

Photovoltaic Cells: Principles of Operation and Performance Characteristics

Abdulgader Alsharif^{1*}, Fathallah I. Solman², Abdelgader Agilah Saleh Gheidan³, Abdussalam Ali Ahmed⁴, Llahm Omar Farag Ben Dalla⁵, Mohamed A. Alsharif⁶, Abba Lawan Buker⁷, Ibrahim Imbayah⁸

¹ Department of Electric and Electronic Engineering, College of Technical Sciences Sabha, Sabha, Libya

² Department of Electrical and Electronic Engineering, College of Engineering Technology Al-Qubba, Libya

³ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Technical Engineering, Bright Star University, El Brega, Libya

⁴ Department of Mechanical Engineering, Bani Waleed University, Bani Waleed, Libya

⁵ Department of Computer science, College of Technical Sciences Sabha, Sabha, Libya

⁶ Department of Communications and Information Technology, College of Civil Aviation and Meteorology Technology, Espia, Libya

⁷ Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, University of Maiduguri, P.M.B. 1069, Maiduguri, Borno State, Nigeria

⁸ Department of Energy Engineering, College of Renewable Energy, Tajoura, Libya

الخلايا الكهروضوئية: مبادئ العمل وخصائص الأداء

عبدالقادر الشريف^{1*}، فتح الله إبراهيم سليمان²، عبدالقادر عقيلة³، عبدالسلام علي أحمد⁴، للاهم عمر فرج بن دله⁵، محمد الشريف⁶، أبا لوان بوكور⁷، إبراهيم أمبيه⁸

¹ قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية، كلية العلوم التقنية سبها، ليبيا

² قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية، كلية الهندسة التقنية القبة، ليبيا

³ قسم الهندسة الميكانيكية، كلية الهندسة التقنية، جامعة النجم الساطع، البريقة، ليبيا

⁴ قسم الهندسة الميكانيكية، جامعة بني وليد، بني وليد، ليبيا

⁵ قسم علوم الحاسوب، كلية العلوم التقنية سبها، ليبيا

⁶ قسم الاتصالات وتكنولوجيا المعلومات، كلية تقنية الطيران المدني والارصاد الجوية، اسبيعة، ليبيا

⁷ قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية، كلية الهندسة، جامعة مايدوقوري، ص.ب. 1069، مايدوقوري، ولاية بورنو، نيجيريا

⁸ قسم هندسة الطاقة، كلية الطاقة المتجددة تاجوراء، ليبيا

*Corresponding author: alsharifutm@gmail.com

Received: January 31, 2026

Accepted: February 28, 2026

Published: March 21, 2026



Copyright: © 2026 by the authors. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract:

Photovoltaic cells are among the most important technologies for converting solar energy into electricity, relying on the photovoltaic effect in semiconductor materials such as silicon. When sunlight strikes the cell, photons are absorbed, transferring their energy and releasing electrons, thereby generating an electric current. Cells are manufactured in several types: monocrystalline and polycrystalline silicon, thin films (e.g., CdTe, CIGS), and

emerging technologies (such as perovskite and multi-junction cells). Cell efficiency is measured by key performance parameters: open-circuit voltage (V_{oc}), short-circuit current (I_{sc}), fill factor (FF), and efficiency (η). These parameters are influenced by solar irradiance intensity, temperature, and material properties. Photovoltaic cells contribute to advancing renewable energy and reducing emissions, with ongoing research aimed at improving their efficiency and lowering costs.

Keywords: Photovoltaic Cells, Photovoltaic Effect, Efficiency, Solar Energy, Silicon, Thin Films, Fill Factor.

الملخص

تعد الخلايا الكهروضوئية من أهم تقنيات تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء، حيث تعتمد على التأثير الكهروضوئي في مواد شبه موصلة كالسيليكون. عند سقوط ضوء الشمس على الخلية، تمتص الفوتونات طاقتها وتحرر إلكترونات، مما يولد تياراً كهربائياً. تُصنع الخلايا بأنواع متعددة: السيليكون أحادي ومتعدد البلورات، والأغشية الرقيقة (مثل CdTe، CIGS)، والتقنيات الناشئة (كالبيروفسكايت ومتعددة الوصلات). تقاس كفاءة الخلية بمعاملات أداء رئيسية: جهد الدائرة المفتوحة (V_{oc})، تيار القصر (I_{sc})، عامل الملء (FF)، والكفاءة (η). تتأثر هذه المعاملات بشدة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة وخصائص المواد. تسهم الخلايا الكهروضوئية في تعزيز الطاقة المتجددة وتقليل الانبعاثات، مع استمرار البحث لتحسين كفاءتها وخفض التكاليف.

الكلمات المفتاحية: خلايا كهروضوئية، تأثير كهروضوئي، كفاءة، طاقة شمسية، سيليكون، أغشية رقيقة، معامل الملء.

1. المقدمة

دفع الطلب العالمي على الطاقة النظيفة والمستدامة إلى تحقيق تطورات كبيرة في تكنولوجيا الخلايا الكهروضوئية (Allam, Metwalley, and Muhammad 2018). تُعد الخلايا الكهروضوئية، التي تحول ضوء الشمس إلى كهرباء، حجر الزاوية في أنظمة الطاقة المتجددة، حيث تقدم حلاً قابلاً للتطوير وصديقاً للبيئة للاحتياجات من الطاقة (Alsharif, Tan, Ayop, Dobi, et al. 2021). يشكل التأثير الكهروضوئي، الذي اكتشفه ألكسندر-إدمون بيكريل في عام 1839، الأساس الذي تقوم عليه عملية تشغيل الخلايا الكهروضوئية. تهدف هذه المخطوطة إلى توضيح مبادئ عمل الخلايا الكهروضوئية، وتركيبات موادها، وخصائص أدائها، مما يوفر أساساً للباحثين والمهندسين وصانعي السياسات لفهم وتطوير تقنيات الطاقة الشمسية (Solman et al. 2026).

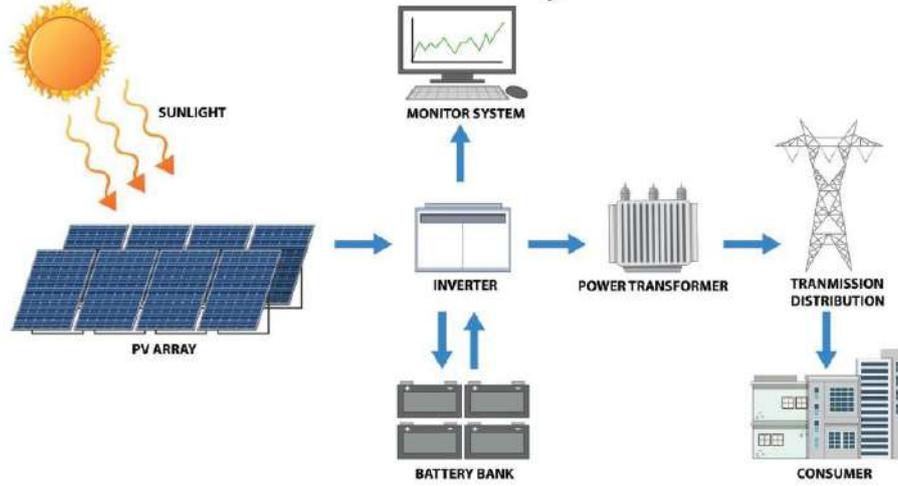
كان السعي لتسخير الطاقة الشمسية من خلال الخلايا الكهروضوئية حجر زاوية في أبحاث الطاقة المتجددة منذ أن لاحظ ألكسندر-إدمون بيكريل التأثير الكهروضوئي لأول مرة في عام 1839 (Alsharif, Tan, 1839). على مدى العقود، تطورت تكنولوجيا الخلايا الكهروضوئية من مجرد فضول علمي إلى عنصر حيوي في أنظمة الطاقة العالمية. يستكشف هذا الاستعراض للأدبيات المبادئ الأساسية، وخصائص الأداء، والتطورات الحديثة في الخلايا الكهروضوئية، بالاعتماد على دراسات رئيسية لوضع سياق المخطوطة "تسليط الضوء على الخلايا الكهروضوئية: كيف تعمل وماذا يمكنها أن تفعل". يسلط الاستعراض الضوء على التفاعل بين علم المواد والابتكارات الهندسية والتحديات العملية في تطوير الطاقة الشمسية.

2. المبادئ الأساسية للخلايا الكهروضوئية

إن التأثير الكهروضوئي، الذي تقوم عليه عملية تشغيل الخلايا الكهروضوئية، موثق جيداً في النصوص الأساسية. يقدم جرين (2001) نظرة عامة شاملة على الفيزياء الكامنة وراء الخلايا الكهروضوئية، مع التركيز على دور أشباه الموصلات مثل السيليكون في تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء من خلال توليد أزواج الإلكترونات والثقوب عند الوصلة p-n. يوضح نيلسون (2003) بالتفصيل نموذج الصمام الثنائي المفرد، الذي يصف سلوك التيار-الجهد للخلايا الكهروضوئية باستخدام معاملات مثل التيار المولد بالضوء (I_{ph})، تيار التشبع العكسي (I_0)، ومقاومات السلسلة والتوازي. تضع هذه الأعمال الإطار النظري لفهم تشغيل الخلايا الكهروضوئية، بما في ذلك مقاييس الأداء الرئيسية مثل جهد الدائرة المفتوحة (V_{oc})، تيار الدارة القصيرة (I_{sc})، عامل الملء (FF)، والكفاءة (η). يوسع فورفل (2009) هذا التحليل من خلال استكشاف مفاهيم متقدمة، مثل تأثير طاقة فجوة النطاق على الاستجابة الطيفية والحدود الديناميكية الحرارية للكفاءة، ولا سيما حد شوكلي-كويزر، الذي يحدد كفاءة الخلايا أحادية الوصلة بحوالي 33% (شوكلي

- امتصاص الفوتونات: يخترق ضوء الشمس الساقط شبه الموصل، وتقوم الفوتونات ذات الطاقة الكافية بإثارة الإلكترونات، مما يؤدي إلى إنشاء أزواج من الإلكترونات والثقوب.
- فصل الشحنات: يقوم المجال الكهربائي عند وصلة p-n بمسح الإلكترونات باتجاه المنطقة من النوع n والثقوب باتجاه المنطقة من النوع p.
- تجمع التيار: يتم تجميع الإلكترونات والثقوب عند الأقطاب الكهربائية الخاصة بها، مما يولد تيارًا خارجيًا عند توصيلها بحمل كهربائي.

Solar Electricity Production

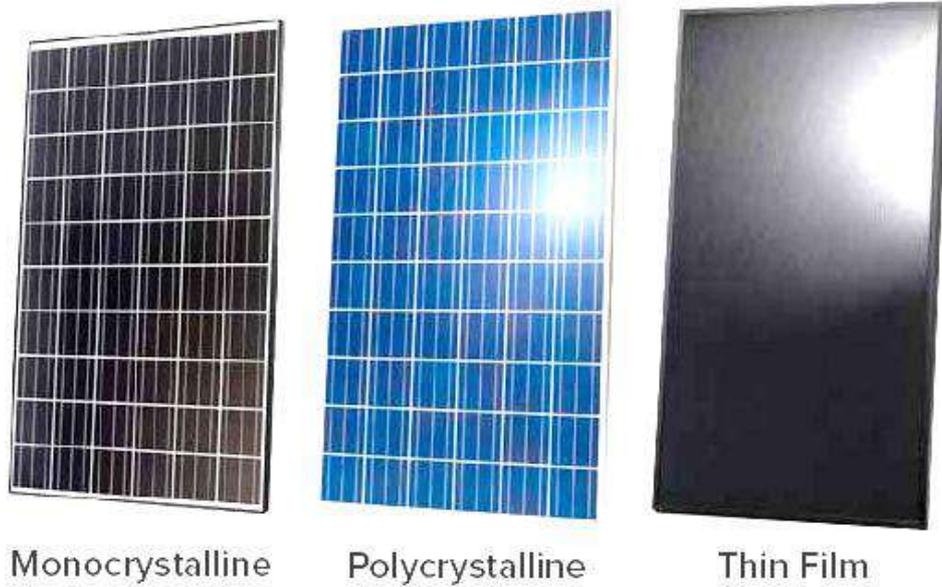


شكل (2): دائرة انتاج الطاقة الكهربائية بالطاقة الشمسية.

4. أنواع الخلايا الكهروضوئية

4.1 الخلايا الكهروضوئية القائمة على السيليكون

تهيمن الخلايا القائمة على السيليكون على سوق الخلايا الكهروضوئية نظرًا لنضجها وموثوقيتها وكفاءتها كما موضحة في شكل 3 (Abdussalam Ali Ahmed and HudaEIslam Mohamed 2025).



شكل (3): أنواع الألواح الشمسية.

