضح في الشكل(Ⅲ-7) التالي:



الشكل(Ⅲ-7): نافذة مكونات الخلية الشمسية.

يكمل دور هذه النافذة في تحديد نوع ومادة كل طبقة من طبقات الخلية الشمسية، بالإضافة إلى إدخال كافة الخواص الضوئية والكهربائية لكل طبقة على حدة.ويتم ذلك من خلال اتباع الخطوات التالية:

إضافة الطبقات: يتم الضغط على زر(Add Layer) للبدء إدخال الخواص اللازمة لكل طبقة، كما موضح في الشكل (Ⅲ-8).

حفظ التصميم: بعد الانتهاء من تصميم الخلية الخاصة بك، يمكنك حفظها باضغط على زر (save).

استرجاع البيانات: في حال كان لديك تصميم خلية محفوظ مسبقا، يمكنك استرجاعه بكل سهولة عبر الضغط لى زر(load).

ملاحظة: فور إتمام هذه الخطوات، نقوم بحفظ كافة الإعدادات السابقة للعودة مباشرة إلى نافذة العمل الأساسية.

الشكل(Ⅲ-8): تعبئة معلومات الطبقات المختلفة في خلية الطاقة الشمسية

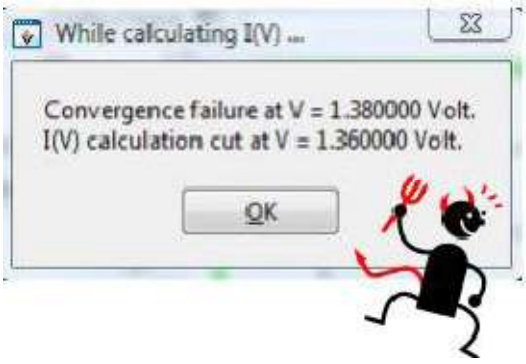
Ⅲ-3-5- بدء الحساب:

لبدء الحساب، يتم الضغط على زر (Calculate: Single Shot) الموجود في لوحة التحكم(الصفحة الرئيسية). ستظهر لوحة (Energy Bands). وتبدأ الحسابات تلقائيا.

يعرض برنامج SCAPS رسومات متحركة توضح تطور الخصائص الفيزيائية للخلية الشمسية مثل: نطاقات التوصيل والتكافؤ (conduction and valence bands)، ومستوى فيرمي (Fermi level)، تسهم هذه الرسومات في فهم السلوك الديناميكي للخلية.

ملاحظة:

في حالة ظهور رسالة التباعد(divergence) أثناء الحساب، فإن ذلك يعتبر مشكلة عددية طبيعية ولا يستدعي القلق، حيث تظل النقاط المحسوبة مسبقا في منحنى التيار-الجهد (I-V) محفوظة ولم تفقد.



III-3-6- تسريع الحساب:

لتسريع عملية الحساب، يتم الضغط على زر Batch set-up، الذي يفتح لوحة لاختيار المعاملات المراد تعديلها، مع تحديد نطاق التغيير وطريقة التغيير (خطية، لوغاريتمية، أو مخصصة).

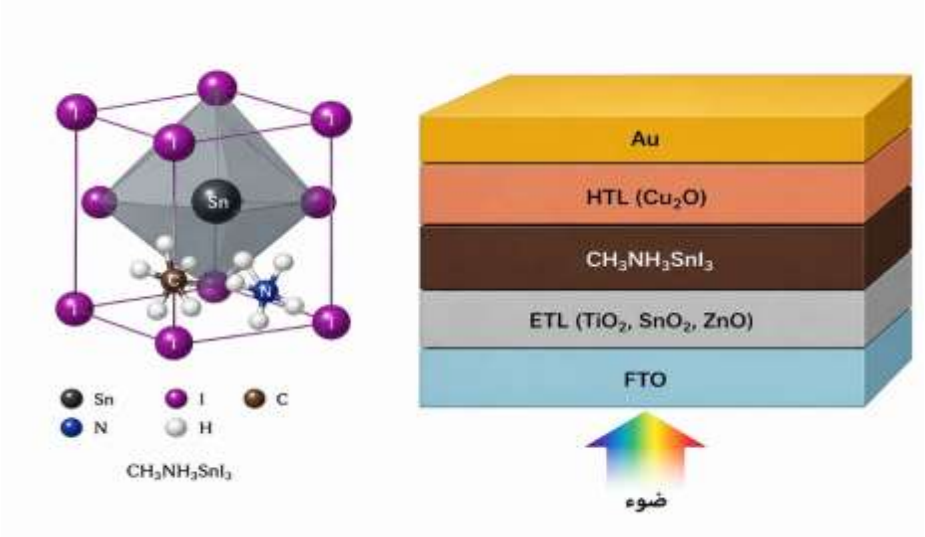
يمكن تعديل عدة معاملات بشكل متزامن، ولكن يفضل البدء بخيارات بسيطة، ثم الضغط على Calculate:batc لبدء الحساب بشكل تلقائي.

III-3-7- تسريع العمل المسجل:

في الحسابات التقليدية، تعرض النتائج لنقطة واحدة فقط، باستخدام أداة Recorder، يمكن تتبع خصائص محددة أثناء تعديل معاملات Batch. بعد اختيار Record set-up، يتم تشغيل الحساب عبر Calculate:Recorder، مما يتيح الحصول على النتائج لكل خطوة بشكل مسجل ومنظم.

III-4- دراسة مقارنة لتأثير طبقات نقل الإلكترونات (TiO_2, SnO_2, ZnO) على أداء خلايا البيروفسكايت الشمسية القائمة على القصدير:

III-4-1- بنية خلية البيروفسكايت القائمة على القصدير:



الشكل(III-9): رسم تخطيطي لهيكل خلية البيروفسكايت القصديرية

III-4-2- محاكاة وتحسين البنية المقترحة:

تتميز خلايا البيروفسكايت القائمة على القصدير بكفاءة امتصاص واعدة تجعلها بديلا بيئيا ممتازا للأنظمة التقليدية المعتمدة على الرصاص. ومن أجل استكشاف أداء هذه البنية وتحسين مخرجاتها، تم توظيف برنامج SCAPS لنمذجة ومحاكاة الاستجابة الكهروضوئية للخلية. ترتكز هذه الدراسة على ضبط وتحسين الخصائص البنيوية كالسمك والتشويب، مع التركيز بشكل خاص على تقييم وتغيير مادة طبقة نقل الإلكترونات (ETL) لتحديد المركب الأكثر ملائمة لرفع كفاءة الاستقرار والتحويل.

III-4-2-1- خصائص المواد المستعملة في هذه الدراسة:

تم في هذه الدراسة استعمال مجموعة من المواد المكونة لخلية البيروفسكايت الشمسية، حيث تم اختيارها اعتمادا على خصائصها الفيزيائية والإلكترونية المناسبة. إضافة إلى قيم عيوب الطبقات والعيوب الفاصلة، لمحاكاة أداء الخلية باستخدام برنامج SCAPS.

الجدول(III-1):الخصائص الفيزيائية المستعملة لمحاكاة خلية البيروفسكايت الشمسية

Parameter	FTO	TiO_2	SnO_2	ZnO_2	$CH_3NH_3SnI_3$	Cu_2O
Thickness (nm)	500	50	50	50	400	50
Bandgap energy Eg (ev	3.4	3.2	3.5	3.3	1.3	2.17
Electron affinity χ (ev)	4.5	4.1	4.0	4.0	4.17	3.2
Relative permittivity ∈	9.1	9.0	9.0	9.0	6.5	7.5
Effective conduction bar density CB ($1/cm^3$)	1.1×10^{19}	2.2×10^{18}	2.2×10^{18}	2.0×10^{18}	1.0×10^{18}	2.0×10^{18}
Effective valence band density VB ($1/cm^3$)	1.1×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.8×10^{19}	1.0×10^{18}	1.8×10^{18}
Electron thermal velocit (cm/s)	1×10^{07}	1×10^{07}	1×10^{07}	1×10^{07}	1×10^{07}	1×10^{07}
Hole thermal velocity (cm/s)	1×10^{07}	1×10^{07}	1×10^{07}	1×10^{07}	1×10^{07}	1×10^{07}
Electron mobility $\mu n(cm^2/Vs)$	20	0.05	100	100	2000	20
Hole mobility $\mu p(cm^2/Vs)$	10	0.05	25	25	300	80
Shallow uniform donor density ND ($1/cm^3$)	1.1×10^{19}	1.0×10^{18}	1.0×10^{17}	1.0×10^{18}	0.0	0.0
Shallow uniform accepto density NA ($1/cm^3$)	0	0	0	0	3.0×10^{17}	2.0×10^{19}

Defect type	/	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral	Neutral
Capture cross section ho (cm^2)	/	1×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}
Capture cross section electrons (cm^2)	/	1×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}	1×10^{-15}
Energetic distribution	/	single	single	single	Gaussian	Single
Reference for defect energy level Et	/	Above Ev	Above Ev	Above Ev	Above Ev	Above Ev
Energy level with respec to Reference (eV)	/	0.600	0.600	0.600	0.600	0.600
Defect density Nt (1/ cm^3) uniform	/	1.0×10^{14}	1.0×10^{15}	1.0×10^{15}	2.0×10^{15}	1.0×10^{14}

- كما تم إدخال قيم العيوب الفاصلة بين الطبقات داخل برنامج SCAPS كما هو موضح في الجدول التالي:

الجدول(Ⅲ-2): عيوب السطوح الفاصلة بين طبقات الخلية

Interlayer	HTL(Cu_2O)/$CH_3NH_3SnI_3$	$CH_3NH_3SnI_3$/ETL(TiO_2,SnO_2,ZnO)	ETL(TiO_2,SnO_2,ZnO) TO
Defect type	Neutral	Neutral	Neutral
Capture cross section hole (cm^2	1×10^{-19}	1×10^{-19}	1×10^{-19}
Capture cross section electrons (cm^2)	1×10^{-19}	1×10^{-19}	1×10^{-19}
Energetic distribution	Single	Single	Single
Reference for defect energy lev Et	Above the highest Ev	Above the highest Ev	Above the highe Ev
Energy with respe to reference (eV)	0.600	0.600	0.600
Total density (integrated over a energies) ($1/cm^3$	1×10^{10}	1×10^{10}	1×10^{10}

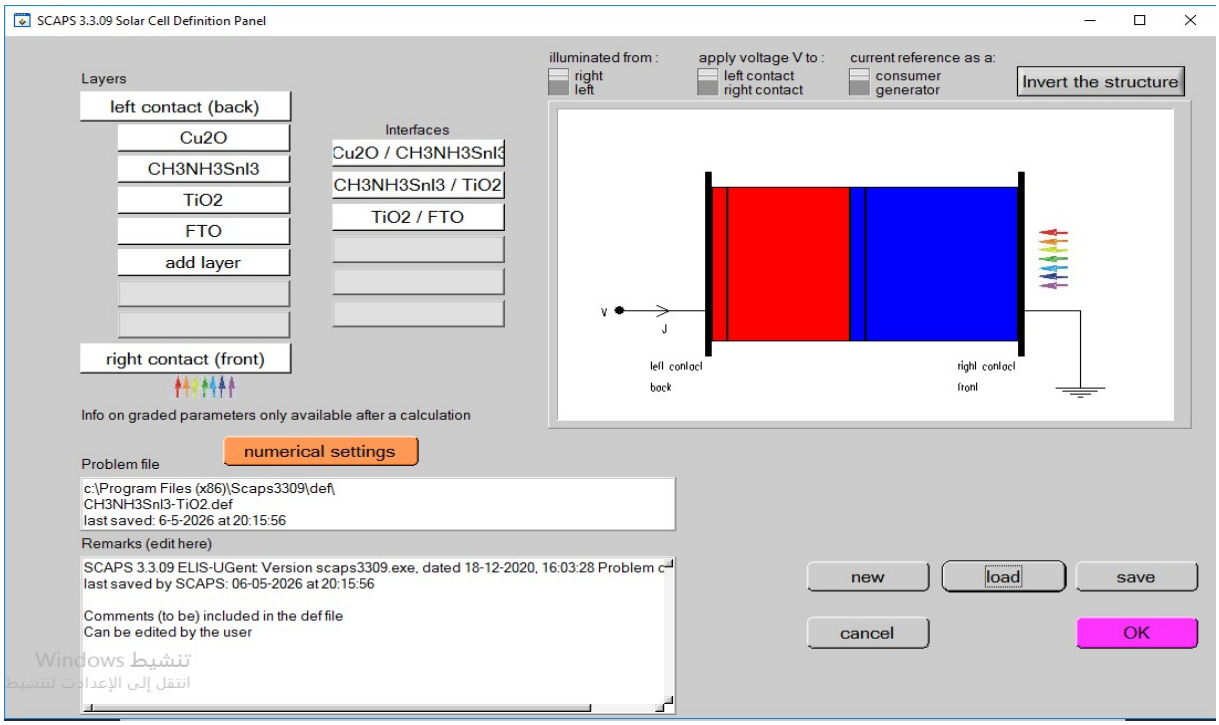
الجدول(Ⅲ-3):دالة الشغل للأقطاب(الخلفي والأمامي)

القطب	قيمة دالة الشغل (eV)
Left contact (back)	5.1 (ذهب)
Right contact (front)	4.4

Ⅲ-4-2-2- دراسة تأثير طبقة ثاني أكسيد التيتانيوم TiO_2:

بداية، تنفيذ محاكاة خلية البيروفسكايت شمسية عبر برنامج SCAPS-1D، يتطلب الأمر أولا تحديد الهيكل البنائي للخلية وتحديد الطبقات المكونة لها، ويشمل ذلك إدخال الخصائص الفيزيائية الأساسية لكل طبقة، مثل السمك، معامل الامتصاص، كثافة الشوائب، ومستوى طاقة الحواف. تلي هذه الخطوة مرحلة ضبط شروط التشغيل مثل درجة الحرارة، شدة الإضاءة، وجهد التوصيل. من خلال هذه الإجراءات، يمكن تحليل تأثير كل عامل على أداء الخلية، مثل التيار الكهربائي، الجهد وكفاءة التحويل.

في الخطوات التالية، سأوضح كيفية إعداد نموذج الخلية في SCAPS-1D، بدءا من إدخال بيانات الطبقات، مرورا بإعداد شروط المحاكاة، وانتهاء بتحليل النتائج للحصول على فهم شامل لأداء خلية البيروفسكايت الشمسية.



الشكل(Ⅲ-10): هيكل خلية البيروفسكايت الشمسية باعتبار TiO_2 المادة الناقلة في برنامج SCAPS-1D

توضح هذه الصورة واجهة تعريف بنية الخلية الشمسية في برنامج SCAPS-1D، حيث تتكون الخلية المدروسة من أربع طبقات رئيسية مرتبة كما يلي (من الخلف إلى الأمام):

1- Cu_2O (أكسيد النحاس الأحادي):

يعمل كطبقة ناقلة للثقوب (HTL)، حيث يجمع الثقوب وينقلها إلى القطب الخلفي (Left contact).

2- $CH_3NH_3SnI_3$ (ميثيل أمونيوم قصدير يوديد):

هذه هي الطبقة الفعالة والممتصة في الخلية، حيث يتم فيها امتصاص الضوء وتوليد أزواج (إلكترون- فجوة)، وهي المسؤولة المباشرة عن التحويل الكهروضوئي الرئيسي في الخلية.

3- TiO_2 (ثاني أكسيد التيتانيوم):

تعمل كطبقة ناقلة للإلكترونات (ETL)، حيث تجمع الإلكترونات المتولدة في طبقة البيروفسكايت وتنقلها نحو القطب الأمامي.

4- FTO (أكسيد القصدير المشوب بالفلور):

يعمل كطبقة أكسيد موصلة وشفافة (TCO)، تتيح مرور الضوء إلى الطبقة الفعالة مع ضمان التوصيل الكهربائي الجيد نحو القطب الأمامي (right contact).

5- الأقطاب (Contacts):

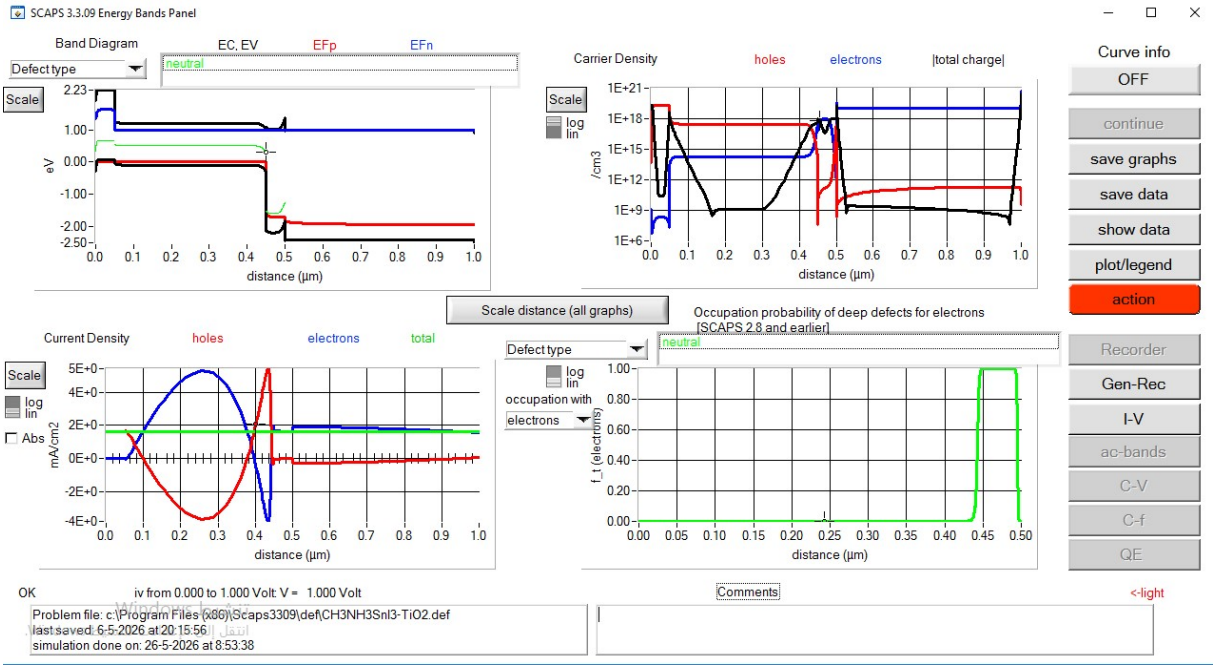
تم توصيل الخلية من الجهتين بموصلات كهربائية:

القطب الخلفي (left contact) والقطب الأمامي (right contact) لجمع التيار الناتج.

على يمين الصورة، يظهر رسم تخطيطي يوضح ترتيب الطبقات، وتدفق التيار الكهربائي (J)، واتجاه الجهد (V)، بالإضافة إلى اتجاه الإضاءة من جهة القطب الأمامي (اليمين).

يعكس هذا الترتيب الطبقي التصميم الحديث لخلايا البيروفسكايت الشمسية الصديقة للبيئة (المعتمدة على القصدير)، حيث تمثل كل طبقة وظيفة محددة في عملية التحويل الكهروضوئي، ويتيح البرنامج ضبط خصائص كل طبقة لمكافأة أداء الخلية بدقة.

- عقب الانتهاء من تصميم نموذج الخلية الشمسية ومحاكاة سمات طبقاتها المختلفة، أجري تحليل شامل للخصائص الداخلية للخلية بدلالة المسافة الموضحة في الأشكال البيانية. وبناء على هذه المعطيات، يستعرض منحنى الخصائص (I-V) الموضح أدناه المؤشرات الجوهرية للأداء، بما في ذلك جهد الدائرة المفتوحة، تيار الدائرة القصيرة، كفاءة التحويل، وعامل التعبئة. مما يعطي صورة واضحة عن فاعلية واستقرار الخلية في ظروف التشغيل.



الشكل(Ⅲ-11): مخططات توزيع الطاقة والشحنات والتيار في خلية البيروفسكايت باعتبار TiO_2 المادة الناقلة للإلكترونات

1- مخطط مستويات الطاقة (Energy Band Diagram):

يُظهر الرسم البياني في الجزء العلوي الأيسر من واجهة البرنامج تغير مستويات الطاقة (Ec وEv) بالإضافة إلى مستويات شبه فيرمي (EFn وEFp) بدلالة المسافة داخل الخلية الشمسية ($1.0\mu m$-0.0). نلاحظ وجود انحناءات واضحة في مستويات الطاقة عند الواجهات البينية بين طبقة نقل الإلكترونات (TiO_2) وطبقة الامتصاص البيروفسكايت ($CH_3NH_3SnI_3$)، مما يشير إلى تشكل مجال كهربائي داخلي فعال يساهم في تحسين فصل الإلكترونات والثقوب. كما يعكس الانتقال المناسب وجود توافق طاقوي جيد بين الطبقات، الأمر الذي يسهل انتقال حاملات الشحنة ويقلل من احتمالية إعادة الاتحاد عند الواجهات، مما يساهم في تحسين أداء الخلية الشمسية.

