وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة ميسان

كلية العلوم

قسم الفيزياء

الخلايا الشمسية وتطورها التقني في القرن الحادي والعشرين

بحث مقدم إلى مجلس قسم الفيزياء في كلية العلوم كجزء من متطلبات

نيل شهادة البكالوريوس في علوم الفيزياء

من قبل الطلبة:

محمد حسن بري

مريم فيصل عباس

نور الهدى حسين علي

بأشراف

م.م بهاء الدين كاظم قاسم

1446هـ

2025م

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَٰنِ الرَّحِيمِ

وَقُل رَّبِّ زِدْنِي عِلْمًا

صدق الله العلي العظيم

سورة طه ، آية 114

الإهداء

اهدي مشروع تخرجي إلى من حصد الأشواك عن دربي حتى يُمهدّ لي طريق العلم، والدي ومُعلمي الأول. وإلى بلسم الحياة التي غمرتني بالحب والحنان، والدتي الحبيبة، وكل من ساعدني في الوصول إلى ما أنا عليه اليوم.

الشكر والتقدير

أتقدّمُ بخالص الشكر والتقدير إلى أبي وأمي العزيزين، اللذين لم يبخلا عليَّ بشيءٍ كان في استطاعتهما توفيرُه لي. وإلى أستاذي العزيز، ومشرفي في البحث، الأستاذ بهاء الدين كاظم الذي لم يبخل عليَّ بالنصيحةِ أو الإرشاد.

إقرار المشرف

أقر بأن البحث الموسوم "الخلايا الشمسية" المقدم من قبل الطلبة: محمد حسن بري، مريم فيصل عباس، نور الهدى حسين علي. قد جرى تحت إشرافي في قسم الفيزياء للعام الدراسي 2024/2025 ولأجله وقعت.

التوقيع :

الاسم :

الدرجة العلمية :

التاريخ: 2025 / /

المحتويات

الفقرة	الموضوع	الصفحة
	الفصل الأول أنوا ع الطاقة ومصادر ها تمهيد لفه م الخلايا الشمسية وتطبيقاتها	
1.1	المقدمة	1
1.2	انواع الطاقة	1
1.3	مصادر الطاقة	2
1.4	الخلية الشمسية	3
1.5	اشكال الخلايا الشمسية	4
1.6	انواع الخلايا الشمسية	4
1.7	مكونات الخلايا الشمسية	4
1.8	طريقة عمل الخلية الشمسية	5
1.9	الهدف	6
	الفصل الثاني مزايا الخلايا الشمسية وتحدياتها في الواقع التطبيقي	
2.1	المقدمة	7
2.2	محاسن الخلايا الشمسية	7
2.3	مساوئ الخلايا الشمسية	11
2.4	مقارنة انواع الخلايا الشمسية من حيث التكلفة	13
	الفصل الثالث	
3.1	المقدمة	15
3.2	الكفاءة في الفيزياء	16
3.3	المقصود بكفاءة الالواح الشمسية	16
3.4	حساب كفاءة الخلية الشمسية	17
3.5	العوامل المؤثرة على كفاءة نظام الطاقة الشمسية	19
3.6	علاقة الكفاءة بالزمن	20
3.7	أهمية تحسين كفاءة الخلايا الشمسية	20
3.8	سبب عدم وجود كفاءة 100%	21
3.9	بعض اتجاهات تكنولوجيا الألواح الشمسية الجديدة لعام 2025	21

الملخص

تتمثل الطاقة الشمسية في ضوء الشمس المشع وحرارتها العالية التي يتم استغلالها الآن باستخدام مجموعة من التقنيات المتطورة في أغراض التدفئة الشمسية والضوئية وتطبيقات الطاقة الحرارية والهندسة الشمسية، وكذلك في محطات الطاقة المالحة المنصهرة وفي عمليات التمثيل الضوئي الاصطناعي، إن الشمس مصدر مهم للطاقة المتجددة وتتميز تقنياتها على نطاق واسع بأنها إما طاقة سلبية أو نشطة اعتمادًا على كيفية استخدام تلك الطاقة وتوزيعها أو تحويلها إلى طاقة أخرى، وتشمل التقنيات الشمسية النشطة العديد من التطبيقات المعاصرة، تسمى الخلايا الشمسية العضوية أو الخلايا الشمسية البلاستيكية هي خلايا كهروضوئية نموذجية تُصنع من الالكترونيات العضوية، وهي جزيئات عضوية صغيرة أو بوليميرات عضوية ناقلة تقوم بإنتاج الطاقة الكهربائية من الضوء بالأثر الكهروضوئي، وأغلب الخلايا الشمسية العضوية هي خلايا بوليميرية.

وللمواد العضوية دور كبير في صنع الخلايا الشمسية التي تولد الكهرباء عن طريق خزن الطاقة الشمسية حيث توجد انواع عدة من الخلايا الشمسية وتوجد الخلايا على عدة فئات وقدرات مختلفة.

الروابط المترافقة في المواد العضوية تمتلك المواد العضوية الإمكانيات لتطوير تقنية اقتصادية بعيدة المدى لإنتاج الطاقة على النطاق الواسع باستخدام مواد متوفرة بشكل كبير وليس لها أي آثار بيئية ضارة، وأقل كلفة المواد غير العضوية المستخدمة في تقنيات الخلايا الكهروضوئية مثل السيليكون تمتلك هذه المواد معاملات امتصاص عالية للضوء لذلك يمكن تشكيل خلايا شمسية رقيقة جداً منها، كما يمكن تصنيعها بهيئات مرنة ويمكن إنتاجها بعمليات إنتاج بسيطة وغير مكلفة مما يقلل من زمن الاسترداد لهذه الخلايا.

الفصل الأول

أنواع الطاقة ومصادرها تمهيد لفهم الخلايا الشمسية وتطبيقاتها

1.1المقدمة

الطاقة هي القدرة على أداء العمل أو إحداث تغيرات في البيئة أو النظام المحيط. ببساطة، هي مقياس لقدرة الجسم أو النظام على إجراء عمل أو تحريك شيء ما. يتم استخدامها في مجموعة متنوعة من الأنشطة والعمليات، مثل الحركة، الحرارة، التفاعلات الكيميائية، وحتى في تشغيل الأجهزة. يعتمد مبدأ عمل الطاقة على قانون حفظ الطاقة، والذي ينص على أن "الطاقة لا تفنى ولا تستُحدث من العدم، وإنما تتحول من شكل إلى آخر هذا يعني أن الطاقة لا تختفي أو تظهر فجأة، بل تنتقل بين الأنظمة وتتحول بين الأشكال المختلفة مثل الطاقة الحركية، الحرارية، الكهربائية، الكيميائية، والنووية، مع الحفاظ على كميتها الكلية في النظام المغلق. الطاقة أيضًا لها دور كبير في تقدم البشرية؛ فهي أساس الصناعات الحديثة، والنقل، والتكنولوجيا، والزراعة، وحتى في مجالات البحث العلمي والطبية. وعلى الرغم من تنوع مصادر الطاقة، فإن الحاجة إلى فهم وتحقيق استخدام أكثر استدامة للطاقة أصبحت ضرورية لحماية البيئة وضمان استمرارية الموارد للأجيال القادمة (1)

1 .2 انواع الطاقة

تقسم الطاقة الى عدة انواع ابرزها:

a- الطاقة الكيميائية: هي الطاقة التي تربط بين ذرات الجزيء الواحد بعضها ببعض في المركبات الكيميائية. وتتم عملية تحويل الطاقة الكيميائية الى طاقة حرارية عن طريق أحداث تفاعل كامل بين المركب الكيميائي وبين الأوكسجين لتتم عملية الحرق وينتج عن ذلك الحرارة. وهذا النوع من الطاقة متوفر في الطبيعة ومن اهم انواعه النفط والفحم والغاز الطبيعي والخشب (2) .