جدول (1): أنواع الخلايا الكهروضوئية

أنواع الخلايا الكهروضوئية	التكلفة	الكفاءة	الميزات
السيليكون أحادي البلورة	تكاليف إنتاج أعلى.	كفاءة عالية (15-22%)	بنية أحادية البلورة
السيليكون متعدد البلورة	أقل تكلفة	كفاءة أقل قليلاً (13-18%)	بنية متعددة البلورات
السيليكون غير المتبلور	مرونة وتكلفة أقل	كفاءة أقل (6-8%)	غير متبلور، يُستخدم في تطبيقات الأغشية الرقيقة

4.2 الخلايا الكهروضوئية ذات الأغشية الرقيقة

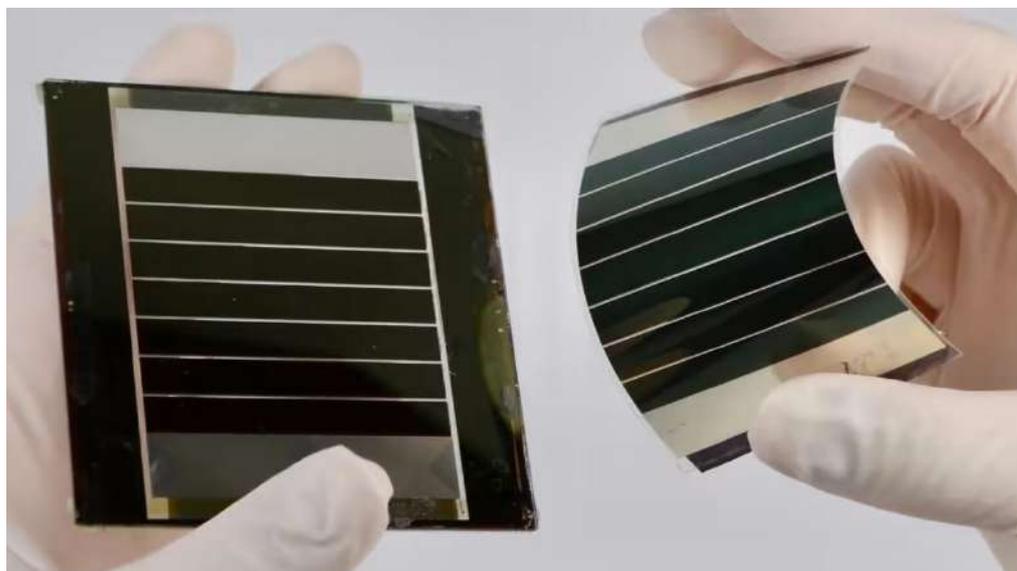
تستخدم الخلايا ذات الأغشية الرقيقة مواد قليلة، مما يقلل التكاليف وبيتح تطبيقات مرنة.

جدول (2): أنواع الخلايا ذات الأغشية الرقيقة.

مواد الخلايا	الميزات	الكفاءة	التكلفة
تيلوريد الكاديوم (CdTe)	يثير مخاوف بيئية بسبب سمية الكاديوم.	يوفر كفاءة جيدة (9-16%)	إنتاج منخفض التكلفة
سيلينيد النحاس الإنديوم الغاليوم (CIGS)	مناسب لتطبيقات متنوعة.	كفاءة عالية (10-20%)	مرونة
الخلايا الكهروضوئية العضوية (OPVs)	خفيفة الوزن ولكن تعاني من مشاكل في الاستقرار.	كفاءة أقل (5-12%)	مرنة

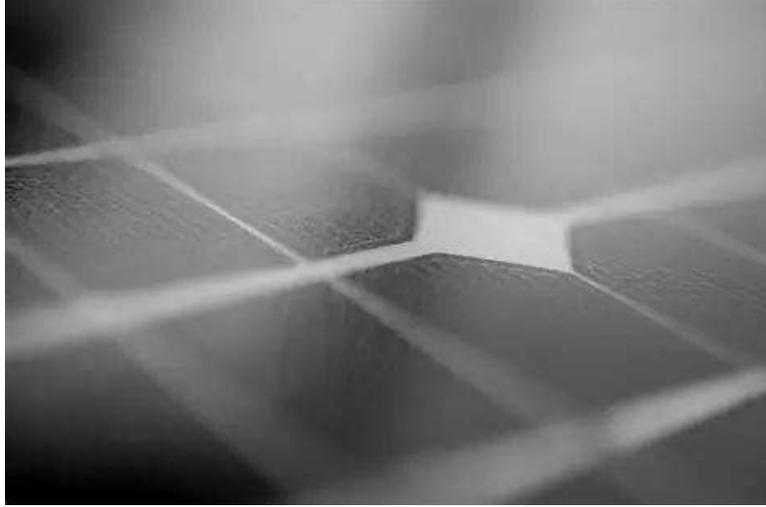
4.3 التقنيات الناشئة

- خلايا البيروفسكايت الشمسية: تتقدم بسرعة بسبب كفاءتها العالية (تصل إلى 25%) وتصنيعها منخفض التكلفة، على الرغم من أن الاستقرار لا يزال يمثل تحدياً.



شكل (4): خلايا البيروفسكايت الشمسية.

- الخلايا الشمسية بالنقاط الكمومية: تستخدم جسيمات شبه موصلة نانوية الحجم للحصول على فجوات نطاق قابلة للضبط، مما يعد بكفاءة عالية، ولكنها لا تزال في مراحل التطوير المبكرة.



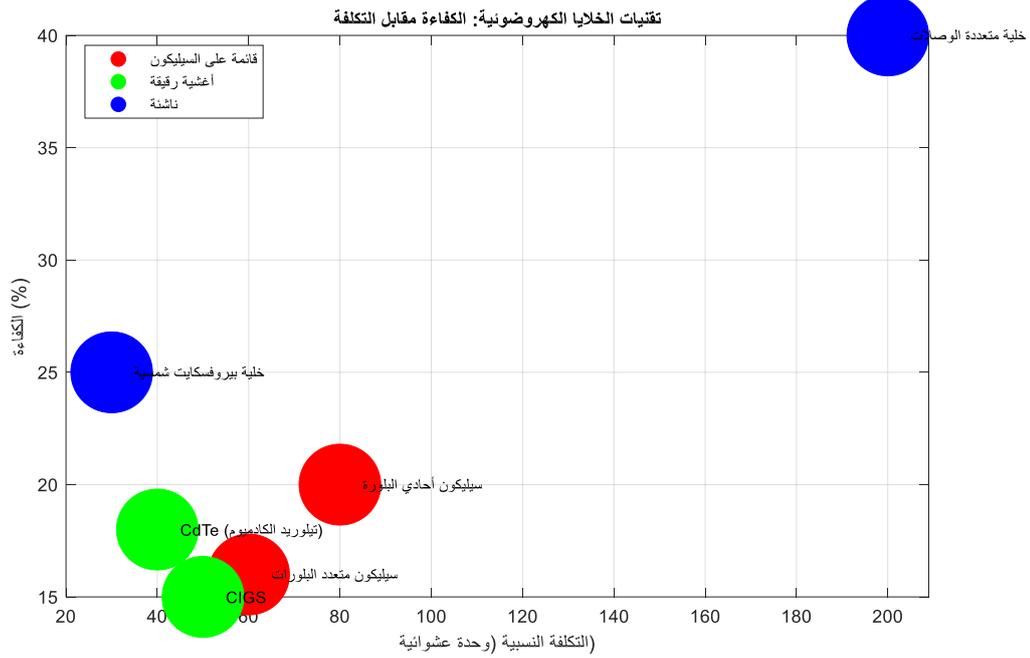
شكل (5): الخلايا الشمسية بالنقاط الكمومية.

- **الخلايا متعددة الوصلات:** تكس طبقات متعددة من أشباه الموصلات لالتقاط طيف أوسع، محققة كفاءات تزيد عن 40% في أنظمة الخلايا الكهروضوئية المركزة.

يوضح الرسم البياني المرفق العلاقة بين **الكفاءة** (المحور الرأسي) و**التكلفة النسبية** (المحور الأفقي) لمختلف تقنيات الخلايا الكهروضوئية (الألواح الشمسية)، والمصنفة إلى ثلاث مجموعات رئيسية. بشكل عام، يظهر المخطط وجود مقايضة؛ حيث ترتبط الكفاءة العالية عادةً بتكاليف تصنيع مرتفعة بشكل ملحوظ، على الرغم من أن التقنيات الناشئة بدأت في كسر هذا النمط.

تحليل تقنيات الطاقة الشمسية

- **التقنيات القائمة على السيليكون (الدوائر الحمراء):** تمثل هذه المجموعة المعيار الصناعي الحالي. يقع السيليكون أحادي البلورة عند كفاءة تقارب 20% وبتكلفة متوسطة تبلغ حوالي 80 وحدة. في المقابل، يعتبر السيليكون متعدد البلورات أقل تكلفة (حوالي 60 وحدة) ولكنه يوفر كفاءة أقل تبلغ حوالي 16%.
- **تقنيات الأغشية الرقيقة (الدوائر الخضراء):** هذه المواد، بما في ذلك **تيلوريد الكاديوم (CdTe)** و**CIGS**، تقع في الطرف الأدنى من نطاق التكلفة (بين 40 و50 وحدة). ومع ذلك، فهي تقع أيضاً في أسفل مقياس الكفاءة، حيث تتراوح بين 15% و18%، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات التي لا تشكل فيها المساحة عائفاً كبيراً بقدر الميزانية.
- **التقنيات الناشئة والمتقدمة (الدوائر الزرقاء):** تظهر هذه الفئة أكبر تباين. تعتبر خلايا البيروفسكايت الشمسية واعدة للغاية، حيث توفر كفاءة عالية تصل إلى 25% بتكلفة نسبية منخفضة جداً تبلغ حوالي 30 وحدة. وعلى الطرف الآخر تماماً، نجد **الخلية متعددة الوصلات** التي تحقق كفاءة هائلة تصل إلى 40%، ولكن بتكلفة باهظة تتجاوز 200 وحدة، مما يحصر استخدامها عادةً في مجالات متخصصة مثل علوم الفضاء.



شكل (6): تقنيات الخلايا الكهروضوئية: الكفاءة مقابل التكلفة.

جدول (3): تحليل تقنيات الطاقة الشمسية.

الكفاءة (تقريباً)	التكلفة النسبية (تقريباً)	فئة التقنية
%18 – %15	50 – 40	الأغشية الرقيقة (CIGS/CdTe)
%20 – %16	80 – 60	السيليكون (متعدد/أحادي)
%25	30	البيروفسكايت
%40	200+	متعددة الوصلات

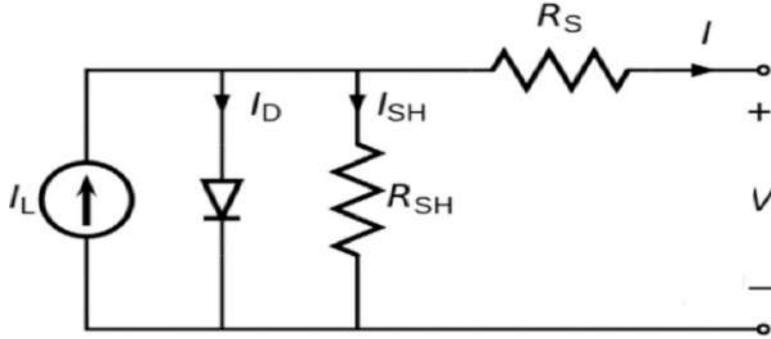
5. الدائرة الكهربائية المكافئة للخلية الشمسية

قبل التوسع في تطبيقات الخلايا الشمسية وآليات تجميعها ضمن الألواح الكهروضوئية، يُعد من الضروري تأسيس فهم علمي دقيق لآلية توليد الجهد والتيار داخل الخلية. إن تحليل هذه الظاهرة لا يقتصر على التفسير الفيزيائي لانتقال الشحنات داخل شبه الموصل، بل يركز بصورة جوهرية على تمثيل الخلية بنموذج كهربائي مكافئ يعكس سلوكها الحقيقي تحت مختلف ظروف التشغيل (Abdulhadi et al. 2025). وتمثل الدائرة الكهربائية المكافئة نقطة الانطلاق لفهم الأداء الكهربائي للخلية الشمسية، إذ تُستخدم النماذج المكافئة في الهندسة الكهربائية لتبسيط الأنظمة المعقدة دون الإخلال بخصائصها الأساسية، مما يتيح دراسة سلوك العناصر الداخلية، وتسهيل التحليل الرياضي، وإجراء الحسابات بدقة أعلى، وصولاً إلى تصور متكامل لأداء النظام واستخلاص خصائصه التشغيلية.

ونظرًا لاعتماد الخلية الشمسية في بنيتها الفيزيائية على وصلة شبه موصلة من نوع (PN Junction) ، فإن تحليلها الكهربائي يستند إلى خصائص هذه الوصلة وسلوكها غير الخطي. ومن أبرز نتائج استخدام النموذج المكافئ إمكانية اشتقاق منحنيات الأداء الأساسية، وعلى رأسها منحنى التيار-الجهد (I-V) ومنحنى القدرة-الجهد (P-V) ، سواء للخلية المفردة أو للوح الشمسي ككل. وتمثل هذه المنحنيات دوال مستمرة تعكس تأثير مجموعة من العوامل، تشمل خصائص المواد المصنعة، والبنية الداخلية للخلية،

وظروف التشغيل مثل شدة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة، مما يجعلها أدوات تحليلية محورية في تقييم الكفاءة والأداء العملي للأنظمة الكهروضوئية.