2- توزيع حاملات الشحنة (Carrier Density Electrons and Holes):

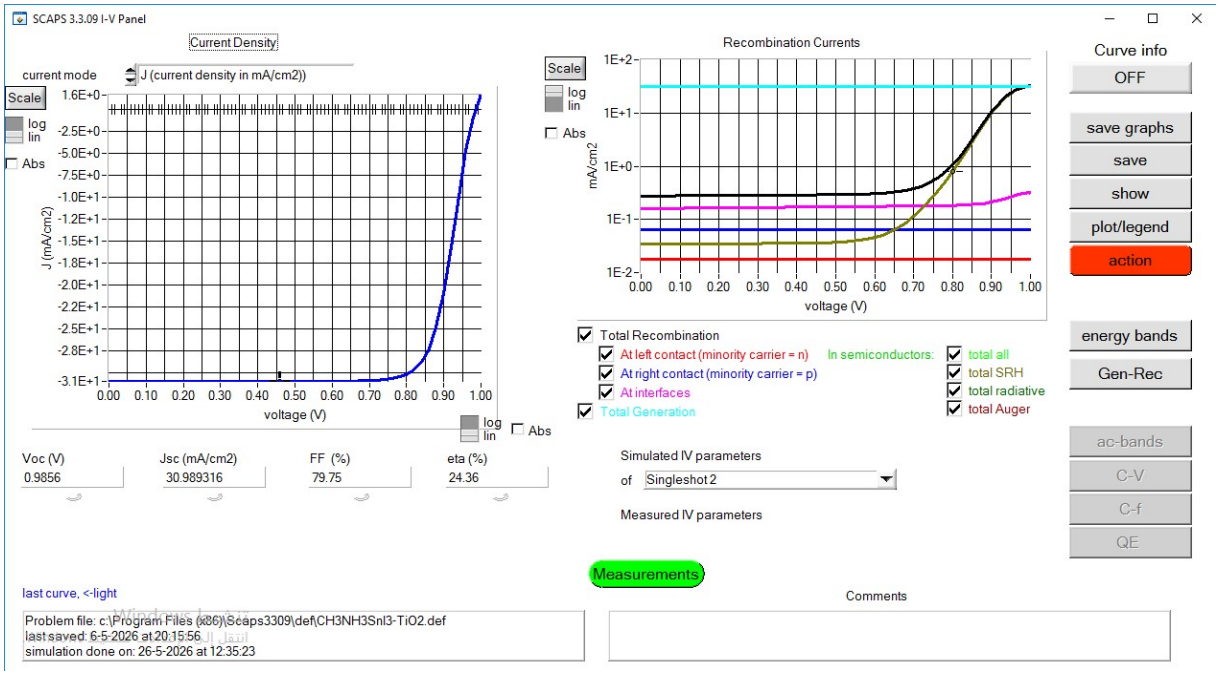
يُظهر الرسم البياني في الجزء العلوي الأيمن من الواجهة توزيع كثافة الإلكترونات (باللون الأزرق) والثقوب (باللون الأحمر) بالإضافة إلى الكثافة الكلية للشحنة (باللون الأسود) عبر المسافة داخل الخلية. نلاحظ أن تركيز الإلكترونات يكون مرتفعا بالقرب من طبقة نقل الإلكترونات (TiO_2) عند الواجهة البينية الأولى($0.0\mu m$)، في حين ينخفض تركيز الثقوب بشكل حاد في هذه المنطقة لمن عبورها. بينما يزداد تركيز الثقوب تدريجيا باتجاه طبقة نقل الثقوب(HTL)، وهو ما يوضح آلية الفصل الانتقائي لحاملات الشحنة داخل الخلية. كما يبين المنحنى وجود توازن نسبي في توزيع الشحنات، مما يساهم في التقليل من إعادة التركيب وتحسين عملية جمع الشحنات عند الأقطاب.

3- كثافة التيار الناتج عن الحوامل (Current Density of Electrons and Holes):

يُظهر الرسم البياني في الجزء السفلي الأيسر من الواجهة تغير كثافة تيار الإلكترونات (باللون الأزرق) وكثافة تيار الثقوب (باللون الأحمر) إضافة إلى كثافة التيار الكلي المتولد (باللون الأخضر) بدلالة المسافة داخل الخلية. نلاحظ أن تيار الإلكترونات وتيار الثقوب يظهران سلوكا متعاكسا داخل الطبقة الفعالة، وهو ما يعكس انتقال حاملات الشحنة الناتجة عن التوليد الضوئي. كما يظهر منحنى التيار الكلي مستقرا تقريبا على امتداد مسافة الخلية، مما يدل على انتظام نقل الشحنات وعدم وجود فقد كبير للتيار داخل البنية، وهو مؤشر إيجابي على كفاءة أداء الخلية الشمسية.

4- احتمالية إشغال العيوب بالإلكترونات(Occupation Probability of Deep Defects):

يُظهر الرسم البياني في الجزء السفلي الأيمن من الواجهة احتمالية إشغال مستويات العيوب العميقة بالإلكترونات عبر المسافة داخل الخلية. نلاحظ أن احتمالية الإشغال تبقى منخفضة وقريبة من الصفر في معظم مناطق البنية، بينما ترتفع بشكل واضح بالقرب من الواجهة عند حدود $0.45\mu m$، حيث تقترب من القيمة العظمى. يشير هذا السلوك إلى تمركز تأثير العيوب بشكل أساسي عند الواجهات البينية، في حين تبقى الطبقة الفعالة ذات خصائص نقل جيدة لحاملات الشحنة، مما يدل على محدودية تأثير مراكز إعادة تركيب داخل البيروفسكايت.



الشكل (12-Ⅲ): منحنى التيار-الجهد (I-V Curve) وتحليل تيارات إعادة التركيب.

1 - منحنى التيار-الجهد – (I-V Curve) الرسم البياني على اليسار:

يعكس المنحنى البياني الموضح على اليسار، جانبا من نتائج المحاكاة التي تم إجراؤها باستخدام برنامج SCAPS-1D، حيث يجسد منحنى (I-V) التفاعل الديناميكي بين كثافة التيار الخارجي

والجهد المطبق على الخلية الشمسية تحت ظروف الإضاءة. يبرز المنحنى بوضوح السلوك التقني للخلية، حيث تبلغ كثافة التيار أقصى قيمة لها (تيار الدارة القصيرة J_{sc}) عند جهد يساوي صفرا، وتتناقص هذه الكثافة تباعا مع زيادة الجهد حتى تبلغ نقطة الانعدام عند جهد الدارة المفتوحة (V_{oc}). وقد أظهرت نتائج المحاكاة لهذا النموذج القيم التالية:

- جهد الدارة المفتوحة (Voc): 0.9856 V
- تيار الدارة القصيرة (J_{sc}): 30.98 mA/cm²
- معامل التعبئة (FF): 79.75%
- كفاءة التحويل (η): 24.36%

تشير هذه القيم المحققة إلى أداء عال ومتميز للخلية الشمسية، حيث يعكس تيار الدارة القصيرة المرتفع كفاءة كبيرة في امتصاص الضوء وتوليد حاملات الشحنة. كما يدل معامل التعبئة المرتفع على جودة التصميم الهندسي للخلية، مما يقلل من المقاومات الطفيلية والخسائر الداخلية، ويؤدي إلى استخلاص أفضل قدرة ممكنة من الخلية.

2- تحليل تيارات إعادة التركيب (Recombination Currents):

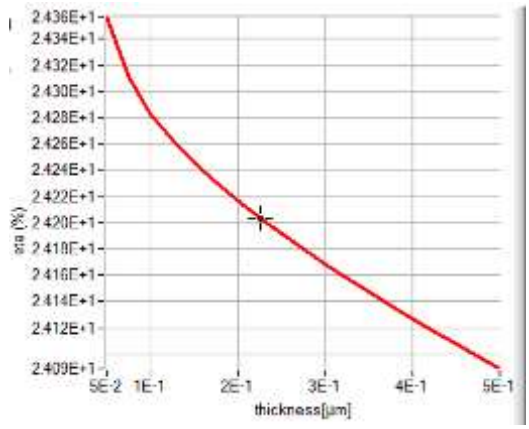
يعرض الرسم البياني على اليمين سلوك تيارات إعادة التركيب الناجمة عن مختلف الآليات الفيزيائية داخل الخلية كدالة في الجهد الكهربائي المطبق. تشمل هذه الآليات إعادة التركيب عبر مراكز العيوب (SRH)، إعادة التركيب الإشعاعي، وإعادة تركيب Auger، حيث يظهر كل منها بلون متميز، ويمثل الخط العلوي إجمالي تيارات إعادة التركيب.

من خلال المنحنى، يمكن استخلاص الملاحظات التالية:

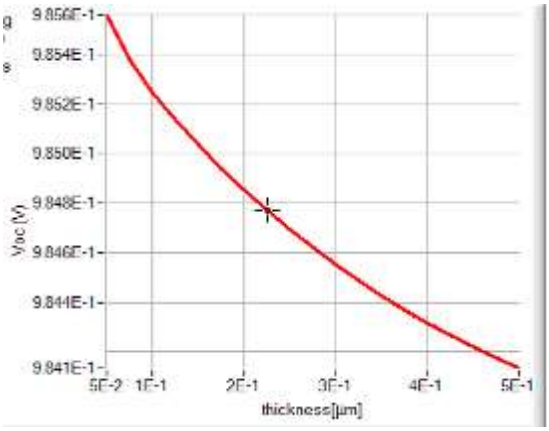
- عند الجهود المنخفضة، تبقى معدلات إعادة التركيب عند مستويات دنيا ومستقرة، مما يعزز من كفاءة جمع حاملات الشحنة.
- مع زيادة الجهد المطبق، يلاحظ ارتفاع تدريجي في مكونات تيارات إعادة التركيب، حيث تبرز ظاهرة إعادة التركيب، عبر مراكز العيوب (SRH) بوضوح أكبر عند الجهود العالية.
- يعتبر هذا التصاعد في التيارات، لا سيما عند الاقتراب من جهد الدارة المفتوحة (V_{oc})، مؤشرا على وجود خسائر داخلية ناتجة عن إعادة تركيب الحاملات، والتي تحد من أقصى قدرة يمكن استخلاصها من الخلية.

يساعد هذا التحليل في تقييم جودة البنية الطبقية للخلية، إذ إن ارتفاع معدلات إعادة التركيب يشير إلى وجود عيوب أو مستويات طاقة وسيطة تعمل كمصائد لحاملات الشحنة قبل وصولها للأقطاب، مما يؤثر سلبا على الأداء العام للخلية.

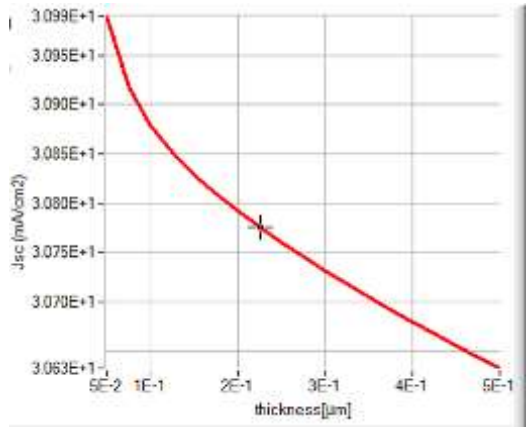
III-4-2-2-1- تأثير سمك طبقة TiO2 على خصائص الخلية الشمسية:



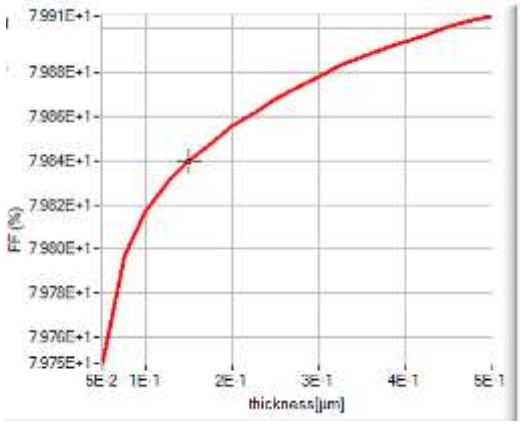
الشكل(III-13): منحنى تغيرات (eta) بدلالة سمك طبقة النقل TiO2



الشكل(III-14): منحنى تغيرات (Voc) بدلالة سمك طبقة النقل TiO2

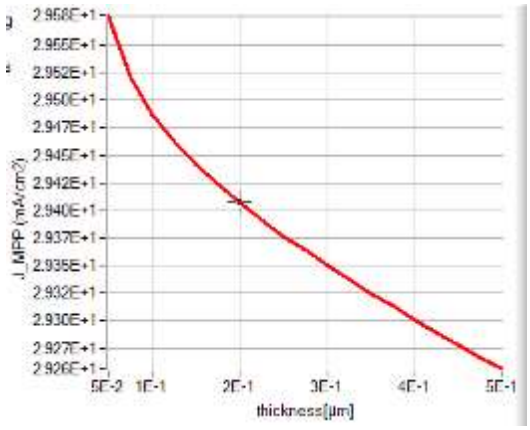


الشكل(III-15): منحنى تغيرات (Jsc) بدلالة سمك طبقة النقل TiO2



الشكل(III-16): منحنى تغيرات (FF) بدلالة سمك طبقة النقل TiO2

الشكل(Ⅲ-17): منحنى تغيرات (V-MPP) بدلالة سمك طبقة النقل TiO_2



الشكل(Ⅲ-18): منحنى تغيرات (J-MPP) بدلالة سمك طبقة النقل TiO_2

توضح المنحنيات المبينة أعلاه تأثير سمك طبقة TiO_2 على مختلف معاملات أداء الخلية الشمسية، حيث تمت دراسة تغير كل من المردود η، جهد الدارة المفتوحة Voc، كثافة تيار الدارة القصيرة Jsc، معامل التعبئة FF، بالإضافة إلى خصائص نقطة الاستطاعة العظمى.

Ⅲ-4-2-2-1-1- تحليل ومناقشة النتائج:

1- المردود η:

يبين منحنى تغير المردود η بدلالة سمك طبقة TiO_2 الشكل (Ⅲ-13) أن مردود الخلية الشمسية يتناقص تدريجيا مع زيادة السمك. حيث سجلت الخلية أعلى قيمة للمردود عند السمك الأصغر، ثم بدأ المردود بالانخفاض المستمر مع زيادة سماكة طبقة النقل الإلكتروني.

يمكن تفسير هذا السلوك بأن زيادة سمك طبقة TiO_2 تؤدي إلى ارتفاع مقاومة النقل داخل الطبقة، مما يعيق انتقال الحوامل الكهربائية ويزيد من احتمالية إعادة الاتحاد، وهو ما ينعكس سلبا على كفاءة تحويل الطاقة.

كما أن الطبقات السميكة قد تسبب زيادة في الفواقد الداخلية وتقليل كفاءة استخراج الشحنات المتولدة داخل الخلية، لذلك فإن القيم الصغيرة للسمك تعتبر أكثر ملاءمة لتحقيق أداء أفضل للخلية الشمسية.

ومن خلال النتائج المتحصل عليها، يمكن استنتاج أن السمك الأمثل لطبقة TiO2 يوجد عند القيم المنخفضة للسمك المدروس، حيث تم الحصول على أعلى مردود للخلية الشمسية.

2- جهد الدارة المفتوحة Voc:

يبين منحنى تغير جهد الدارة المفتوحة Voc بدلالة سمك TiO2 الشكل (III-14) وجود انخفاض تدريجي في قيمة الجهد مع زيادة السمك. حيث سجلت أعلى قيمة ل Voc عند القيم الصغيرة للسمك، ثم بدأ الجهد بالتناقص تدريجيا كلما ازدادت سماكة طبقة النقل الإلكتروني.

يرجع هذا الانخفاض إلى أن زيادة السمك تؤدي إلى ارتفاع مقاومة النقل داخل طبقة TiO2، مما يساهم في زيادة احتمالية إعادة اتحاد الحوامل الكهربائية وتقليل كفاءة فصل الشحنات داخل الخلية الشمسية. كما أن الطبقات السميكة قد تسبب زيادة في الفواقد الداخلية، وهو ما ينعكس سلبا على قيمة جهد الدارة المفتوحة.

ومن خلال النتائج المتحصل عليها، يمكن القول إن القيم الصغيرة لسمك طبقة TiO2 تعتبر أكثر ملاءمة للحصول على قيم مرتفعة ل Voc وتحسين أداء الخلية الشمسية.

3- تيار الدارة القصيرة Jsc:

يبين المنحنى تغير قيمة تيار الدارة القصيرة (Jsc) بدلالة سمك طبقة TiO2 الشكل (III-15)، حيث نلاحظ تناقصا تدريجيا في قيمة التيار مع زيادة سمك هذه الطبقة. وتسجل أعلى قيمة للتيار عند أقل سمك مدروس، بينما تنخفض القيم تدريجيا كلما اتجهنا نحو زيادة سماكة طبقة النقل الإلكتروني.

يمكن تفسير هذا السلوك بأن زيادة سمك طبقة TiO2 تؤدي إلى زيادة طول المسار الذي يجب أن تقطعه الإلكترونات المتولدة لتصل إلى القطب الكهربائي، مما يزيد من احتمالية حدوث عمليات إعادة الاتحاد للشحنات قبل وصولها إلى التماس الكهربائي. هذا الانخفاض في كفاءة جمع الشحنات يؤدي مباشرة إلى انخفاض في تيار الدارة القصيرة المتولد في الخلية الشمسية.

بالإضافة إلى ذلك، قد تساهم زيادة المقاومة التسلسلية الناتجة عن سماكة الطبقة في إعاقة حركة الحوامل الكهربائية، مما يقلل من كثافة التيار المستخلص. وبناء على هذه النتائج يمكن الاستنتاج أن القيم المنخفضة لسمك طبقة TiO2 هي الأكثر ملاءمة لضمان تدفق أعلى للشحنات وتحقيق أداء أمثل للخلية الشمسية من حيث كثافة تيار الدارة القصيرة.

4- معامل الإمتلاء FF:

يبين منحنى تغير معامل ملء الخلية (FF) بدلالة سمك طبقة TiO2 الشكل (Ⅲ-16)سلوكا مغايرا لما لاحظناه في المنحنيات السابقة، حيث نلاحظ ارتفاعا تدريجيا في قيمة معامل الملء مع زيادة سمك هذه الطبقة. وتسجل أقل قيمة لمعامل الملء عند السمك الأصغر، ثم تبدأ القيم بالارتفاع المستمر كلما زادت سماكة طبقة النقل الإلكتروني.

يمكن تفسير هذا السلوك بأن زيادة سمك طبقة TiO2 قد تساهم في تحسين الخصائص الهندسية والكهربائية للوصلة داخل الخلية، مما يؤدي إلى تقليل تيارات التسريب وتحسين استجابة الخلية عند نقاط التشغيل المختلفة. هذا التحسين في توازن الشحنات وتقليل الفواقد عند القطبين ينعكس إيجابا على شكل منحنى التيار-الجهد، وبالتالي يؤدي إلى رفع قيمة معامل ملء الخلية.

بالإضافة إلى ذلك، قد تلعب زيادة السمك دورا في تحسين التغطية وتجانس الطبقة، مما يقلل من احتمالية حدوث قصر كهربائي في المناطق الرقيقة، وهذا يساهم في رفع كفاءة استخلاص الطاقة وزيادة معاملء الملء. وبناء على هذه النتائج، يمكن الاستنتاج أن زيادة سمك طبقة TiO2 (ضمن النطاق المدروس) تؤدي إلى تحسن في أداء الخلية من حيث معامل الملء، وهو ما يوازن جزئيا التأثيرات السلبية الناتجة عن زيادة المقاومة في الطبقة السميكة.

5- جهد نقطة الاستطاعة العظمى V-MPP:

يبين منحنى تغير جهد نقطة الاستطاعة العظمى (V-MPP) بدلالة سمك طبقة TiO2 الشكل (Ⅲ-17) وجود انخفاض تدريجي ومتقطع في قيمة الجهد مع زيادة سمك هذه الطبقة. نلاحظ أن القيمة تكون في أقصى مستوياتها عند السمكات الصغيرة، ثم تتخذ مسارا تنازليا يشبه "الدرجات" كلما ازدادت سماكة طبقة النقل الإلكتروني.

