جمهورية العراق

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة بابل

كلية التربية للعلوم الصرفة

قسم الفيزياء

الخلايا الشمسية

بحث تخرج مقدم الى مجلس كلية التربية للعلوم الصرفة– جامعة بابل وهو جزء من متطلبات نيل شهادة البكالوريوس في قسم الفيزياء.

من قبل الطالب

حسن سعدون هويج

بإشراف

أ.د. خالد حنين

2026 م

1447هـ

الآية القرآنية

بسم الله الرحمن الرحيم

﴿وَجَعَلْنَا سِرَاجًا وَهَّاجًا﴾

صدق الله العلي العظيم

[سورة النبأ، الآية 13]

الإهداء

إلى من كلّلهما الله بالهيبة والوقار.. إلى من أحملُ اسمهما بكل فخر..

إلى شمس حياتي وقمرها، إلى من سهرت الليالي لترسم لي طريق العلم والنجاح، أمي الغالية..

إلى السند الذي لم يملّ يوماً، والقلب الذي اتكأتُ عليه في كل حين، أبي العزيز..

إلى من بذلا الغالي والنفيس لأصل إلى ما أنا عليه اليوم، أهدي ثمرة جهدي المتواضع هذا، تعبيراً عن حبٍ لا تصفه الكلمات، ووفاءً لجميلٍ لا يُرد.

الشكر والتقدير

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، والصلاة والسلام على معلم البشرية الخير، وبعد..

فانطلاقاً من قوله صلى الله عليه وسلم: "مَنْ لَمْ يَشْكُرِ النَّاسَ لَمْ يَشْكُرِ اللَّهَ"، أتقدم ببالغ الشكر والامتنان والتقدير إلى:

عمادة جامعة بابل الموقرة، متمثلة برئاستها وكافة كوادرها، لما وفروه لنا من بيئة تعليمية محفزة تدفع بالطلبة نحو التميز والإبداع.

عمادة كلية التربية للعلوم الصرفة، لدعمهم المستمر وتذليل الصعاب أمامنا طيلة سنوات الدراسة، وحرصهم الدائم على الرقي بالمستوى العلمي والتربوي للطلبة.

رئاسة قسم الفيزياء، وأساتذتي الأفاضل الذين لم يبخلوا علينا بعلمهم وتوجيهاتهم القيمة، فكانوا خير عون لنا في مسيرتنا العلمية.

كما أتقدم بفيض من الشكر والتقدير والامتنان إلى مشرفي الفاضل: **(أ.د. خالد حنين)** المحترم

الذي تفضل بالإشراف على هذا البحث، فكان لنصائحه السديدة وتوجيهاته العلمية الدقيقة أبلغ الأثر في إتمام هذا العمل وإخراجه بصورته النهائية. لقد غمرني بعلمه وسعة صدره، فجزاه الله عني وعن طالب العلم خير الجزاء.

وأخيراً، أتوجه بالشكر لكل من قدم لي يد العون والمساعدة ولو بكلمة طيبة طوال مدة إعداد هذا البحث.

الباحث

حسن سعدون هويج

قائمة المحتويات

العنوان	رقم الصفحة
الآية القرآنية	أ
الإهداء	ب
الشكر والتقدير	ت
قائمة المحتويات	ث
قائمة الاشكال	ج
الخلاصة	ح
الفصل الأول	(1-9)
المقدمة	2
مفهوم الخلايا الشمسية	3
مبدأ عمل الخلايا الشمسية	3-4
انواع الخلايا الشمسية	5-7
مزايا وعيوب الخلايا الشمسية	7-9
الفصل الثاني	(10-18)
العوامل المؤثرة على كفاءة الخلايا الشمسية	11-13
اجيال الخلايا الشمسية	14-16
مقارنة بين الاجيال الثلاثة	17-18
الفصل الثالث	(19-26)
المقدمة	20
مفهوم الخلايا الشمسية البيروفسكايت	21
تركيب الخلايا الشمسية البيروفسكايت	22-23
مبدأ عمل الخلايا الشمسية البيروفسكايت	23-24
ايجابيات وسلبيات الخلايا الشمسية البيروفسكايت	24-26
المصادر	27-31

قائمة الاشكال

رقم الشكل	عنوان الشكل	رقم الصفحة
(1-1)	**الالواح الشمسية احادية البلور.**	**5**
(2-1)	**الالواح الشمسية متعددة البلور.**	**6**
(3-1)	**الألواح الشمسية ذو الغشاء الرقيق.**	**7**
(1-3)	**بناء ثلاثي ميثيل الامونيوم الرصاصي.**	**23**

الخلاصة

يتناول هذا البحث دراسة شاملة للخلايا الشمسية باعتبارها إحدى أهم تقنيات الطاقة المتجددة التي تسهم في مواجهة التحديات العالمية المرتبطة بنضوب مصادر الطاقة التقليدية والتلوث البيئي. وقد تم توضيح المفهوم الأساسي للخلايا الشمسية وآلية عملها المعتمدة على التأثير الكهروضوئي، حيث يتم تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية باستخدام مواد شبه موصلة، وعلى رأسها السيليكون. كما استعرض البحث أنواع الخلايا الشمسية التقليدية مثل أحادية البلور ومتعددة البلور وخلايا الأغشية الرقيقة، مع بيان خصائص كل نوع من حيث الكفاءة والتكلفة والتطبيقات.

كما ناقش البحث العوامل المختلفة المؤثرة على كفاءة الخلايا الشمسية، والتي تشمل العوامل البيئية كالإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، والعوامل الفيزيائية المرتبطة بخصائص المواد مثل فجوة الطاقة وإعادة الاتحاد، إضافة إلى تأثير مكونات النظام ككفاءة العاكس والخسائر الكهربائية. وتم التطرق إلى تصنيف الخلايا الشمسية إلى ثلاثة أجيال رئيسية، حيث يمثل الجيل الأول الخلايا التقليدية المعتمدة على السيليكون، بينما يشمل الجيل الثاني تقنيات الأغشية الرقيقة، أما الجيل الثالث فيضم التقنيات الحديثة والناشئة مثل الخلايا العضوية وخلايا البيروفسكايت.

وركّز البحث بشكل خاص على الخلايا الشمسية البيروفسكايتية باعتبارها من أكثر التقنيات تطورًا، حيث تمتاز بكفاءة عالية وانخفاض في تكلفة التصنيع ومرونة في الاستخدام، إلا أنها ما تزال تواجه تحديات تتعلق بالاستقرار والعمر التشغيلي والتأثيرات البيئية. وبشكل عام، يخلص البحث إلى أن الخلايا الشمسية تمثل خيارًا استراتيجيًا لتحقيق التنمية المستدامة، وأن التطورات المستقبلية، خاصة في تقنيات الجيل الثالث، ستسهم في تحسين الكفاءة وتقليل التكاليف، مما يعزز من الاعتماد على الطاقة الشمسية كمصدر رئيسي للطاقة في المستقبل.