b- الطاقة الميكانيكية: وهي الطاقة الناتجة عن حركة الأجسام من مكان لآخر حيث أنها قادرة نتيجة لهذه الحركة على بذل شغل والذي يؤدي إلى تحويل طاقة الوضع الى طاقة حركية والامثلة الطبيعية لهذا النوع من الطاقة هي حركة الرياح وظاهرة المد والجزر ، ويمكن أن تنشأ الطاقة الميكانيكية بتحويل نوع آخر من الطاقة إلى آخر ، مثل المروحة الكهربائية "تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية" (3) .

c- الطاقة الحرارية : وتعتبر من الصور الأساسية للطاقة التي يمكن أن تتحول كل صور الطاقة إليها ، فعند تشغيل الآلات المختلفة باستخدام الوقود ، تكون الخطوة الأولى هي حرق الوقود والحصول على طاقة حرارية تتحول بعد ذلك إلى طاقة ميكانيكية أو إلى نوع من أنواع الطاقة

d- الطاقة الشمسية : وهي مصدر للطاقة لا ينضب ، ولكنها تصل إلينا بشكل مبعثر وتحتاج التقنية حديثة (خلايا شمسية) لتجميعها والاستفادة منها ، وهي مصدر نظيف فلا ينتج عن استعماله أي غازات أو نواتج ضارة للبيئة كما هو الحال في انواع الوقود الأخرى .

e- الطاقة النووية: وهي الطاقة التي تربط بين مكونات النواة (البروتونات أو النيترونات) وهي تنتج نتيجة تكسر تلك الرابطة وتؤدي إلى إنتاج طاقة حرارية كبيرة جدا.

f- الطاقة الكهربائية: حيث لا يوجد مصدر طبيعي للكهرباء ، والسبب في ذلك أن جميع المواد تكون متعادلة كهربائيا ، والطاقة الكهربائية لا تنشأ إلا بتحويل نوع من أنواع الطاقة إلى طاقة كهربائية مثل تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية كما هو الحال في المولد الكهربائي أو تحويل ا لطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية كما هو الحال في البطاريات. (4) .

g- الطاقة الضوئية: هي عبارة عن موجات كهرو مغناطيسية تحتوي كل منها على حزم من الفوتونات ، وتختلف الموجات الكهرو مغناطيسية في خواصها الفيزيائية باختلاف الأطوال الموجية ، ومن الأمثلة عليها الأشعة السينية .

1.3 مصادر الطاقة

يمكن تقسيم مصادر الطاقة الى مصدرين اساسيين:

a- المصادر غير المتجددة:

هي عباره عن المصادر الناضبة أي التي ستنتهي مع الزمن لكثرة الاستخدام وهي موجوده في الطبيعة بكميات محدودة وغير متجدده وبالإضافة الى ذلك هي ملوثه للبيئة وتنتج من خلال المفاعلات النووية والمشاريع الكهرو مائية وأبرز أنواعها اليورانيوم و الوقود الاحفوري ويشمل النفط والغاز الطبيعي.

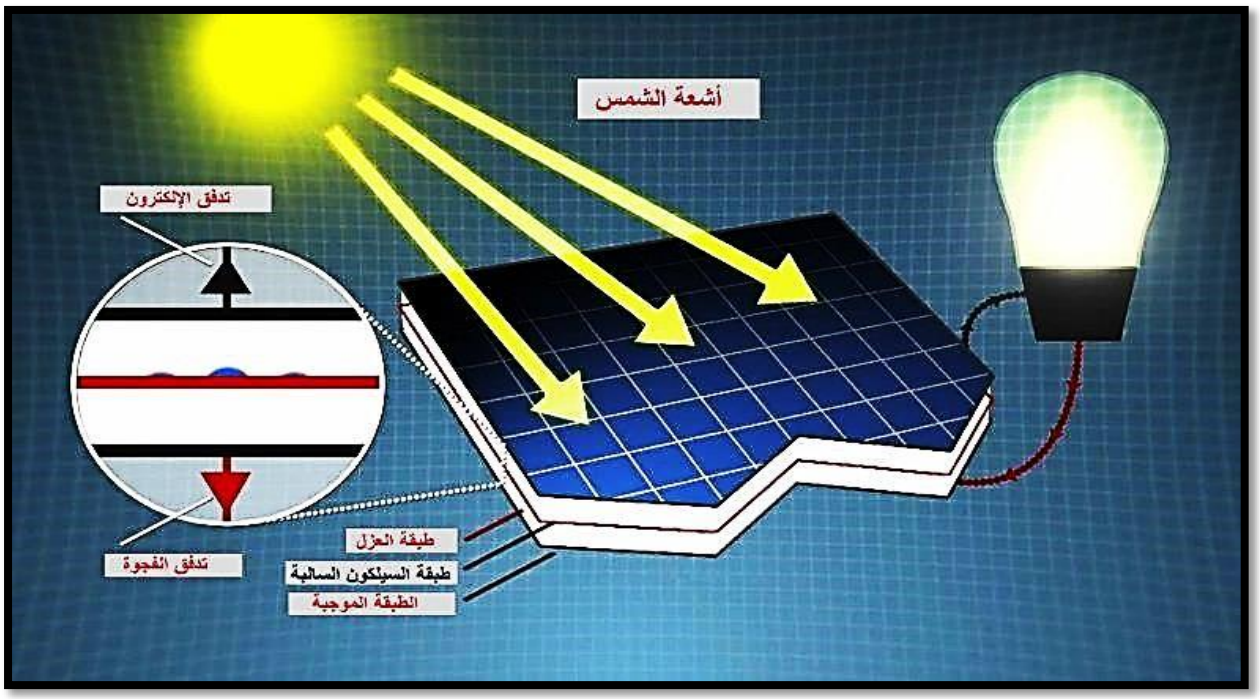
b- مصادر متجددة:

وهي عبارة عن مصادر طبيعية دائمة وغير ناضبة ومتوفرة في الطبيعة ومتجدده باستمرار مادامت الحياة قائمة وتتميز هذه الطاقة بعدة ميزات ابرزها

1- محلية وطبيعية ومتيسرة لكافة الافراد

2- تعتبر سليمة من الناحية البيئية ولا تسبب اصدار غازا ت واهم مصادرها الطاقة الشمسية وطاقة الرياح

1.4 الخلية الشمسية (Solar Cell) هي المكون الأساسي للمنظومة الشمسية وهي أصغر جزء فيه تستجيب للإشعاع الشمسي المباشر وغير المباشر محولة طاقة الاشعاع إلى طاقة كهربائية. تستفيد الالواح الشمسية من ضوء الشمس الذي ينشط الالكترونات داخل الخلية لينتج التيار و تعتمد كفاءة عمل الخلية الشمسية على كفاءة تحويل ضوء الشمس الى تيار . وتتكون الخلايا الشمسية من شبه موصلات غالباً سليكون يتم ضغطها في رقاقة معالجة بشكل خاص لتشكل حقلاً كهربائياً موجباً على طرف وسالباً على الطرف الاخر، عندما تصل الطاقة الضوئية إلى الخلية، تتحرر الالكترونات من الذرات في المادة النصف ناقلة، أي فوتونات ضوء الشمس تقوم بتحفيز الالكترونات إلى حالة أعلى من الطاقة لتولد الكهرباء، ويتم تجميع الالكترونات



الشكل (1 – 1) انتاج الخلايا الشمسية للطاقة الكهربائية

على شكل تيار كهربائي إذا تم وصل نواقل كهربائية إلى الطرفين السالب والموجب .والطاقة الكهربائية الناتجة عبارة عن كهرباء DC وتلك الطاقة المتولدة يتم تخزينها في بطاريات مختلفة السعة بحيث يمكن استخدامها أثناء فترة زوال الشمس(5) .

وقد تم اكتشاف ظاهرة الـ photovoltaic لأول مرة في عام 1839من قبل الفيزيائي الفرنسي ألكسندر إدموند بيكريل عندما لاحظ أنه في حالة تعرض قطب كهربائي إلى الضوء بحيث يكون مغموس في محلول موصل فأنه ينتج تياراً كهربائياً. وفي عام 1941 تمكن المخترع الامريكي روسل اوهل من تقديم الخلية الشمسية في شكلها الحديث ولكن بكفاءة قليله حيث ادى اكتشافه لوصلة PN المعروفة باسم P-N إلي المساهمة في ابتكارات الترانزستور بعد حوالي 30 عاما منذ هذا التاريخ . ولكن كان الاستخدام العلمي الأول لهذه الخلايا هو تشغيل والمركبات الفضائية .