يمكن تفسير هذا السلوك بأن زيادة سمك طبقة TiO2 تؤدي إلى ارتفاع المقاومة الداخلية للخلية، وهو ما يحد من قدرة الخلية على الحفاظ على جهد عال عند نقطة التشغيل المثالية. وبما أن V-MPPيرتبط ارتباطا وثيقا بجهد الدارة المفتوحة (Voc)، فإن الانخفاض الملاحظ في Voc نتيجة زيادة احتمالية إعادة اتحاد الشحنات في الطبقات السميكة، ينعكس بشكل مباشر على انخفاض قيمة V-MPP. أما التغير "المتقطع" (شكل الدرجات) في المنحنى، فقد يعود إلى طبيعة المعالجة الحسابية في برنامج المحاكاة أو إلى تغيرات في توزيع المجال الكهربائي داخل الطبقة عند سمكات معينة.

بشكل عام، تعكس هذه النتيجة أن الزيادة المفرطة في سمك طبقة النقل الإلكتروني لا تؤثر فقط على التيار، بل تؤثر أيضا على الجهد التشغيلي، مما يقلل من الطاقة الكلية المستخرجة. وبناءعلى ذلك، نخلص إلى أن تقليل سماكة هذه الطبقة إلى القيم الدنيا هو الخيار الأفضل للحفاظ على قيمة مرتفعة لجهد نقطة الاستطاعة العظمى، وضمان استقرار أداء الخلية الشمسية تحت ظروف التشغيل.

6- تيار نقطة الاستطاعة العظمى J-MPP :

يبين المنحنى تغيرات كثافة تيار نقطة الاستطاعة العظمى J-MPP بدلالة سمك طبقة TiO2 الشكل (III-18)، حيث يسلك المنحنى سلوكا تناقصيا واضحا، وسجلت أعلى قيمة لكثافة التيار عند القيم الصغيرة جدا للسمك. ومع زيادة سمك طبقة TiO2 تدريجيا نلاحظ انخفاضا مستمرا في قيمة J-MPP حتى تصل إلى أدنى قيمة لها، ويعزى هذا الانخفاض التدريجي إلى زيادة المقاومة المتسلسلة (Rs) الناتجة عن إطالة المسار الذي يجب أن تقطعه الإلكترونات المستخلصة للوصول إلى القطب الكهربائي، مما يتسبب في ضياع جزء من طاقتها الحركية ويقلل من تدفق التيار الكلي عند نقطة التشغيل العظمى. كما يؤدي هذا السمك الزايد إلى ارتفاع معدل إعادة الاتحاد نتيجة قضاء الإلكترونات وقتا أطول في العبور، مما يزيد من احتمالية التقائها بالفجوات أو وقوعها في مراكز إعادة الاتحاد والعيوب البلورية داخل الطبقة أو عند السطح البيني، وهو ما يترتب عليه هبوط كفاءة جمع الشحنات وقيم كثافة التيار.

وتأكيدا للنتائج السابقة الخاصة بجهد الدارة المفتوحة Voc، تثبت نتائج محاكاة تيار نقطة الاستطاعة العظمى J-MPP أنّ الصغيرة والتحسين الدقيق لسمك طبقة TiO2 في رتبة النانومتر هي الخيار الأمثل والأنسب، كون السمك الرقيق يضمن تقليل المقاومة الداخلية ومعدلات إعادة الاتحاد إلى أدنى حد ممكن، مما يتيح استخلاصا كفؤا للإلكترونات ويؤدي في النهاية إلى رفع كفاءة التحويل الطاقوي الإجمالي للخلية الشمسية.

III-4-2-2-1-2- تلخيص وتحديد السمك الأمثل لطبقة TiO2:

بهدف إجراء مقارنة رقمية دقيقية وتسهيل تتبع سلوك معاملات الخلية الشمسية المدروسة بدلالة تغير السمك، يلخص الجدول (III-4) القيم العددية الحرجة المستخرجة من منحنيات المحاكاة السابقة لطبقة TiO_2.

الجدول(Ⅲ-4):تأثير سمك طبقة TiO2 على المعلمات الكهربائية للخلية الشمسية

d(μm) TiO2 سمك طبقة	Voc(V)	Jsc(mA/cm²	FF(%)	η(%)	VMPP(V)	JMPP(mA/cm²)
0.05(الأمثل)	0.9855	30.989	79.748	24.356	0.8235	29.5770
0.10	0.9852	30.879	79.817	24.283	0.8235	29.4878
0.20	0.9848	30.791	79.855	24.216	0.8235	29.4070
0.30	0.9845	30.731	79.877	24.168	0.8234	29.3500
0.40	0.9843	30.679	79.893	24.126	0.8234	29.3007
0.50	0.9841	30.632	79.905	24.089	0.8233	29.2562

- نظرا للعدد الكبير من البيانات المستخرجة من برنامج المحاكاة عبر خاصية القراءة الدفعية (Batch playback)، تم الاكتفاء في الجدول(Ⅲ-4) بعرض القيم الرقمية لمجموعة من النقاط الموزعة بانتظام عبر المجال المدروس لتوضيح سلوك المعلمات الكهربائية للخلية بشكل مبسط، بينما تظهر المنحنيات البيانية السابقة المسار المستمر لجميع النقاط المحاكاتية بدقة عالية.

- التحليل الفيزيائي للمعاملات الكهربائية:

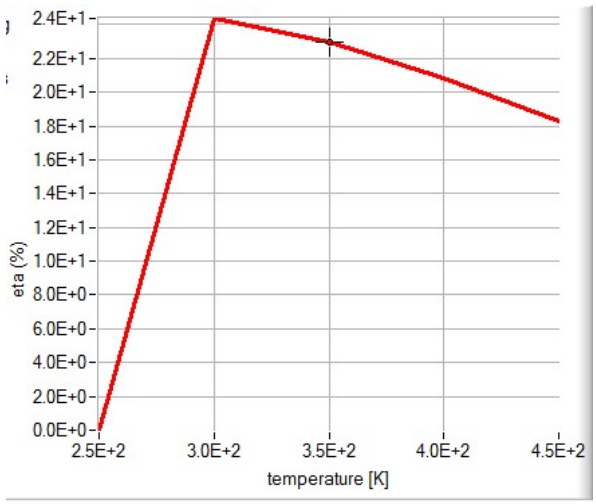
من خلال تتبع قيم الجدول(Ⅲ-4) يلاحظ سلوك منتظم ومستمر لمختلف المعاملات الكهربائية بدلالة زيادة السمك، حيث تسجل الخلية أعلى كفاءة تحويل طاقوي عند أصغر سمك مدروس $0.05\mu m$ بقيمة η=24.356%، مترافقة مع أعلى قيم لكل من تيار الدارة القصيرة $Jsc=30.989mA/cm^2$ وجهد الدارة المفتوحة Voc=0.9855V.

ومع الزيادة التدريجية للسمك حتى $0.5\mu m$، يلاحظ انخفاض طفيف ومستمر في قيم الكفاءة والتيار والجهد، إضافة إلى تراجع قيم J-MPP و V-MPP. ويفسر هذا السلوك بزيادة المقاومة التسلسلية (Series Resistance) وازدياد طول المسار الذي تقطعه الإلكترونات المتولدة ضوئيا، مما يرفع من احتمال إعادة اتحاد الحوامل (Recombination) قبل وصولها إلى الأقطاب الكهربائية.

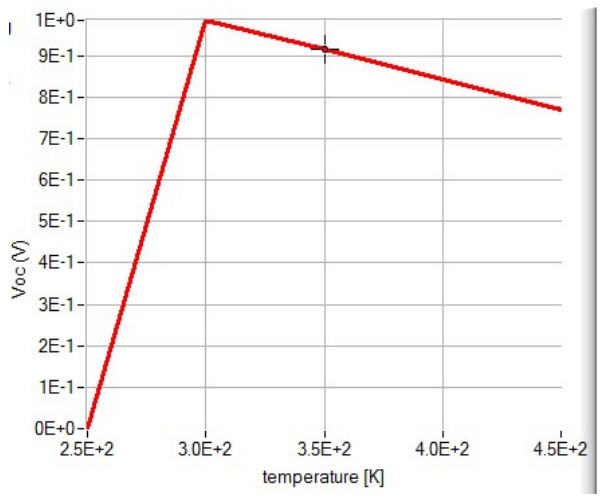
بالمقابل يظهر عامل الامتلاء FF تحسنا طفيفا مع زيادة السمك، إلا أن هذا التحسن يبقى غير كاف لتعويض الانخفاض المسجل في باقي المعاملات الكهربائية.

وبناء على النتائج السابقة، تم اختيار السمك $0.05\mu m$ كقيمة مثالية لطبقة TiO_2، لكونه يحقق أفضل أداء للخلية الشمسية.

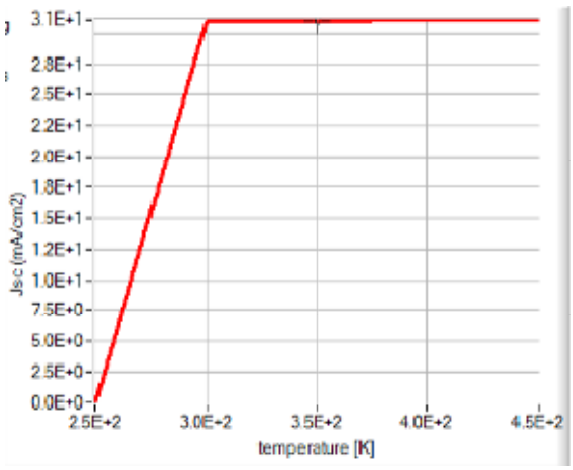
III-4-2-2-2- تأثير درجة الحرارة على خصائص الخلية الشمسية بوجود طبقة TiO_2:



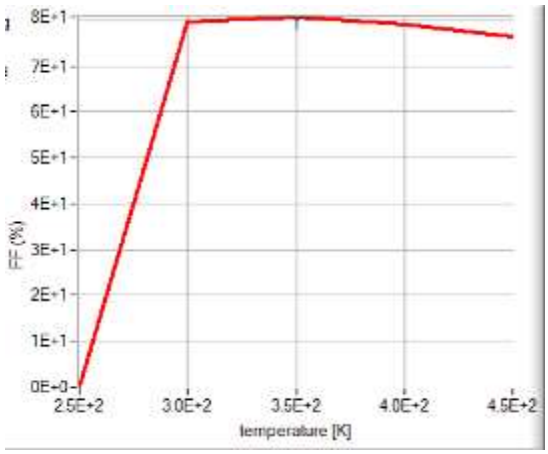
الشكل(III-19): منحنى تغيرات (eta) بدلالة درجة الحرارة



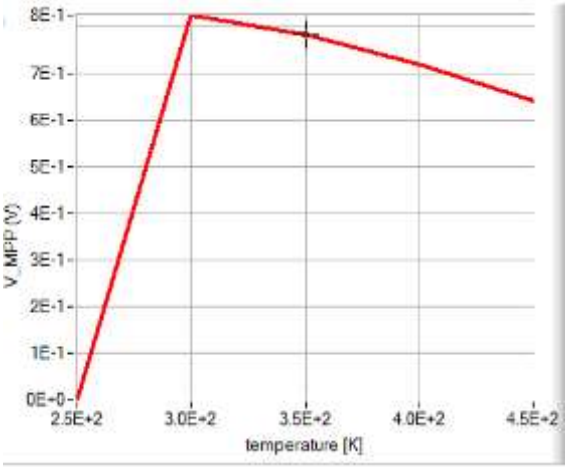
الشكل(III-20): منحنى تغيرات (Voc) بدلالة درجة الحرارة



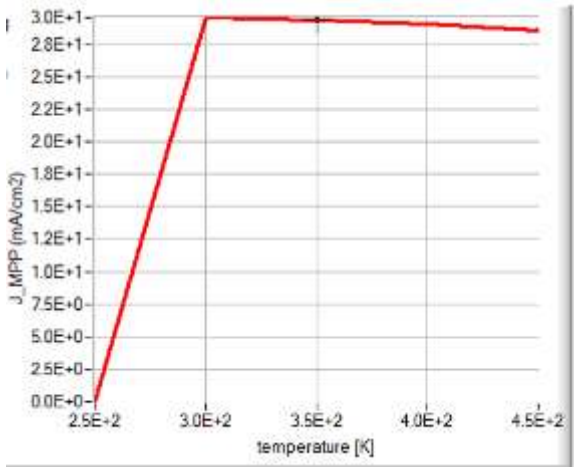
الشكل(III-21): منحنى تغيرات (Jsc) بدلالة درجة الحرارة



الشكل(III-22): منحنى تغيرات (FF) بدلالة درجة الحرارة



الشكل(III-23): منحنى تغيرات (V-MPP) بدلالة درجة الحرارة



الشكل(III-24): منحنى تغيرات (J-MPP) بدلالة درجة الحرارة

توضح المنحنيات المبينة أعلاه تأثير درجة الحرارة على مختلف معاملات أداء الخلية الشمسية، حيث تمت دراسة تغير كل من المردود η، جهد الدارة المفتوحة Voc، كثافة تيار الدارة القصيرة Jsc، معامل التعبئة FF، بالإضافة إلى خصائص نقطة الاستطاعة العظمى(V-MPPو J-MPP).

III-4-2-2-2-1- تحليل ومناقشة النتائج:

1- المردود η:

يمثل الشكل (III-19) تغير كفاءة التحويل الطاقوي (η) بدلالة درجة الحرارة، حيث ترتفع الكفاءة تدريجيا لتبلغ قيمتها العظمى بحوالي 24% عند 300K، وهي الدرجة التي تحقق أفضل توازن بين توليد الشحنات ونقلها داخل الخلية الشمسية.

بعد ذلك، تبدأ الكفاءة في الانخفاض التدريجي مع زيادة درجة الحرارة لتصل إلى حوالي 17% عند 450K. ويفسر هذا التراجع بارتفاع معدلات إعادة الاتحاد الحراري وزيادة الفواقد الداخلية، مما يؤثر مباشرة على القدرة الكهربائية المستخرجة من الخلية.

2- جهد الدارة المفتوحة Voc :

يوضح الشكل (III-20) تغير جهد الدارة المفتوحة (Voc) بدلالة درجة الحرارة، حيث يلاحظ ارتفاع واضح في قيمة الجهد عند الانتقال من درجات الحرارة المنخفضة نحو درجة حرارة

(300k)، إذ تصل قيمة Voc إلى أقصاها بحوالي 0.95V . ويفسر هذا السلوك بتحسن انتقال حاملات الشحنة وانخفاض تأثير التجمد الحراري في الدرجات المنخفضة.

بعد تجاوز 300K يبدأ جهد الدارة المفتوحة في الانخفاض التدريجي مع ارتفاع درجة الحرارة، ويعود ذلك إلى الزيادة في تيار التشبع العكسي (J0) وتناقص فجوة الطاقة(Bandgap)، مما يؤدي إلى ارتفاع معدلات إعادة اتحاد الحوامل(Recombination)، وبالتالي تراجع الجهد المتولد داخل الخلية الشمسية.

3- تيار الدارة القصيرة Jsc :

يبين الشكل (III-21)تغير كثافة تيار الدارة القصيرة (Jsc) بدلالة درجة الحرارة، حيث يلاحظ ارتفاع سريع للتيار عند الانتقال من 250k إلى 300k. ويعزى ذلك إلى تحسن حركة حاملات الشحنة وزيادة قدرتها على الانتقال داخل طبقات الخلية.

ومع استمرار ارتفاع درجة الحرارة حتى 450k، ويبقى التيار شبه مستقر مع تسجيل انخفاض طفيف فقط، ويرجع ذلك إلى زيادة تصادم الحوامل مع اهتزازات الشبكة البلورية (Phonon Scattering)، مما يؤدي إلى انخفاض محدود في حركية الشحنات.

4- عامل الامتلاء FF:

يوضح الشكل (III-22) تغير عامل الامتلاء بدلالة درجة الحرارة، حيث يسجل أعلى قيمة له بالقرب من 300K بحوالي 78%. ويرتبط هذا التحسن بانخفاض تأثير المقاومات الطفيلية وتحسن جودة انتقال الشحنات داخل الخلية عند درجات الحرارة المعتدلة.

ومع ارتفاع درجة الحرارة، يبدأ عامل الامتلاء في الانخفاض التدريجي نتيجة ازدياد المقاومة المتسلسلة (Rs) وانخفاض المقاومة المتوازية (Rsh)، مما يؤدي إلى تشوه منحنى تيار-الجهد وانخفاض جودة الأداء الكهروضوئي للخلية الشمسية.

5- جهد نقطة الاستطاعة العظمى V-MPP:

يوضح الشكل (III-23)تغير الجهد عند نقطة الاستطاعة العظمى (V-MPP) بدلالة درجة الحرارة، حيث يرتفع تدريجيا حتى يبلغ أعلى قيمة له عند 300K بحوالي 0.8V، ثم يبدأ في الانخفاض المستمر مع زيادة درجة الحرارة.

ويفسر هذا السلوك بتأثر الحواجز الطاقوية داخل الخلية بالاضطرابات الحرارية وازدياد إعادة اتحاد الحوامل، مما يقلل من قدرة الخلية على العمل عند جهود مرتفعة، وبالتالي يؤدي إلى انخفاض القدرة العظمى والكفاءة الكلية للخلية الشمسية.

6- تيار نقطة الاستطاعة العظمى J-MPP:

يبين الشكل (Ⅲ-24) تغير كثافة التيار عند نقطة الاستطاعة العظمى (J-MPP) بدلالة درجة الحرارة، حيث يسجل ارتفاعا واضحا حتى يصل إلى قيمته العظمى عند 300K بحوالي $29mA/cm^2$.

بعد ذلك، يبقى التيار مستقرا نسبيا مع انخفاض طفيف عند درجات الحرارة المرتفعة، مما يدل على أن آليات نقل وتجميع الشحنات داخل طبقة TiO_2 تحافظ على فعاليتها الحرارية ضمن المجال المدروس، وأن التأثير الأكبر لارتفاع الحرارة يتركز أساسا على معاملات الجهد أكثر من التيار.

Ⅲ-4-2-2-2-2- تلخيص وتحديد تأثير درجة الحرارة على أداء الخلية بوجود طبقة TiO2:

بهدف إجراء مقارنة رقمية دقيقة وتسهيل تتبع سلوك معاملات الخلية الشمسية المدروسة بدلالة تغير درجة حرارة التشغيل (T)، يلخص الجدول **(Ⅲ-5)** القيم العددية الحرجة المستخرجة من منحنيات المحاكاة السابقة بوجود طبقة TiO_2.

الجدول(Ⅲ-5):تغير معاملات الأداء الحرجة للخلية الشمسية بدلالة درجة الحرارة بوجود طبقة TiO_2

T(K)	Voc(V)	Jsc(mA/cm	FF(%)	η(%)	V_{MPP}(V)	J_{MPP}(mA/cm^2)
250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
300(الأمثل)	0.9855	30.989	79.748	24.356	0.8235	29.577
350	0.9163	31.035	80.802	22.297	0.7832	29.337
400	0.8441	31.093	79.294	20.810	0.7168	29.032

- التحليل الفيزيائي للمعاملات الكهربائية:

من خلال تتبع قيم الجدول(Ⅲ-5)، يلاحظ سلوك منتظم ومستمر لمختلف المعاملات الكهربائية بدلالة تغير درجة حرارة التشغيل (T). حيث تسجل الخلية إنعداما تاما في أداء الكفاءة والجهد عند درجة الحرارة المنخفضة 250 K نتيجة لضعف التنشيط الحراري، وتجمد ناقلات الشحنة الحرة (Carrier Freeze-out).

بالمقابل تسجل الخلية أعلى كفاءة تحويل طاقوي عند درجة الحرارة القياسية 300k بقيمة η=24.356%، مترافقة مع أعلى قيم لكل من جهد الدارة المفتوحة Voc= 0.9855V، وتيار النقطة العظمى J-MPP=29.577mA/cm^2 .