الفصل الاول

الخلايا الشمسية

1-1 المقدمة

أصبحت الخلايا الشمسية في العقود الأخيرة من أهم التقنيات الحديثة في مجال الطاقة المتجددة، نظرًا للدور الكبير الذي تؤديه في تحويل الطاقة الشمسية، وهي أحد أنظف مصادر الطاقة وأكثرها استدامة، إلى طاقة كهربائية قابلة للاستخدام المباشر في مختلف المجالات. ويأتي الاهتمام المتزايد بالخلايا الشمسية نتيجة التحديات العالمية المتمثلة في تناقص مصادر الطاقة التقليدية، وارتفاع كلف استخراجها، إضافة إلى الآثار البيئية السلبية الناجمة عن استخدام الوقود الأحفوري، مثل تلوث الهواء وزيادة انبعاثات الغازات المسببة للاحتباس الحراري [1].

وتعتمد الخلايا الشمسية في عملها على ظاهرة التأثير الكهروضوئي، التي تُمكّن بعض المواد شبه الموصلة من توليد تيار كهربائي عند تعرضها للإشعاع الضوئي. وتمتاز هذه التقنية بكونها لا تحتاج إلى وقود أو عمليات احتراق أو تفاعلات كيميائية لإنتاج الطاقة، فضلًا عن خلوها من الأجزاء المتحركة، الأمر الذي يمنحها موثوقية عالية ويقلل من كلفة الصيانة مقارنة بمصادر توليد الطاقة التقليدية [2].

وقد شهدت الخلايا الشمسية تطورًا ملحوظًا منذ اكتشاف التأثير الكهروضوئي في القرن التاسع عشر، إذ انتقلت من تجارب علمية محدودة إلى تقنيات عملية تُستخدم على نطاق واسع. وأسهم التقدم العلمي في مجالات فيزياء أشباه الموصلات وعلوم المواد والهندسة الكهربائية في تحسين كفاءة الخلايا الشمسية وخفض تكاليف إنتاجها، مما شجّع على اعتمادها في التطبيقات المنزلية والصناعية والتجارية، فضلًا عن استخدامها في تزويد الأقمار الصناعية ومحطات الفضاء بالطاقة الكهربائية.

وتبرز أهمية الخلايا الشمسية بشكل خاص في الدول التي تتمتع بإشعاع شمسي عالٍ، مثل العراق، حيث تمثل هذه التقنية خيارًا استراتيجيًا لدعم التنمية المستدامة وتنويع مصادر الطاقة وتقليل الاعتماد على الشبكات الكهربائية التقليدية. وعليه، يهدف هذا الفصل إلى تسليط الضوء على الخلايا الشمسية من حيث مفهومها ومبدأ عملها، وبيان أهميتها ودورها في تحقيق مستقبل طاقوي أكثر استدامة [1][2].

2-1 مفهوم الخلايا الشمسية

الخلايا الشمسية هي أجهزة إلكترونية تُعرف أيضًا بالخلايا الكهروضوئية (Photovoltaic Cells)، تعمل على تحويل الطاقة الضوئية مباشرة إلى طاقة كهربائية من خلال التأثير الكهروضوئي. وتعتمد هذه الخلايا في عملها على مواد شبه موصلة تمتلك خصائص كهربائية تُمكّنها من امتصاص الإشعاع الشمسي وتحويله إلى تيار كهربائي مستمر. ويُعدّ السيليكون المادة الأكثر استخدامًا في صناعة الخلايا الشمسية، نظرًا لتوفره الطبيعي وكفاءته المناسبة، إذ يُستخدم بعدة أشكال مثل السيليكون غير المتبلور، ومتعدد البلورات، وأحادي البلورة، والتي تختلف فيما بينها من حيث الكفاءة والتكلفة [1].

وتُستخدم الخلايا الشمسية بشكل منفرد في التطبيقات الصغيرة، كما يمكن تجميعها في وحدات تُعرف بالألواح الشمسية لتوليد قدرة كهربائية أعلى، أو ربط أعداد كبيرة منها في مصفوفات شمسية ضخمة تُستخدم في محطات توليد الطاقة الكهربائية. وقد أسهم هذا التنوع في أشكال وتطبيقات الخلايا الشمسية في زيادة أهميتها كمصدر بديل ومستدام للطاقة في مختلف البيئات الجغرافية [3] .

3-1 مبدأ عمل الخلايا الشمسية

عندما يسقط ضوء الشمس على الخلية الشمسية، تبدأ العملية بتحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية مباشرة. الخلايا الشمسية مصنوعة عادةً من السليكون شبه الموصل، وهو مادة تحتوي على أربعة إلكترونات في مدارها الأخير، تشارك في تكوين روابط تساهمية مع ذرات السليكون المجاورة داخل البلورة. عند وصول فوتونات ضوء الشمس إلى سطح الخلية، تمتص الذرات هذه الفوتونات، وإذا كانت طاقتها كافية، تقوم بتحفيز الإلكترونات من حالة طاقة منخفضة إلى حالة طاقة أعلى. هذه العملية تُعرف بـ التأثير الكهروضوئي، حيث يتحرر الإلكترون من مكانه داخل الذرة، ويترك وراءه فجوة إلكترونية تمثل موقعًا شاغرًا يمكن أن تنتقل فيه الإلكترونات لاحقًا [10].

لكي يتم توجيه الإلكترونات والفجوات بحيث يُمكن توليد تيار كهربائي، يتم تعديل خصائص السليكون من خلال عملية تسمى الإشابة (Doping). في هذه العملية، تُضاف ذرات شائبة إلى السليكون لتغيير طبيعة حمل الشحنة في مناطق محددة من البلورة. على سبيل المثال، إذا أُضيفت ذرات الفوسفور التي تحتوي على خمسة إلكترونات في مدارها الأخير، فتبقى إلكترونات فائضة حرة

الحركة بعد تشكيل الروابط التساهمية، مكوّنة ما يُعرف بالمنطقة السالبة أو N-type، حيث تُعتبر الإلكترونات هي حاملات الشحنة الرئيسية. أما إذا أُضيفت ذرات البورون التي تحتوي على ثلاثة إلكترونات، فتبقى فجوات غير مملوءة للإلكترونات، وتصبح المنطقة الناتجة P-type، حيث تُعتبر الفجوات هي حاملات الشحنة الرئيسية [10].