1.5 أشكال الخلايا الشمسية

من الممكن أن تتكون الخلايا الشمسية بشكل مربع أو مستطيل أو دائري تفصل بينها فواصل بمسافات تختلف حسب تصميم الوحدة الشمسية، أو من الممكن أن يكون مظهرها كقطعة واحدة تغطي الوحدة الشمسية بدون فواصل، وتختلف أبعاد الخلايا الشمسية وفقاً لنوعها وطريقة صناعتها، وتتراوح أبعاد الخلية الواحدة من في الاتجاهين أو تكون بأبعاد 10×10 cm كخلايا قياسية، وأقل ما يمكن أن تنتجه الخلية الشمسية من طاقه تتراوح بين watt 1-2 بسبب صغر حجم الخلية الشمسية، ولزيادة الإنتاجية الكلية للطاقة يتم تجميعها في صفائح مغلفة مع بعضها لتكون الوحدة الشمسية Module.وتختلف الخلايا الشمسية بعضها عن بعض تبعاً لنوع المادة والكفاءة والشكل واللون وطرق التصنيع **(6).**

1.6 أنواع الخلايا الشمسية:

1- خلايا الجيل الأول(الخلايا الشمسية التقليدية السيليكونية): تعُتبر هذه الخلايا الأكثر انتشاراً وتعتمد على السيليكون البلوري (احادي أو متعدد البلورات) وهي تتميز بكفاءتها العالية نسبياً (22%- 15) لكنها مكلفة بسبب عمليات التصنيع المعقدة واستهلاكها الكبير للمواد الخام(7).

2- خلايا الجيل الثاني(الخلايا الشمسية الرقيقة): تستخدم مواد مثل السيليكون غير المتبلور والكادميوم والتيلورايد وخلايا CIGS (نحاس، انديوم، غاليوم، سيلينيد) تتميز بأنها اخف وزناً وأرخص تكلفة من الجيل الأول لكنها اقل كفاءة حوالي(15%- 10)(8).

3- خلايا الجيل الثالث)الخلايا الشمسية المتقدمة : (تشمل تقنيات جديدة مثل الخلايا العضوية والخلايا الشمسية النانوية وخلايا البيروفسكايت والخلايا متعددة الوصلات التي تستهدف كفاءات تتجاوز 40%.توفر هذه الخلايا إمكانيات واعدة مثل المرونة، الشفافية، انخفاض التكلف ة لكنها لا تزال في مراحل التطوير**(9).**

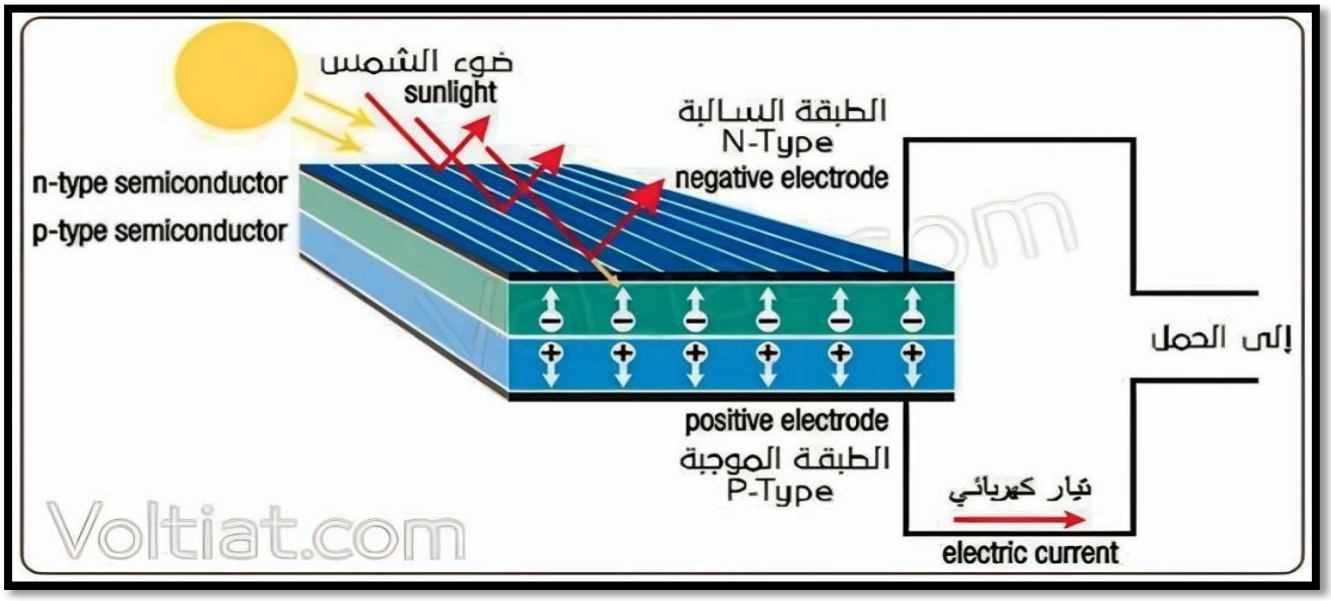
1.7 مكونات الخلايا الشمسية

ذرة السيليكون البلوري تحتوي على 14 إلكترون وتحتوي الخلية الشمسية ببساطة على مواد شبه موصله والتي تتكون من مواد نقية مثل السيليكون والجرمانيوم مع إضافة مواد غير نقية بنسبة معينة كالشوائب مثل الزرنيخ و الانتيمون الفسفور، الغاليوم، الانديوم والبورون حيث تصنع الخلية الشمسية من طبقتين لكي تعمل على توليد الطاقة الكهربائية

a -طبقة نوع N-Type: تحتوي على مواد شبه موصلة مضافاً إليها مواد شائبة بذرات خماسية التكافؤ كالزرنيخ أو الانتيمون أو الفسفور

b-طبقة نوع P-Type: تحتوي على مواد شبه موصلة بإضافة مواد شائبة عليها بذرات ثلاثية التكافؤ كالجاليوم والباريوم.