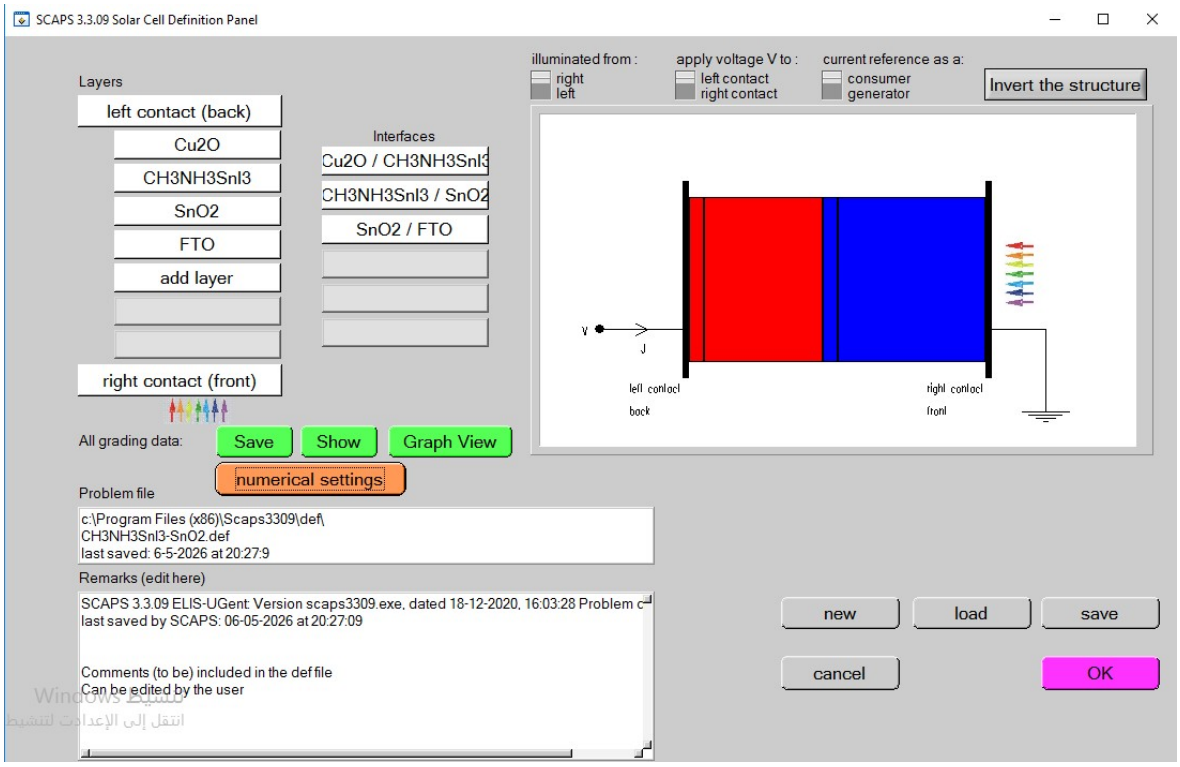
ومع الزيادة التدريجية لدرجة الحرارة من 300K *إلى* 400K ، يلاحظ انخفاض مستمر وواضح في قيم الكفاءة والجهد وقيم V-MPP *و* J-MPP. ويفسر هذا السلوك فيزيائيا بارتفاع الطاقة الحركية والاهتزازية للشبكة البلورية، مما يؤدي إلى زيادة حادة في تيار التشبع العكسي (I_0) الناجم عن زيادة تركيز الناقلات الجوهرية. هذا الارتفاع الحراري يسرع بشكل مباشر من معدلات إعادة اتحاد الحوامل غير المشع عند الواجهة البينية لطبقة البيروفيسكايت والطبقة الناقلة للإلكترونات(TiO_2)، مما يتسبب في هبوط الجهد وتراجع الأداء الإجمالي للخلية.

بالمقابل يظهر تيار الدارة القصيرة *Jsc* وعامل الامتلاء FF تغيرات طفيفة ومتذبذبة مع زيادة الحرارة، إلا أنّ هذا السلوك يبقى غير كاف لتعويض الانخفاض الحاد المسجل في بقية المعاملات الكهربائية الأساسية (خاصة الجهد Voc).

وبناء على النتائج السابقة، تم تحديد درجة الحرارة القياسية 300k كدرجة مثالية لتحقيق أفضل أداء واستقرار للخلية الشمسية بوجود طبقة TiO_2.

Ⅲ-4-2-3- تأثير طبقة ثنائي أكسيد القصدير SnO_2:

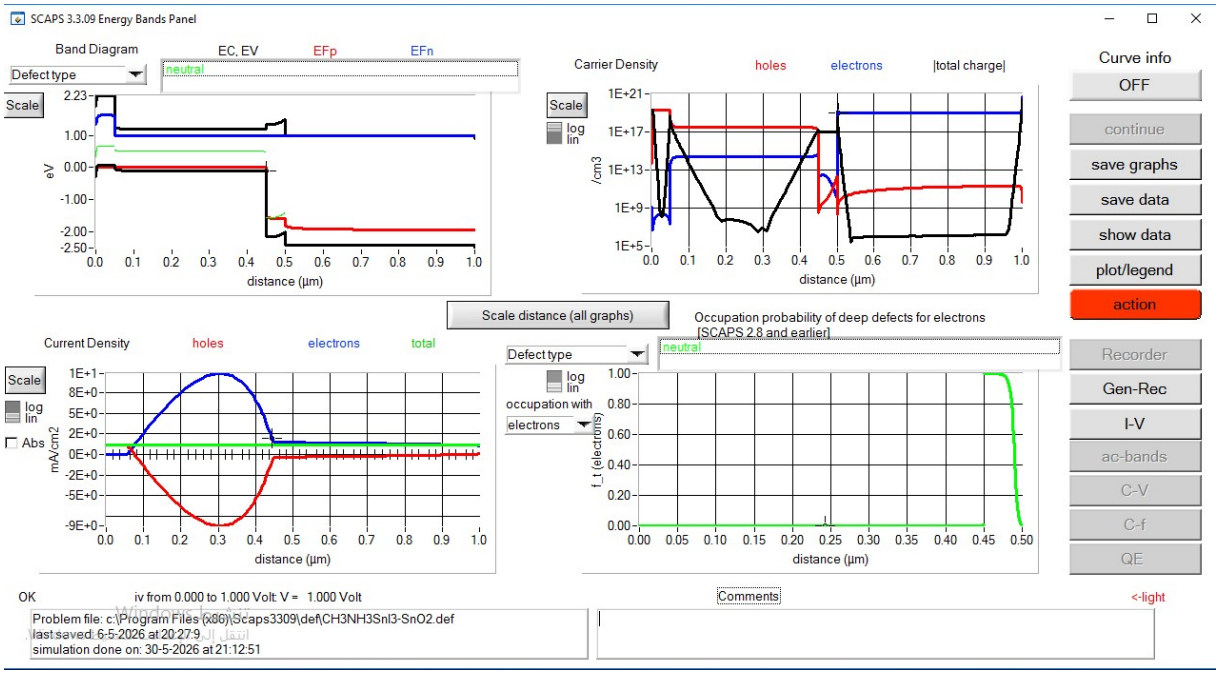
بهدف إجراء دراسة مقارنة شاملة واستكشاف بدائل أكثر استقرارا وكفاءة، تم استبدال الطبقة الناقلة للإلكترونات السابقة بطبقة ثنائي أكسيد القصدير (SnO_2). ولضمان دقة المقارنة الفيزيائية بين المواد، تم الحفاظ على نفس الشروط التشغيلية والمعاملات البنائية القياسية السابقة في برنامج SCAPS-1D .



الشكل(Ⅲ-25): هيكل خلية البيروفسكايت الشمسية باعتبار SnO_2 المادة الناقلة في برنامج SCAPS-1D

يظهر الشكل (Ⅲ-25) واجهة برنامج SCAPS-1D بعد إعداد النموذج البنائي البديل للخلية الشمسية المعتمدة على القصدير حيث تم الحفاظ على كافة المعاملات الفيزيائية للطبقات المشتركة، مع استبدال الطبقة ثاني أكسيد التيتانيوم السابقة بطبقة الجديدة:**SnO_2 (ثنائي أكسيد القصدير)**، تعمل كطبقة ناقلة للإلكترونات (ETL) بديلة، وتتحدد وظيفتها الأساسية في تجميع وفصل الإلكترونات المتولدة ضوئيا في طبقة البيروفسكايت ونقلها بكفاءة نحو القطب الأمامي الموصل(FTO)، مع منع مرور الثقوب لتفادي حدوث إعادة الالتحام.

عقب الانتهاء من ضبط هذا النموذج الجديد ومحاكاة سمات طبقاته المختلفة، سيتم إجراء تحليل شامل للخصائص الكهربائية والمؤشرات الجوهرية للأداء(I-V) بدلالة تغير السمك ودرجة الحرارة.



الشكل(Ⅲ-26): مخططات توزيع الطاقة والشحنات والتيار في خلية البيروفسكايت باعتبارSnO_2 المادة الناقلة للإلكترونات

1- مخطط مستويات الطاقة (Energy Band Diagram):

يظهر الرسم البياني انحناء متناسقا في مستويات الطاقة(Ec) و(Ev) عند الواجهة البينية بين طبقة نقل الإلكترونات(SnO_2) وطبقة الامتصاص البيروفسكايت ($SH_3NH_3SnI_3$). هذا التوافق الطاقوي الممتاز يعزز من قوة المجال الكهربائي الداخلي عند الواجهة، مما يسمح بنقل أكثر سلاسة للإلكترونات نحو القطب الكهربائي ويقلل بشكل ملحوظ من حاجز الطاقة مقارنة بالمادة السابقة.

2- توزيع حاملات الشحنة (Carrier Density Electrons and Holes):

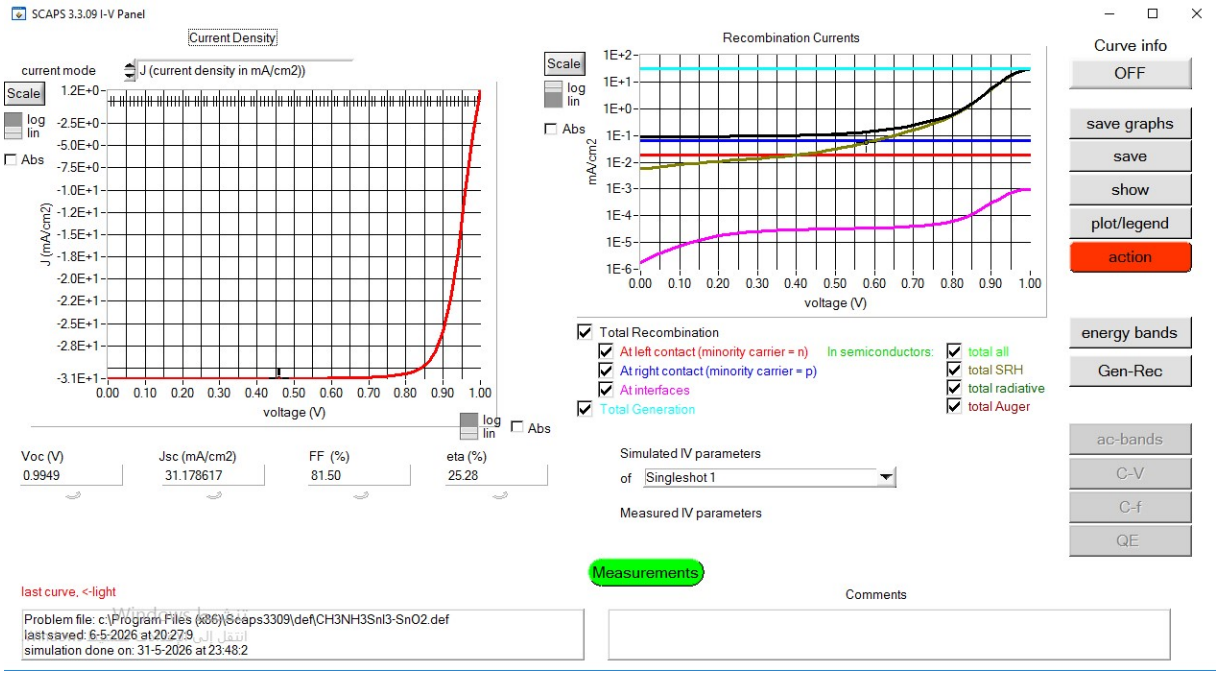
نلاحظ احتفاظ تركيز الإلكترونات (باللون الأزرق) بقيم مرتفعة ومستقرة عند الواجهة البينية الأولى ($0.0\mu m$) مع مادة SnO_2 . في المقابل ينخفض تركيز الثقوب (باللون الأحمر) بشكل حاد ودقيق عند هذه المنطقة، مما يثبت الكفاءة العالية لطبقة SnO_2 في عملية الفصل الانتقائي لحاملات الشحنة، ومنع ارتداد الثقوب نحو جهة الإلكترونات.

3- كثافة التيار الناتج عن الحوامل (Current Density of Electrons and Holes):

يظهر المنحنى كثافة تيار الإلكترونات وتيار الثقوب سلوكا متناظرا ومثاليا داخل الطبقة الفعالة. نلاحظ أن القيمة المطلقة لذروة التيار قد سجلت ارتفاعا واضحا (وصولا إلى مشارف 1 E+1 أو حوالي $10mA/cm^2$ كقيمة قصوى داخل الطبقة عند ذروة المنحنى)، مع الحفاظ على استقرار تام وثبات لتيار الكلي(باللون الأخضر) على طول مسافة الخلية، مما يدل على تقليل الفواقد الطاقوية الناتجة عن المقاومة البينية.

4- احتمالية إشغال العيوب بالإلكترونات(Occupation Probability of Deep Defects):

يوضح المنحنى أن احتمالية إشغال العيوب العميقة بالالكترونات تبقى منعدمة (0.0) في معظم مناطق الخلية لتشهد قفزة حادة وتمركزا دقيقا عند نهاية مسافة الطبقة الفعالة وبداية الواجهة الثانية (عند حدود $0.45\mu m$ إلى $0.50\mu m$). هذا السلوك يؤكد أنّ مادة SnO_2 نجحت في تحييد تأثير مراكز إعادة التركيب داخل عمق طبقة البيروفسكايت، وحصرت تأثير العيوب في نطاق ضيق جدا عند الواجهة الخلفية فقط.



الشكل (Ⅲ-27): منحنى التيار-الجهد (I-V Curve) وتحليل تيارات إعادة التركيب.

1 - منحنى التيار-الجهد – (I-V Curve) الرسم البياني على اليسار:

أظهرت نتائج المحاكاة عند استبدال الطبقة TiO_2 بمادة SnO_2 تحسنا ملحوظا في جميع المعايير الكهروضوئية للخلية، حيث سجلت القيم المثالية التالية:

- جهد الدارة المفتوحة (Voc): 0.9949 V
- تيار الدارة القصيرة (J_{sc}): 31.178 mA/cm²
- معامل التعبئة (FF): 81.50%
- كفاءة التحويل (η): 25.28%

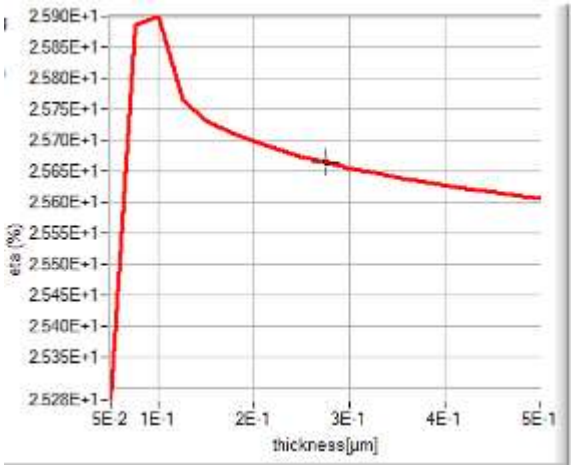
هذا الارتفاع العام في الكفاءة يؤكد أن المادة توفر توازنا طاقويا أفضل يقلل من المقاومات الداخلية للخلية ويسمح باستخلاص طاقة قصوى أعلى.

2- تحليل تيارات إعادة التركيب (Recombination Currents):

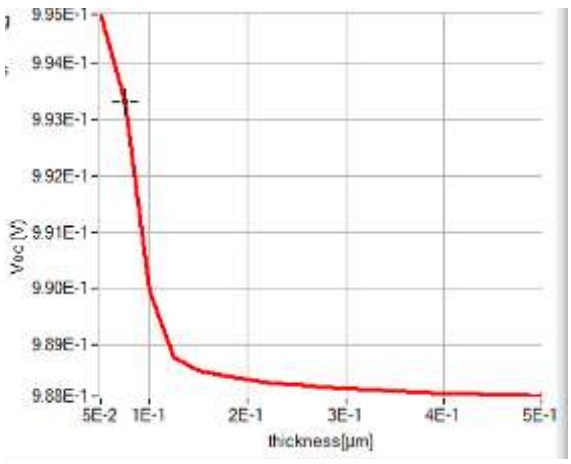
عند دراسة آليات الفقد تحت تأثير مادة SnO_2، نلاحظ التغيرات الفيزيائية الجوهرية التالية:

- عند الجهود المنخفضة والمشحونة، استقرت معدلات إعادة التركيب الكلية عند مستويات دنيا منخفضة جدا (في رتبة $10^{-2} mA/cm^2$)، مما يفسر القيمة المرتفعة في تيار(Jsc) القصر وعامل الامتلاء(FF).
- مع زيادة الجهد المطبق (الاقتراب من Voc): يلاحظ أن منحنى تيارات إعادة التركيب عبر مراكز العيوب (Total SRH) حافظ على استقرار طاقوي ملحوظ، حيث كان معدل الصعود تدريجيا وبقيم إجمالية كبحها النظام قبل الوصول إلى قيم الجهد العالية. في حين يظهر منحنى إعادة التركيب الإجمالي (Total Recombination) صعودا بارزا عند الجهود المرتفعة نتيجة لتزايد تأثير آليات الفقد المختلفة عند الاقتراب من جهد الدارة المفتوحة.
- الأثر العام على جودة البنية : هذا التحكم الفعال في إجمالي التيارات المفقودة يؤكد كفاءة هذه البنية الطبقية في تقليص تأثير المصائد الطاقوية، مما انعكس إيجابا على الأداء العام والوصول بالكفاءة إلى 25.28%.

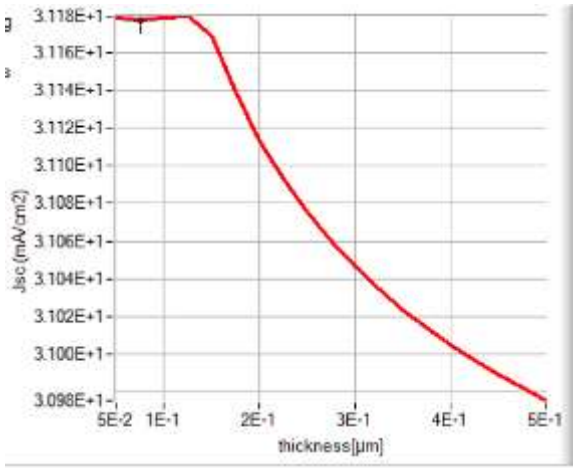
III-4-2-3-1- تأثير سمك طبقة SnO2 على خصائص الخلية الشمسية:



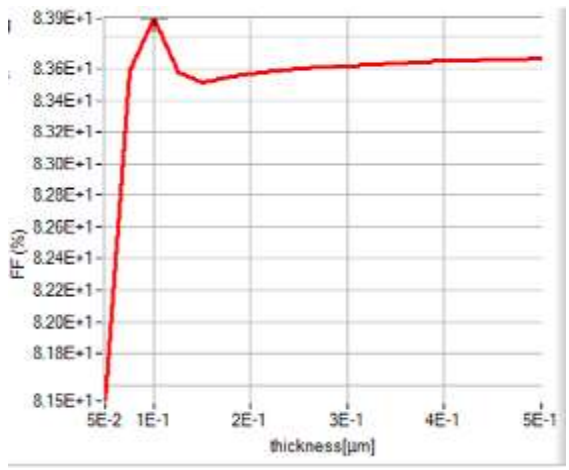
الشكل(III-28):منحنى تغيرات (eta) بدلالة سمك طبقة النقل SnO2



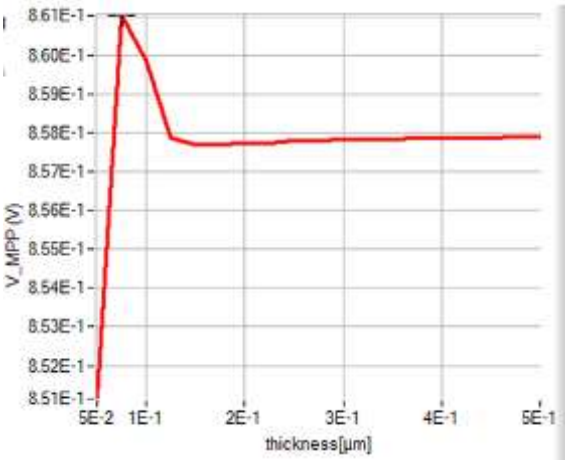
الشكل(III-29): منحنى تغيرات (Voc) بدلالة سمك طبقة النقل SnO2



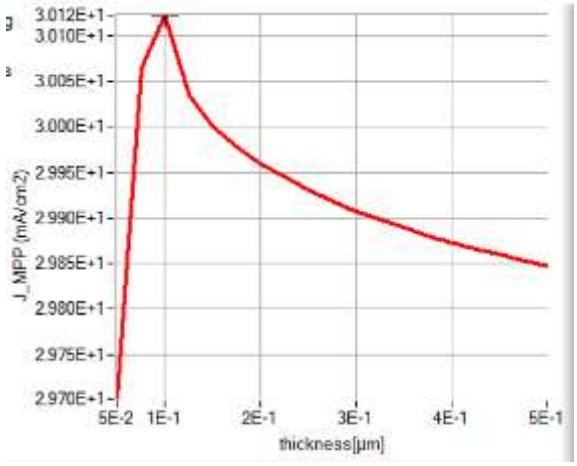
الشكل (Ⅲ-30):منحنى تغيرات (Jsc) بدلالة سمك طبقة النقل SnO2



الشكل(Ⅲ-31): منحنى تغيرات (FF) بدلالة سمك طبقة النقل SnO2



الشكل(Ⅲ-32): منحنى تغيرات (V-MPP) بدلالة سمك طبقة النقل SnO2



الشكل(Ⅲ-33):منحنى تغيرات (J-MPP) بدلالة سمك طبقة النقل SnO2

توضح المنحنيات المبينة أعلاه تأثير سمك طبقة SnO_2 على مختلف معاملات أداء الخلية الشمسية، حيث تمت دراسة تغير كل من المردود η، جهد الدارة المفتوحة Voc، كثافة تيار الدارة القصيرة Jsc، معامل التعبئة FF، بالإضافة إلى خصائص نقطة الاستطاعة العظمى(V-MPP و J-MPP).