ويعتمد بناء النموذج الكهربائي المكافئ للخلية الشمسية على افتراض هندسي أساسي مفاده أن الخلية المثالية يمكن تمثيلها كمصدر تيار ضوئي موصول على التوازي مع صمام ثنائي، مع إضافة عنصرين مقاومين لتمثيل الفواقد واللاخطيات العملية التي تظهر في الخلية الحقيقية، بحيث يعكس النموذج السلوك الكهربائي الواقعي بدقة مناسبة للتحليل والدراسة.



شكل (7): الدائرة المكافئة للخلية الشمسية

تُوصَّل المقاومة التسلسلية على التوالي مع عناصر الدائرة، وتمثل مجموع الفواقد الداخلية الناتجة عن مقاومة المادة شبه الموصلة، ومقاومة الموصلات المعدنية، ونقاط اللحام والتلامس الكهربائي. ويؤدي ازدياد هذه المقاومة إلى حدوث هبوط في الجهد داخل الخلية، مما ينعكس سلباً على القدرة المستخرجة وكفاءة نقل الطاقة إلى الحمل الخارجي. أما مقاومة التفرع فتُوصَّل على التوازي، وتمثل مسارات التسرب الداخلية الناتجة عن العيوب التصنيعية أو عدم تجانس البنية البلورية للمادة. ويسمح وجود هذه المقاومة بمرور جزء من التيار عبر مسارات غير مرغوبة داخل الخلية بدلاً من مروره إلى الدائرة الخارجية، الأمر الذي يؤدي إلى انخفاض التيار المفيد وتقليل الأداء الكلي.

إن توصيف عمل الخلية الشمسية وفق هذا النموذج يستلزم صياغة معادلات الخصائص (Characteristic Equations) التي تربط بين التيارات والجهود في عناصر الدائرة. ووفقاً لهذا التمثيل، فإن التيار الخارج من الخلية يساوي التيار المتولد من المصدر الضوئي مطروحاً منه التيار المار عبر الصمام الثنائي، وكذلك التيار المتسرب عبر مقاومة التفرع. كما هو موضح في هذا الإطار الرياضي الذي أساساً لتحليل الاستجابة الكهربائية للخلية تحت ظروف تشغيل مختلفة، كما يُستخدم في تصميم ومحاكاة الأنظمة.

$$(1) \quad I = I_L - I_D - I_{SH}$$

حيث

I = تيار الخرج (الأمبير)

I_L = شدة التيار المولد (الأمبير)

I_D = تيار الثنائي (الأمبير)

I_{SH} = تيار القطع (الأمبير)

تيار الخرج من خلال العناصر المتحكم بها هلال الجهد المار:

$$(2) \quad V_j = V + I R_s$$

$V_j = V$ = الجهد عبر كل من الدايمود ومقاومة التوازي $\{R_{sh}\}$ (فولت)

$V = V$ = الجهد عبر أطراف الخرج

$I = I$ = تيار الخرج

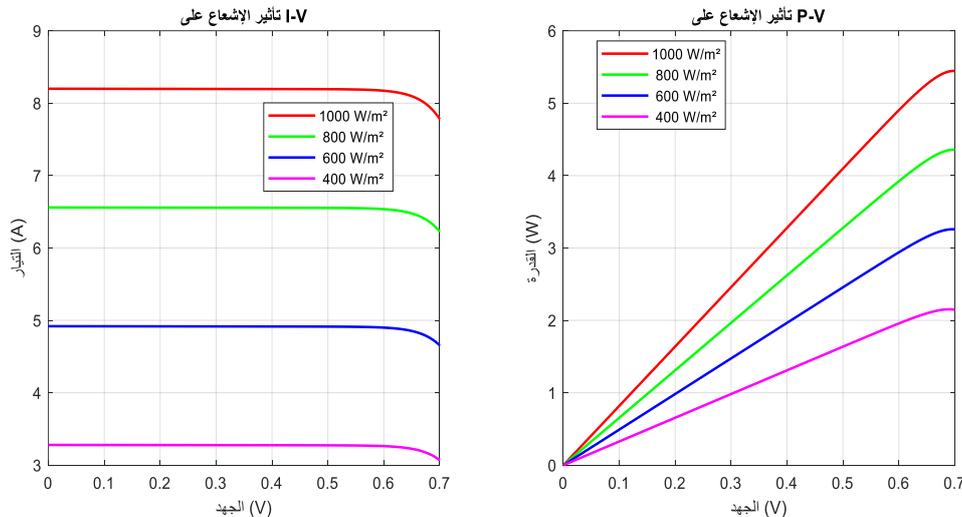
$R_s = R_s$ = مقاومة التوالي

6. تغير منحني (التيار- الفولتية IV) و (القدرة- الفولتية PV) مع شدة الاشعاع الشمسي

يتم تحديد الخصائص الأدائية الأساسية لأي خلية شمسية عند ما يُعرف بالظروف القياسية للاختبار (STC)، والتي تتمثل في شدة إشعاع شمسي مقدارها 1000 وات لكل متر مربع. وتمثل هذه الظروف مرجعاً معيارياً لقياس ومقارنة أداء الخلايا الشمسية. غير أنه من الضروري كذلك دراسة كيفية تغير إنتاجية الخلية، وكذلك اللوح الشمسي المكوّن منها، عند تغير قيم الإشعاع الشمسي الساقط على سطحها، نظراً لأن شدة الإشعاع تعد العامل الرئيس المؤثر في القدرة المنتجة.

ولتوضيح طبيعة هذه التغيرات، يمكن الاستناد إلى مثال منشور لأداء إحدى الخلايا الشمسية، حيث تبلغ قيمة فولتية الدائرة المفتوحة 0.5957 فولت، بينما تبلغ قيمة تيار القصر نحو 4.68 أمبير.

يبين الشكل المشار إليه (I-V Curve) منحنيات التيار-الفولتية (I-V Curve) ومنحنيات القدرة-الفولتية (P-V Curve) مع تغير شدة الإشعاع الشمسي الساقط على الخلية. ومن خلال هذه المنحنيات يمكن ملاحظة التأثير الكبير لتغير الإشعاع الشمسي على إنتاجية الخلية، وهو أمر منطقي نظراً لأن الإشعاع الشمسي يمثل مصدر الطاقة الأساسي الذي تعتمد عليه الخلية في توليد القدرة الكهربائية. ومن الملاحظات الأساسية التي يمكن استخلاصها من الشكل أن قيمة فولتية الدائرة المفتوحة تتناقص بوضوح مع انخفاض شدة الإشعاع الشمسي، ويظهر ذلك من خلال انزياح منحني الجهد نحو قيم أقل. كذلك تنخفض قيمة تيار القصر بصورة ملحوظة عند انخفاض شدة الإشعاع، ويتجلى ذلك في هبوط منحني التيار نحو الأسفل. وبطبيعة الحال، فإن انخفاض كل من التيار والفولتية يؤدي إلى انخفاض القدرة الكهربائية المنتجة من الخلية، مما يعني أن القدرة الكلية تتناقص مع تناقص شدة الإشعاع الشمسي الساقط عليها. لهذا السبب، تحرص الشركات المصنعة للخلايا والألواح الشمسية على تضمين نشرات البيانات الفنية Data Sheet الخاصة بكل منتج (منحنيات التيار-الفولتية والقدرة-الفولتية) وذلك لتمكين المستخدم أو المصمم من توقع تغير الإنتاجية تبعاً لتغير شدة الإشعاع الشمسي أثناء التشغيل الفعلي.

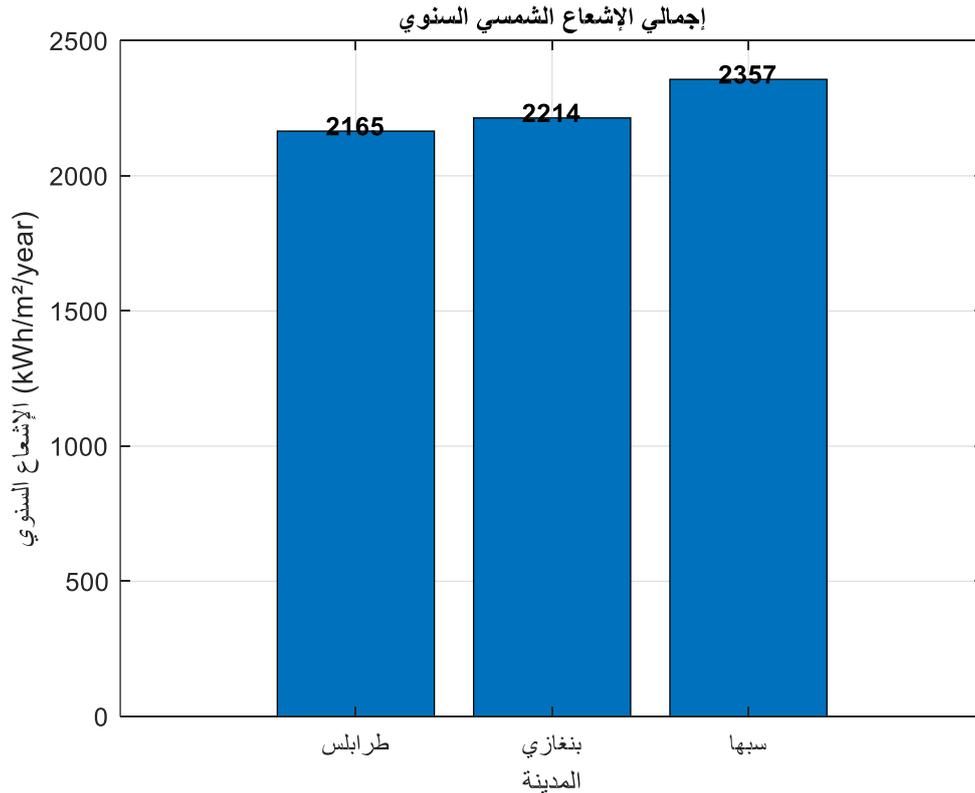


شكل (8): يبين تغير منحني الفولتية- التيار (I-V Curve) ومنحني القدرة- الفولتية (P-V Curve) لخلية شمسية مع تغير شدة الاشعاع الشمسي.

يعرض المخطط البياني بالأعمدة إجمالي الإشعاع الشمسي السنوي في ثلاث مدن ليبية رئيسية هي: طرابلس، وبنغازي، وسبها. وتُبرز البيانات، المقاسة بوحدة كيلوواط ساعة/متر مربع/سنة (kWh/m²/year)، اتجاهها جغرافياً واضحاً للإمكانات الشمسية في البلاد. تحليل البيانات:

- التباين الإقليمي: هناك زيادة تدريجية في معدلات الإشعاع الشمسي كلما اتجهنا من الشمال الساحلي نحو المناطق الصحراوية الجنوبية.

- طرابلس وبنغازي: تظهر المدن الساحلية الشمالية إمكانيات عالية، حيث تسجل طرابلس 2165 كيلوواط ساعة/متر مربع/سنة، بينما تسجل بنغازي معدلاً أعلى قليلاً يصل إلى 2214 كيلوواط ساعة/متر مربع/سنة.
 - أقصى إمكانية (سبها): تسجل مدينة سبها، الواقعة في الجنوب الصحراوي، أعلى معدل إشعاع شمسي سنوي بقيمة 2357 كيلوواط ساعة/متر مربع/سنة. ويمثل هذا زيادة ملحوظة مقارنة بالمناطق الساحلية، ويعود ذلك بشكل أساسي إلى المناخ الجاف وقلة الأيام الغائمة.
- يوضح الرسم البياني رقم 7 أن ليبيا تمتلك إمكانات هائلة من الطاقة الشمسية في جميع أنحاء البلاد. ومع ذلك، توفر المناطق الجنوبية مثل سبها الظروف الأكثر مثالية لمحطات الطاقة الشمسية واسعة النطاق نظراً لارتفاع كثافة الإشعاع.



شكل (9): إجمالي الإشعاع الشمسي السنوي.

تمتلك ليبيا إمكانات استثنائية تجعلها واحدة من أكثر الدول تأهلاً لقيادة قطاع الطاقة المتجددة في شمال إفريقيا. بفضل موقعها الجغرافي ضمن ما يُعرف بـ "حزام الشمس"، وتوفر مساحات شاسعة، انتقلت ليبيا من مرحلة التخطيط إلى مرحلة التنفيذ الفعلي لمشاريع كبرى تهدف لتنويع مصادر الدخل وتقليل الاعتماد على النفط. وبناء للاستراتيجية الليبية للطاقات المتجددة في ليبيا لعام 2026:

1. الأهداف الاستراتيجية (خطة 2023 - 2035)

- تتبنى الهيئة العامة للطاقة المتجددة في ليبيا (REAOL) استراتيجية طموحة تهدف إلى:
 - رفع حصة الطاقة المتجددة في مزيج الطاقة الوطني لتصل إلى 17% بحلول عام 2025، وما بين 22% إلى 25% بحلول عام 2030.
 - الوصول إلى قدرة إنتاجية إجمالية تبلغ 4000 ميجاوات بحلول عام 2035

2. أبرز المشاريع الحالية (2026 - 2025)

شهد عام 2025 وبداية 2026 خطوات عملية ملموسة، أهمها:

- **محطة سدادة للطاقة الشمسية (500 ميغاوات):** بالتعاون مع شركة "توتال إنيرجي" الفرنسية، وهي أكبر مشروع للطاقة الشمسية في البلاد، ومن المتوقع أن تبدأ عملياتها التجارية خلال عام 2026.