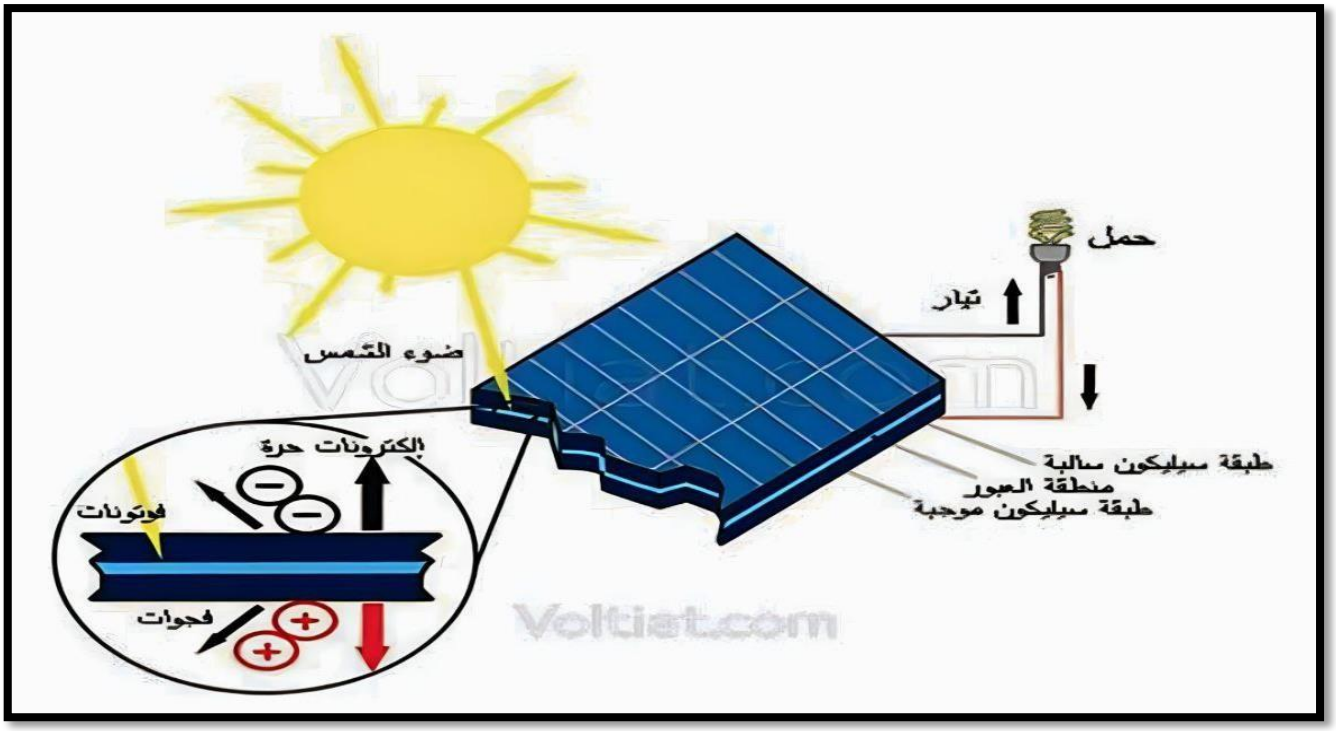
وتعمل كلا الطبقتين على تدفق التيار الكهربائي داخل الخلية عند سقوط أشعة الشمس على سطحها تصع الخلية الشمسية على شكل فرزات خشنة لزيادة مساحة سطح الخلية، بالإضافة إلى وجود فولتيات وبعض المواقع الإلكترونية (10).



(2 – 1) مكونات الخلايا الشمسية

1.8 طريقة عمل الخلية الشمسية

عند تعرض الخلية للإشعاع الشمسي فأن الإلكترونات الحرة تمتص "طاقة الفوتونات المكونة للإشعاع الشمسي أي أن الطاقة المنبعثة من الشمس تصطدم بسطح الخلية بشكل فوتون الفوتون)عباره عن طاقة في صورة ضوء وإشعاع كهرومغناطيسي وليس لها شحنة ولا كتلة.(و أذا كانت طاقة الفوتون كافية فأنها تعمل على تحفيز الالكترونات في الخلية الشمسية مما يولد جهداً كافياً لدفع هذه الإلكترونات في دوائر الحمل أي إن عند سقوط ضوء الشمس على الخلية يمر هذا الضوء من خلال سطح الخلية ويمتص منه جزء بواسطة الطبقة الأولى للخلية وهي طبقة السيليكون والمحتوية على الفسفور أما غالبية الضوء الساقط على هذه الخلية فيقوم بامتصاصه الجزء الخاص بذلك أي طبقة السيليكون المحتوية على البورون خلال هذه العملية تتكون الكترونات حرة الحركة يمكنها السريان خلال الموصل المتصل في اطراف الخلية، بزيادة كثافة الضوء الساقط على الخلية تزداد حركة الإلكترونات وبالتالي يتشكل تيار كهربائي مستمر وعند توصيل حمل كهربائي بين طرفي الخلية الشمسية يتم الاستفادة من حركة الإلكترونات الناتجة من سقوط ضوء الشمس على الخلية (11).



الشكل (3-1) عمل الخلية الشمسية

1.9 الهدف

يهدف هذا الفصل إلى تقديم مدخل شامل لمفهوم الطاقة، أنواعها، ومصادرها، مع التركيز على أهمية التحول نحو استخدام مصادر الطاقة المتجددة، وبالأخص الطاقة الشمسية. كما يستعرض الفصل المبادئ الأساسية لعمل الخلايا الشمسية، تركيبها، أنواعها، وآلية تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية. ويهدف كذلك إلى توضيح الدور المحوري للخلايا الشمسية في إنتاج الطاقة النظيفة والمستدامة، بما يسهم في تعزيز الوعي العلمي والتقني حول استخدامها في التطبيقات الحديثة، من أجل مواجهة التحديات البيئية وضمان استدامة الموارد.

الفصل الثاني
مزايا الخلايا الشمسية وتحدياتها
في الواقع التطبيقي

2.1 المقدمة

تعُد الخلايا الشمسية من الركائز الأساسية للطاقة المتجددة في العصر الحديث، إذ تقدم حلولاً بيئية واقتصادية مستدامة تسهم في الحد من الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية، وتحفز التحول نحو مستقبل أكثر نظافة وأماناً. تعكس هذه التقنية تطوراً علمياً ملحوظاً عبر العقود الأخيرة، حيث أصبحت الطاقة الشمسية جزءاً محورياً من سياسات الطاقة المستدامة لكثير من الدول حول العالم. في هذا الفصل، نتناول تفصيلياً مزايا الخلايا الشمسية، مع التعمق في الجوانب التقنية والاجتماعية والبيئية، بالإضافة إلى بعض العيوب والتحديات المصاحبة لاستخدامها، مع الإشارة إلى أهمية الاستمرار في تطوير هذه التكنولوجيا الحيوية.

شكل (2.1)

2.2 محاسن الخلايا الشمسية:

1- مصدر للطاقة المتجددة

تعُد الطاقة الشمسية واحدة من أنظف وأغزر مصادر الطاقة المتاحة، فهي متوفرة في جميع أنحاء العالم تقريبًا، ولا ترتبط بمناطق جغرافية محددة مثل النفط أو الفحم. تسخر الخلايا الشمسية الكهروضوئية أشعة الشمس لإنتاج الكهرباء دون الحاجة إلى وقود إضافي، مما يجعلها حلاً طويل الأمد لمشاكل الطاقة. علاوة على ذلك، فإن الاعتماد على الطاقة الشمسية يقلل من الاعتماد الجيوسياسي على مصادر الطاقة التقليدية، ويعزز استقلالية الطاقة للدول النامية، مما يسهم في تحقيق الأمن الطاقي .

2 - الطاقة الصديقة للبيئة

مع الخلايا الشمسية لا يحدث أي تلوث تقريبا وهذه ميزة كبيرة لا مفر من تصريف النفايات والتلوث فيما يتعلق بإنتاج الخلايا الشمسية ونقلها وعند تركيبها ومع ذلك هذا جزء ضئيل مقارنة بمصادر الطاقة التقليدية إلى جانب ذلك مع التقدم

في إعادة تدوير الخلايا الشمسية تراجعت المخاوف بشأن الخلايا الشمسية المنتهية الصلاحية بشكل كبير أيضا لا تنتج الخلايا الشمسية أي تلوث ضوضاء لذا فهي مثالية للمناطق الحضرية وخاصة المنازل.

شكل (2.2)

3- الطاقة المبتكرة

تعد الخلايا الكهروضوئية موضوعا شائعا في مجال الطاقة الخضراء وتعتبر حلا جيدا لمنع تغير المناخ وهي أيضا واحدة من أكثر مجالات الصناعة تقدما من الناحية التكنولوجية من بين أنواع الطاقة المتجددة الأخرى . لقد أنشأت بالفعل فرعا مبتكرًا للدراسة قيد البحث والتطوير المستمر بفضل الأموال غير المسبوقة التي تضعها الحكومات في هذا المجال فقد أوجدت وظائف لا حصر لها على مستويات مختلفة من مركبي الكهروضوئية إلى الباحثين والعلماء لذا فإن ميزة أخرى لصناعة الخلايا الشمسية هي فرص العمل التي يمكن أن توفرها في حالة استمرار الاستثمارات.