بعد إنشاء المنطقتين P وN، يتم تكوين وصلة PN بينهما. عند الحد الفاصل بين المنطقتين، نتيجة اختلاف تركيز الشحنات، تبدأ الإلكترونات بالتحرك من المنطقة السالبة N إلى المنطقة الموجبة P، بينما تتحرك الفجوات في الاتجاه المعاكس. هذا التزاحم للشحنات يؤدي إلى تكوين مجال كهربائي داخلي عبر الوصلة، يعمل كموجه طبيعي يفرض اتجاه حركة الإلكترونات عند توصيل الدائرة الكهربائية. يمكن تخيل هذا المجال الداخلي كصمام يسمح للإلكترونات بالتحرك في اتجاه واحد فقط، وهو ما يضمن توليد تيار مستمر عند توصيل الحمل الخارجي [10].

عندما يُوصل حمل كهربائي، مثل مقاومة، بين طرفي الخلية الشمسية، يقوم هذا المجال الداخلي بدفع الإلكترونات عبر الدائرة، مولّدًا تيارًا كهربائيًا، ويُلاحظ جهدًا كهربائيًا بين طرفي الخلية. يمكن استخدام هذا التيار لتشغيل الأجهزة الكهربائية مباشرة أو تخزينه في البطاريات لاستخدام لاحق. العملية كلها تحدث بدون أي أجزاء متحركة، مما يجعل الخلايا الشمسية مصدر طاقة نظيف ومستدام، ولا تُصدر أي غازات دفيئة عند التشغيل [11].

أخيرًا، تُحدد كفاءة الخلية الشمسية من خلال ما يُعرف بـ الكفاءة الكمية (Quantum Efficiency)، أي القدرة على تحويل الفوتونات الساقطة إلى أزواج من الإلكترونات والفجوات. كل فوتون يسقط على السطح له احتمال معين لإحداث زوج من الإلكترون والفجوة، وكلما زادت هذه النسبة، زادت كمية الكهرباء المنتجة مقارنة بالطاقة الضوئية المستقبلة [10].

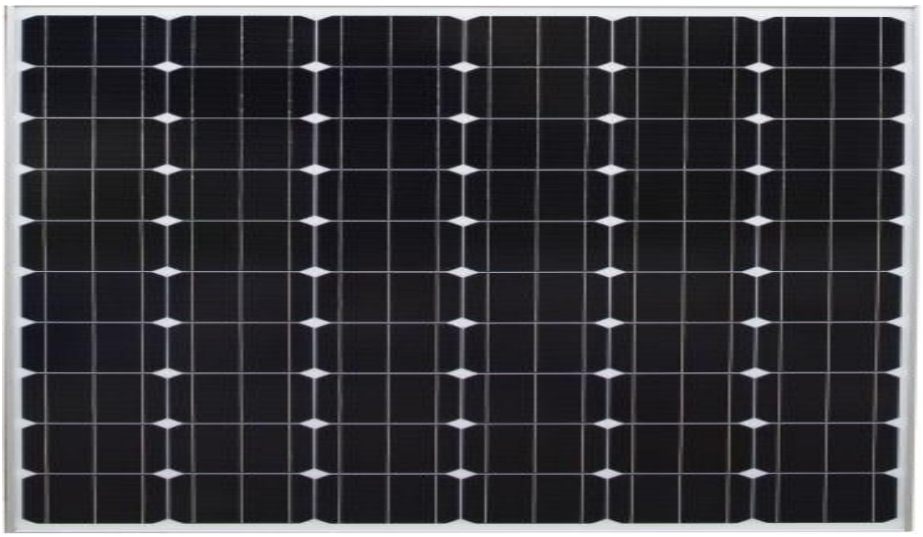
4-1 انواع الخلايا الشمسية

توجد حاليًا ثلاث تقنيات رئيسية مستخدمة في صناعة الخلايا الشمسية والمتوفرة في الأسواق العالمية، وتختلف هذه الأنواع من حيث مادة التصنيع، والكفاءة، والتكلفة، وظروف التشغيل، وهي: الخلايا الشمسية أحادية البلور، والخلايا الشمسية متعددة البلور، والخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة. وتُعدّ الخلايا الشمسية أحادية البلور ومتعددة البلور من الخلايا المصنوعة من السيليكون البلوري، بينما تعتمد الخلايا ذات الأغشية الرقيقة على تقنيات ومواد مختلفة كليًا [5].

4-1-1 الخلايا الشمسية أحادية البلور (Monocrystalline)

تُعدّ الخلايا الشمسية أحادية البلور من أقدم وأكثر تقنيات الخلايا الشمسية تطورًا، إذ تُصنّع من بلورة سيليكون واحدة مستمرة ذات بنية بلورية منتظمة، مما يمنحها كفاءة عالية في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. ويُميّز هذا النوع من الخلايا مظهره المتجانس ولونه الداكن الموحد، إضافة إلى كفاءته العالية مقارنة بالأنواع الأخرى.

تُصنّع هذه الخلايا باستخدام طريقة تشوخرالسكي (Czochralski Method)، حيث يتم سحب بلورة سيليكون نقية من السيليكون المصهور لتشكيل سبائك بلورية تُقطّع لاحقًا إلى رقائق تُستخدم في تصنيع الخلايا الشمسية. وعلى الرغم من كلفتها المرتفعة نسبيًا، إلا أن هذا النوع يتمتع بعمر افتراضي طويل وكفاءة ممتازة حتى في درجات الحرارة المرتفعة [5].



الشكل(1-1)، الالواح الشمسية احادية البلور .[5]

4-1-2 الخلايا الشمسية متعددة البلور (Polycrystalline)

الخلايا الشمسية متعددة البلور هي تقنية أحدث نسبيًا مقارنة بالخلايا أحادية البلور، وتُصنّع من عدة بلورات سيليكون متجاورة تتشكل أثناء تبريد السيليكون المصهور دون سحبه على شكل بلورة واحدة. ويؤدي هذا الأسلوب إلى تكوين حبيبات بلورية متعددة داخل الخلية، مما يمنحها مظهرًا مميزًا غير متجانس.

تتميز الخلايا الشمسية متعددة البلور بانخفاض تكلفتها مقارنة بالخلايا أحادية البلور، بسبب بساطة عملية التصنيع وقلة هدر السيليكون. وعلى الرغم من أن كفاءتها أقل نسبيًا، إلا أن التطور التقني المستمر جعل كفاءتها قريبة جدًا من كفاءة الخلايا أحادية البلور، الأمر الذي ساهم في انتشارها الواسع في التطبيقات السكنية والتجارية [5].

الشكل (1-2)، الالواح الشمسية متعددة البلور .[5]

4-1-3 الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة (Thin Film – Amorphous)

تُعدّ الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة تقنية مختلفة كليًا عن خلايا السيليكون البلوري، إذ يتم تصنيعها بترسيب مواد كهروضوئية رقيقة جدًا على أسطح مثل الزجاج أو البلاستيك. ومن أكثر المواد استخدامًا في هذا النوع: السيليكون غير المتبلور، وتيلوريد الكادميوم، وسيلينيد النحاس والإنديوم والغاليوم، إضافة إلى الخلايا الشمسية الحساسة للأصباغ.