- **مشروع الكفرة للطاقة الشمسية:** تم تسليم محطة بسعة **1.14 ميغاوات** لتزويد المنطقة الحرة بالكهرباء النظيفة.

- **مبادرة "Go Green":** برنامج وطني لتشجيع تركيب سخانات الشمسية والألواح فوق أسطح المنازل والمباني العامة (المستشفيات والجامعات)، بهدف تخفيف الضغط على الشبكة العامة.

3. الإمكانيات الطبيعية المتاحة

تتمتع ليبيا بمزايا تجعلها "علاقاً نائماً" في هذا المجال:

- **الطاقة الشمسية:** متوسط إشعاع يومي يصل إلى **7.5 كيلوواط ساعة/متر مربع** في الجنوب، وأكثر من **3000 ساعة** مشمسة سنوياً.
- **طاقة الرياح:** تمتلك بعض المناطق الساحلية والجزلية (مثل درنة) سرعات رياح ممتازة تجعل مزارع الرياح مجدية اقتصادياً بشكل كبير.

4. التحديات والفرص

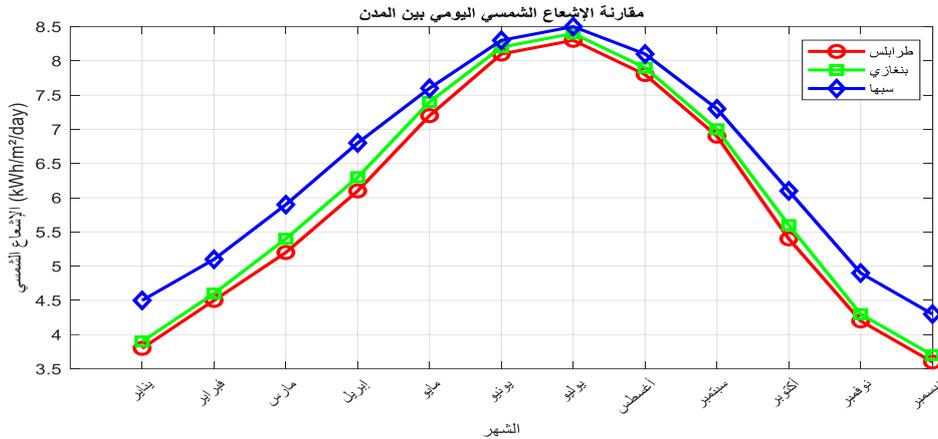
على الرغم من الإمكانيات، تواجه الدولة تحديات مثل:

- **الحاجة لتحديث التشريعات:** يتم العمل حالياً على مراجعة قوانين الطاقة لتسهيل الاستثمار الأجنبي والشراكة بين القطاعين العام والخاص.
- **الاستقرار الأمني والسياسي:** وهو العامل الحاسم لضمان استمرارية المشاريع الكبرى وجذب التمويل الدولي.



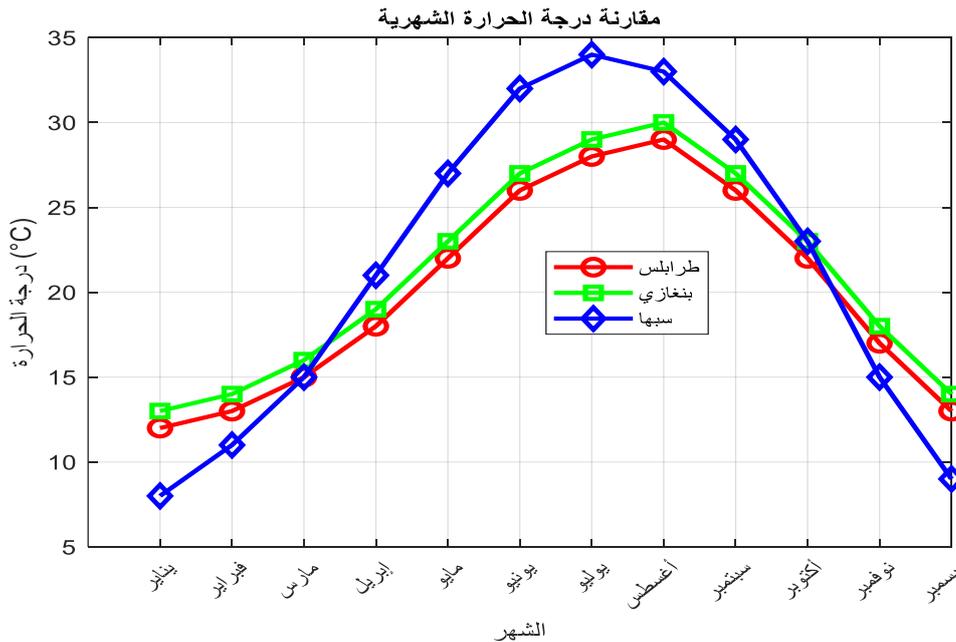
يوضح الشكل المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي اليومي ($\$/kWh/m^2/day$) لثلاث مدن ليبية رئيسية هي طرابلس وبنغازي وسبها، حيث يكشف عن نمط موسمي ثابت يتميز بذروة ملحوظة خلال أشهر الصيف. وتصل المدن الثلاث إلى أقصى إمكاناتها الشمسية في شهري يونيو ويوليو، مع ارتفاع قيم الإشعاع لتتراوح ما بين 8.1 و $8.5 kWh/m^2/day$ ، بينما يتم تسجيل أدنى المستويات في شهري ديسمبر ويناير، وتتراوح ما بين 3.6 و $4.5 kWh/m^2/day$. ومن الملاحظ أن مدينة سبها (المتتمثلة بالمنحنى الأزرق) تفوق باستمرار المدن الساحلية (طرابلس وبنغازي) على مدار العام. ويبرز هذا التفاوت إمكانات طاقة شمسية هائلة في المناطق الجنوبية بليبيا، حيث يوفر انخفاض الغطاء السحابي وكثافة الإشعاع العالية بيئة مثالية لدمج الأنظمة الكهروضوئية على نطاق واسع. ومن منظور ترابط (WEFE)، توفر مستويات

الإشعاع العالية هذه، خاصة في الجنوب، فرصة استراتيجية لتحويل عمليات ضخ المياه كثيفة استهلاك الطاقة في "النهر الصناعي العظيم" نحو المصادر المتجددة، مما يعزز أمن الطاقة والمياه في آن واحد.



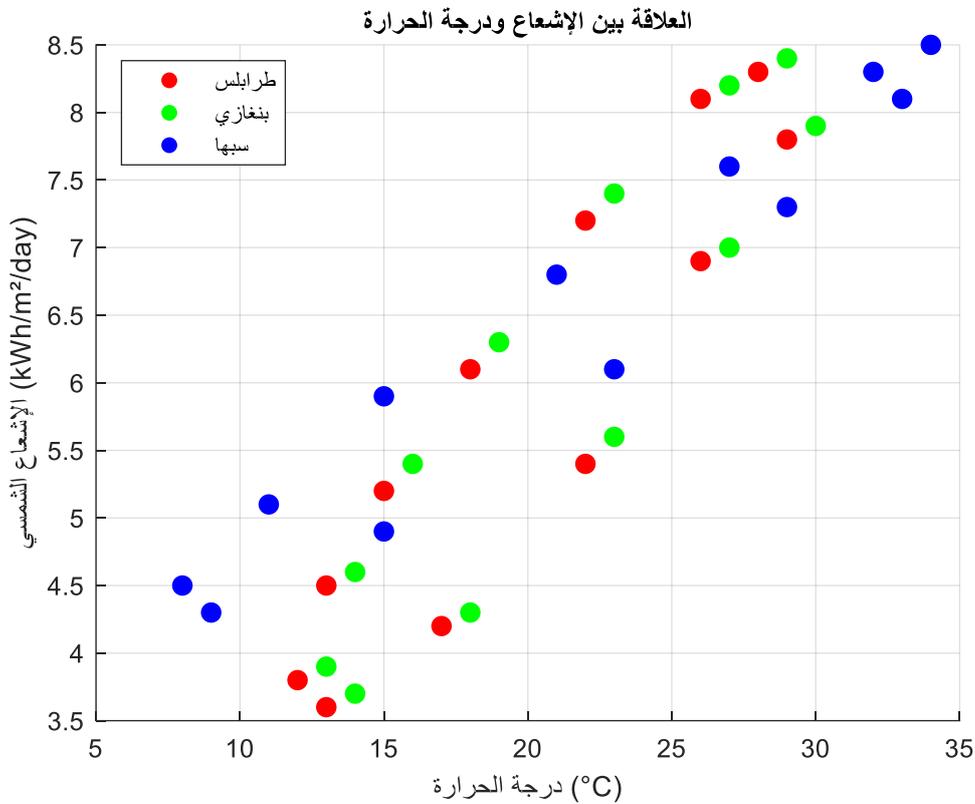
شكل (10): مقارنة الإشعاع الشمسي للمدن الليبية الثلاثة.

يوضح الرسم البياني المرفق مقارنة لمتوسط درجات الحرارة الشهرية (درجة مئوية) لمدينة طرابلس وبنغازي وسبها الليبية على مدار العام. تكشف البيانات عن تباين مناخي واضح بين المناطق الساحلية والمناطق الداخلية الصحراوية؛ حيث تظهر مدينة سبها (المنحنى الأزرق) مدى حرارياً واسعاً يميز المناخ القاري الجاف، إذ تسجل أدنى درجات حرارة شتوية (حوالي 8 درجات مئوية في يناير) قبل أن تشهد ارتفاعاً حاداً لتصل إلى أعلى القمم الصيفية عند ما يقارب 34 درجة مئوية في يوليو. وعلى العكس من ذلك، تظهر المدن الساحلية في طرابلس (باللون الأحمر) وبنغازي (باللون الأخضر) تقلبات أكثر اعتدالاً بفضل التأثير البحري، حيث تظل ذروة درجات الحرارة الصيفية دون 30 درجة مئوية. وفي سياق ترابط (WEFE)، تعد هذه الملامح الحرارية بالغة الأهمية لارتباطها المباشر بزيادة الطلب على الطاقة لأغراض التبريد وارتفاع معدلات التبخر في خزانات المياه خلال أشهر الصيف. وتكمل هذه البيانات الحرارية تحليل الإشعاع الشمسي، مما يشير إلى أنه في حين تمتلك المنطقة الجنوبية (سبها) أعلى إمكانات للطاقة، فإنها تواجه أيضاً أقصى الضغوط البيئية، مما يستلزم حوكمة متكاملة وقوية لإدارة الارتفاعات الناتجة في استهلاك المياه والطاقة.



شكل (11): مقارنة درجة الحرارة الشهرية.

يوضح الرسم البياني المبعثر (Scatter Plot) في شكل 10 العلاقة الطردية بين درجة الحرارة المحيطة (درجة مئوية) والإشعاع الشمسي اليومي $kWh/m^2/day$ عبر المدن الليبية الثلاث المدروسة. ويكشف توزيع البيانات أنه مع ارتفاع درجات الحرارة، تزداد مستويات الإشعاع الشمسي بشكل متناسب، متبعةً اتجاهًا خطياً صاعداً. وتظهر مدينة سبها (المتمثلة بالنقاط الزرقاء) النطاق المناخي الأكثر اتساعاً، حيث تشغل أطراف الرسم البياني؛ فهي تسجل أعلى مستويات الإشعاع (التي تتجاوز $8.5 kWh/m^2/day$ عند درجات حرارة تقترب من 34 درجة مئوية (وأقل درجات حرارة شتوية عند مستويات إشعاع منخفضة. في المقابل، تظهر نقاط بيانات طرابلس (باللون الأحمر) وبنغازي (باللون الأخضر) تكتلاً أكثر في النطاق المتوسط، مما يعكس ظروفاً مناخية ساحلية أكثر استقراراً. ومن منظور تقني وضمن إطار ترابط (WEFE)، تسلط هذه العلاقة الضوء على تحدٍ هندسي بالغ الأهمية: فبينما يوفر الإشعاع الشمسي العالي في الجنوب إمكانات طاقة هائلة، يمكن أن تؤدي درجات الحرارة المرتفعة المتزامنة معه إلى تدهور حراري للألواح الكهروضوئية، مما يقلل من كفاءة التحويل. وبناءً على ذلك، يجب أن تأخذ الحوكمة المتكاملة هذه المقايضات البيئية في الاعتبار عند التخطيط لبنية تحتية مستدامة للطاقة لدعم نظم المياه والغذاء.



شكل (12): العلاقة بين الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة.

7. الكفاءة التحويلية للخلايا الشمسية: التعريف والأسس النظرية والعوامل المؤثرة

تُعد كفاءة الخلايا الشمسية بالتالي كفاءة الألواح الشمسية المكوّنة منها من أكثر المعايير استخداماً في تقييم القدرة الإنتاجية للأنظمة الكهروضوئية. وتُعرّف كفاءة الخلية الشمسية بأنها نسبة القدرة الكهربائية التي تنتجها الخلية إلى القدرة الإشعاعية الساقطة عليها من الشمس، وهي مؤشر مباشر على مدى فاعلية الخلية في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية قابلة للاستخدام كما هو موضح بالشكل ().