3-3-2-3-1- تحليل ومناقشة النتائج:

1- المردود η:

يظهر المنحنى البياني الممثل لتغير كفاءة التحويل الطاقوي(η) كدالة لسمك الطبقة الناقلة للإلكترونات (SnO_2) الشكل (III-28)، سلوكا تنازليا مستمرا مع زيادة السمك، حيث يسجل المردود قيمته القصوى عند أدنى سمك للطبقة، ليبدأ بعدها في الانخفاض التدريجي كلما اتجهنا نحو سمكات أكبر .

يعزى هذا السلوك فيزيائيا إلى أنّ زيادة سمك SnO_2 تؤدي مباشرة إلى رفع المقاومة التسلسلية الداخلية للطبقة، الأمر الذي يعيق النقل السلس للحوامل الشحنية المستخلصة ويزيد من احتمالية إعادة الاتحاد قبل وصولها إلى الأقطاب، بناء على ذلك فإنّ الطبقات الرقيقة توفر مسارا أقصر للإلكترونات، مما يقلل من الفواقد الداخلية ويضمن الحصول على كفاءة مثلى للخلية الشمسية المدروسة.

2- جهد الدارة المفتوحة Voc :

يوضح منحنى تغير جهد الدارة المفتوحة (Voc) بدلالة سمك طبقة SnO_2 الشكل (III-29) تراجعا تدريجيا في قيم الجهد مع زيادة سمك الطبقة، حيث تتمركز أعلى قيمة لـ **Voc** عند السمكات المتدنية، ثم تنخفض هذه القيم تباعا مع زيادة سماكة الطبقة الناقلة للإلكترونات.

ويرتبط هذا الانخفاض أساسا بزيادة المقاومة الداخلية للخلية الناتجة عن زيادة حجم الطبقة، مما يعزز من معدلات إعادة اتحاد الحوامل الكهربائية المتولدة ضوئيا. هذا التأثير السلبي يؤدي إلى خفض كفاءة فصل الشحنات عند الواجهة البينية مما ينعكس طرديا على تقليص قيمة جهد الدارة المفتوحة وبالتالي يتأكد أنّ الحفاظ على سمك رقيق ونموذجي لطبقة SnO_2 يعد محددا رئيسيا لتفادي هبوط الجهد.

3- تيار الدارة القصيرة Jsc:

يكشف المنحنى الخاص بتيار الدارة القصيرة (Jsc) الشكل (III-30) عن تأثر الكثافة التيارية سلبا بزيادة سمك طبقة SnO_2، حيث تسجل أعلى كثافة تيار عند أقل سمك تم نمذجته، في حين تتناقص هذه القيم تدريجيا مع زيادة أبعاد الطبقة.

ويمكن تفسير الآلية الفيزيائية لهذا التراجع بأنّ زيادة السمك تفرض على الإلكترونات المتولدة مسارا أطول للوصول إلى القطب الكهربائي المجمع، مما يرفع من فرضية وقوع عمليات عادة الاتحاد أثناء النقل الجسيمي، بالإضافة إلى ذلك فإنّ نمو المقاومة التسلسلية يحدّ من تدفق الشحنات الحرة ويقلل من كفاءة تجميعها، مما يثبت أن القيم المنخفضة لسمك طبقة SnO_2 هي الأكثر ملاءمة لتأمين استخلاص أعظمي للتيار.

4- معامل الامتلاء FF:

على عكس المعاملات السابقة، يظهر معامل الامتلاء (FF) الشكل (III-31) منحنى نمو تصاعدي مع زيادة سمك طبقة SnO_2 ضمن النطاق المدروس، حيث تسجل أدنى قيمة له عند السمكات الدقيقة، ويبدأ في الارتفاع الملحوظ كلما زاد سمك الطبقة الناقلة.

يبرر هذا السلوك فيزيائيا بأنّ زيادة السمك تساهم في تحسين الخصائص الهندسية للطبقة، مما يعمل على معالجة العيوب السطحية وتقليل تيارات التسرب داخل الوصلة. هذا التحسن يضمن توازنا أفضل في توزيع الحوامل الشحنية وتقليص الفواقد عند الأقطاب حيث ظروف التشغيل المختلفة مما ينعكس إيجابا على شكل منحنى(التيار - الجهد) ويؤدي إلى رفع قيمة معامل الامتلاء، مستعرضا تأثيرا فيزيائيا يوازن جزئيا الخسائر المسجلة في الجهد والتيار.

5- الجهد عند نقطة الاستطاعة العظمى V-MPP:

يسلك منحنى الجهد عند نقطة الاستطاعة العظمى (V-MPP) الشكل (III-32) منحى تنازليا مع زيادة سمك طبقة SnO_2. إذ تتركز القيم المرتفعة لهذا الجهد عند السمكات الرقيقة ثم تنخفض تدريجيا كلما زادت سماكة الطبقة الناقلة للإلكترونات.

ويعود التراجع لقيم V-MPP إلى الهبوط الجهدي الداخلي الناجم عن ارتفاع المقاومة المتسلسلة لطبقة SnO_2 السميكة، مما يزحزح نقطة التشغيل المثلى للخلية بعيدا عن الاستقرار المطلق. تعزز هذه النتائج فكرة أنّ رقة الطبقة الناقلة تضمن تقليل المفقودات الجهدية أثناء النقل، وبالتالي الحفاظ على جهد تشغيلي قريب من القيمة النظرية القصوى للخلية.

6- كثافة التيار عند نقطة الاستطاعة العظمى J-MPP:

يبين المنحنى كثافة التيار عند نقطة الاستطاعة العظمى J-MPP الشكل (III-33) دالة تناقصية بدلالة زيادة سمك الطبقة SnO_2 حيث يسجل التيار أعلى مستوياته عند السمك الأقل متبوعا بانخفاض مستمر ومطرد مع الاتجاه نحو السمكات الأكبر.

تعزى هذه الظاهرة مباشرة إلى تزايد الفواقد المقاومتية الداخلية وارتفاع معدلات إعادة اتحاد الحوامل الكهربائية نتيجة لزيادة المسافة المقطوعة داخل الطبقة الناقلة للإلكترونات. هذا التدهور في كفاءة النقل والاستخلاص للشحنات يؤثر سلبا على المردود التياري للخلية عدا تعمل عند نقطة القدرة

القصوى، مما يؤكد أنّ زيادة سمك SnO_2 تلقي بظلالها السلبية على تيار التشغيل الأمثل للخلية الشمسية

III-4-2-3-2- تلخيص وتحديد السمك الأمثل لطبقة SnO_2 :

بهدف إجراء مقارنة رقمية دقيقة وتسهيل تتبع سلوك معاملات الخلية الشمسية المدروسة بدلالة تغير السمك، يلخص الجدول (III-6) التالي القيم العددية الحرجة المستخرجة من منحنيات المحاكاة السابقة لطبقة SnO_2.

الجدول(III-6):تأثير سمك طبقة SnO2 على المعلمات الكهربائية للخلية الشمسية

سمك طبقةSnO2 d(μm)	Voc(V)	Jsc(mA/cm^2)	FF(%)	η(%)	VMPP(V)	JMPP(mA/cm^2)
0.05	0.9949	31.1786	81.5009	25.2804	0.8512	29.7014
0.10(الأمثل)	0.9900	31.1780	83.9169	25.9012	0.8599	30.1224
0.20	0.9884	31.1135	83.5650	25.6979	0.8578	29.9595
0.30	0.9882	31.0466	83.6194	25.6553	0.8578	29.9072
0.40	0.9881	31.0050	83.6465	25.6272	0.8579	29.8730
0.50	0.98811	30.9755	83.6631	25.6065	0.8579	29.8476

- نظرا للعدد الكبير من البيانات المستخرجة من برنامج المحاكاة عبر خاصية القراءة الدفعية(Batch playback)، تم الاكتفاء في الجدول(III-6) بعرض القيم الرقمية لمجموعة من النقاط الموزعة بانتظام عبر المجال المدروس لتوضيح سلوك المعلمات الكهربائية للخلية بشكل مبسط، بينما تظهر المنحنيات البيانية السابقة المسار المستمر لجميع النقاط المحاكاتية بدقة عالية.

- التحليل الفيزيائي للمعاملات الكهربائية:

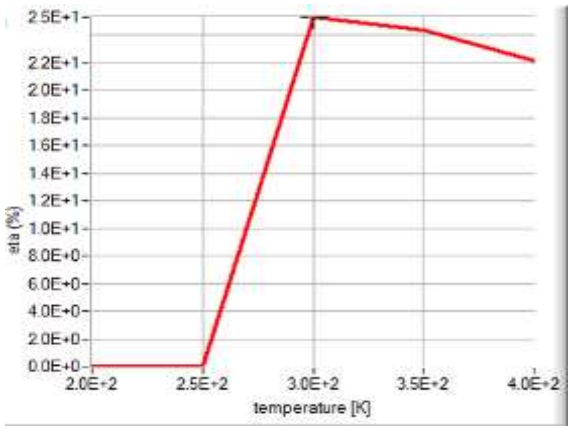
من خلال تتبع قيم الجدول(III-6) يلاحظ سلوك منتظم ومستمر لمختلف المعاملات الكهربائية بدلالة زيادة السمك، حيث تسجل الخلية أعلى كفاءة تحويل طاقوي عند سمك المدروس $0.10\mu m$ بقيمة η=25.9012%، مترافقة مع قيم متوزنة لكل من تيار الدارة القصيرة Jsc=31.1780mA/cm^2 وجهد الدارة المفتوحة Voc=0.9900V وعامب امتلاء مميز FF=83.9169%.

ومع الزيادة التدريجية للسمك من $0.10\mu m$ حتى $0.50\mu m$، يلاحظ انخفاض طفيف ومستمر في قيم الكفاءة والتيار والجهد، بالإضافة إلى تراجع قيم J-MPP و V-MPP. ويفسر هذا السلوك بزيادة المقاومة التسلسلية (Series Resistance) وازدياد طول المسار الذي تقطعه الإلكترونات المتولدة ضوئيا، مما يرفع من احتمال إعادة اتحاد الحوامل (Recombination) قبل وصولها إلى الأقطاب الكهربائية.

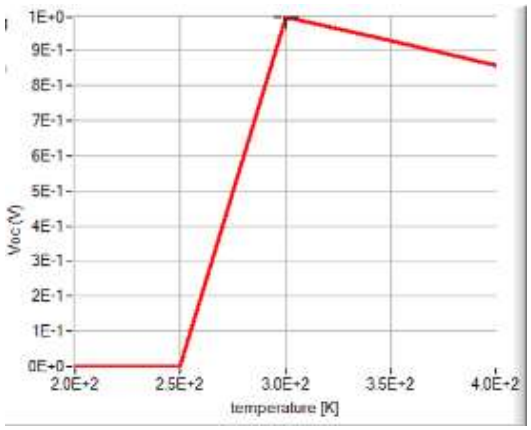
بالمقابل يظهر عامل الامتلاء FF تحسنا طفيفا مع زيادة السمك، إلا أن هذا التحسن يبقى غير كاف لتعويض الانخفاض المسجل في باقي المعاملات الكهربائية خاصة التيار والجهد.

وبناء على النتائج السابقة، تم اختيار السمك $0.10\mu m$ كقيمة مثالية لطبقة SnO_2، لكونه يحقق أفضل أداء للخلية الشمسية.

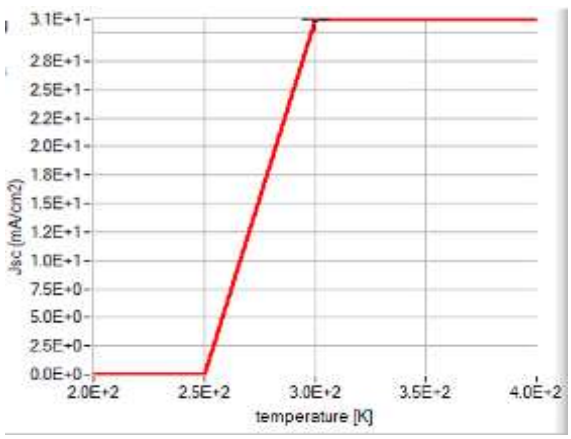
III-4-2-3-2- تأثير درجة الحرارة على خصائص الخلية الشمسية بوجود طبقة SnO_2:



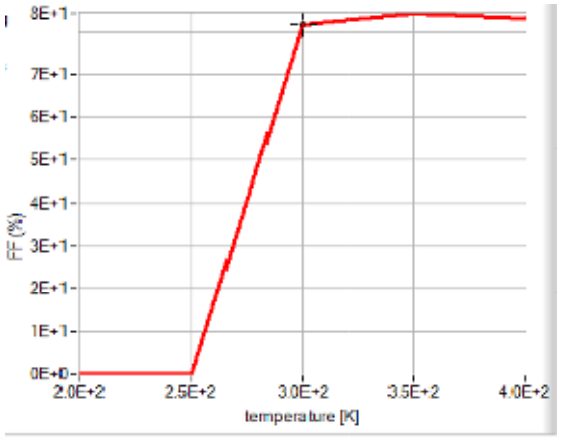
الشكل(III-34):منحنى تغيرات (eta) بدلالة درجة الحرارة



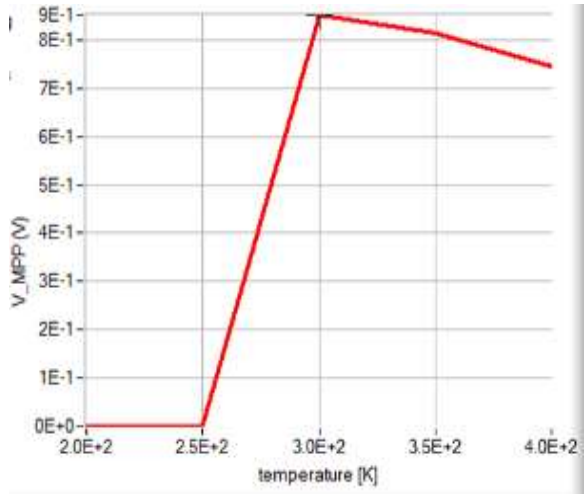
الشكل(III-35): منحنى تغيرات (Voc) بدلالة درجة الحرارة



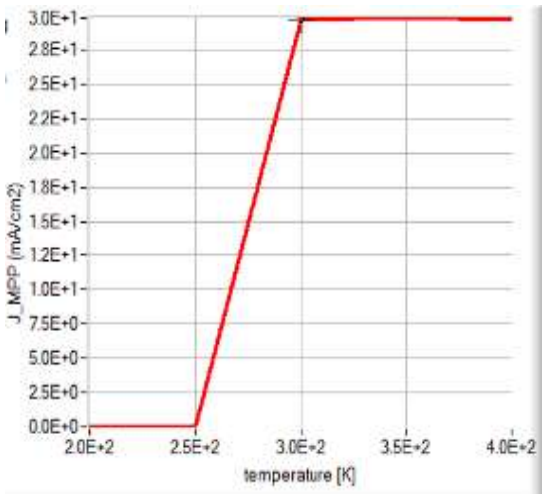
الشكل(III-36): منحنى تغيرات (Jsc) بدلالة درجة الحرارة



الشكل(III-37): منحنى تغيرات (FF) بدلالة درجة الحرارة



الشكل(Ⅲ-38): منحنى تغيرات (Jsc) بدلالة درجة الحرارة



الشكل(Ⅲ-39): منحنى تغيرات (FF) بدلالة درجة الحرارة

توضح المنحنيات المبينة أعلاه تأثير درجة الحرارة على مختلف معاملات أداء الخلية الشمسية، حيث تمت دراسة تغير كل من المردود η، جهد الدارة المفتوحة Voc، كثافة تيار الدارة القصيرة Jsc، معامل التعبئة FF، بالإضافة إلى خصائص نقطة الاستطاعة العظمى(*V-MPP* و *J-MPP*).

Ⅲ-4-2-3-2-1- تحليل ومناقشة النتائج:

1- المردود η:

يمثل الشكل (Ⅲ-34) تغير كفاءة التحويل (η) بدلال الحرارة لمادة SnO_2، حيث نلاحظ ارتفاع الكفاءة بشكل سريع جدا عند الانتقال من درجات الحرارة العمنخفضة لتصل إلى قيمتها العظمى بحوالي 25.90% عند درجة الحرارة 300K(27°C) ، وهي الدرجة المثالية التي تحقق أفضل توازن بين توليد الشحنات ونقلها داخل الخلية الشمسية.

بعد ذلك تبدأ الكفاءة في الانخفاض التدريجي والمستمر مع زيادة درجة الحرارة لتصل إلى حوالي 25.60% عند 500K(227°C) . ويفسر هذا التراجع بارتفاع معدلات إعادة الاتحاد الحراري وزيادة الفواقد الداخلية، متأثرة بالانخفاض الواضح والأساسي في جهد الدارة المفتوحة، مما ينعكس سلبا على القدرة الكهربائية المستخرجة الملية للخلية.

2- جهد الدارة المفتوحة Voc:

يوضح الشكل (III-35) تغير جهد الدارة المفتوحة (Voc) بدلالة درجة الحرارة، حيث يلاحظ ارتفاع واضح في قيمة الجهد عند الانتقال من درجات الحرارة المنخفضة نحو درجة حرارة الغرفة(300k)، إذ تصل قيمة Voc إلى ذروتها بحوالي 0.990V. ويفسر هذا السلوك بتحسن انتقال حاملات الشحنة وانخفاض تأثير التجمد الحراري في الدرجات المنخفضة.

بعد تجاوز 300K، يبدأ جهد الدارة المفتوحة في الانخفاض التدريجي مع ارتفاع درجة الحرارة (حيث ينخفض خطيا وبشكل طفيف حتى يقارب 0.988V عند نهاية المجال). ويعود هذا التناقص إلى الزيادة في تيار التشبع العكسي (J_0) وتناقص فجوة الطاقة للمواد، مما يؤدي مباشرة إلى ارتفاع معدلات إعادة اتحاد الحوامل وتراجع الجهد المتولد داخل الخلية.

3- تيار الدارة القصيرة Jsc:

يبين الشكل (III-36) تغير كثافة تيار الدارة القصيرة (Jsc) بدلالة درجة الحرارة، حيث يلاحظ ارتفاع سريع للتيار عند الانتقال من درجات الحرارة المنخفضة نحو 300k ليثبت عند قيمة تقارب $31.178mA/cm^2$. ويعزى هذا السلوك إلى تحسن حركية الشحنات وزيادة قدرتها على الانتقال والعبور داخل طبقات الخلية.

ومع استمرار ارتفاع درجة الحرارة يلاحظ أن التيار يبقى مستقرا بشكل ملحوظ مع انخفاض طفيف جدا لا يكاد يذكر عند نهاية المجال المدروس(ليصل إلى $30.975mA/cm^2$ عند *500k*). ويرجع هذا التغير الطفيف إلى تصادم حاملات الشحنة مع اهتزازات الشبكة البلورية الناتجة عن زيادة الطاقة الحرارية، مما يسبب انخفاضا محدودا جدا في حركية الشحنات المتولدة.