تتميز خلايا الأغشية الرقيقة بانخفاض تكلفتها ومرونتها وسهولة إنتاجها، كما أنها تعمل بكفاءة أفضل في ظروف الإضاءة المنخفضة ودرجات الحرارة المرتفعة، إلا أن كفاءتها العامة أقل مقارنة بخلايا

السيليكون البلوري، كما تتطلب مساحات أكبر لإنتاج نفس القدرة الكهربائية. ولذلك تُستخدم غالبًا في التطبيقات الصناعية واسعة المساحة أو في الحالات التي لا تشكل المساحة فيها عائقًا رئيسيًا [5].

الشكل (1-3)، الألواح الشمسية ذو الغشاء الرقيق .[5]

1-5 مزايا وعيوب الخلايا الشمسية

أولاً: مزايا الخلايا الشمسية

1- مصدر طاقة متجدد ونظيف

تُعدّ الطاقة الشمسية من مصادر الطاقة المتجددة التي لا تنضب، كما أنها طاقة نظيفة لا تنتج عنها انبعاث غازات ضارة بالبيئة أثناء التشغيل، مما يسهم في تقليل التلوث البيئي والحد من ظاهرة الاحتباس الحراري [6].

2- انخفاض تكاليف التشغيل والصيانة

تتميز أنظمة الخلايا الشمسية بانخفاض تكاليف التشغيل والصيانة بعد التركيب، لعدم حاجتها إلى وقود أو أجزاء ميكانيكية متحركة، مما يجعلها خيارًا اقتصاديًا على المدى الطويل [7].

3- إمكانية الاستخدام في المناطق النائية

تُستخدم الخلايا الشمسية بكفاءة في المناطق البعيدة عن شبكات الكهرباء التقليدية، مما يساعد على توفير الطاقة للمناطق الريفية والصحراوية والمناطق غير المخدومة بالشبكات الوطنية [8].

4- تعدد مجالات الاستخدام

تدخل الخلايا الشمسية في تطبيقات متعددة مثل توليد الكهرباء للمنازل والمنشآت الصناعية، وتشغيل أنظمة الاتصالات، وإنارة الشوارع، إضافة إلى استخدامها في الأقمار الصناعية والمركبات الفضائية [9].

5- عمر تشغيلي طويل

تمتلك الخلايا الشمسية عمرًا افتراضيًا طويلًا قد يصل إلى 25 سنة أو أكثر، مع احتفاظها بنسبة جيدة من كفاءتها، مما يعزز من جدواها الاقتصادية [7].

6- عدم إصدار ضوضاء أثناء التشغيل

تعمل الخلايا الشمسية دون إصدار ضوضاء، لعدم احتوائها على أجزاء متحركة، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في المناطق السكنية والبيئات الحساسة للضوضاء [6].

ثانياً: عيوب الخلايا الشمسية

1- الاعتماد على الظروف المناخية

يعتمد أداء الخلايا الشمسية بشكل مباشر على شدة الإشعاع الشمسي، حيث تنخفض كفاءتها في الأيام الغائمة أو الممطرة، كما يتأثر إنتاجها بتغير الفصول [8].

2- ارتفاع تكلفة التركيب الأولية

تُعد التكلفة الأولية لتركيب أنظمة الخلايا الشمسية مرتفعة نسبيًا مقارنة ببعض مصادر الطاقة التقليدية، خاصة عند الحاجة إلى أنظمة تخزين الطاقة [9].

3- الحاجة إلى مساحات واسعة

يتطلب إنتاج كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية باستخدام الخلايا الشمسية توفير مساحات واسعة لتركيب الألواح، مما قد يشكل عائقًا في المناطق ذات المساحة المحدودة [7].

4- الحاجة إلى أنظمة تخزين الطاقة

نظرًا لعدم توفر الطاقة الشمسية ليلًا أو عند ضعف الإشعاع، فإن أنظمة الخلايا الشمسية تحتاج إلى بطاريات لتخزين الطاقة، مما يزيد من التكلفة والتعقيد التقني للنظام [8].

5- انخفاض الكفاءة مقارنة بمصادر الطاقة الأخرى

على الرغم من التطور التكنولوجي المستمر، إلا أن كفاءة الخلايا الشمسية ما تزال أقل مقارنة ببعض مصادر الطاقة التقليدية، مما يحد من قدرتها على تلبية الأحمال العالية بشكل مستقل [9].

6- تأثيرات بيئية مرتبطة بمرحلة التصنيع

قد تتسبب عمليات تصنيع الخلايا الشمسية في استهلاك مواد خام واستخدام مركبات كيميائية قد تؤثر على البيئة إذا لم تُدار بطرق سليمة [6].

الفصل الثاني

(العوامل المؤثرة على كفاءة الخلايا الشمسية واجيال الخلايا الشمسية)

1-2 العوامل المؤثرة على كفاءة الخلايا الشمسية

تتأثر كفاءة الخلية الشمسية بعدد من العوامل الفيزيائية والبيئية والتقنية، إذ إن عملية تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية لا تتم بكفاءة كاملة بسبب وجود خسائر متعددة في مراحل الامتصاص والتحويل والنقل. ويمكن توضيح أهم هذه العوامل كما يأتي:

1-2-١ العوامل البيئية والتشغيلية:

1. شدة الإشعاع الشمسي وتوافره:

تعتمد كفاءة الخلية الشمسية بشكل مباشر على كمية الإشعاع الشمسي الساقط على سطحها، إذ تزداد القدرة الكهربائية المنتجة بزيادة شدة الضوء، وذلك لأن التيار الناتج يتناسب طردياً مع عدد الفوتونات الممتصة. ويتأثر مقدار الإشعاع بالموقع الجغرافي، وخط العرض، والفصول السنوية، والظروف الجوية مثل الغيوم والرطوبة والغبار، مما يؤدي إلى تغيرات في الأداء اليومي والسنوي للمنظومة الشمسية [12].

2. زاوية ميل الألواح واتجاهها:

يلعب التوجيه الصحيح للألواح الشمسية دوراً مهماً في زيادة كمية الإشعاع الممتص. إذ يجب أن تكون زاوية الميل واتجاه اللوح متوافقين مع مسار الشمس لضمان استقبال أكبر قدر ممكن من الأشعة المباشرة. وأي انحراف عن الزاوية المثلى يؤدي إلى انخفاض في شدة الإشعاع الساقط وبالتالي انخفاض في القدرة الناتجة [12].