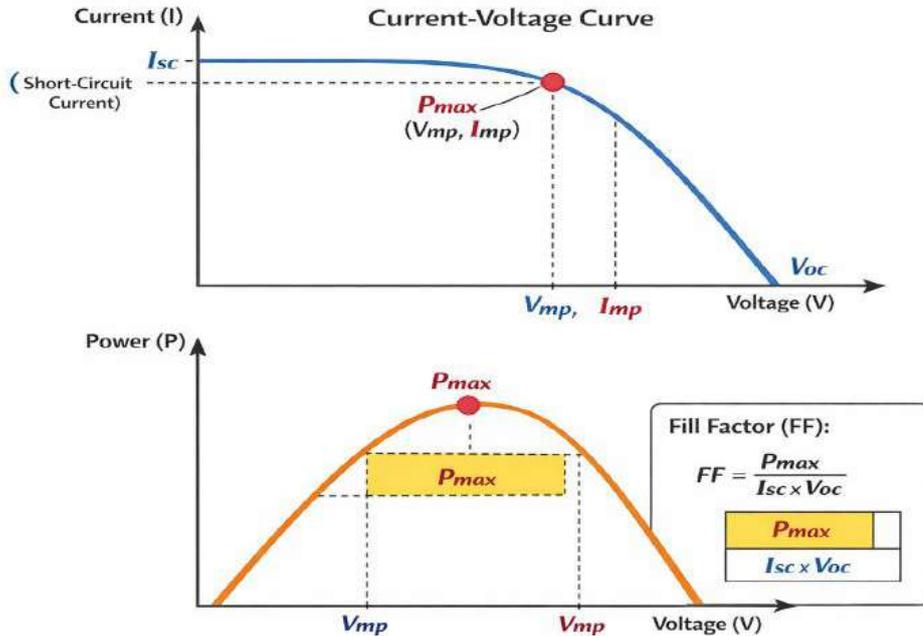
حيث يُعبّر عن معامل الامتلاء ($Fill Factor - FF$) وهو أحد أهم المؤشرات المرتبطة بأداء الخلية بالعلاقة التالية:

$$(3) \quad FF = P_{max}/p = I_{mp} \times V_{mp} / I_{sc} \times V_{oc}$$

حيث يمثل P_{max} القدرة العظمى للخلية، و I_{mp} و V_{mp} تيار وجهد نقطة القدرة العظمى، بينما I_{sc} هو تيار القصر و V_{oc} هو جهد الدائرة المفتوحة. كما يمكن التعبير عن كفاءة الخلية الشمسية بالعلاقة:

$$(4) \quad \mu = P_{m}/P_{in} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF / P_{in}$$

حيث تمثل P_m القدرة الكهربائية الناتجة من الخلية، و P_{in} القدرة الشمسية الساقطة عليها. تعتمد كفاءة الخلية الشمسية على عدة عوامل رئيسية، من أبرزها تقنية التصنيع، ونوعية المواد المستخدمة، وآلية بناء وترتيب الخلايا داخل اللوح الشمسي. ومن الملاحظ عملياً أن كفاءة اللوح الشمسي تكون عادة أقل من كفاءة الخلايا المفردة المكوّنة له. ويعود ذلك إلى أن المساحة الفعالة للخلايا لا تغطي كامل مساحة اللوح بسبب وجود فراغات بين الخلايا، إضافة إلى المساحات المخصصة للإطار الهيكلي. كما تسهم الضياعات الناتجة عن توصيل الخلايا داخلياً في خفض الكفاءة الإجمالية للوح مقارنة بالكفاءة النظرية للخلايا الفردية



شكل (13) يبين منحنيات التيار- الجهد والقدرة-الجهد للخلية الشمسية مع تحديد نقطة القدرة العظمى ومعامل الامتلاء.

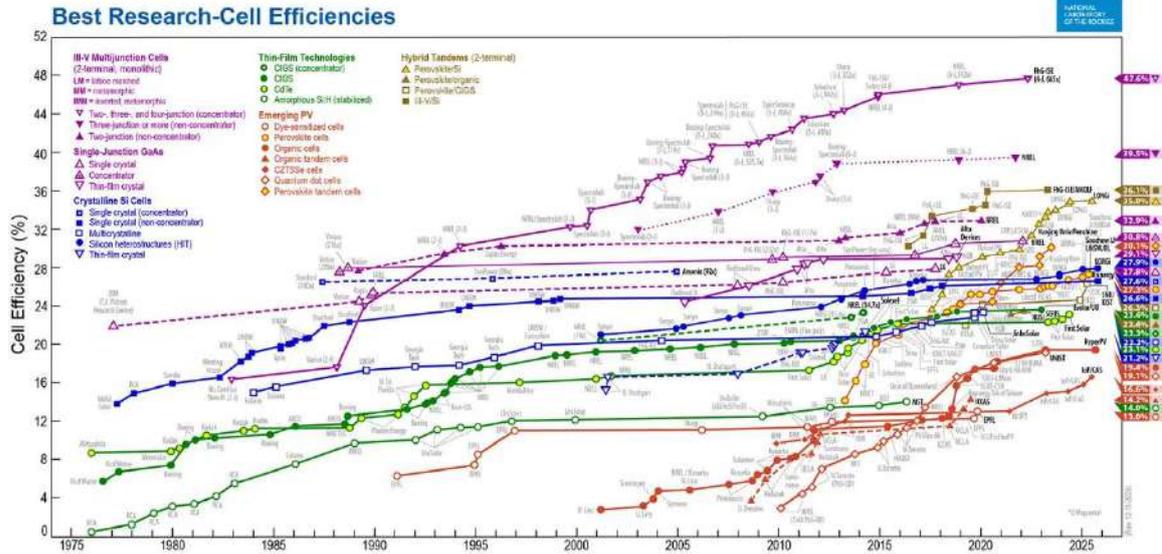
8. المرجعيات العالمية لتقييم كفاءة الخلايا الشمسية وتصنيفها التقني

تُعد نشرات الكفاءة الصادرة عن National Renewable Energy Laboratory من أهم المراجع العالمية الموثوقة لتتبع تطور كفاءة الخلايا الشمسية المنتجة عالمياً. فقد بدأ المختبر بنشر تقريره السنوي حول كفاءة مختلف تقنيات الخلايا الشمسية منذ عام 1976 في عرض موجز ومكثف يُقدّم عادة في صفحة واحدة، كما هو موضح في الشكل (8).

يعرض هذا الشكل تصنيفاً مقارناً لكفاءات الخلايا الشمسية وفقاً للتقنية المستخدمة في تصنيعها ونوعية المواد الداخلة في تكوينها. ويتم التمييز بين التقنيات المختلفة باستخدام ألوان وخطوط ورموز بصرية محددة لتسهيل القراءة والمقارنة. فعلى سبيل المثال، تُعرض تقنيات الخلايا المعتمدة على السيليكون البلوري باللون الأزرق، بينما تُميّز الخلايا متعددة الوصلات باللون البنفسجي، وتُعرض تقنيات الأغشية الرقيقة باللون الأخضر.

كما تتضمن التسميات المكتوبة داخل الشكل أسماء المختبرات والشركات المطوّرة لهذه الخلايا، في حين تُظهر القيم الرقمية المدرجة على الجانب الأيمن أحدث مستويات الكفاءة المسجّلة لكل تقنية حتى تاريخ نشر

هذا البحث. وبذلك يوفر الشكل مرجعاً بصرياً شاملاً لتتبع التقدم التقني في أداء الخلايا الشمسية ومقارنة نتائج الأبحاث والتطوير على المستوى العالمي.



شكل (14): مخطط كفاءة الخلايا لأفضل الأبحاث.

9. ربط وتوصيل الخلايا الشمسية

لا تكفي القدرة الكهربائية الناتجة عن الخلية الشمسية المفردة لتغذية معظم التطبيقات العملية، سواء في الأنظمة الصغيرة أو في أنظمة الطاقة الشمسية المتكاملة. ولذلك يتم تجميع عدد من الخلايا الشمسية معاً للحصول على الجهد والتيار ومن ثم القدرة الكهربائية المطلوبة. وتتم عملية الربط وفق ثلاث طرائق أساسية تُستخدم عند تكوين الألواح الشمسية (Modules)، وهي ذاتها الطرائق المعتمدة لاحقاً عند ربط الألواح معاً لتشكيل المصفوفات الشمسية (Arrays).

9.1 الربط على التوالي (Series Connection)

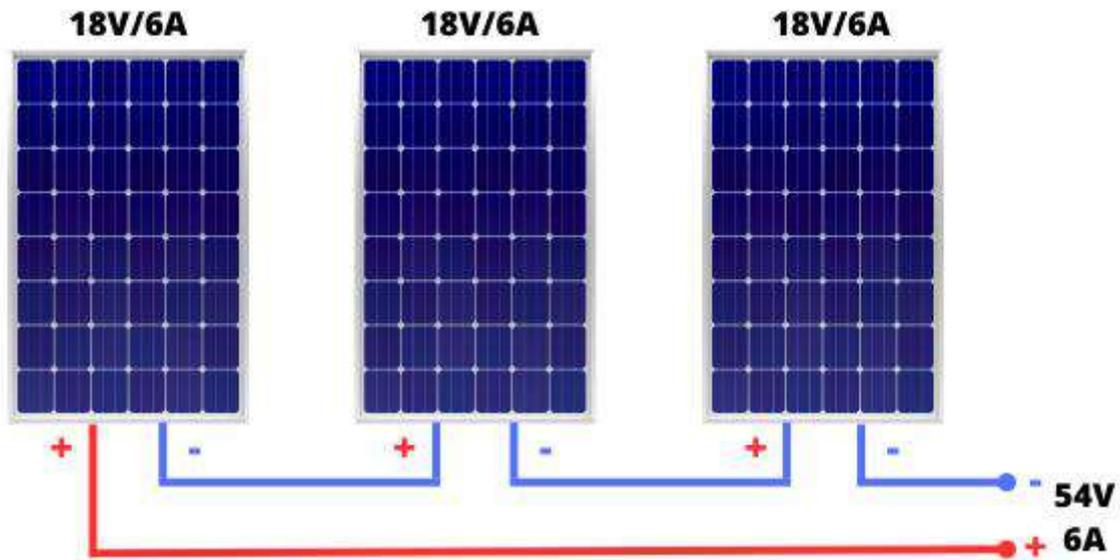
يُستخدم الربط على التوالي عندما تكون الحاجة إلى رفع قيمة الجهد الكهربائي للنظام، حيث يتم توصيل القطب الموجب للخلية الأولى مع القطب السالب للخلية التالية، وهكذا تباعاً ضمن صف الخلايا المكوّن للوح الشمسي. في هذه الحالة يمر نفس التيار عبر جميع الخلايا المتصلة، بينما تتجمع قيم الجهد. القاعدة الأساسية في هذا النوع من التوصيل يمكن تلخيصها كما يلي: الجهد الكلي (V_{total}) لمجموعة من الخلايا الموصولة على التوالي يساوي مجموع جهود الخلايا الفردية:

$$(5) \quad V_t = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$$

التيار الكلي (I_{total}) يبقى ثابتاً ويساوي تيار أي خلية ضمن السلسلة، بافتراض تماثل الخلايا:

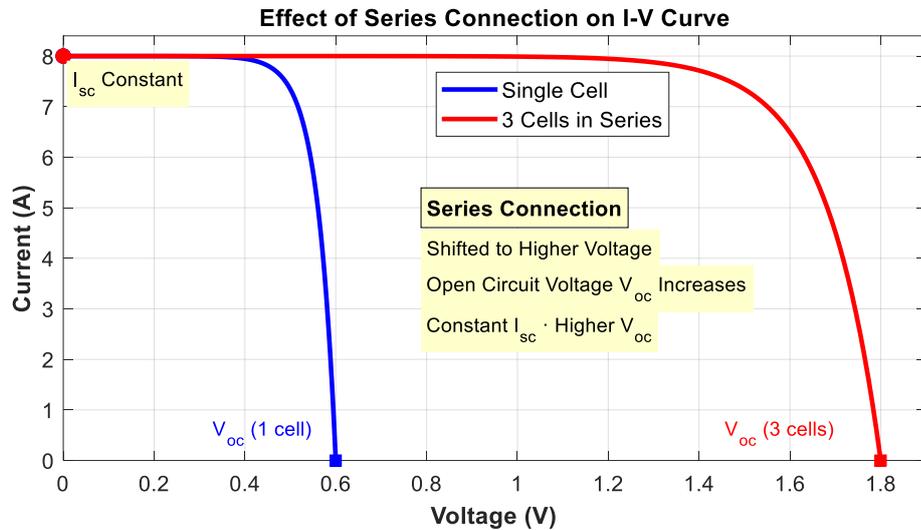
$$(6) \quad I_{total} = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n$$

وعليه، فإن القدرة الكلية الناتجة عن التوصيل على التوالي كما هو موضح بالشكل () تزداد نتيجة زيادة الجهد في حين يظل التيار محدوداً بقيمة تيار الخلية الواحدة. ومن الجدير بالذكر أن أي انخفاض في أداء إحدى الخلايا (بسبب الظليل أو العيوب) يؤثر مباشرة على تيار السلسلة بالكامل، مما يستدعي استخدام صمامات التجاوز (Bypass Diodes) في التطبيقات العملية لتحسين موثوقية الأداء.