4- الحد من استهلاك الكهرباء وتقليل الفواتير

نظرا لأنه سوف يتم تلبية بعض الاحتياجات من الطاقة بالكهرباء التي يولدها النظام الشمسي ستنخفض فواتير الطاقة ويعتمد المبلغ الذي توفيره على الفاتورة على حجم النظام الشمسي واستخدام الكهرباء أو الحرارة علاوة على ذلك لن يتم فقط توفير فواتير الكهرباء بل هناك أيضا إمكانية لاستلام مدفوعات مقابل فائض الطاقة الذي يتم ارجاعه مرة أخرى إلى الشبكة وذلك إذا كان يتم توليد كهرباء أكثر مما يتم استخدامه[8] بالنظر إلى أن نظام الألواح الشمسية تكون متصل بالشبكة.

شكل (2.3)

5- الحفاظ على البيئة وتقليل البصمة الكربونية

تساهم الأنظمة الشمسية في حماية الموارد الطبيعية من خلال تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، مما يساعد في الحفاظ على النظم البيئية والتنوع الحيوي. الطاقة الشمسية تحد من تآكل الأراضي وتلوث المياه الناجمين عن أنشطة التعدين واستخراج النفط والفحم

6 - طاقة طويلة الاجل

غالبا ما تتمتع الأنظمة الكهروضوئية بحياة طويلة ومتانة جيدة وفي الوقت نفسه غالبا ما يكون هناك ضمان بحد أدنى ٢٠ عاما على الألواح الشمسية مما يضمن للمستهلك الحصول على الصيانة والإصلاحات اللازمة في حالة حدوث أي مضاعفات .

7 - استخدامها في التطبيقات المتنوعة

يمكن استخدام الطاقة الشمسية لأغراض متنوعة حيث يمكن توليد الكهرباء (الضوئية) أو الحرارة الطاقة الشمسية الحرارية ويمكن استخدام الطاقة الشمسية لإنتاج الكهرباء في المناطق التي لا تصل لها شبكات الطاقة وكذلك تستخدم لتقطير المياه في المناطق ذات الإمداد المحدود بالمياه النظيفة وتزويد الأقمار الصناعية بالطاقة في الفضاء (13).

شكل (2.4)

8- انخفاض تكاليف الصيانة

لا تتطلب أنظمة الطاقة الشمسية عموما الكثير من الصيانة ليس على المستهلك سوى الحفاظ عليها نظيفة نسبياً لذا فإن تنظيفها عدة مرات في السنة يمنعها من التلف ومعظم الشركات المصنعة للألواح الشمسية الموثوقة تقدم ضمانا يتراوح من ٢٠ إلى ٥٢ عاما أيضا نظرا لعدم وجود اجزاء متحركة وعادة ما يكون العاكس هو الجزء الوحيد الذي يجب تغييره بعد ١٠,٥ سنوات لأنه يعمل باستمرار على تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء وحرارة الطاقة الشمسية الكهروضوئية مقابل الطاقة الشمسية الحرارية وبصرف النظر عن العاكس تحتاج الكابلات أيضا إلى صيانة لضمان تشغيل نظام الطاقة الشمسية بأقصى قدر من الكفاءة.

9- تطوير التكنولوجيا

تتقدم التكنولوجيا في صناعة الطاقة الشمسية باستمرار ويمكن للابتكارات في فيزياء الكم وتكنولوجيا النانو أن تزيد من فعالية الألواح الشمسية وتضاعف المدخلات الكهربائية الأنظمة الطاقة الشمسية.

10 - بيع الطاقة

إذا كان منزلك يحتوي على خلايا شمسية فغالبا ما يكون من الأسهل بيع العقار بسعر أعلى في المملكة المتحدة هناك بعض المنح والحوافز المتاحة إذا كنت ترغب في الاستثمار في الخلايا

11- الطاقة اللانهائية

عندما تتاح لك الفرصة لاستخراج الطاقة من أشعة الشمس فهذا مصدر للطاقة لن يتم استنفاده أبدا وبالتالي هذا سوق مبتكر يخضع للبحث والتطوير المستمر.

2.3 مساوئ الخلايا الشمسية (Solar cell cons)

قد يكون لاستخدام الخلايا الشمسية بعض العيوب فيما يلي بعض أهم عيوب الخلايا الشمسية التي يجب مراعاتها عند استخدام الطاقة الشمسية (12).

شكل (2.5)

1 - ارتفاع الاستثمار

من أهم عيوب الخلايا الشمسية التكلفة العالية نسبيا لتركيب الألواح الشمسية على سبيل المثال تبلغ التكلفة التقديرية لنظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية ٥ كيلو وات حوالي ٧٠٠٠ جنيه إسترليني - ٩٠٠٠ جنيه إسترليني اعتماداً على نوع السقف والظروف الأخرى . لحسن الحظ هناك حل لهذا العيب تقدم معظم البنوك في المملكة المتحدة إقراض الطاقة والذي يمنحك

فائدة منخفضة كعميل أو مستثمر في الطاقة الخضراء والأهم من ذلك يجب أن تضع في اعتبارك أن الطاقة التي تنتجها الخلايا الشمسية مجانية وليس لديك أي تكاليف تشغيلية في الواقع لا تحتاج الألواح الكهروضوئية إلى أي وقود لذلك يمكن تعويض التكلفة الأولية بعد فترة.

2- عدم تلبية الاحتياجات الداخلية

ليست كل الأسر التي يمكنها تلبية احتياجاتها والحصول على أقصى استفادة من خلاياها الشمسية حتى الآن حيث تعتبر الخلايا الشمسية حساسة للغاية من حيث موقعها مما يعني أنه إذا كان هناك ظل على مجموعة الخلايا الموجودة في مكان ما فمن الصعب استغلال الألواح الشمسية على ا لنحو الأمثل ولحل هذه المشكلة يجب الاتصال بالشبكة وبالتالي شراء الطاقة من الآخرين

3- ارتفاع التكلفة

التكلفة الأولية لشراء الخلايا الشمسية مرتفعة إلى حد ما حيث تشمل التكلفة دفع ثمن الألواحالشمسية والعاكس والبطاريات والأسلاك والتركيب ومع ذلك فإن تكنولوجيات الطاقة الشمسية تتطور باستمرار لذلك من الأمن افتراض أن الأسعار ستنخفض في المستقبل.

4 - الطاقة الموسمية وتعتمد على الطقس

بالمقارنة مع الأنواع الأخرى من الطاقة المتجددة فإن محطة الطاقة الشمسية موسمية للغاية حيث يمكن أن يكون هناك فترات محدودة من الشمس ويكمن الحل في توصيل شبكات الطاقة الشمسية وشراء الطاقة من شبكة الكهرباء العامة خلال الفترات التي تقل فيها الطاقة الشمسية ويعد الاستثمار في نظام تخزين البطاريات الشمسية خيارًا جيداً أيضا حيث يمكنه تخزين الطاقة المولدة خلال ساعات الذروة وجعلها متاحة بسهولة للأيام الملبدة بالغيوم (13).

5 - تخزين الطاقة الشمسية باهظ الثمن

يمكن استخدام الطاقة الشمسية على الفور أو يمكن تخزينها في بطاريات كبيرة ويمكن شحن هذه البطاريات المستخدمة في أنظمة الطاقة الشمسية خارج الشبكة خلال النهار حتى يتم استخدام الطاقة في الليل وهذا حل جيد لاستخدام الطاقة الشمسية طوال اليوم ولكنه مكلف للغاية.

6 - تحتاج إلى مساحة كبيرة من الفضاء

كلما زادت الطاقة المراد إنتاجها زاد عدد الألواح الشمسية التي يتم الحاجة إليها وفي هذه الحالة يجب جمع أكبر قدر ممكن من ضوء الشمس تتطلب الألواح الكهروضوئية الشمسية مساحة كبيرة وبعض الأسطح ليست كبيرة بما يكفي لتناسب عدد الألواح الشمسية المراد امتلاكها فإذا لم يكن هناك مساحة لجميع اللوحات يمكن اختيار تثبيت عدد أقل لتلبية بعض الاحتياجات من الطاقة.