3. درجة الحرارة:

على الرغم من اعتماد الخلايا الشمسية على ضوء الشمس، إلا أن ارتفاع درجة الحرارة يؤدي إلى انخفاض الجهد الكهربائي للخلية، مما يسبب تراجعاً في الكفاءة الكلية. لذلك فإن درجات الحرارة المرتفعة تؤثر سلباً في الأداء، وتُعد أنظمة التهوية أو التبريد وسيلة مهمة للحفاظ على كفاءة التشغيل [13].

4. الظلال والعوائق:

يسبب التظليل الجزئي، حتى لو كان على جزء صغير من اللوح، انخفاضاً ملحوظاً في القدرة الناتجة، لأن الخلايا الموصولة على التوالي تتأثر بأضعف خلية في السلسلة. لذلك ينبغي تجنب الظلال الناتجة عن المباني أو الأشجار أو التراكمات السطحية [12].

5. الصيانة والتنظيف:

يؤدي تراكم الغبار والأوساخ وفضلات الطيور إلى تقليل كمية الإشعاع الممتص، مما يخفض من كفاءة التحويل. لذلك فإن الصيانة الدورية والتنظيف المنتظم يحافظان على الأداء الأمثل للنظام الشمسي[14].

1-2-2 العوامل المرتبطة بخصائص المادة والخلية

1. العلاقة بين طاقة الفوتون وطاقة ربط الإلكترون (فجوة الطاقة):

لا يسهم في توليد التيار الكهربائي إلا الفوتونات التي تساوي أو تتجاوز طاقتها فجوة الطاقة للمادة شبه الموصلة. ففي السيليكون تبلغ فجوة الطاقة نحو 1.1 إلكترون فولت، لذا فإن جزءاً من الطيف الشمسي الذي تقل طاقته عن هذه القيمة لا يُستفاد منه، مما يحد من الكفاءة النظرية للخلية [13].

2. فقدان الطاقة على شكل حرارة:

تتحول الطاقة الزائدة للفوتونات التي تفوق فجوة الطاقة إلى حرارة، كما أن بعض الإلكترونات المتحررة لا تصل إلى نقاط التجميع وتفقد طاقتها داخل الخلية. تمثل هذه الخسائر الحرارية نسبة مهمة من الطاقة الممتصة، مما يقلل من الكفاءة الكلية [13].

3. تسرب التيار عند نقاط الاتصال:

يزداد التيار المتسرب مع ارتفاع درجة الحرارة، مما يؤدي إلى انخفاض القدرة المنتجة. وتُعد خسائر نقاط الاتصال من العوامل المحددة للكفاءة العملية للخلية [13].

4. إعادة اتحاد الإلكترونات والفجوات (Recombination):

قد تعود الإلكترونات المتحررة للاتحاد مع الفجوات قبل وصولها إلى الدائرة الخارجية، مما يؤدي إلى انخفاض عدد حاملات الشحنة المساهمة في التيار الكهربائي، وبالتالي انخفاض الكفاءة [12].

5. المقاومة الداخلية للخلية:

تؤدي المقاومة الداخلية إلى فقد جزء من القدرة الكهربائية على شكل حرارة داخلية، مما يقلل من الجهد والتيار الناتجين عن الخلية [12].

6. انعكاس جزء من الإشعاع الشمسي:

ينعكس جزء من الضوء الساقط عن سطح الخلية بدلاً من امتصاصه، مما يقلل الطاقة المتاحة للتحويل. وتُستخدم طبقات مضادة للانعكاس لتقليل هذه الخسارة [12].

3-2-1 العوامل المرتبطة بمكونات النظام

1. كفاءة العاكس (Inverter Efficiency):

يتم تحويل التيار المستمر (DC) الناتج من الخلايا إلى تيار متناوب (AC) باستخدام العاكس، وترافق هذه العملية خسائر طاقة تعتمد على كفاءة الجهاز المستخدم، مما يؤثر في الكفاءة الإجمالية للنظام [14].

2. كفاءة مكونات النظام الأخرى (BOS):

تشمل هذه المكونات الأسلاك، وأجهزة التخزين مثل البطاريات، ومنظومات التحكم. ويؤدي أي فقد في هذه العناصر إلى انخفاض الكفاءة النهائية للطاقة المسلّمة إلى نقطة الاستهلاك [14].

2-2 اجيال الخلايا الشمسية

توجد عدة أنواع من الخلايا الشمسية، ويتم تصنيفها عادةً إلى ثلاثة أجيال رئيسية. يعتمد الجيل الأول على السيليكون البلوري ويُعد من الأجهزة التقليدية، أما الجيل الثاني فيشمل تقنيات الأغشية الرقيقة، في حين يُعرف الجيل الثالث بالتقنيات الناشئة التي ما تزال قيد البحث والتطوير للوصول إلى مرحلة الانتشار التجاري الواسع [15].

2-2-1 الجيل الأول (First Generation):

يعتمد هذا الجيل بشكل أساسي على السيليكون البلوري، وهو أكثر المواد دراسةً واستخداماً في التطبيقات التجارية. يبلغ عرض فجوة الطاقة للسيليكون حوالي 1.1 إلكترون فولت، مما يسمح له بامتصاص جزء واسع من الطيف الشمسي. وقد حققت خلايا السيليكون أحادي البلورة كفاءة وصلت إلى 26.1% [16].

إلا أن السيليكون يمتلك فجوة طاقة غير مباشرة، مما يقلل من كفاءة الامتصاص ويتطلب سماكات كبيرة نسبياً للحصول على أداء جيد، ومع ذلك فإن ثباته واستقراره جعلاه المادة الأكثر انتشاراً في السوق [17].

يشمل الجيل الأول:

1. **السيليكون أحادي البلورة (Mono-Si).**
2. **السيليكون متعدد البلورات (Multi-Si).**
3. **خلايا السيليكون المتغايرة البنية (HIT)[18].**

2-2-2 الجيل الثاني (Second Generation – Thin Film):

يعتمد هذا الجيل على تقنيات الأغشية الرقيقة، حيث يتم تصنيع طبقات شبه موصلة بسماكات صغيرة جداً مقارنةً بالسيليكون البلوري، مما يقلل استهلاك المواد ويخفض الكلفة النسبية لبعض التطبيقات [19].

زرنيخيد الغاليوم (GaAs) يمتلك فجوة طاقة مباشرة مقدارها 1.43 إلكترون فولت، وقد حقق كفاءة وصلت إلى 29.1%، لكنه مرتفع التكلفة ويستخدم غالباً في التطبيقات الفضائية [20].

تيلورايد الكادميوم (CdTe) يتميز بفجوة طاقة مناسبة (1.44 إلكترون فولت) وكفاءة تصل إلى 22.6%، كما يتميز بإمكانية تصنيع ألواح رقيقة ومرنة، إلا أن سميّة الكادميوم تمثل تحدياً بيئياً [21].