شكل (15): الربط على التوالي.

من الناحية الكهربائية، يؤدي الربط على التوالي كما موضح بالشكل () إلى إزاحة منحنى التيار-الجهد ($I-V$ Curve) أفقيًا نحو قيم جهد أعلى، مع بقاء قيمة تيار القصر (Short Circuit Current) ثابتة تقريبًا، بينما تزداد قيمة جهد الدائرة المفتوحة (Open Circuit Voltage) بما يتناسب مع عدد الخلايا الموصولة على التوالي.



الشكل (16) يبين منحنى التيار-الفولت (Curve I-V) في حالة التوصيل على التوالي.

وبذلك يُعد الربط على التوالي الخيار الأمثل في الأنظمة التي تتطلب جهود تشغيل مرتفعة، مثل أنظمة الشحن ذات الفولتية العالية أو الأنظمة المرتبطة بالعاكسات (Inverters) التي تعمل عند مستويات جهد محددة.

9.2 الربط على التوازي (Parallel Connection)

يُستخدم الربط على التوازي عندما تكون الحاجة إلى زيادة قيمة التيار الكهربائي للنظام مع المحافظة على نفس مستوى الجهد. ويتم ذلك من خلال توصيل الأقطاب الموجبة للخلايا معًا، وكذلك الأقطاب السالبة معًا، بحيث تتشكل مسارات متعددة لتدفق التيار، بينما يبقى فرق الجهد ثابتًا عبر جميع الخلايا المتصلة.

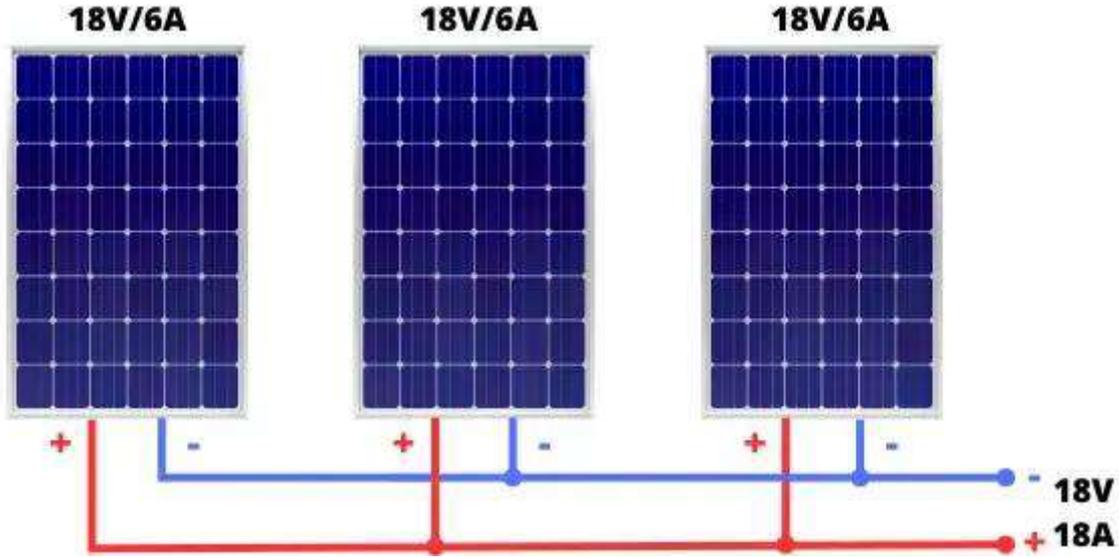
في هذا النوع من التوصيل، تكون القاعدة الأساسية كما يلي:
 الجهد الكلي (V_{total}) لمجموعة من الخلايا الموصولة على التوازي يساوي جهد خلية واحدة (بافتراض تماثل الخلايا):

(7)	$V_t = V_1 = V_2 = V_3 = \dots \dots V_n$
-----	---

التيار الكلي (I_{total}) يساوي مجموع تيارات الخلايا الفردية:

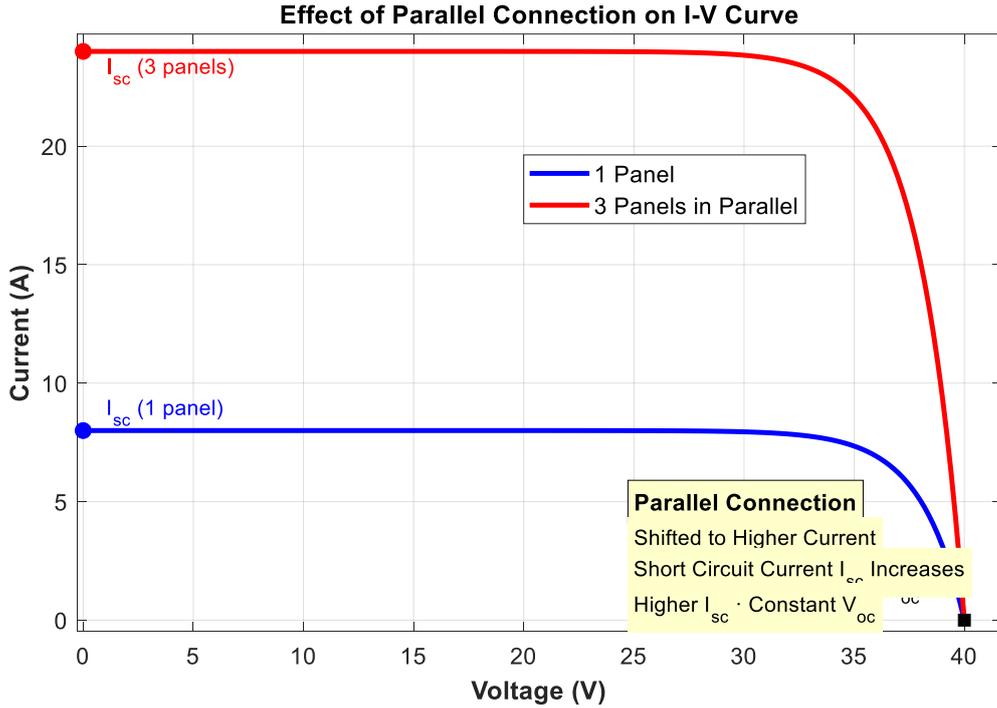
(8)	$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots \dots + I_n$
-----	---

وبالتالي، فإن القدرة الكلية للنظام تزداد نتيجة زيادة التيار، في حين يظل الجهد ثابتاً عند قيمة جهد الخلية الواحدة. ويُعد هذا النوع من التوصيل مناسباً للتطبيقات التي تتطلب تيارات عالية عند مستوى جهد محدد، مثل أنظمة شحن البطاريات ذات الجهد المنخفض.
 من الناحية العملية، يجب مراعاة تماثل خصائص الخلايا أو الألواح الموصولة على التوازي (من حيث الجهد الاسمي، تيار القصر، ونقطة القدرة العظمى)، إذ إن أي اختلاف بينها قد يؤدي إلى تدفق تيارات غير متوازنة مما يسبب فقداً في الكفاءة أو ارتفاعاً في درجة الحرارة.



شكل (17): الربط على التوازي.

أما من حيث الخصائص الكهربائية، فإن الربط على التوازي يؤدي إلى إزاحة منحنى التيار-الجهد ($I-V$ Curve) رأسياً نحو قيم تيار أعلى، بينما تبقى قيمة جهد الدائرة المفتوحة (Open Circuit Voltage) ثابتة تقريباً، وتزداد قيمة تيار القصر (Short Circuit Current) بما يتناسب مع عدد الخلايا أو الألواح الموصولة على التوازي.



شكل (18): يبين منحنى التيار – الفولت (Curve I-V) في حالة التوصيل على التوازي

الاعتبارات التطبيقية لاختيار أسلوب توصيل الألواح الشمسية: التوالي أم التوازي يُعد اختيار طريقة توصيل الألواح الشمسية سواء على التوالي أو على التوازي قرارًا تصميميًا محوريًا يؤثر بصورة مباشرة في كفاءة النظام الكهروضوئي، واستقراره التشغيلي، وتوافقه مع بقية مكونات المنظومة مثل منظمات الشحن، والعاكسات، ووحدات التخزين. ولا يعتمد هذا الاختيار على تفضيل تقني ثابت، بل على تحليل متطلبات الجهد والتيار، وطبيعة الأحمال، وظروف التشغيل، والقيود الهندسية للنظام. تعتمد الأنظمة الكهروضوئية الحديثة مثل الأنظمة القائمة على ألواح Canadian Solar أو Jinko Solar على مبدأ موازنة الجهد والتيار مع نافذة التشغيل المثلى لمعدات التحكم والطاقة، وهو ما يحدد عمليًا متى يكون التوصيل على التوالي أو التوازي هو الخيار الأنسب.

استخدامات التوصيل على التوالي (Series Connection)

يُستخدم التوصيل على التوالي عندما يكون الهدف الأساسي هو رفع الجهد الكهربائي مع بقاء التيار ضمن حدود محددة. ويُعد هذا الأسلوب مناسبًا في الحالات التي تتطلب جهود تشغيل مرتفعة لضمان كفاءة نقل الطاقة وتقليل الفواقد في الموصلات، من أبرز الحالات التي يُفضّل فيها التوصيل على التوالي:

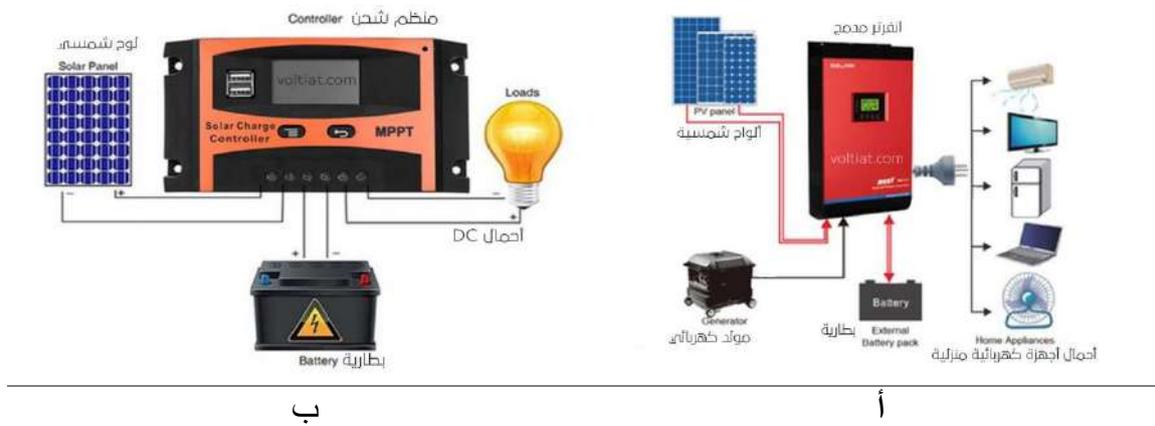
- الأنظمة المرتبطة بعاكسات ذات مجال جهد تشغيل مرتفع.
- الأنظمة التي تستخدم منظمات شحن بتقنية تتبع نقطة القدرة العظمى (MPPT). التركيبات ذات المسافات الطويلة بين الألواح ووحدة التحكم لتقلل الجهد المرتفع من فواقد القدرة.
- الأنظمة المتوسطة والكبيرة التي تتطلب استقرارًا في الجهد.

فعلى سبيل المثال: العديد من عواكس الطاقة الشمسية مثل منتجات SMA Solar Technology تعمل بكفاءة أعلى عند جهود دخل مرتفعة، مما يجعل التوصيل على التوالي الخيار الأمثل لتحقيق أقصى استفادة من الطاقة المتولدة. ومع ذلك، فإن هذا الأسلوب يتطلب عناية خاصة بظروف التظليل وعدم تماثل الألواح، لأن أي انخفاض في أداء لوح واحد يؤثر على السلسلة بالكامل.

استخدامات التوصيل على التوازي (Parallel Connection)

يُستخدم التوصيل على التوازي عندما تكون الحاجة إلى زيادة التيار الكهربائي مع الحفاظ على نفس مستوى الجهد. ويُعد هذا الأسلوب مناسباً للتطبيقات التي تعمل عند جهود منخفضة نسبياً ولكن تتطلب قدرة تيارية مرتفعة. ومن أهم تطبيقاته:

- أنظمة شحن البطاريات ذات الجهد الثابت.
 - الأنظمة الصغيرة والمستقلة (Off-grid).
 - الأنظمة التي تعمل عند مستويات جهد منخفضة مثل 12 V أو 24 V.
 - التطبيقات التي تتطلب مرونة تشغيلية عند اختلاف ظروف الإضاءة.
- في هذا السياق، تعتمد العديد من حلول التحكم بالشحن مثل منتجات Victron Energy على تصميمات تستفيد من زيادة التيار الناتج عن التوصيل على التوازي، خصوصاً في أنظمة التخزين المنزلية. ويتميز هذا الأسلوب بقدرته على تقليل تأثير التظليل الجزئي، إذ يستمر باقي الألواح في إنتاج الطاقة دون تأثر كبير بلوح واحد. (Alsharif et al. 2026).