2.4 مقارنة أنواع الخلايا الشمسية من حيث الكلفة:

تعُد الخلايا الشمسية من أبرز حلول الطاقة المتجددة، إلا أن اختيار النوع الأمثل يعتمد بشكل كبير على كفاءتها وتكلفة إنتاجها. تختلف أنواع الخلايا الشمسية في المواد المستخدمة وتقنيات التصنيع، مما يؤدي إلى تباين كبير في تكلفتها، سواء على مستوى المواد الخام أو العمليات الصناعية.

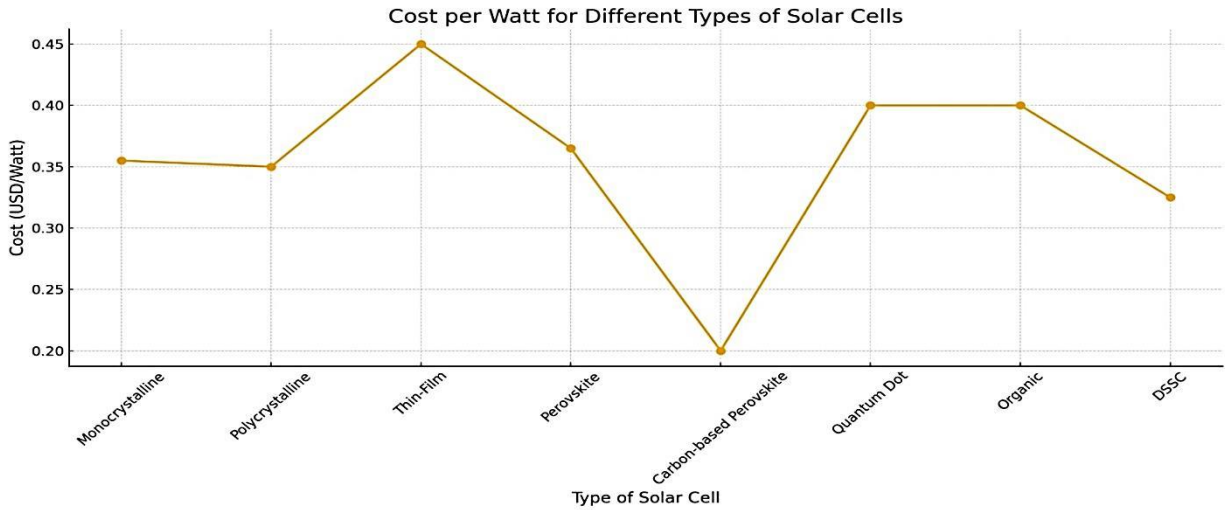
تشير الأبحاث إلى أن خلايا السيليكون التقليدية، وخاصة من نوع p-type وn-type، ما تزال مهيمنة على السوق، لكن تكلفة تصنيع خلايا n-type لا تزال أعلى نسبيًا بسبب متطلبات موادها الخاصة **(14).** بالمقابل، تقدم خلايا السيليكون غير المتبلور حلاً منخفض التكلفة مع كفاءة معتدلة، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات الاستهلاكية واسعة النطاق

(15) . أما خلايا البيروفسكايت الحديثة فتوفر كفاءة عالية مع إمكانيات كبيرة لتقليل التكلفة، خاصة عند استخدام أقطاب كربونية منخفضة السعر بدلاً من الذهب، مما يخفض تكلفة التصنيع بأكثر من 50% (Li & Chen, 2024).تشير بعض الدراسات أيضًا إلى أن خلايا الطبقات الرقيقة مثل CdTe وCIGS تعتبر من الخيارات الأرخص على الإطلاق، لكنها قد تعاني من محدودية في الكفاءة مقارنة بالخلايا التقليدية (16) .

مقارنة علمية لتكلفة أنواع الخلايا الشمسية (Cost per Watt)

نوع الخلية الشمسية	الكلفة بالدولار لكل واط (USD/Watt)	المصدر
Monocrystalline Silicon	0.254 – 0.455 USD/W	17
Polycrystalline Silicon	0.30 – 0.40 USD/W	18
Thin-Film (CdTe, a-Si)	0.40 – 0.50 USD/W	19
Perovskite Solar Cells	0.32 – 0.41 USD/W	20
Carbon-based Perovskite	~0.20 USD/W	21
Quantum Dot Solar Cells (QDSCs)	0.35 – 0.45 USD/W	22
Organic Solar Cells (OSCs)	0.30 – 0.50 USD/W	23
Dye-Sensitized Solar Cells (DSSC)	0.25 – 0.40 USD/W	24

الخلايا أحادية البلورية تتميز بأعلى كفاءة، لكنها الأغلى الخلايا متعددة البلورات أرخص قليلاً مع كفاءة جيدة. خلايا الأغشية الرقيقة أقل كفاءة، لكنها أقل تكلفة وأخف وزنًا. خلايا بيروفسكايت تمثل الجيل الجديد، بكفاءة مرتفعة جدًا وكلفة منخفضة مما يجعلها واعدة جدًا للمستقبل. خلايا البيروفسكايت الكربونية تمثل أقل تكلفة تصنيع حالياً، لكنها لا تزال في مراحل التطوير التجاري.



الفصل الثالث

كفاءة الخلية الشمسية

3.1 المقدمة :

تُعدّ الطاقة الشمسية من أكثر مصادر الطاقة المتجددة انتشارًا وواعدةً على وجه الأرض . فهي تُتيح لنا فرصة تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري المحدود الذي يُلوّث كوكبنا. وتُعدّ الألواح الشمسية الوسيلة الأكثر شيوعًا لتسخير طاقة الشمس ، لكن ليست جميع الألواح الشمسية متساوية في الجودة، فبعضها أكثر كفاءة من غيرها. وتلعب كفاءة الألواح الشمسية دورًا حاسمًا في مدى فعالية نظام الطاقة الشمسية في تزويد المنازل أو الشركات بالطاقة. لذا، من الضروري تعظيم كفاءة الألواح الشمسية للاستفادة القصوى من ضوء الشمس وتحويله إلى طاقة نظيفة (25)

3.2 الكفاءة في الفيزياء :

عندما نتحدث عن الكفاءة في الفيزياء، فإننا نشير إلى نسبة الطاقة المفيدة الناتجة عن نظام ما إلى إجمالي طاقة الإدخال المنقولة إلى هذا النظام (26).

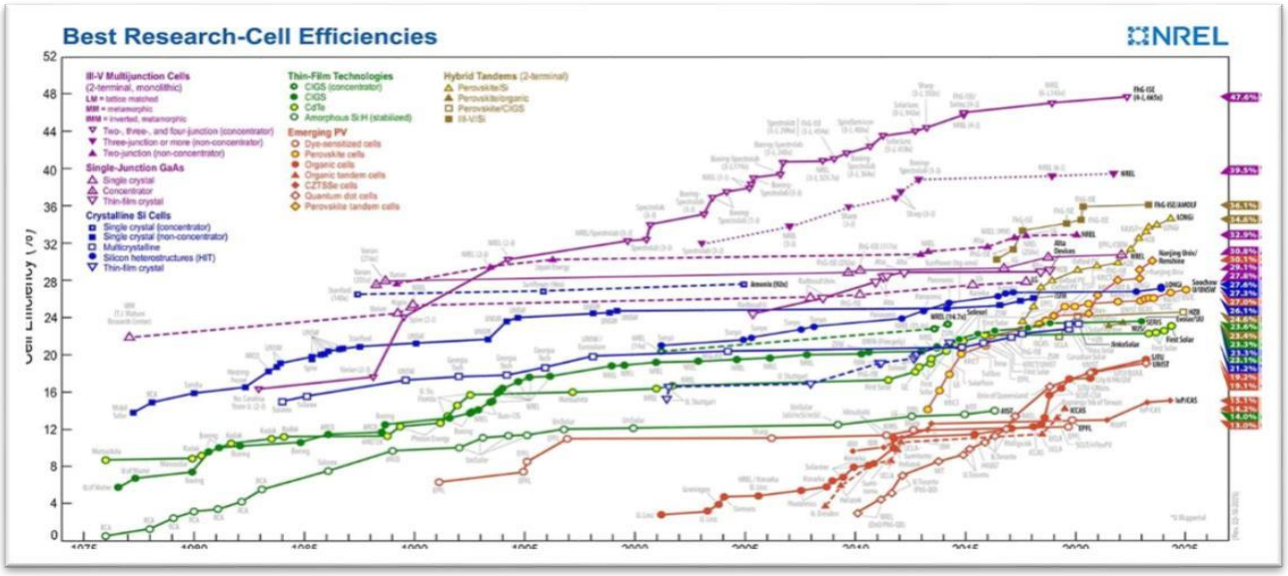
3.3 المقصود كفاءة الألواح الشمسية:

كفاءة الألواح الشمسية هي كمية ضوء الشمس (الإشعاع الشمسي) التي تسقط عليها والتي يمكن تحويلها إلى كهرباء قابلة للاستخدام. هذا يعني أنه بالنسبة للوحة ذات كفاءة 20%، فإن 20% من طاقة الشمس التي تمتصها ستحُوّل إلى كهرباء. يعُرف هذا أي اضا باسم خرج الطاقة أو تصني ف قدرة اللوحة، والذي يُقاس بالواط. تؤُلدّ

اللوحة الشمسية ذات الكفاءة الأعلى كهرباء أكبر (واط أكثر) من اللوحة الأقل كفاءة في نفس الظروف. تنُتج معظم الألواح الشمسية ذات 72 خلية المتوفرة في السوق اليوم ما بين 350 و600 واط لكل منها (27).

ملاحظة مهمة:

كفاءة اللوح الشمسي تختلف عن كفاءة الخلايا الشمسية. فأن كفاءة اللوح تكون أقل من كفاءة الخلايا الموجودة داخل اللوح. على الرغم أن القانون المستخدم لحساب كفاءة الخلية الشمسية نفس القانون المستخدم لحساب كفاءة اللوح. على سبيل المثال لو كانت كفاءة لوح ما 20% فإن كفاءة الخلايا الموجودة في اللوح أكبر من 20%. الفرق يمكن أن يتراوح عادة بين 2٪ إلى 5٪، وأحيانا أكثر حسب نوع اللوح وجودة التصنيع .والسبب يعود إلى عدة عوامل. منها: خسائر التوصيل والمقاومة والمساحات غير الفعالة بين الخلايا المكونة للوح وغيرها من العوامل الأخرى.



مخطط كفاءة الخلايا الشمسية البحثية الصادر عن مختبر الطاقة المتجددة الوطني الأمريكي تعد مرجعاً مهماً في مجال تكنولوجيا الخلايا الشمسية. يظُهر هذا المخطط تطور كفاءة الخلايا الشمسية عبر الزمن، بداء من عام 1976 وحتى الوقت الحاضر، ويصُنف الخلايا حسب نوع التقنية (28).

3.4 حساب كفاءة الخلية الشمسية:

$$\eta = \frac{P_m}{G \times A_C}$$

قانون حساب كفاءة الخلية الشمسية (29).

حيث:

η (إيتا): كفاءة الخلية الشمسي (%)

P: القدرة العظمى الناتجة من الخلية الشمسية (Watt)

A: مساحة الخلية (m^2)

G: الإشعاع الشمسي ($Watt/m^2$)

ملاحظة:

هنالك أكثر من صيغة أو شكل لقانون حساب كفاءة الخلية الشمسية، ولكن استخدمنا القانون في الشكل أعلاه للسهولة. على الرغم أن جميع صيغ القوانين الأخرى تعط نفس الناتج.

ملاحظة:

قيمة الإشعاع الشمسي (G) في القانون أعلاه هي قيمة متغيرة وليست ثابتة لكن عندما نحسب كفاءة الخلايا أو الألواح الشمسية تستخدم هذه القيمة في القانون والتي هي ($W/m^2$1000) لأنها تمثل الشرط القياسي العالمي للاختبار المعروف بـ: Standard Test Conditions (STC)

وهذه الشروط القياسية وضعت حتى:

- نوحد المقارنة بين أنواع الخلايا المختلفة.
- نقيم الأداء النظري في ظروف مثالية.
- نسهل الحسابات في المعامل والمختبرات.

3. 5 العوامل المؤثرة على كفاءة نظام الطاقة الشمسية

عند تصميم أنظمة الطاقة الشمسية فمن الضروري النظر بشكل كامل في بعض العوامل الهامة التي تؤثر على كفاءة التحويل. هناك العديد من العوامل التي يمكن أن تؤثر على كفاءة نظام الطاقة الشمسية. فيما يلي العوامل الرئيسية التي يجب مراعاتها:

شدة ضوء الشمس وتوافره: تؤثر كمية ضوء الشمس التي تصل إلى اللوحة الشمسية بشكل مباشر على كفاءته ا. يمكن لعوامل مثل الموقع الجغرافي، والظروف الجوية، والوقت من العام أن تؤثر على شدة ضوء الشمس وتوافره. تتمتع المناطق ذات الإشعاع الشمسي العالي (الإشعاع الشمسي) عمو اما بكفاءة أعلى في نظام الطاقة الشمسية.

1. زاوية وتوجيه الألواح الشمسية: يعد التثبيت والتوجيه المناسبين للألواح الشمسية أم ارا بالغ الأهمية لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة. يجب تحسين زاوية الألواح واتجاهها لالتقاط أكبر قدر من ضوء الشمس طوال اليوم. يتضمن ذلك مراعاة خط العرض والميل والَّتجاه بالنسبة لمسار الشمس.

2. درجة الحرارة: تعمل الألواح الشمسية بكفاءة أكبر في درجات الحرارة الباردة. مع زيادة درجة الحرارة، تنخفض كفاءة اللوحة. يمكن أن تؤدي درجات الحرارة المرتفعة إلى انخفاض الجهد وتقليل خرج الطاقة الإجمالي للنظام . يمكن أن تساعد آليات التهوية والتبريد المناسبة في التخفيف من آثار درجات الحرارة المرتفعة على الكفاءة.

3. الظلال والعوائق: الظلال الملقاة على الألواح الشمسية يمكن أن تقلل من كفاءتها بشكل كبير. حتى كمية صغيرة من التظليل على اللوحة يمكن أن تسبب انخفاضا في توليد الطاقة. من المهم تقليل تأثير الظلال من الهياكل أو الأشجار أو العوائق الأخرى القريبة من خلال وضع الألواح بشكل مناسب والصيانة الدورية لإزالة أي حطام قد يلقي الظلال.

4. جودة اللوحة وتقنيتها: تلعب جودة وتقنية الألواح الشمسية نفسها دو ارا في كفاءة النظام .تلتقط الألواح عالية الجودة المزودة بخلايا كهروضوئية عالية الكفاءة المزيد من ضوء الشمس وتحوله إلى كهرباء .تتمتع التقنيات الكهروضوئية المختلفة مثل أحادية البلورة ومتعددة البلورات والأغشية الرقيقة بمستويات كفاءة مختلفة.

5. مكونات النظام وتصميمه: يمكن أن تؤثر كفاءة المكونات الأخرى في النظام الشمسي، مثل العاكسات والأسلاك ومكونات توازن النظام(BOS) على الكفاءة الإجمالية. يمكن أن يؤدي التصميم السليم لهذه المكونات وضبطها واختيارها، جن ابا إلى جنب مع نظام فعال لإدارة الطاقة، إلى تحسين كفاءة النظام بشكل عام.

6. الصيانة والتنظيف: الصيانة الدورية وتنظيف الألواح الشمسية أمر ضروري لضمان أقصى قدر من الكفاءة. يمكن أن يتراكم الغبار والأوساخ والحطام وفضلات الطيور على الألواح، مما يقلل من قدرتها على امتصاص أشعة الشمس. يؤدي تنظيف الألواح بانتظام والحفاظ عليها في حالة جيد ة إلى تحسين الكفاءة.