سيلينيد النحاس والإنديوم والغاليوم (CIGS) تصل كفاءته إلى 23.6%، ويمكن تعديل فجوة طاقته بين 1.0 و1.7 إلكترون فولت، لكنه مكلف ويعتمد على عناصر نادرة [22].

يمتاز الجيل الثاني بقلة سماكة الطبقات وانخفاض استهلاك المواد، لكنه أقل انتشاراً من السيليكون بسبب الكلفة أو ندرة بعض العناصر [23].

2-2-3 الجيل الثالث (Third Generation – Emerging Photovoltaics):

يُعرف هذا الجيل بالتقنيات الناشئة التي تهدف إلى تجاوز الحدود النظرية لخلايا السيليكون التقليدية وتحقيق كفاءات أعلى مع تقليل التكلفة [24].

الخلايا الحساسة للأصباغ (DSSC) تعتمد على أصباغ عضوية تمتص الضوء وتنقل الإلكترونات إلى أكسيد معدني مثل TiO_2، وتمتاز بانخفاض التكلفة وإمكانية التصنيع بطرق الطباعة، لكنها تعاني من مشاكل في الاستقرار الحراري وطول العمر التشغيلي [25].

الخلايا العضوية (Organic Solar Cells – OSC) تعتمد على بوليمرات أو جزيئات عضوية شبه موصلة، وقد وصلت كفاءتها إلى حوالي 19.2%، وتمتاز بخفة الوزن والمرونة، إلا أنها تعاني من ضعف الاستقرار وإعادة الاتحاد السريعة للإلكترونات والفجوات [26].

خلايا البيروفسكايت (Perovskite Solar Cells – PSC) تستخدم مواد ذات تركيب بلوري من نوع ABX_3، وقد ارتفعت كفاءتها بسرعة حتى وصلت إلى 26.1%، مما يجعلها من أسرع التقنيات تطوراً، إلا أنها تواجه تحديات تتعلق بالاستقرار واستخدام مواد تحتوي على الرصاص [27].

3-2 مقارنة بين الاجيال الثلاثة

جدول 1: مقارنة بين أجيال الخلايا الشمسية من حيث المواد، المميزات، العيوب والكفاءة

الجيل	الخلايا	المميزات	العيوب	الكفاءة القصوى	المصدر
الجيل الأول First Generation	السليكون احادي البلورة(Mono-Si)-السيليكون متعدد البلورات (Multi-Si) - خلايا السيليكون المتغايرة البنية (HIT)	ثبات واستقرار عالي ، انتشار تجاري واسع	فجوة طاقة غير مباشرة تقلل الامتصاص تتطلب سماكات كبيرة	أحادي البلورة: 26.1% متعدد البلورات: 23.3% HIT: 27.1%	[27][23][21][15]
الجيل الثاني Second) Generation – Thin Film	زرنيخيد الغاليوم (GaAs) - تيلورايد الكادميوم (CdTe) - سيلينيد النحاس والإنديوم والغاليوم (CIGS)	سماكات طبقات منخفضة - انخفاض استهلاك المواد - بعض المواد مرنة وقابلة للطباعة	تكلفة عالية لبعض المواد - ندرة بعض العناصر - سمية الكادميوم	GaAs: 29.1% CdTe: 22.6% CIGS: 23.6%	[27][24][22][16]
الجيل الثالث Third) Generation – Emerging (PV	الخلايا الحساسة للأصباغ (DSSC) - الخلايا العضوية (OSC) -	انخفاض التكلفة DSSC,) (OSC - خفيفة الوزن	كفاءة أقل (DSSC) - ضعف الاستقرار وإعادة الاتحاد	DSSC: 13% OSC: 19.2% PSC:	[27][25][19][18]

	خلايا البيروفسكايت (PSC)	ومرنة (OSC) - امتصاص قوي وتصنيع سريع (PSC)	السريعة للإلكترونات (OSC) - مشاكل الاستقرار واستخدام مواد سامة (PSC)	26.1%	

الفصل الثالث

الخلايا الشمسية البيروفسكايت

1-3 المقدمة

تُعدّ الخلايا الشمسية البيروفسكايت من أبرز التقنيات الحديثة في مجال الطاقة المتجددة، حيث ظهرت كأحد أهم بدائل الخلايا الشمسية التقليدية خلال العقد الأخير. وقد حظيت هذه الخلايا باهتمام واسع من قبل الباحثين بسبب التطور السريع في كفاءتها، إذ ارتفعت من نحو 4% عند اكتشافها عام 2009 إلى أكثر من 25% خلال فترة زمنية قصيرة، وهو ما يُعدّ تقدمًا غير مسبوق في تقنيات الخلايا الكهروضوئية [28].

تعتمد هذه الخلايا على مواد بيروفسكايت ذات تركيب بلوري مميز يمنحها خصائص كهروضوئية فريدة، مثل معامل امتصاص ضوئي عالٍ، وإمكانية ضبط فجوة الطاقة، إضافةً إلى قدرة جيدة على نقل الشحنات. كما تتميز بسهولة تصنيعها باستخدام تقنيات منخفضة التكلفة مقارنةً بالخلايا التقليدية المصنوعة من السيليكون [29].

وعلى الرغم من هذه المزايا، لا تزال الخلايا الشمسية البيروفسكايتية تواجه تحديات مهمة، أبرزها ضعف الاستقرار عند التعرض للعوامل البيئية مثل الرطوبة والحرارة والضوء، الأمر الذي يتطلب مزيدًا من البحث والتطوير قبل اعتمادها على نطاق تجاري واسع [30].

2-3 مفهوم الخلايا الشمسية البيروفسكايت

تُعرَّف الخلايا الشمسية البيروفسكايتية بأنها نوع من الخلايا الشمسية ذات الوصلات غير المتجانسة، تعتمد على مواد بيروفسكايت هاليديه عضوية-غير عضوية كمادة فعالة لامتصاص الضوء [31].

تتكون هذه المواد من تركيب بلوري يُعبَّر عنه بالصيغة العامة:

$$ABX_3$$

حيث يمثّل:

- **A** كاتيونات عضويًا أو غير عضوي (مثل ميثيل أمونيوم أو سيزيوم)
- ***B*** كاتيونًا فلزيًا (مثل الرصاص أو القصدير)
- **X** أنيون هاليد (مثل اليود أو البروم أو الكلور) [32].

وتُستخدم هذه المادة كطبقة ماصة للضوء توضع بين طبقة ناقلة للإلكترونات (ETL) وطبقة ناقلة للفجوات (HTL)، ضمن تراكيب مختلفة مثل البنية المنتظمة (n-i-p) أو البنية المعكوسة ((p-i-n [33].