شكل (19): أنظمة شحن. (أ) الهجين المدمج، (ب) منظم شحن عادي.

الحسابات التصميمية لقدرة وعدد ومساحة الألواح الشمسية في المنظومات الكهروضوئية تُعد مرحلة تحديد قدرة الألواح الشمسية وعددها والمساحة المطلوبة لتركيبها من أهم المراحل التصميمية في أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية، إذ تعتمد عليها كفاءة النظام واستقراره وقدرته على تلبية الأحمال الكهربائية المطلوبة بشكل مستمر. وتستند هذه الحسابات إلى معطيات فنية تشمل الطاقة اليومية المستهلكة، عدد ساعات الإشعاع الشمسي المكافئة، كفاءة النظام الكلية، إضافة إلى الخسائر الناتجة عن التوصيلات ودوائر التحويل والظروف البيئية.

حساب القدرة الإجمالية المطلوبة للألواح الشمسية

يتم أولاً تقدير القدرة الكلية المطلوبة من مصفوفة الألواح الشمسية (PV Array Power) لتوليد الطاقة اليومية اللازمة لتغذية الأحمال الكهربائية. ويعتمد ذلك على عدد ساعات الذروة الشمسية اليومية (Peak Sun Hours) وكفاءة النظام التصميمية، والتي تأخذ بعين الاعتبار:

- خسائر العاكس (Inverter Losses)
- خسائر التوصيلات والأسلاك
- خسائر عدم التطابق بين الألواح
- تأثير درجات الحرارة المرتفعة
- تراكم الأتربة والعوامل البيئية

وتُحسب القدرة المطلوبة للألواح وفق العلاقة العامة التالية:

(9)	$\frac{\text{الاستهلاك اليومي}}{\text{ساعات الإشعاع الشمسي} \times \text{كفاءة النظام}} = \text{القدرة المطلوبة للألواح}$
-----	---

ويضمن هذا الحساب أن تكون المصفوفة الشمسية قادرة على تعويض الفوائد وتحقيق إنتاج فعلي يغطي الحمل الكهربائي المخطط له، مع توفير هامش أمان تشغيلي مناسب.

تحديد عدد الألواح الشمسية اللازمة للنظام

بعد حساب القدرة الكلية المطلوبة للألواح، يتم تحديد عدد الألواح اللازمة عن طريق قسمة القدرة المطلوبة على القدرة الاسمية للوح الواحد (Rated Power of Panel)، ثم تقريب الناتج إلى أقرب عدد صحيح أعلى، وذلك لتفادي أي نقص في الإنتاج الفعلي للطاقة. يتم حساب عدد الألواح وفق العلاقة العامة التالية:

(10)	$\text{عدد الألواح} = \frac{\text{القدرة المطلوبة للألواح}}{\text{قدرة اللوح الواحد}}$
------	--

حساب المساحة الكلية المطلوبة لترتيب الألواح الشمسية

بعد تحديد العدد النهائي للألواح، يتم حساب المساحة الإجمالية اللازمة لترتيبها، وذلك للتأكد من توفر مساحة كافية وأمنة على السطح أو موقع التركيب مع مراعاة:

- اتجاه وزاوية الميل المثلى للألواح
 - مسافات التباعد بين الصفوف لتجنب التظليل
 - سهولة الوصول للصيانة
 - عوامل الأمان الإنشائي
- على سبيل المثال الألواح الشمسية بقدرة 460W والتي غالبًا ما تكون من نوع 72 خلية أحادية البلورة تمتلك المواصفات التقريبية التالية:
- الطول: حوالي 2 متر
 - العرض: حوالي 1 متر
 - المساحة السطحية للوح الواحد: 2 متر مربع تقريبًا
 - السمك: من 3 إلى 4 سم
 - الوزن: بين 22 إلى 25 كجم لكل لوح

وبناءً على ذلك يتم حساب المساحة الكلية كما يلي:

(11)	$\text{إجمالي المساحة المطلوبة} = \text{عدد الألواح} \times \text{مساحة اللوح الواحد} = 2 \times 6 = 12 \text{ متر مربع}$
------	---

ويلاحظ أن المساحة الفعلية المطلوبة قد تزيد قليلاً عند احتساب مسافات الفصل بين الألواح وزوايا الميل، لذلك يُوصى بتوفير مساحة إضافية لضمان التهوية الجيدة وتقليل تأثير ارتفاع درجة الحرارة على كفاءة الإنتاج.

10. خصائص أداء الخلايا الكهروضوئية

10.1 الكفاءة

الكفاءة (η) هي نسبة طاقة الخرج الكهربائية إلى طاقة الإشعاع الشمسي الساقط، ويُعبّر عنها بالمعادلة:

(12)	$\eta = (P_{\text{max}} / P_{\text{in}}) = (V_{\text{oc}} \times I_{\text{sc}} \times FF) / P_{\text{in}}$
------	--

حيث أن V_{oc} هو جهد الدائرة المفتوحة، I_{sc} هو تيار الدارة القصيرة، FF هو عامل الملء، و P_{in} هي القدرة الساقطة (عادةً 1000 واط/م² تحت شروط الاختبار القياسية). تحقق خلايا السيليكون عادةً كفاءة تتراوح بين 15-22%، بينما يمكن للخلايا متعددة الوصلات أن تتجاوز 40%.

10.2 جهد الدائرة المفتوحة (V_{oc})

جهد الدائرة المفتوحة (V_{oc}) هو أقصى جهد عبر الخلية عندما لا يسري تيار. يعتمد على فجوة النطاق لشبه الموصل ويُعطى بالعلاقة:

$$(13) \quad = (kT/q) \ln((I_L/I_0) + 1)V_{oc}$$

حيث I_L هو التيار المولد ضوئيًا، I_0 هو تيار التشبع العكسي، k هو ثابت بولتزمان، T هي درجة الحرارة، و q هي شحنة الإلكترون. تؤدي فجوات النطاق الأعلى إلى V_{oc} أعلى، ولكنها قد تقلل التيار.

10.3 تيار الدارة القصيرة (I_{sc})

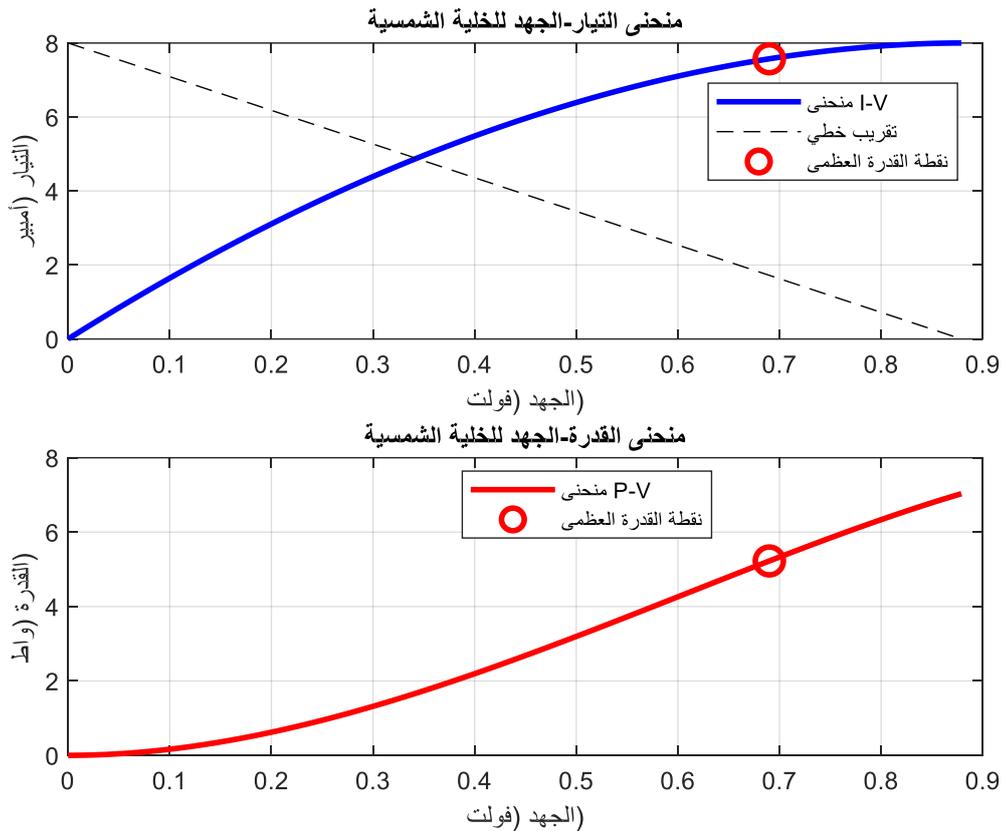
تيار الدارة القصيرة (I_{sc}) هو التيار المار عبر الخلية عندما لا يكون هناك جهد مطبق. يتناسب مع عدد الفوتونات الممتصة ويعتمد على الاستجابة الطيفية للمادة وتصميم الخلية.

10.4 عامل الملء (FF)

يُقاس عامل الملء مدى "تربيعية" منحنى التيار-الجهد، ويُعرف بالمعادلة:

$$(14) \quad FF = (V_{mp} \times I_{mp}) / (V_{oc} \times I_{sc})$$

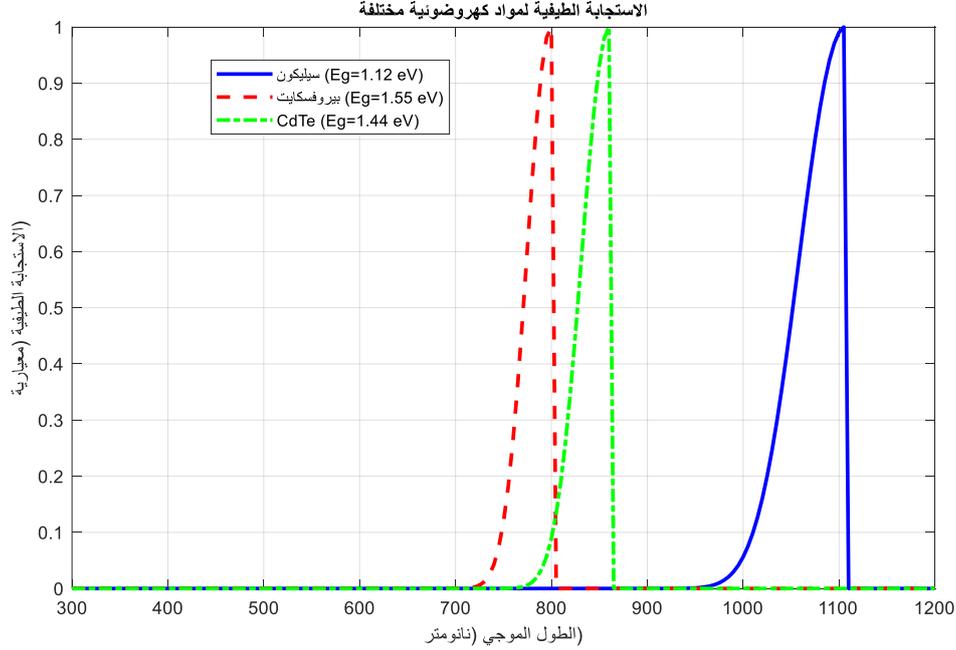
حيث V_{mp} و I_{mp} هما الجهد والتيار عند نقطة القدرة القصوى. يتأثر FF بمقاومات السلسلة والتوازي، وتتراوح قيمه النموذجية لخلايا السيليكون بين 0.7 و 0.85.



شكل (20): منحنيات الخلية الشمسية (أ) التيار والجهد (ب) القدرة والجهد.

11. الاستجابة الطيفية

تصف الاستجابة الطيفية كفاءة الخلية في تحويل الأطوال الموجية المختلفة للضوء إلى كهرباء. تعتمد هذه الاستجابة على فجوة النطاق للمادة وهي ضرورية لتحسين الأداء تحت الظروف الطيفية المتغيرة) مثل الطيف الشمسي القياسي (AM1.5).

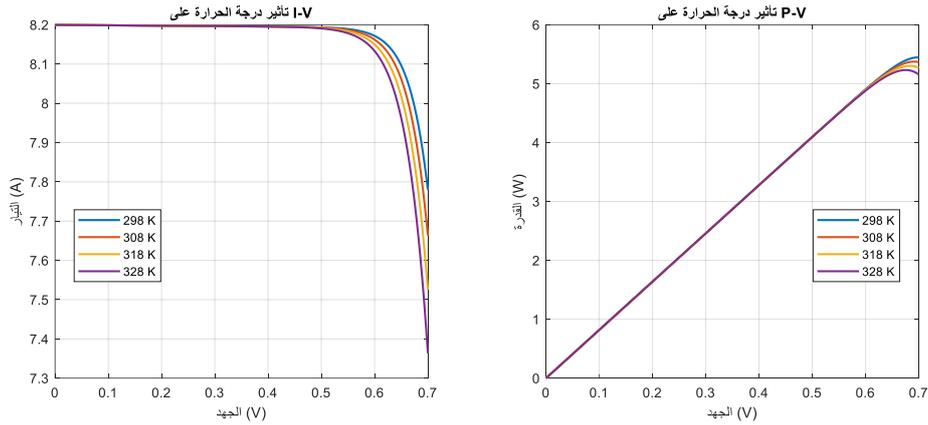


شكل (21): الاستجابة الطيفية لمواد كهروضوئية مختلفة.