7. كفاءة الانقلاب: يقوم العاكس بتحويل الطاقة الكهربائية DC (التيار المباشر) الناتجة عن اللوحة الشمسية إلى طاقة كهربائية AC (تيار متناوب)، والتي يمكن استخدامها بواسطة شبكة إمداد الطاقة أو الأجهزة الكهربائية. تلعب كفاءة العاكس دو ارا حيويا في كفاءة النظام بشكل عام. يؤدي استخدام محولًات عالية الجودة وعالية الكفاءة إلى تحسين تحويل الطاقة وتقليل فقد الطاقة (30).

3.6 علاقة الزمن بالكفاءة:

تشهد الألواح الشمسية انخفاضا تدريجيا في الكفاءة بمرور الوقت، وهي ظاهرة تعُرف بالتدهور. في المتوسط، تفقد معظم الألواح الشمسية حوالي 5.0% إلى 1% من كفاءتها سنوي اا. وهذا يعني أنه بعد 20 عام اما، قد تعمل اللوحة التي كانت كفاءتها في البداية 20% بكفاءة تتراوح بين 15% إلى 17% فقط. تشير الأبحاث الصادرة عن المختبر الوطني للطاقة المتجددة) NREL(إلى أن الألواح عالية الجودة تميل إلى التدهور ببطء أكبر. على سبيل المثال، غال ابا ما تبلغ معدلات التدهور في العلامات التجارية الفاخرة مثل SunPower و0.3% LG سنويا. وعلى النقيض من ذلك، يمكن أن تتدهور الألواح ذات الجودة المنخفضة بمعدلًات تتجاوز 1% سنويا. معظم الشركات المصنعة تقدم ضمانات التي تضمن مستوى عينا من الأداء

(غال ابا حوالي 80% من الكفاءة) بعد 25 عاما، مما يوفر ضمانا لطول عمرها (31).

3.7أهمية تحسين كفاءة الخلايا الشمسية:

كفاءة الطاقة الشمسية عنصرا أساسيا في تعزيز استخدامنا للطاقة النظيفة والمستدامة، مع التحسينات المستمرة في تقنيات الألواح الشمسية، نقترب تدريجيا من تحقيق أقصى استفادة من أشعة الشمس، مما يسهم في خفض تكاليف الطاقة وحماية البيئة(32).

3.8 عدم وجود كفاءة 100%

قد يتساءل البعض عن عدم توفر ألواح شمسية فعّالة بنسبة 100% في السوق. يبذل قطاع الطاقة الشمسية جهودا حثيثة لتحقيق تقدم ملحوظ في كفاءة الألواح الشمسية.

في الواقع، حققت لوحة شمسية طورها المختبر الوطني للطاقة المتجددة(NREL) التابع لوزارة الطاقة الأمريكية مؤخ ارا تصنيفات كفاءة بلغت 47% في المختبر و40% في بيئة واقعية. لكن من المرجح ألاً تحقق تقنية الطاقة الكهروضوئية كفاءة 100% أب ادا، نظرا لوجود بعض الأطوال الموجية للضوء، مثل الأشعة فوق البنفسجية والأشعة تحت الحمراء، التي لاً تستطيع الألواح الشمسية الحالية امتصاصها. هذه الطاقة الضوئية إما تنعكس عن ا لألواح أو تفقدها ببساطة. مع تطور التقنيات، من الممكن أن تتمكن الألواح الشمسية يوما ما من امتصاص طيف أوسع من الضوء، ولكن حتى مع ذلك، لن تتحقق كفاءة الألواح الشمسية بنسبة 100%.

سيضيع جزء من طاقة الضوء الممتصة دائما في عملية التحويل الكهروضوئي داخل الخلايا الشمسية. هذه هي طبيعة تحويل شكل من أشكال الطاقة (ضوء الشمس) إلى شكل آخر الكهرباء (33).

3.9 بعض اتجاهات تكنولوجيا الألواح الشمسية الجديدة لعام 2025:

تشمل اتجاهات تكنولوجيا الألواح الشمسية الناشئة لعام ٢٠٢٥ التطورات في الخلايا الترادفية وخلايا البيروفسكايت، مما يعزز الكفاءة وإنتاج الطاقة، إلى جانب الاستخدام المتزايد للألواح ثنائية الوجه التي تلتقط ضوء الشمس على كلا الجانبين.

كما تزداد شعبية العاكسات الذكية ، مما يعزز إدارة الطاقة وتكاملها مع أنظمة التخزين. وتسُهم الابتكارات في الذكاء الاصطناعي وتقنية البلوك تشين في تبسيط المراقبة وتحسين أداء النظام. تسُهم هذه التطورات في تكنولوجيا الطاقة الشمسية في تعزيز الكفاءة وتوفير التكاليف وتعدد الاستخدامات. ومع تنامي هذه التوجهات، من المتوقع أن يزيد اعتماد الطاقة الشمسية في المشاريع السكنية والتجارية ومشاريع المرافق العامة. (34)

المصادر

1. محمد عبد الله العريان، الطاقة والبيئة، القاهرة، دار الكتب العلمية، 2010. صفحة 25

2. عبد الرحمن العريفي، الطاقة الكيميائية وتحويلها الى طاقة حرارية، الرياض، دار الكتب العلمية، 2015ص 20-30.

3. فاطمة العنزي، الطاقة الميكانيكية وأهميتها في الحياة اليومية، الرياض، دار النشر، 2014. صفحة 25.

4. نور الدين السليماني، الطاقة الكهربائية وتحويل الطاقة، القاهرة، دار النشر، 2017. ص 30.

5. الأخرس اسامه، كل ما تريد معرفته عن الخلايا الشمسي ة 2014.

6. محمد العبد الله، تقنيات الطاقة الشمسية، القاهرة، دار الكتب العلمية، 2018. ص 70- 80

7. عبد الله السلمان، "تطور تقنية الخلايا الشمسية في العالم العربي"، الرياض، دار العلم للجميع، 2017. ص 100- 115

8. سعيد الجاسم، "تقنية الخلايا الشمسية الرقيقة"، الدوحة، دار النشر، 2017. ص 90- 100

9. محمد السيد، "تقنيات الخلايا الشمسية المتقدمة"، القاهرة، دار النشر، 2017. ص 75

10. نور الدين السليمان، "تصميم وتصنيع الخلايا الشمسي ة"، القاهرة، دار النشر، 2017. صفحة 75

11. الخلايا الشمسية، دكتور محمد لطفي، دار اسامة للطباعة والنشر، دمشق، 2007

12. Hans J. (1961). "Detailed، Queisser؛ William، Shockley "Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells .PDF). Journal of Applied Physics. 32 (3): 510(.doi:10.1063/1.1736034) .PDF

13. Peter (2007). Sustainable energy systems، Gevorkian .engineering: the complete green building design resource .McGraw Hill Professional. ISBN 978-0-07-147359-0

14. Alkharasani et al., 2022

15- Kuwano, 1984

16. Breeze, 2016

17- (**Sherman** et al., 2021)

18- **(Angadi et al., 2019)**

19- **(Angadi et al., 2019)**

20- **(Song et al., 2018)**

21-(Li & Chen, 2024)

22- **(Bhambhani, 2018)**

23- **(Rizwan et al., 2022)**

24- **(Shalini et al., 2016)**

25. Just Energy. (2024, April 22). Solar Panel Efficiency: A Path to Energy Independence.

26- Vaia. (2023, August 1). Efficiency in Physics

27- Velo Solar. (2023, February 20). Solar Panel Efficiency

28- National Renewable Energy Laboratory (NREL). (n.d.). Best .Research-Cell Efficiency Chart

29-Savelieva, M. (2023, May 26). How to calculate solar panel .efficiency. SunValue

30-Sunrun Solar. (2023, June 15). The Factors Affecting Solar Power .System Efficiency

31-Shielden Solar. "Improving Solar Energy Efficiency: A Deeper Look at Solar Panel Efficiency." Published on March 19, 2024, and .last updated on January 23, 2025

32- .Future Sun. (2024, March 4). Solar energy efficiency

33- .Velo Solar. (2023, February 20). Solar Panel Efficiency

34-GreenLancer. (2025, April 18). 7 new solar panel technology trends shaping the future