3-3 تركيب الخلايا الشمسية البيروفسكايت

تتكون الخلية الشمسية البيروفسكايتية من عدة طبقات متراكبة تعمل معًا لتحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية، ويمكن توضيح تركيبها كما يأتي:

1- الركيزة (Substrate):

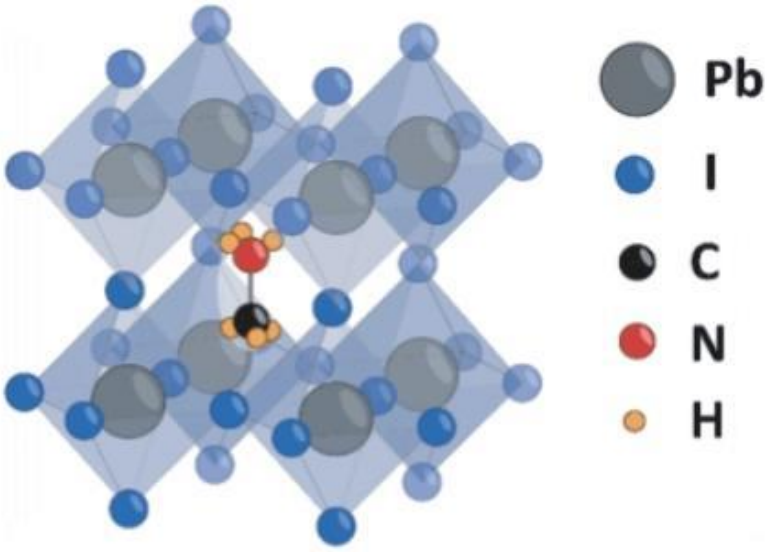
تكون عادةً من زجاج مغطى بطبقة موصلة شفافة مثل أكسيد القصدير والفلور (FTO) أو أكسيد الإنديوم والقصدير (ITO)، وتسمح بمرور الضوء إلى داخل الخلية [34].

2- طبقة نقل الإلكترونات (ETL):

وهي طبقة شبه موصلة من النوع (n)، مثل ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) أو ثاني أكسيد القصدير (SnO_2)، وتعمل على نقل الإلكترونات ومنع إعادة اتحادها مع الفجوات [35].

3- طبقة البيروفسكايت (الطبقة الفعالة):

تمثل قلب الخلية، حيث يتم امتصاص الضوء وتوليد أزواج الإلكترونات والفجوات، وغالبًا ما تتكون من مركبات مثل CH_3NH_3PbI [36]. كما موضح في الشكل (3-1):



الشكل (3-1)، بناء ثلاثي ميثيل الامونيوم الرصاصي.[36]

4- طبقة نقل الفجوات (HTL):

وهي مادة شبه موصلة من النوع (p)، مثل Spiro-OMeTAD أو مواد غير عضوية مثل NiO_x، وتعمل على نقل الفجوات إلى القطب الخلفي [37].

5- القطب الخلفي (Back Electrode):

يكون عادةً من معدن مثل الذهب (Au) أو الفضة، ويعمل على جمع الشحنات وإكمال الدائرة الكهربائية [38].

4-3 مبدأ عمل الخلايا الشمسية البيروفسكايت

تعتمد الخلايا الشمسية البيروفسكايتية في عملها على مبدأ التأثير الكهروضوئي، حيث يتم تحويل الطاقة الضوئية إلى طاقة كهربائية من خلال سلسلة من العمليات الفيزيائية داخل طبقات الخلية. ويتميز هذا النوع من الخلايا بكفاءة عالية نتيجة الخصائص الفريدة لمادة البيروفسكايت، مثل معامل الامتصاص العالي وحركية حاملات الشحنة المرتفعة.

تبدأ عملية توليد الطاقة عند سقوط الفوتونات (الضوء) على طبقة البيروفسكايت، حيث يتم امتصاصها بكفاءة عالية بسبب امتلاك المادة فجوة طاقة مباشرة وقابلة للضبط. يؤدي هذا

الامتصاص إلى إثارة الإلكترونات وانتقالها من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل، مما ينتج عنه تكوين أزواج من الإلكترونات والفجوات (حاملات الشحنة).

بعد ذلك، يتم فصل هذه الشحنات بفضل المجال الكهربائي الداخلي الناتج عن وجود طبقات نقل الشحنات، حيث تتحرك الإلكترونات نحو طبقة نقل الإلكترونات (ETL)، بينما تنتقل الفجوات في الاتجاه المعاكس نحو طبقة نقل الفجوات (HTL). ويُعدّ هذا الفصل السريع ضروريًا لمنع إعادة اتحاد الشحنات وفقدان الطاقة.

وفي المرحلة الأخيرة، يتم نقل الشحنات المفصولة عبر هذه الطبقات إلى الأقطاب الكهربائية، حيث تُجمع الإلكترونات عند القطب الأمامي والفجوات عند القطب الخلفي، مما يؤدي إلى توليد تيار كهربائي يمكن استخدامه في الدائرة الخارجية لإنتاج الطاقة الكهربائية [39].

5-3 ايجابيات وسلبيات الخلايا الشمسية البيروفسكايت

5-3-1 ايجابيات الخلايا الشمسية البيروفسكايت

1- كفاءة تحويل طاقة عالية:

خلايا البيروفسكايت سجلت كفاءة تحويل تصل إلى أكثر من 26% في المختبرات، مع توقعات لزيادة الكفاءة عند دمجها مع السيليكون في خلايا ترادفية [40].

2- انخفاض تكلفة التصنيع:

طرق التحضير تعتمد على المحاليل، مثل الطلاء بالدوران والطباعة، ما يقلل استهلاك الطاقة مقارنة بالسيليكون عالي النقاء [41].

3- مرونة وخفة الوزن:

يمكن تصنيعها على ركائز مرنة مثل البلاستيك، مما يسمح باستخدامها على الأسطح المنحنية وفي الأنظمة المدمجة بالمباني [42].

4- امتصاص الضوء الفعال:

معامل الامتصاص العالي يسمح بتحويل كميات أكبر من الضوء حتى في طبقات رقيقة جدًا، مما يقلل كمية المادة المطلوبة ويزيد الكفاءة [43].

5- قابلية تعديل الخصائص الكيميائية والكهربائية:

يمكن تعديل فجوة الطاقة للمواد عن طريق تغييرات في التركيب الكيميائي، ما يدعم تصميم خلايا ترادفية تزيد الكفاءة الإجمالية لأكثر من 30% [44].

6- سرعة التطوير والابتكار

تطوير طبقات النقل والتعديلات التركيبية تسمح بتحسين الأداء بسرعة مقارنة بالخلايا التقليدية [44].

2-3-5 سلبيات الخلايا الشمسية البيروفسكايت

1- عدم الاستقرار البيئي:

تتأثر الخلايا بالرطوبة والحرارة والضوء القوي، مما يؤدي إلى تدهور المادة الفعالة وانخفاض الأداء مع الزمن[45].