4- عامل الامتلاء FF:

يوضح الشكل (III-37) تغير عامل الامتلاء بدلالة درجة الحرارة حيث يسجل أعلى قيمة له بالقرب من 300K بحوالي 83.916% ويرتبط هذا الأداء المثالي بانخفاض تأثير المقاومات الطفيلية وتحسن التجميع الشحنات عند الأقطاب المتكافئة حراريا. ومع ارتفاع درجة الحرارة من 300K إلى 500K، يبدأعامل الامتلاء في الانخفاض بشكل طفيف وتدريجي ليبلغ حوالي 83.663% عند نهاية المجال. ويعزى هذا التراجع الطفيف إلى زيادة المقاومة المتسلسلة (Rs) وتناقص المقاومة المتوازية

(Rsh) نتيجة الاضطراب الحراري، مما يؤدي إلى انخفاض طفيف في جودة الأداء الكهروضوئي للخلية.

5- جهد نقطة الاستطاعة العظمى V-MPP:

يوضح الشكل (III-38) تغير الجهد عند نقطة الاستطاعة العظى بدلالة درجة الحرارة، حيث يرتفع تدريجيا في البداية حتى يبلغ ذروته عند 300K بقيمة 0.8598V ، ليدخل بعدها في مرحلة انخفاض تدريجي ومستمر مع زيادة الحرارة حتى يصل إلى 0.8579V عند 500K.

ويفسر هذا التناقص بتأثر الحواجز الطاقوية الفعالة داخل بنية الخلية بالاضطرابات الحرارية المستمرة وازدياد فرص إعادة اتحاد الحوامل، مما يقلل من مقدرة استقرار جهد الخلية عند العمل في ظروف الاستطاعة القصوى.

6- تيار نقطة الاستطاعة العظمى J-MPP :

يبين الشكل (III-39) تغير كثافة التيار عند نقطة الاستطاعة العظمى بدلالة درجة الحرارة، حيث نلاحظ قفزة سريعة للتيار في المنخفضات الحرارية ليصل إلى قيمته العظمى والمثالية عند 300K بحوالي $30.122mA/cm^2$. بعد تجاوز هذه الدرجة، يحافظ التيار على استقراره العام مع تراجع ضئيل جدا عند درجات الحرارة ليبلغ $29.847mA/cm^2$ عند 500K . وتدل هذه النتيجة بوضوح على أن آليات نقل وتجميع الشحنات في مادة SnO_2 تتميز باستقرارية حرارية ممتازة ضمن المجال المدروس، وأن تراجع كفاءة الخلية الكلية مع الحرارة يعود بالدرجة الأولى إلى حساسية معاملات الجهد (Voc وV-MPP) مقارنة بمعاملات التيار المستقرة.

III-4-2-3-2-2- تلخيص وتحديد تأثير درجة الحرارة على أداء الخلية بوجود طبقة SnO2:

بهدف إجراء مقارنة رقمية دقيقة وتسهيل تتبع سلوك معاملات الخلية الشمسية المدروسة بدلالة تغير درجة حرارة التشغيل(T)، يلخص الجدول(III-7) القيم العددية الحرجة المستخرجة من منحنيات المحاكاة السابقة بوجودة طبقة SnO_2.

الجدول(Ⅲ-7):تغير معاملات الأداء الحرجة للخلية الشمسية بدلالة درجة الحرارة بوجود طبقة SnO_2

T(K)	Voc(V)	Jsc(mA/cm	FF(%)	η(%)	V_{MPP}(V)	J_{MPP}(mA/cm^2)
200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
300(الأمثل)	0.9949	31.1786	81.5009	25.2804	0.8512	29.7014
350	0.9263	31.1747	84.1705	24.3053	0.8153	29.8117
400	0.8564	31.1753	82.9694	22.1523	0.7462	29.6872

- التحليل الفيزيائي للمعاملات الكهربائية:

من خلال تتبع الجدول(Ⅲ-7)، يلاحظ سلوك منتظم ومستمر لمختلف المعاملات الكهربائية بدلالة تغير درجة حرارة التشغيل(T). حيث تسجل الخلية إنعداما تاما في أداء الكفاءة والجهد عند درجات الحرارة(200K و 250K) نتيجة لضعف التنشيط الحراري، وتجمد ناقلات الشحنة الحرة.

بالمقابل تسجل الخلية أعلى كفاءة تحويل طاقوي عند درجة الحرارة القياسية 300K بقيمة η=25.2804%، مترافقة مع أعلى قيم لكل من جهد الدارة المفتوحة Voc=0.9949V. وتيار الدارة العظمى

$$J - MPP = 29.7014\text{mA/cm}^2.$$

ومع زيادة التدريجية لدرجة الحرارة من 300K إلى 400K، يلاحظ انخفاض مستمر وواضح في قيم الكفاءة والجهد وقيم V-MPP. ويفسر هذا السلوك فيزيائيا بارتفاع الطاقة الحركية والاهتزازية للشبكة البلورية، مما يؤدي إلى زيادة حادة في تيار التشبع العكسي (I_0) الناجم عن زيادة تركيز الناقلات الجوهرية. هذا الارتفاع الحراري يسرع بشكل مباشر معدلات إعادة اتحاد الحوامل غير

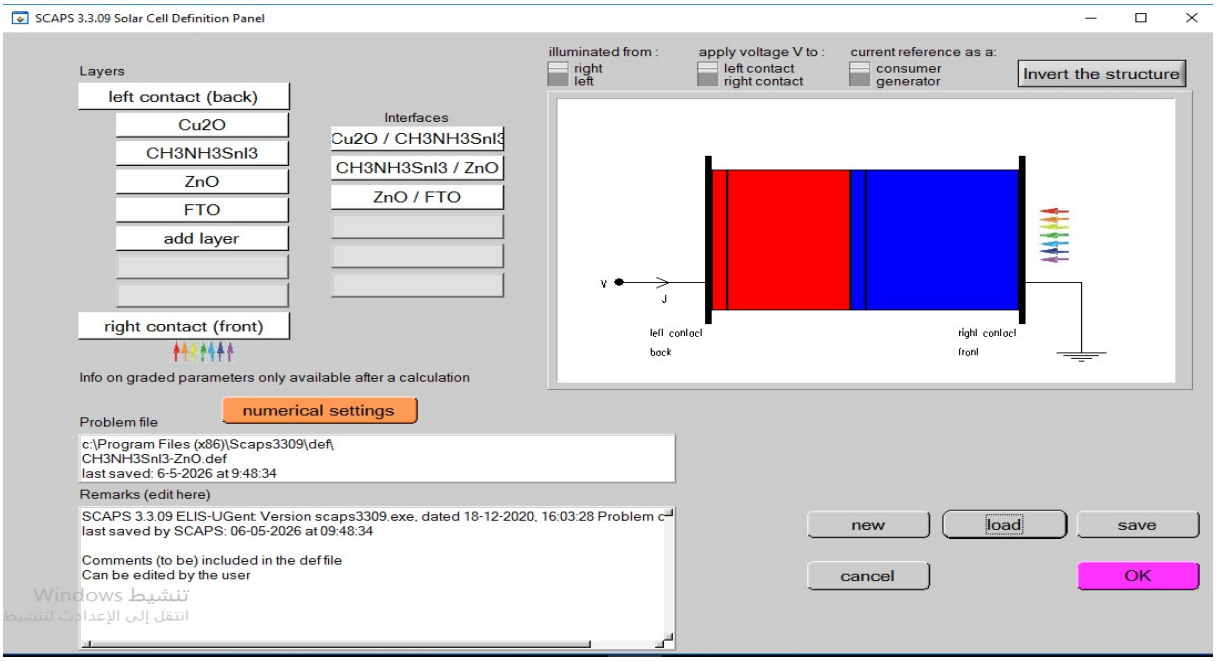
المشع عند الواجهة البينية لطبقة البيروفسكايت والطبقة الناقلة للإلكترونات (SnO_2)، مما يتسبب في هبوط الجهد وتراجع الأداء الإجمالي للخلية.

بالمقابل يظهر تيار الدارة القصيرة وعامل الامتلاء FF تغيرات طفيفة ومتذبذبة مع زيادة الحرارة إلا أن هذا السلوك يبقى غير كاف لتعويض الانخفاض الحاد المسجل في بقية المعاملات الكهربائية الأساسية (خاصة الجهد Voc).

وبناء على النتائج السابقة، تم تحديد درجة الحرارة القياسية 300K كدرجة مثالية لتحقيق أفضل أداء واستقرار للخلية الشمسية بوجود طبقة SnO_2.

Ⅲ-4-2-4- تأثير طبقة أكسيد الزنك ZnO:

بهدف إجراء دراسة مقارنة شاملة واستكشاف بدائل أكثر استقرارا وكفاءة، تم استبدال الطبقة الناقلة للإلكترونات السابقة بطبقة أكسيد الزنك (ZnO). ولضمان دقة المقارنة الفيزيائية بين المواد، تم الحفاظ على نفس الشروط التشغيلية والمعاملات البنائية القياسية السابقة في برنامج SCAPS-1D .

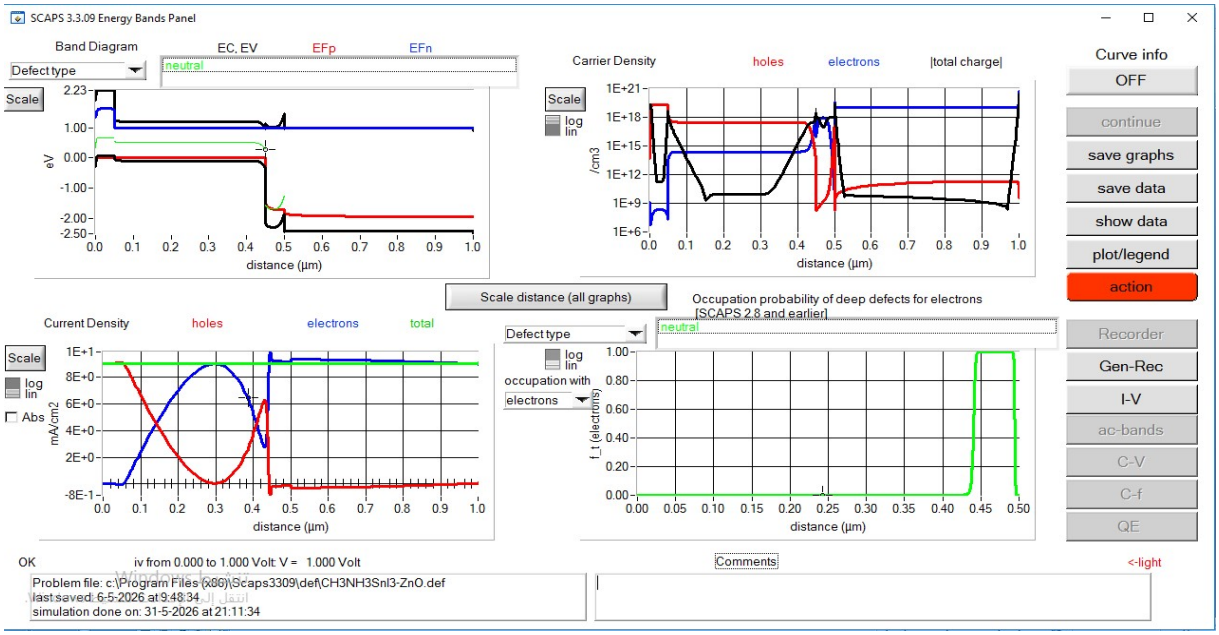


الشكل(Ⅲ-40): هيكل خلية البيروفسكايت الشمسية باعتبار ZnO المادة الناقلة في برنامج SCAPS-1D

يظهر الشكل (Ⅲ-40) واجهة برنامج SCAPS-1D بعد إعداد النموذج البنائي البديل للخلية الشمسية المعتمدة على القصدير حيث تم الحفاظ على كافة المعاملات الفيزيائية للطبقات المشتركة، مع استبدال الطبقة ثاني أكسيد التيتانيوم السابقة بطبقة الجديدة:ZnO (أكسيد الزنك).

تعمل كطبقة ناقلة للإلكترونات (ETL) بديلة، وتحدد وظيفتها الأساسية في تجميع وفصل الإلكترونات المتولدة ضوئيا في طبقة البيروفسكايت ونقلها بكفاءة نحو القطب الأمامي الموصل (FTO)، مع منع مرور الثقوب لتفادي حدوث إعادة الالتحام.

عقب الانتهاء من ضبط هذا النموذج الجديد ومحاكاة سمات طبقاته المختلفة، سيتم إجراء تحليل شامل للخصائص الكهربائية والمؤشرات الجوهرية للأداء (I-V) بدلالة تغير السمك ودرجة الحرارة.



الشكل(Ⅲ-41): مخططات توزيع الطاقة والشحنات والتيار في خلية البيروفيسكايت باعتبارZnO المادة الناقلة للإلكترونات

1- مخطط مستويات الطاقة (Energy Band Diagram):

يظهر الرسم البياني انحناء متناسقا في مستويات الطاقة(Ec) و(Ev) عند الواجهة البينية بين طبقة نقل الإلكترونات(ZnO) وطبقة الامتصاص البيروفسكايت ($SH_3NH_3SnI_3$).هذا التوافق الطاقوي المثالي يعزز من قوة المجال الكهربائي الداخلي عند الواجهة، مما يسمح بنقل أكثر سلاسة للإلكترونات نحو القطب الأمامي ويقلل بشكل ملحوظ من حاجز الطاقة .

2- توزيع حاملات الشحنة (Carrier Density Electrons and Holes):

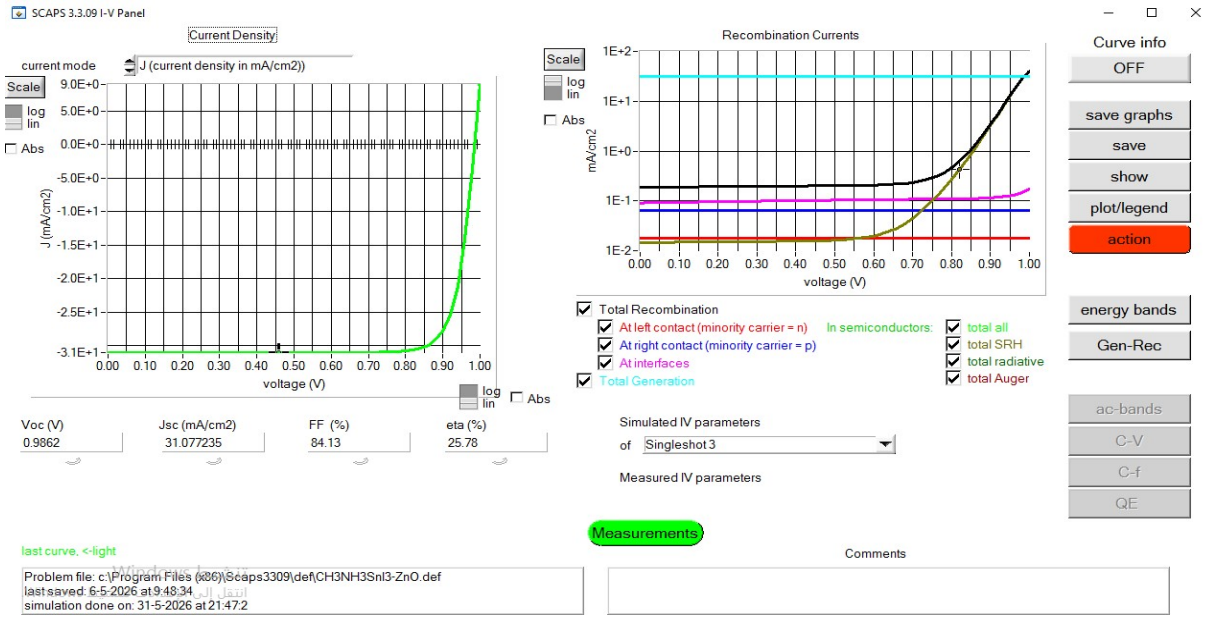
نلاحظ من خلال منحنيات توزيع الشحنات احتفاظا متميزا لتركيز الإلكترونات (باللون الأزرق) بقيم مرتفعة داخل حدود الطبقة البينية الأولى الممتدة عند $(0.0\mu m)$ مع مادة ZnO. وفي المقابل ينخفض تركيز الثقوب (باللون الأحمر) بشكل حاد ودقيق عند هذه المنطقة، مما يثبت الكفاءة العالية لطبقة ZnO في عملية الفصل الانتقائي لحاملات الشحنة، ومنع ارتداد الثقوب نحو جهة الإلكترونات.

3- كثافة التيار الناتج عن الحوامل (Current Density of Electrons and Holes):

يظهر المنحنى كثافة تيار الإلكترونات وتيار الثقوب سلوكا متناظرا ومثاليا داخل الطبقة الفعالة. نلاحظ أن القيمة المطلقة لذروة التيار قد سجلت ارتفاعا واضحا (وصولا إلى مشارف 1 E+1 أو حوالي $10mA/cm^2$ كقيمة قصوى داخل الطبقة عند ذروة المنحنى)، مع الحفاظ على استقرار تام وثبات لتيار الكلي(باللون الأخضر) على طول مسافة الخلية، مما يدل على تقليل الفواقد الطاقوية الناتجة عن المقاومة البينية.

4- احتمالية إشغال العيوب بالإلكترونات(Occupation Probability of Deep Defects):

يوضح المنحنى أن احتمالية إشغال العيوب العميقة بالالكترونات تبقى منعدمة (0.0) في معظم مناطق الخلية لتشهد قفزة حادة وتمركزا دقيقا عند نهاية مسافة الطبقة الفعالة وبداية الواجهة الثانية(عند حدود $0.45\mu m$ إلى $0.50\mu m$). هذا السلوك يؤكد أنّ مادة ZnO نجحت في تحييد تأثير مراكز إعادة الالتحام داخل عمق طبقة البيروفسكايت، وحصرت تأثير العيوب في نطاق ضيق جدا عند الواجهة الخلفية فقط.



الشكل (Ⅲ-42): منحنى التيار-الجهد (I-V Curve) وتحليل تيارات إعادة التركيب.

1 - منحنى التيار-الجهد – (I-V Curve) الرسم البياني على اليسار:

بينت نتائج المحاكاة عند استبدال الطبقة بمادة ZnO الحفاظ على استقرار المعايير الكهروضوئية للخلية، وتحقيق أداء متميز، حيث سجلت الخلية القيم المثالية التالية:

- جهد الدارة المفتوحة (Voc): 0.9862 V
- تيار الدارة القصيرة (Jsc): 31.077 mA/cm²

- معامل التعبئة (FF): 84.13%
- كفاءة التحويل (η): 25.78%

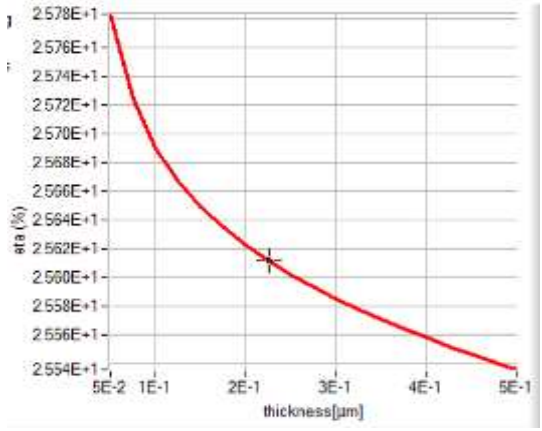
يؤكد هذا الأداء العام المرتفع، ولا سيما القيمة الممتازة لمعامل التعبئة (FF=84.13%)، أن مادة أكسيد الزنك توفر توازنا طاقويا ممتاز عند الواجهة البينية، مما يقلل بشكل فعال من المقاومات الداخلية للخلية، ويسمح باستخلاص ونقل الشحنات بأقل فواقد ممكنة، وهو ماينعكس إيجابا على الكفاءة الإجمالية التي بلغت النسبة النموذجية 25.78%.

2- تحليل تيارات إعادة التركيب (Recombination Currents) :

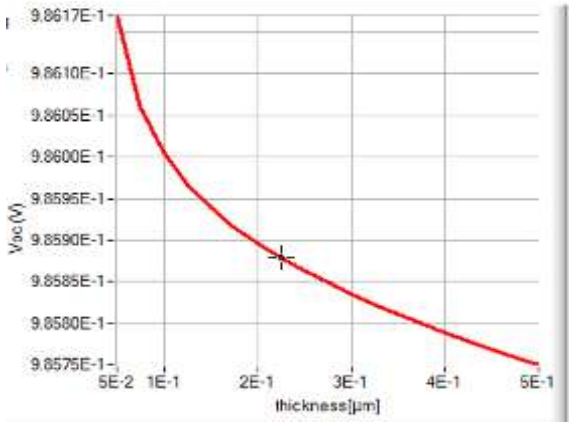
من خلال دراسة آليات الفقد وتحليل منحنيات تيارات إعادة التركيب تحت تأثير مادة ZnO، نلاحظ التغيرات الفيزيائية الجوهرية التالية:

- عند الجهود المنخفضة والمشحونة، استقرت معدلات إعادة التركيب الكلية عند مستويات دنيا منخفضة جدا (في رتبة تيار تقارب $10^{-2} mA/cm^2$)، مما يفسر بشكل مباشر القيمة المرتفعة جدا لكل من تيار القصر (Jsc) وعامل الامتلاء (FF).
- مع زيادة الجهد المطبق (الاقتراب من Voc): يلاحظ أن منحنى تيارات إعادة التركيب عبر مراكز العيوب (Total SRH) حافظ على استقرار طاقوي واضح ومحدود، حيث كان معدل الصعود تدريجيا وبقيم إجمالية تم كبحها قبل الوصول إلى قيم الجهد العالية. في حين يظهر منحنى إعادة التركيب الإجمالي (Total Recombination) صعودا بارزا عند الجهود المرتفعة نتيجة لتزايد تأثير آليات الفقد البينية الأخرى عند الاقتراب من جهد الدارة المفتوحة.
- الأثر العام على جودة البنية : هذا التحكم الفعال في إجمالي التيارات المفقودة يؤكد كفاءة هذه البنية الطبقية المعتمدة على ZnO في تقليص تأثير المصائد الطاقوية، مما انعكس إيجابا على الأداء العام والوصول بالكفاءة إلى 25.78%.

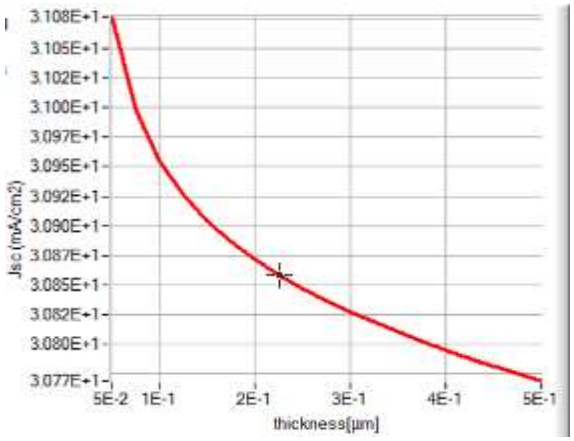
III-4-2-4-1- تأثير سمك طبقة ZnO على خصائص الخلية الشمسية:



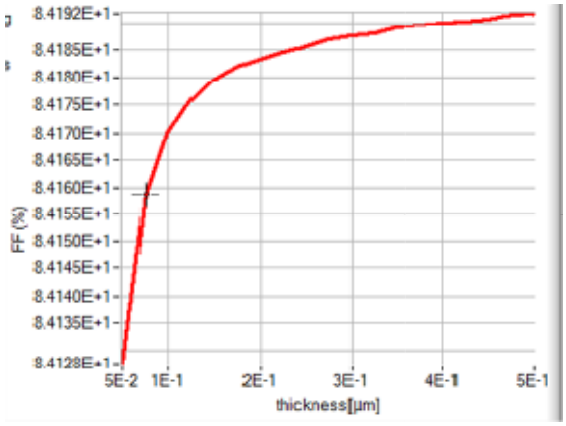
الشكل(III-43): منحنى تغيرات (eta) بدلالة سمك طبقة النقل ZnO



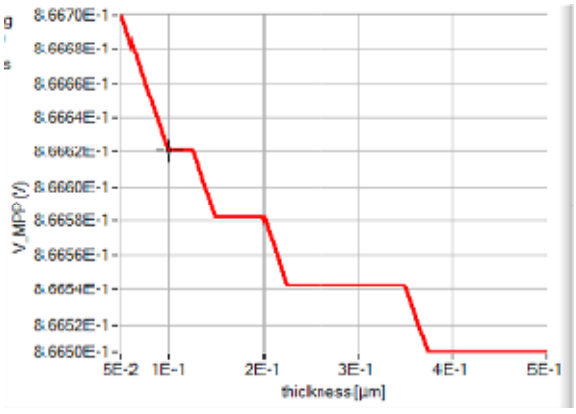
الشكل(III-44): منحنى تغيرات (Voc) بدلالة سمك طبقة النقل ZnO



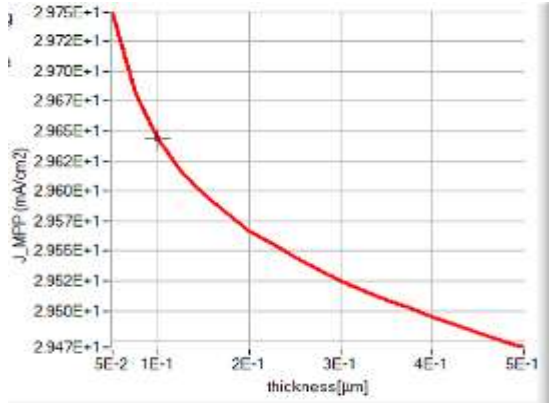
الشكل(III-45): منحنى تغيرات (Jsc) بدلالة سمك طبقة النقل ZnO



الشكل(III-46):منحنى تغيرات (FF) بدلالة سمك طبقة النقل ZnO



الشكل(III-47): منحنى تغيرات (V-MPP) بدلالة سمك طبقة النقل ZnO .



الشكل(III-48): منحنى تغيرات (J-MPP) بدلالة سمك طبقة النقل ZnO

توضح المنحنيات المبينة أعلاه تأثير سمك طبقة ZnO على مختلف معاملات أداء الخلية الشمسية، حيث تمت دراسة تغير كل من الردود η، جهد الدارة المفتوحة Voc، كثافة تيار الدارة القصيرة Jsc، معامل التعبئة FF، بالإضافة إلى خصائص نقطة الاستطاعة العظمى(V-MPP و J-MPP).

III-4-2-4-1-1- تحليل ومناقشة النتائج:

1- المردود η:

يتضح من المنحنى البياني الخاص بالكفاءة η وجود مسار تناقصي مستمر ومقوس كلما اتجهت قيم سمك طبقة ZnO نحو الارتفاع. حيث تسجل الخلية ذروة أدائها الطاقوي عند أدنى سمك ممكن للطبقة الناقلة($0.05\mu m$)، لتبدأ الكفاءة بعدها في التراجع التدريجي الواضح.

يعزى هذا السلوك فيزيائيا إلى أن زيادة المسافة التي تقطعها الحوامل الكهربائية داخل مادة ZnO السميكة ترفع من المقاومة الحجمية للطبقة، مما يتسبب في إعاقة حركة الإلكترونات الحرة المتولدة ضوئيا، وبالتالي زيادة فواقد النقل الحراري وهبوط الأداء الكلي للخلية.

بناء على هذا، يشكل السمك الدقيق جدا الخيار الأمثل للمحافظة على إنتاجية طاقوية مرتفعة.

2- جهد الدارة المفتوحة Voc :

يبين منحنى تغير جهد الدارة المفتوحة Voc انخفاضا طفيفا ومستمرا يتناسب عكسيا مع زيادة سمك طبقة ZnO، هذا التناقص المستمر في قيم الجهد يمكن تفسيره بظاهرة إعادة الاتحاد الفيزيائية، فحينما يزداد سمك مادة أكسيد الزنك، تزداد احتمالية احتجاز الشحنات(Trapping) أو إعادة اتحادها عند المستويات الطاقوية البينية للمادة قبل تمكنها من الوصول إلى القطب التماسي. هذا الخلل في فصل الحوامل يؤدي مباشرة إلى تقلص طفيف في الجهد الداخلي للخلية (Voc)، مما يعزز من فرضية أن الطبقات الأكثر رقة هي الأفضل للحفاظ على الاستقرار الجهدي.

3- تيار الدارة القصيرة Jsc:

يسلك منحنى كثافة تيار الدارة القصيرة Jsc سلوكا تراجعيا حادا في البداية ثم يستقر على تضاؤل تدريجي مع زيادة سمك طبقة ZnO ، حيث تتدنى قيم التيار بشكل ملحوظ عند الانتقال إلى الأبعاد السميكة للطبقة.

لتفسير العلمي لهذه الظاهرة يكمن في "عمر النصف لحوامل الشحنة" ومسافة الانتشار (Diffusion Length). إن زيادة سمك طبقة ZnO تجبر الإلكترونات على قطع مسار أطول للوصول إلى المسرى الأمامي للخلية. ونظرا لارتفاع فواقد النقل واعتراض الشحنات المستخلصة، يقل عدد الإلكترونات الناجحة في بلوغ التماس الكهربائي، مما ينعكس سلبا على كثافة التيار الكلية المستقاة من الخلية الشمسية.

4- معامل الامتلاء FF:

على نقيض المعاملات السابقة، يظهر منحنى معامل الامتلاء FF طفرة صعودية واضحة، حيث يرتفع بشكل سريع في نطاق السمك الصغير، ثم يؤول إلى الاستقرار النسبي عند السمك الأكبر، مسجلا أعلى قيمه عند نهاية المنحنى.

السبب الفيزيائي في هذا الصعود يعود إلى دور السمك في توفير تغطية فيزيائية متجانسة وخالية من العيوب النقطية. في الأبعاد الرقيقة جدا، قد تعاني الطبقة من تيارات تسريب موضعية، ولكن مع زيادة سمك ZnO ، تصبح الطبقة أكثر تماسكا وتعمل كحاجز مثالي يمنع التسريب العكسي للشحنات وتحسن من الخصائص الديناميكية للوصلة، مما يرفع من جودة واستقامة منحنى (I-V) وبالتالي زيادة معامل الامتلاء بشكل ملحوظ.

5- الجهد عند نقطة الاستطاعة العظمى V-MPP:

يظهر المنحنى البياني الخاص بالجهد عند نقطة الاستطاعة العظمى V-MPP سلوكا تناقصيا متدرجا (يأخذ شكل درجات متتابعة) كلما اتجهنا نحو زيادة سمك طبقة أكسيد الزنك(ZnO). حيث تتمركز أعلى قيم لهذا الجهد عند أبعاد السمك الأقل، ثم تبدأ في الانحسار والنزول التدريجي مع تزايد سماكة الطبقة الناقلة للإلكترونات.

يعزى هذا التراجع الفيزيائي إلى أن زيادة سمك مادة ZnO تؤدي مباشرة على تضخم المقاومة المتسلسلة الداخلية للخلية، مما يتسبب في حدوث هبوط طاقة متزايد عبر الطبقة. هذا الفقد الداخلي يمنع الخلية من الحفاظ على استقرار جهد التشغيل المثالي لها، مما يجبر قيمة الجهد عند أقصى استطاعة على الانخفاض، وهو ما يثبت أن استخدام طبقات رقيقة من ال ZnO يعد شرطا أساسيا لتقليص ضياعا الجهد التشغيلي.

6- كثافة التيار عند نقطة الاستطاعة العظمى J-MPP:

يوضح منحنى كثافة التيار عند نقطة الاستطاعة العظمى J-MPP مسارا تناقصيا مستمرا ومنتظما يتناسب عكسيا مع زيادة سمك طبقة ZnO. حيث تسجل الخلية ذروة كثافة تيار التشغيل عند السمك الأقل للطبقة، لتبدأ بعدها القيم في التضاؤل الواضح كلما تحركنا نحو الأبعاد الأكثر سمكا.

ويرجع هذا السلوك العلمي إلى زيادة معدلات إعادة اتحاد حوامل الشحنة (الإلكترونات والثقوب) المتولدة ضوئيا نتيجة طول المسافة التي ترغم الشحنات على قطعها داخل الطبقة السميكة. وبما أن المقاومة ل ZnO تزداد مع السمك، فإن كفاءة جمع واستخلاص هذه الإلكترونات عند نقطة التشغيل القصوى تتراجع، مما يؤدي في النهاية إلى تدني تيار التشغيل الأمثل المستخلص من الخلية الشمسية.

III-4-2-4-1-2- تلخيص وتحديد السمك الأمثل لطبقة ZnO :

بهدف إجراء مقارنة رقمية دقيقة وتسهيل تتبع سلوك معاملات الخلية الشمسية المدروسة بدلالة تغير السمك، يلخص الجدول(III-8) التالي القيم العددية الحرجة المستخرجة من منحنيات المحاكاة السابقة لطبقة ZnO.

الجدول(III-8):تأثير سمك طبقة ZnO على المعلمات الكهربائية للخلية الشمسية سابقة لطبقة ZnO.

سمك طبقة ZnO d(μm)	Voc(V)	Jsc(mA/cm^2)	FF(%)	η(%)	VMPP(V)	JMPP(mA/cm^2)
0.05(الأمثل)	0.9861	31.0772	84.1276	25.7829	0.8666	29.7484
0.10	0.9860	30.9542	84.1703	25.6896	0.8666	29.6434
0.20	0.9858	30.8714	84.1832	25.6220	0.8665	29.5667
0.30	0.9858	30.8271	84.1875	25.5850	0.8665	29.5253
0.40	0.9857	30.7948	84.1898	25.5576	0.8665	29.4951
0.50	0.9857	30.7687	84.1916	25.5355	0.8665	29.4696

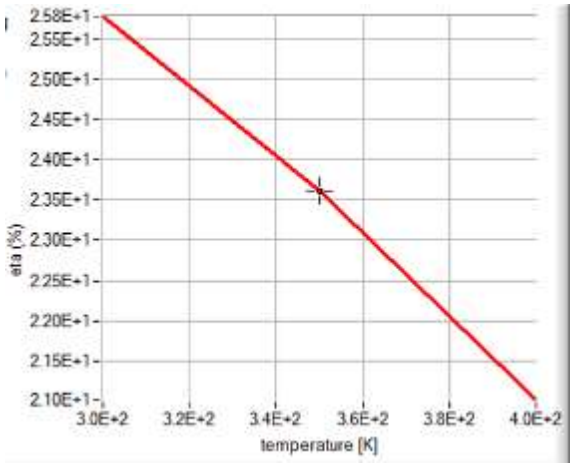
- نظرا للعدد الكبير من البيانات المستخرجة من برنامج المحاكاة عبر خاصية القراءة الدفعية(Batch playback)، تم الاكتفاء في الجدول(III-8) بعرض القيم الرقمية لمجموعة من النقاط الموزعة بانتظام عبر المجال المدروس لتوضيح سلوك المعلمات الكهربائية للخلية بشكل مبسط، بينما تظهر المنحنيات البيانية السابقة المسار المستمر لجميع النقاط المحاكاتية بدقة عالية.

- التحليل الفيزيائي للمعاملات الكهربائية:

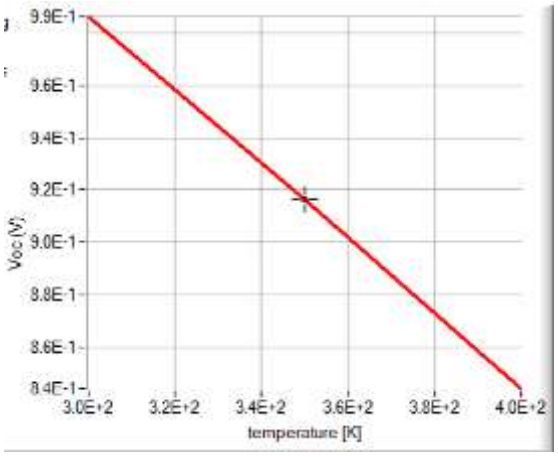
يقود تتبع المعطيات الرقمية المدرجة في الجدول إلى رصد سلوك فيزيائي منتظم ومطرد لمختلف الخصائص التشغيلية للخلية للخلية الشمسية عند تغير سمك الطبقة الناقلة للإلكترونات (ZnO). حيث تبين النتائج أن الاستجابة المثلى كفاءة وأداء تتمركز عند السمك الأقل المدروس $0.05\mu m$ ، محققة كفاءة تحويل طاقوي قصوى تبلغ 25.7829%. وتتكامل هذه الكفاءة الأعظمية مع منظومة متوازنة من المعلمات الكهربائية عند نفس السمك، متمثلة في تيار الدارة القصيرة قيمته $31.0772mA/cm^2$، وجهد الدارة المفتوحة يناهز 0.9861V، مدعومة بمعامل امتلاء مميز يستقر عند 84.1276%.

ومع التدرج التصاعدي لسماكة الطبقة $0.05\mu m$ وصولا إلى السقف الأقصى $0.50\mu m$، يلاحظ وجود تراجع تدريجي مستمر في مؤشرات الأداء الأساسية (الكفاءة، الجهد والتيار)، يرافقه هبوط مواز في قيم كل من V-MPP و J-MPP. ويجد هذا التدهور تفسيره العلمي في تنامي المقاومة المتسلسلة للطبقة الناقلة كلما زادت أبعادها الهندسية، مما يمدد المسار الحركي الذي يجب على الإلكترونات المتولدة ضوئيا تجاوزه قبل التجميع. هذا المسار الطويل يرفع بشكل مباشر من فرص حدوث ظاهرة إعادة الاتحاد عند الواجهات البينية وداخل المادة، الأمر الذي يعيق التدفق السلس للشحنات نحو الأقطاب الكهربائية. في المقابل يسلك معامل الامتلاء (FF) منحنى مغايرا، حيث يبدي تحسنا طفيفا جدا من النمط المستقر مع زيادة السمك. وعلى الرغم من هذا الارتفاع الطفيف، إلا أنه يظل غير كاف إطلاقا لتعويض العجز الطاقوي المترتب عن تراجع قيم الجهد وكثافة التيار. وتأسيسا على هذه المعطيات الفيزيائية، نستنتج أن اختيار السمك $0.05\mu m$ كقيمة مثالية لطبقة ZnO هو الخيار الأنسب لضمان الحد من الفواقد الداخلية وتحقيق أعلى مردودية تشغيلية ممكنة للخلية الشمسية.

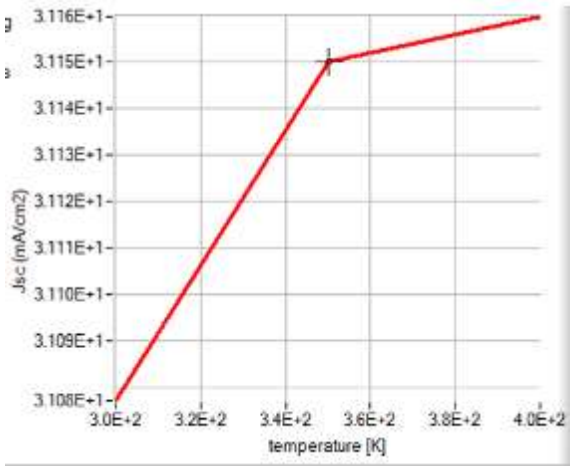
III-4-2-4-2- تأثير درجة الحرارة على خصائص الخلية الشمسية بوجود طبقة ZnO:



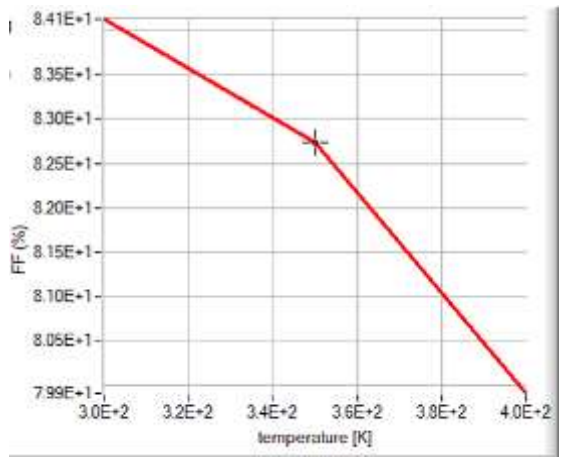
الشكل(III-49): منحنى تغيرات (eta) بدلالة درجة الحرارة



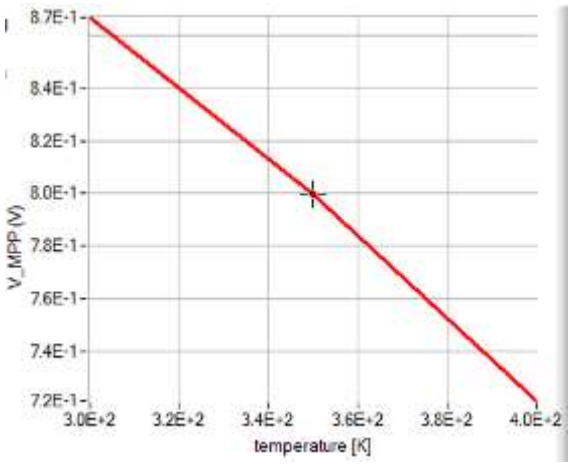
الشكل(III-50): منحنى تغيرات (Voc) بدلالة درجة الحرارة



الشكل(III-51): منحنى تغيرات (Jsc) بدلالة درجة الحرارة



الشكل(III-52): منحنى تغيرات (FF) بدلالة درجة الحرارة



الشكل(III-53): منحنى تغيرات (V-MPP) بدلالة درجة الحرارة

الشكل(III-54): منحنى تغيرات (J-MPP) بدلالة درجة الحرارة

توضح المنحنيات المبينة أعلاه تأثير درجة الحرارة على مختلف معاملات أداء الخلية الشمسية، حيث تمت دراسة تغير كل من المردود η، جهد الدارة المفتوحة Voc، كثافة تيار الدارة القصيرة Jsc، معامل التعبئة FF، بالإضافة إلى خصائص نقطة الاستطاعة العظمى(*V-MPP* و *J-MPP*).