2- المخاطر البيئية والصحية:

تحتوي بعض الخلايا على الرصاص، ما يطرح مخاطر بيئية وصحية عند التصنيع أو التخلص منها [42].

3- العمر التشغيلي المحدود:

العمر الافتراضي أقل من خلايا السيليكون بسبب تحلل البنية البلورية، ويتطلب حلول حماية إضافية [46].

4- حساسية عملية التصنيع:

تتطلب ظروف تصنيع دقيقة من حيث الحرارة والرطوبة، ما يصعب الانتقال من المختبر للإنتاج الصناعي [47].

5- الحاجة للتغليف والحماية الإضافية:

لضمان استقرار الأداء، يحتاج المنتج النهائي إلى طبقات تغليف خاصة، مما يزيد التعقيد والتكلفة [48].

المصادر

[1]Solar Cell Electronics, Encyclopaedia Britannica, www.britannica.com, Retrieved 15-5-2018. Edited.

[2] محمد محمود عمارة، الطاقة في القرن الواحد والعشرين، الطبعة الأولى، القاهرة: المكتبة الأكاديمية، ص 27–29، بتصرّف.

[3] د. علي محمد عبد الله، الطاقة المتجددة، ص 41–42، بتصرّف.

[4] موقع موضوع، كيف تعمل الخلايا الشمسية، https://mawdoo3.com، بتصرّف.

[5] Solarreviews، أنواع الألواح الشمسية ومزاياها وعيوبها، موقع علوم 24 – موقع متخصص في الطاقة المتجددة، بتصرّف.

[6] Boyle, G. Renewable Energy: Power for a Sustainable Future. Oxford University Press.

[7] Messenger, R. A., & Ventre, J. Photovoltaic Systems Engineering. CRC Press.

[8] International Renewable Energy Agency (IRENA). Solar Energy Technologies.

[9] Kalogirou, S. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Academic Press.

[10] Stefan, C. W. (2006). Solar electric power generation – photovoltaic energy systems. Springer Berlin Heidelberg.

[11] NasrSolar. (n.d.). How solar cells work. https://nasrsolar.com/

[12]Krauter, S. C. W. (2006). Solar electric power generation: Photovoltaic energy systems. Springer.

[13] عياش، سعود يوسف. (سنة النشر). تكنولوجيا الطاقة البديلة.

[14] Messenger, R. A., & Ventre, J. (2010). Photovoltaic systems engineering (3rd ed.). CRC Press.

[15] A review of solar cells from Si-single crystals to porous materials and quantum dots. (n.d.). PMC Articles. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4348457/

[16] Advances in organic photovoltaic cells: a comprehensive review of materials, technologies, and performance. (2023). RSC Advances. https://doi.org/10.1039/D3RA01454A

[17] A Review of Third Generation Solar Cells. (2021). Processes, 11(6), Article 1852. https://www.mdpi.com/2227-9717/11/6/1852

[18] التطورات في تكنولوجيا الخلايا الكهروضوئية: المبادئ، الأداء، وإمكانات التصنيع في ليبيا. (2025). مجلة الباحث للعلوم التطبيقية, 4(2), 66-79. https://albahitjas.com.ly/index.php/albahit/ar/article/view/83

[19] الخلايا الشمسية الترادفية.. رقم قياسي في كفاءة توليد الكهرباء. (2025, ديسمبر 26). الطاقة المتخصصة. https://attaqa.net/2025/12/26/

[20] الخلايا الشمسية ترادفية تحقق رقمًا قياسياً في الكفاءة. (2025, أبريل 25). الطاقة المتخصصة.https://attaqa.net/2025/04/25/

[21] World energy outlook and state of renewable energy. (2023). O. Yolcan.

[22] Solar energy: Potential and future prospects. (2018). E. Kabir et al. https://www.aljazeera.

[23] Parida, B. (2011). A review of solar photovoltaic technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, 1625-1636.

[24] Lee, T. (2017). A review of thin film solar cell technologies and challenges. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 70, 1286-1298.

[25] Hagfeldt, A. (2010). Dye-Sensitized Solar Cells. Chemical Reviews, 110, 6595-6663.

[26] Solar Simulator and characterization standards (AM1.5G). (n.d.). Industry standard solar spectrum protocols.

[27] NREL Best Research Cell Efficiencies Chart. (Updated 2024). National Renewable Energy Laboratory. https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html

[28] T. Kojima, K. Teshima, Y. Shirai, and T. Miyasaka, “Organometal halide perovskites as visible-light sensitizers for photovoltaic cells,” Journal of the American Chemical Society, vol. 131, no. 17, pp. 6050–6051, 2009.

[29] N.-G. Park, “Perovskite solar cells: An emerging photovoltaic technology,” Materials Today, vol. 18, no. 2, pp. 65–72, 2015.

[30] B. Conings et al., “Intrinsic thermal instability of methylammonium lead trihalide perovskite,” Advanced Energy Materials, vol. 5, no. 15, 2015.

[31] J. H. Heo et al., “Efficient inorganic–organic hybrid heterojunction solar cells containing perovskite compound and polymeric hole conductors,” Nature Photonics, vol. 7, pp. 486–491, 2013.

[32] H.-S. Kim et al., “Lead iodide perovskite sensitized all-solid-state submicron thin film mesoscopic solar cell,” Scientific Reports, vol. 2, 2012.

[33] J. You et al., “Low-temperature solution-processed perovskite solar cells with high efficiency and flexibility,” ACS Nano, vol. 8, no. 2, pp. 1674–1680, 2014.

[34] M. A. Green et al., “Solar cell efficiency tables,” Progress in Photovoltaics: Research and Applications, vol. 28, no. 1, pp. 3–15, 2020.

[35] Q. Chen et al., “Planar heterojunction perovskite solar cells via vapor-assisted solution process,” Journal of the American Chemical Society, vol. 136, no. 2, pp. 622–625, 2014.

[36] N. J. Jeon et al., “Compositional engineering of perovskite materials for high-performance solar cells,” Nature, vol. 517, pp. 476–480, 2015.

[37] U. Bach et al., “Solid-state dye-sensitized mesoporous TiO_2 solar cells with high photon-to-electron conversion efficiencies,” Nature, vol. 395, pp. 583–585, 1998.

[38] National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Best research-cell efficiencies,” 2020.

[42] G. Tang and F. Yan, “Recent progress in flexible perovskite solar cells,” Nano Today, 2021.

[43] J. Day et al., “Improving spectral modification for solar cells,” Renewable Energy, 2019.

[46] K. Aitola et al., “Encapsulation of perovskite solar cells,” Solar Energy, 2022.

[47] P. M. Kumar et al., “Fabrication and lifetime of perovskite solar cells,” 2018.

[48] B. Gopal Krishna et al., “Perovskite solar cells in ambient conditions,” Solar Energy, 2021.