III-4-2-4-2-1-تحليل ومناقشة النتائج:

1- المردود η:

يظهر المنحنى سلوكا تنازليا خطيا واضحا لكفاءة الخلية (η) مع ارتفاع درجة الحرارة. تنخفض الكفاءة من أعلى قيمة لها عند درجة حرارة 300K حوالي 25.8% لتصل إلى أدنى مستوياتها عند 400K حوالي 21.0%.

يعود هذا التدهور في الأداء الطاقوي للخلية بشكل مباشر إلى الانخفاض الحاد في جهد الدارة المفتوحة (Voc) وعامل الامتلاء (FF) نتيجة الارتفاع الحراري. تساهم الحرارة العالية في زيادة الطاقة الحركية لحوامل الشحنة، مما يرفع من معدلات إعادة الالتحام داخل طبقة الامتصاص وعند الواجهات البينية، وبالتالي تقل قدرة الخلية على تحويل الضوء إلى طاقة كهربائية بكفاءة.

2- جهد الدارة المفتوحة Voc:

يوضح المنحنى انخفاضا مستمرا وشبه خطي في جهد الدارة المفتوحة (Voc) مع زيادة درجة الحرارة، حيث يتراجع الجهد من قيمة تقارب 0.99V عند 300Kإلى حوالي 0.84V عند 400K.

فيزيائيا يرتبط جهد الانفتاح ارتباطا وثيقا بتيار التشبع العكسي (Io) وفجوة النطاق. مع ارتفاع درجة الحرارة، يزداد تيار التشبع العكسي بشكل أسي نتيجة لزيادة التوليد الحراري لحوامل الشحنة الجوهرية. هذا الارتفاع في النقل الحراري يقلص من جهد الانفتاح وفقا للعلاقة الصمامية للخلية الشمسية، مما يجعله المعامل الأكثر تأثرا بالحرارة والمسؤول الأول عن تراجع الكفاءة.

3- كثافة تيار الدارة القصيرة Jsc :

على عكس بقية المعاملات، يظهر هذا المنحنى سلوكا تصاعديا لـ (Jsc) مع زيادة درجة الحرارة. ينقسم المنحنى إلى مرحلتين:

زيادة سريعة وبخط مستقيم من 300K حوالي($31.08mA/cm^2$)حتى 350k حوالي($31.15mA/cm^2$)، تليها مرحلة تباطؤ في معدل الزيادة من 350k إلى 400k.

تعزى هذه الزيادة الطفيفة في كثافة التيار الاستقصار إلى ظاهرة تضييق فجوة النطاق الناجمة عن التمدد الحراري للشبكة البلورية وزيادة التفاعل بين الإلكترونات والاهتزازات الحرارية للمادة.

يتيح هذا التقلص الصغير في الفجوة للخلية امتصاص فوتونات ذات طاقة أقل، مما يرفع من تيار الاستقصار. التغير في الميل عند 350K يشير إلى حدوث توازن أو تشبع بين زيادة التوليد الضوئي وزيادة معدل إعادة الالتحام.

4- معامل الامتلاء FF:

ينخفض عامل الامتلاء (FF) بشكل ملحوظ وبصيغة خطية تقريبا مع زيادة درجة الحرارة، حيث يتراجع من أعلى قيمة له عند 300K (حوالي 81.1%) ليصل إلى حوالي 79.9% عند 400K.

يعكس عامل الامتلاء جودة النقل وحفظ الشحنات داخل الخلية. هذا التراجع الحراري لعامل الامتلاء يفسره الانخفاض المتزامن في جهد الانفتاح، بالإضافة إلى زيادة المقاومات الداخلية للخلية، حيث تؤدي الحرارة إلى انخفاض حركية حوامل الشحنة وزيادة مقاومة التسلسل (Rs) نتيجة لتشتت حاملات الشحنة بفعل الاهتزازات الحرارية، مما يضعف جودة منحنى (I-V) ويجعله أقل.

5- جهد نقطة الاستطاعة العظمى V-MPP:

يسلك منحنى الجهد عند نقطة الطاقة القصوى (V-MPP) سلوكا مماثلا لمنحنى الجهد الكلي (Voc)، حيث ينخفض خطيا من حوالي 0.87V عند 300K إلى حوالي 0.73V عند 400K.

يمثل V-MPP الجهد الفعلي الذي تعمل عنده الخلية في أقصى كفاءة تشغيلية لها.

تدهور هذا المعامل حراريا يؤكد أن الخلية تفقد قدرتها الفولتية التشغيلية بنفس معدل فقدانها لجهد الانفتاح تحت التأثير الحراري، مما يستدعي توفير أنظمة تبريد أو تحسين استقرار الواجهات البينية عند التطبيق العملي.

6- كثافة تيار نقطة الاستطاعة العظمى J-MPP:

يظهر المنحنى انخفاضا مستمرا لكثافة التيار عند نقطة الطاقة القصوى (J-MPP) مع ارتفاع درجات الحرارة، متراجعا من حوالي $29.75mA/cm^2$ عند 300K إلى حوالي $29.13mA/cm^2$ عند 400K.

على الرغم من أن تيار الاستقصار الكلي(Jsc) قد ارتفع قليلا مع الحرارة ، إلا أن التيار التشغيلي الفعلي عند نقطة الاستطاعة العظمى (J-MPP) ينخفض. هذا التناقض الظاهري يرجع إلى أن زيادة معدلات إعادة الالتحام عند الجهود العالية (قرب نقطة الطاقة القصوى) تفوق بكثير الزيادة الطفيفة الناتجة عن تضييق فجوة النطاق، مما يثبت أن الخسائر الداخلية للشحنات تحت تأثير الحرارة تشتد بشكل خاص في ظروف التشغيل الحقيقية للخلية.

III-4-2-4-2-2- تلخيص وتحديد تأثير درجة الحرارة على أداء الخلية بوجود طبقة ZnO:

بهدف إجراء مقارنة رقمية دقيقة وتسهيل تتبع سلوك معاملات الخلية الشمسية المدروسة بدلالة تغير درجة حرارة التشغيل(T)، يلخص الجدول(III-9) القيم العددية الحرجة المستخرجة من منحنيات المحاكاة السابقة بوجودة طبقة ZnO.

الجدول(III-9):تغير معاملات الأداء الحرجة للخلية الشمسية بدلالة درجة الحرارة بوجود طبقة ZnO

T(K)	Voc(V)	Jsc(mA/cm	FF(%)	η(%)	V_{MPP}(V)	J_{MPP}(mA/cm²)
200	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
250	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
300(الأمثل)	0.9862	31.0772	84.1276	25.7829	0.8667	29.7484
350	0.9162	31.1499	82.7432	23.6137	0.7999	29.5193
400	0.8441	31.1597	79.9106	21.0184	0.7215	29.1297

- التحليل الفيزيائي للمعاملات الكهربائية:

يتضح الاستقرار المنهجي للبيانات المدرجة في الجدول(III-9) أن المؤشرات الكهربائية للخلية الشمسية تسلك مسارا متغيرا ومحددا تحت تأثير التدرج الحراري، مع تسجيل الملاحظات الفيزيائية التالية:

- بخصوص درجات الحرارة المنخفضة (200K و 250K): يلاحظ تسجيل قيم منعدمة تماما (0.0000) لجميع معاملات أداء الخلية، ويعود ذلك من الناحية التقنية إلى عدم إقلاع المحاكاة أو توقف اشتغال البرنامج عند هذه الدرجات المنخفضة جدا. من الناحية الفيزيائية، يعزى هذا السلوك إلى ظاهرة تجمد الناقلات وشلل نشاطها الحركي، مما يجعل الخلية عاجزة عن العمل، ولهذا السبب بدأت المنحنيات البيانية المستخرجة من البرنامج مباشرة من درجة الحرارة القياسية 300K.

- مرحلة الأداء الأمثل عند الدرجة القياسية (300K): تبدأ القراءة الفعلية المستقرة للأداء من درجة حرارة الغرفة (300K)، والتي تمثل النقطة المثالية لتشغيل الخلية، حيث سجلت ذروة عطائها الطاقوي بكفاءة تحويل نوعية بلغت $\eta = 25.7829\%$. ويتزامن هذا الأداء المتميز مع تحقيق أعلى قيمة لجهد الدارة المفتوحة ($Voc=0.9862V$) وعامل امتلاء مرتفع ($FF=84.1276\%$)، تعكس هذه المؤشرات جودة التوافق الطاقوي وبنية النطاقات المثالية عند الواجهة البينية بين امتصاصية البيروفسكايت وطبقة النقل المتمثلة في أكسيد الزنك (ZnO) مما يسمح باستخلاص الشحنات بأقل خسائر ممكنة.

- مرحلة التدهور الحراري المتصاعد من $300K$ إلى 400K : مع الارتفاع المتدرج في درجات الحرارة نحو $400K$، تشهد الخلية تراجعا مستمرا في كفاءتها التشغيلية لتنخفض إلى 21.0184% ، ويمكن تفسير هذا الهبوط الحاد من الناحية الفيزيائية بالتناقص المباشر في قيمة الجهد (Voc) وجهد النقطة العظمى (V-MPP).

إنّ رفع حرارة النظام البلوري يؤدي إلى زيادة طاقة الاهتزازات الشبكية، والتي بدورها ترفع من الكفاءة الجوهرية لناقلات الشحنة مما يضاعف من تيار الانحياز العكسي(I_0). هذا التوليف الحراري السلبي يسرع بشكل مباشر من آليات إعادة الالتحام غير المشع عند الواجهة البينية، مما يتسبب في هبوط الجهد وعامل الامتلاء بالتوازي.

- سلوك تيار الاستقصار وعامل الامتلاء (FF وJsc) : في المقابل يبدب تيار (Jsc) نموا طفيفا ومستقرا مع زيادة الحرارة (ليصل إلى $31.1597mA/cm^2$ عند 400K). هذا الصعود المحدود ناتج عن التضييق الحراري الطفيف لفجوة نطاق الطاقة للمادة الماصة، مما يحسن من امتصاص الفتونات منخفضة الطاقة .

بيد أن هذه الزيادة الطفيفة في التيار تظل غير كافية لحجم النتائج الخسائر الجسيمة الناتجوة عن تراجع الجهد، مما يؤدي في النهاية إلى انخفاض المعامل FF وتراجع الأداء الكلي للخلية.

III-4-3-المقارنة والمناقشة العامة للنتائج:

الجدول(III-10):مقارنة الخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية باستعمال طبقات النقل الإلكتروني المختلفة

المواد	η(%)	Voc(V)	Jsc(mA/cm^2)	FF(%)	VMPP(V)	JMPP(mA/cm^2)	افضل درجة حرارة	أفضل سمك
TiO2	24.356	0.9855	30.989	79.748	0.8235	29.5770	300	0.05
SnO2	25.9012	0.9900	31.1780	83.9169	0.8599	30.1224	300	0.10
ZnO	25.7829	0.9861	31.0772	84.1276	0.8666	29.7484	300	0.05

- من خلال النتائج الموضحة في الجدول السابق، نلاحظ أن جميع مواد النقل الإلكتروني المدروسة أعطت مردودا مرتفعا للخلايا الشمسية، مع وجود اختلافات طفيفة في القيم الكهربائية. وقد حققت طبقة SnO_2 أعلى كفاءة بلغت 25.9012% مقارنة بكل من TiO_2 و ZnO، كما سجلت أعلى قيمة لتيار الدارة القصيرة Jsc وجهد الدارة المفتوحة Voc، مما يدل على كفاءة أفضل في نقل الشحنات وتقليل ضياعها داخل الخلية.

أما طبقة ZnO فقد أظهرت أعلى قيمة لمعامل الامتلاء FF وأعلى جهد عند نقطة الاستطاعة العظمى V-MPP، مما يعكس تحسن خصائص الأداء الكهربائي للخلية، في حين سجلت طبقة TiO_2 أقل القيم مقارنة بالمواد الأخرى، إلا أنها حافظت على أداء جيد واستقرار مقبول.

كما تبين أن أفضل أداء للخلايا تحقق عند درجة حرارة 300K بالنسبة لجميع المواد، مع اختلاف طفيف في السمك الأمثل لكل طبقة، حيث بلغ $0.05\mu m$ لكل من TiO_2 و ZnO، و $0.10\mu m$ بالنسبة ل SnO_2.

خاتمة:

وبصفة عامة، أظهرت الدراسة أن اختيار مادة طبقة النقل الإلكتروني يؤثر بشكل مباشر على تحسين أداء الخلايا الشمسية البيروفسكايتية، حيث بدت مادة SnO_2 الأكثر ملاءمة من حيث الكفاءة والاستقرار مقارنة بباقي المواد المدروسة (TiO_2 و ZnO)، كما تؤكد هذه النتائج أهمية المحاكاة العددية باستعمال برنامج SCAPS-1D في دراسة وتحسين أداء الخلايا الشمسية قبل تصنيعها عمليا، مما يساهم في توفير الوقت والتكلفة وتسريع تطوير تقنيات الطاقة لشمسية الحديثة.

المراجع والمصادر:

[1]A. A.Benhabireche abdelhak, etude numerique des cellules photovoltaïques heterojonction, mémoire de magister, universite des sciences et de la technologie houari boumediene, (2016).

[2]H. Chahrazed, Comparaison par simulation numérique entre une cellule solaire n/p et une cellules solaire p/n en silicium cristallin par SCAPS, Université Med Khider Biskra, (2014).

[3] M. Burgelman, P. Nollet, S. Degrave, "Modelling polycrystalline semiconductor solar cells," Thin Solid Films, vol. 361, pp. 527–532, 2000.

[4] J. Verschraegen, M. Burgelman, "Numerical modeling of intra□band tunneling for heterojunction solar cells in SCAPS," Thin Solid Films, vol. 515, pp. 6276–6279, 2007.

[5] S. Degrave, M. Burgelman, P. Nollet, "Modelling of polycrystalline thin film solar cells: new features in SCAPS version 2.3," in Proc. 3rd World Conf. Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, 2003, pp. 487–490.

الخاتمة العامة

الخاتمة العامة:

بعد استعراض الجوانب النظرية المتعلقة بالإشعاع الشمسي وأنصاف النواقل و الخلايا الشمسية البيروفسكايتية في الفصلين الأول والثاني ، تم في الفصل الأخير إجراء دراسة ومحاكاة عددية لأداء الخلية الشمسية باستعمال برنامج SCAPS-1D، وذلك بدراسة تأثير طبقات النقل الإلكتروني المختلفة والمتمثلة في TiO_2 وZnO وSnO_2 على الخصائص الكهربائية للخلايا الشمسية.

أظهرت النتائج أن تغيير مادة طبقة النقل الإلكتروني يؤثر بشكل مباشر على أداء الخلية، حيث سجلت جميع المواد المدروسة مردودًا مرتفعًا مع اختلافات طفيفة في القيم الكهربائية. وقد حققت طبقة SnO_2 أفضل كفاءة مقارنة بكل من TiO_2 وZnO، إضافة إلى قيم مرتفعة لكل من جهد الدارة المفتوحة Voc وتيار الدارة القصيرة Jsc، مما يدل على فعالية جيدة في نقل الشحنات وتقليل إعادة الاتحاد داخل الخلية.

كما بينت الدراسة أن طبقة ZnO أعطت أعلى قيمة لمعامل الامتلاء FF وأفضل جهد عند نقطة الاستطاعة العظمى، في حين حافظت طبقة TiO_2 على أداء جيد واستقرار مقبول رغم أن قيمها كانت أقل نسبيًا مقارنة بباقي المواد.

وأوضحت النتائج كذلك أن سمك طبقة النقل الإلكتروني ودرجة الحرارة يعتبران من العوامل المهمة المؤثرة على أداء الخلايا الشمسية، حيث تم الحصول على أفضل النتائج عند درجة حرارة 300K مع اختلاف السمك الأمثل لكل مادة.

وقد أكدت هذه الدراسة أهمية استخدام برامج المحاكاة العددية مثل SCAPS-*1D* في دراسة وتحسين أداء الخلايا الشمسية قبل الانتقال إلى الجانب التجريبي، لما توفره من دقة وسرعة في تحليل تأثير مختلف المتغيرات وتقليل الوقت والتكاليف.

وفي الأخير، يمكن القول إن اختيار مادة طبقة النقل الإلكتروني المناسبة يساهم بشكل كبير في تحسين أداء واستقرار الخلايا الشمسية البيروفسكايتية، مما يجعل هذه الخلايا من التقنيات الواعدة في مجال الطاقات المتجددة مستقبلًا.

الملخص:

تتناول هذه الدراسة محاكاة أداء الخلايا الشمسية البيروفسكايتية باستعمال برنامج SCAPS-1D، مع التركيز على تأثير طبقات النقل الإلكتروني TiO2 وZnO وSnO2، إضافة إلى تأثير السمك ودرجة الحرارة على أداء الخلية.

أظهرت النتائج أن جميع المواد تعطي أداءً جيدًا، مع تفوق طبقة SnO2 التي سجلت أعلى كفاءة بلغت حوالي 25.9%. كما حققت ZnO أفضل معامل امتلاء، بينما قدمت TiO2 أداءً مستقراً ومقبولاً.

كما بينت الدراسة أن الأداء يتغير حسب السمك ودرجة الحرارة، وكانت أفضل النتائج عند 300 كلفن مع اختلاف السمك الأمثل لكل مادة.

وتؤكد هذه النتائج أهمية المحاكاة العددية في تحسين تصميم الخلايا الشمسية قبل التطبيق العملي.

الكلمات المفتاحية: الخلايا الشمسية، البيروفسكايت، SCAPS-1D، طبقة النقل الإلكتروني، الكفاءة، السمك، درجة الحرارة.

Abstract:

This study presents a simulation of perovskite solar cell performance using SCAPS-1D software, focusing on the effect of different electron transport layers (TiO2, ZnO, and SnO2), as well as the influence of thickness and temperature on cell performance.

The results show that all materials exhibit good performance, with SnO2 achieving the highest efficiency of about 25.9%. ZnO recorded the best fill factor, while TiO2 showed stable and acceptable behavior.

The study also indicates that performance varies with both thickness and temperature, with optimal results obtained at 300 K and different optimal thicknesses for each material.

These findings highlight the importance of numerical simulation in optimizing solar cell design before experimental implementation.

Keywords: Solar cells, perovskite, SCAPS-1D, electron transport layer, efficiency, thickness, temperature.

Résumé:

Cette étude présente une simulation des performances des cellules solaires à pérovskite à l'aide du logiciel SCAPS-1D, en se concentrant sur l'effet de différentes couches de transport d'électrons (TiO2, ZnO et SnO2), ainsi que sur l'influence de l'épaisseur et de la température sur les performances de la cellule.

Les résultats montrent que tous les matériaux étudiés présentent de bonnes performances, avec une efficacité maximale d'environ 25,9 % obtenue pour SnO2. ZnO présente le meilleur facteur de remplissage, tandis que TiO2 montre un comportement stable et acceptable.

L'étude indique également que les performances varient en fonction de l'épaisseur et de la température, avec des résultats optimaux obtenus à 300 K et des épaisseurs optimales différentes selon chaque matériau.

Ces résultats soulignent l'importance de la simulation numérique pour optimiser la conception des cellules solaires avant leur réalisation expérimentale.

Mots-clés : Cellules solaires, pérovskite, SCAPS-1D, couche de transport d'électrons, rendement, épaisseur, température.