12. تأثيرات درجة الحرارة

يقف أداء الخلايا الكهروضوئية مع زيادة درجة الحرارة بسبب زيادة إعادة اتحاد حاملات الشحنة وانخفاض الجهد الكهربائي (V_{oc}). معامل درجة الحرارة لخلايا السيليكون يتراوح عادة بين -0.4% إلى -0.5% لكل درجة مئوية بالنسبة للكفاءة. توضح الصور المرفقة تأثير تغيرات درجات الحرارة على أداء الخلية الكهروضوئية (PV) من خلال منحنيات الخصائص ($I-V$ تيار-جهد) و ($P-V$ قدرة-جهد). ومع ارتفاع درجة الحرارة من 298 كلفن إلى 328 كلفن، يلاحظ وجود تراجع واضح في الأداء العام للخلية.

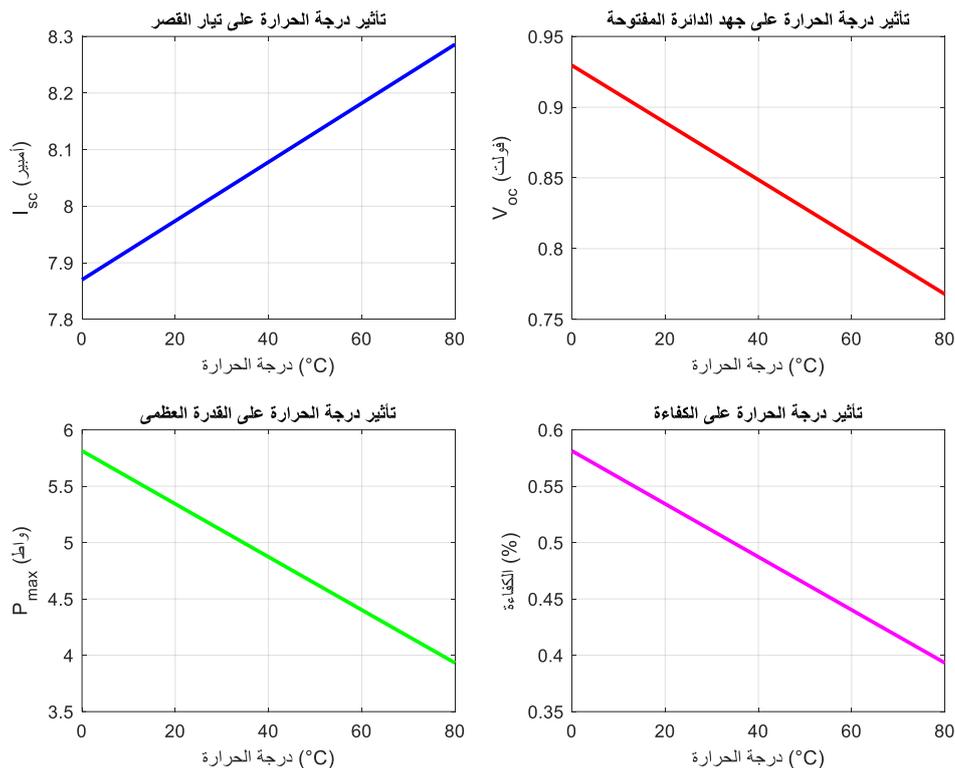
- **التأثير على الجهد (V_{oc}):** التأثير الأكثر أهمية لارتفاع درجة الحرارة هو انخفاض جهد الدائرة المفتوحة. فمع ارتفاع الحرارة، تنزاح المنحنيات نحو اليسار، مما يشير إلى أن الخلية تنتج جهداً أقل لنفس الكمية من ضوء الشمس.
- **التأثير على التيار (I_{sc}):** في حين يظهر تيار القصر (I_{sc}) زيادة طفيفة جداً مع ارتفاع درجة الحرارة (بسبب انخفاض فجوة الطاقة)، إلا أن هذه الزيادة ضئيلة جداً ولا تعوض الفقد الكبير في الجهد.
- **التأثير على القدرة (P_{max}):** يوضح رسم ($P-V$) بشكل جلي أن نقطة أقصى قدرة (MPP) تنخفض كلما ارتفعت درجة الحرارة؛ حيث تهبط ذروة المنحنى من حوالي 5.5 واط عند 298 كلفن إلى ما يقارب 5.2 واط عند 328 كلفن.



شكل (22): تأثير درجة الحرارة (أ) P-V و (ب) I-V.

تقدم مجموعة الرسوم البيانية المرفقة نظرة شاملة حول كيفية تأثير ارتفاع درجات الحرارة من 0 درجة مئوية إلى 80 درجة مئوية بشكل خطي على معايير الأداء الأساسية للخلية الشمسية. وبينما يظهر أحد المعايير تحسناً طفيفاً، فإن التأثير العام يتمثل في انخفاض كبير في الكفاءة وإنتاج الطاقة.

- **تيار القصر (I_{sc}):** على عكس المعايير الأخرى، يظهر التيار (الخط الأزرق) علاقة طردية مع درجة الحرارة. فمع تسخن الخلية، تضيق فجوة النطاق في أشباه الموصلات، مما يسمح بامتصاص المزيد من الفوتونات وتحويلها إلى أزواج (إلكترون-فجوة)، مما يؤدي لارتفاع التيار من حوالي 7.87 أمبير إلى 8.29 أمبير.
- **جهد الدائرة المفتوحة (V_{oc}):** يظهر الجهد (الخط الأحمر) انخفاضاً حاداً مع زيادة درجة الحرارة، حيث يهبط من حوالي 0.93 فولت إلى 0.77 فولت. هذا هو المحرك الرئيسي لفقدان الأداء، حيث تؤدي الطاقة الحرارية المتزايدة إلى تعزيز إعادة اتحاد حاملات الشحنة، مما يقلل من الجهد الكهربائي.
- **القدرة العظمى (P_{max}):** نظراً لأن انخفاض الجهد يكون أكثر حدة بكثير من الزيادة الطفيفة في التيار، فإن إجمالي ناتج القدرة (الخط الأخضر) ينخفض بشكل كبير. تهبط القدرة القصوى من حوالي 5.8 واط إلى أقل من 4 واط، مما يمثل خسارة جوهرية في قدرة حصاد الطاقة.
- **الكفاءة (η):** يلخص الرسم البياني السفلي (الخط الأرجواني) التأثير الإجمالي؛ حيث تنخفض كفاءة الخلية من حوالي 58% إلى 39% عبر نطاق الـ 80 درجة مئوية، مما يثبت أن الألواح الشمسية تكون أكثر فاعلية بكثير في ظروف التشغيل الباردة.



شكل (23): تأثير درجة الحرارة. (أ) على جهد الدائرة المفتوحة، (ب) على تيار القصر، (ج) على الكفاءة، (د) على القدرة العظمى.

13. العوامل المؤثرة على أداء الخلايا الكهروضوئية

تتأثر كفاءة وإنتاجية الخلايا الشمسية بمجموعة متداخلة من العوامل التي تبدأ من الخصائص الذرية للمادة وتصل إلى الظروف البيئية المحيطة. يمكن تلخيص هذه العوامل في المحاور التالية:

- **أولاً:** الخصائص الجوهرية للمواد وتصميم الخلية يعتبر اختيار مادة شبه الموصل هو الحجر الأساس في تحديد قدرة الخلية على تحويل الضوء إلى كهرباء؛ حيث تتحكم "فجوة النطاق" (Bandgap) ومعامل الامتصاص في تحديد كمية الطيف الضوئي التي يمكن للخلية الاستفادة منها.
- ولتعزيز هذه الاستفادة، يأتي دور التصميم الهندسي للخلية، الذي يركز على تقليل الفواقد البصرية والكهربائية من خلال استخدام طلاءات مضادة للانعكاس وتطوير شبكات تلامس دقيقة، بالإضافة إلى تقنيات "التخميل السطحي" التي تمنع ضياع الشحنات الكهربائية قبل استخلاصها.
- **ثانياً:** جودة التصنيع والتحكم التقني تلعب دقة العمليات الصناعية دوراً حاسماً في إطالة العمر الافتراضي للخلية؛ فوجود عيوب أو شوائب ناتجة عن التصنيع، أو عدم انتظام في عملية "التشويب (Doping)"، يؤدي إلى خلق مراكز لإعادة الاتحاد. هذه المراكز تعمل كـ "مصائد" للشحنات، مما يقلل بشكل مباشر من الكفاءة الكلية ويتسبب في تدهور أداء الخلية بمرور الوقت.
- **ثالثاً:** التحديات البيئية والتشغيلية بمجرد تركيب الخلايا في الميدان، تصبح العوامل البيئية هي المؤثر الأكبر على الأداء اليومي. فالعوامل الخارجية مثل تراكم الغبار، والتظليل الجزئي، والرطوبة العالية قد تؤدي إلى انخفاض حاد في الطاقة المولدة. وللتغلب على ذلك، تعتمد الصناعة على تقنيات "التغليف" المتقدمة وتصاميم الوحدات القوية التي توفر حماية ميكانيكية وكيميائية ضد الظروف القاسية، مما يضمن استمرارية العمل بأعلى كفاءة ممكنة.

جدول (4): العوامل المؤثرة على أداء الخلايا الكهروضوئية

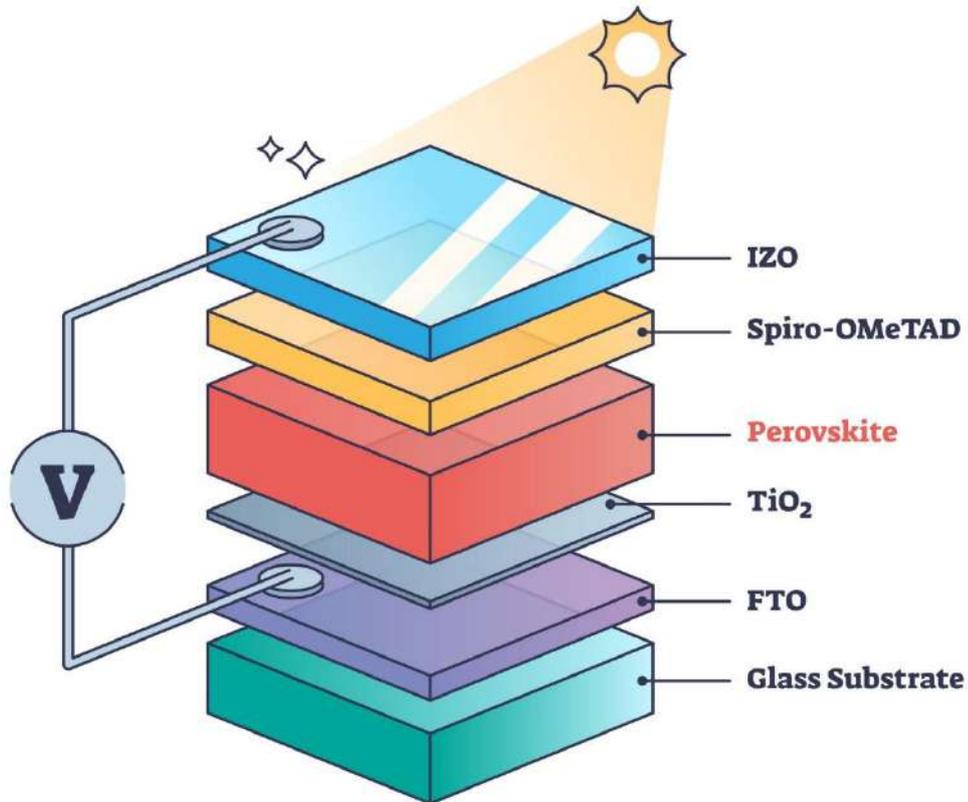
الأداة	شرحها
خصائص المواد	يحدد اختيار مادة شبه الموصل فجوة النطاق، ومعامل الامتصاص، وحركية حاملات الشحنة، مما يؤثر بشكل مباشر على الكفاءة والاستجابة الطيفية.
تصميم الخلية	يعمل تحسين الطلاءات المضادة للانعكاس، وتصميم شبكة التلامس، والتخميل السطحي على تقليل الفقد الناتج عن الانعكاس، وإعادة الاتحاد، والمقاومة.
العوامل البيئية	يمكن أن يؤدي تراكم الغبار والتظليل والرطوبة إلى تدهور الأداء. يعمل التغليف وتصميم الوحدات القوي على التخفيف من هذه التأثيرات.
عيوب التصنيع	يمكن للعيوب أو الشوائب أو التشويب غير المنتظم أن يؤدي إلى إنشاء مراكز إعادة اتحاد، مما يقلل من الكفاءة والعمر الافتراضي.

14. التطورات والتحديات في تكنولوجيا الخلايا الكهروضوئية

أولاً: التطورات التكنولوجية الحديثة

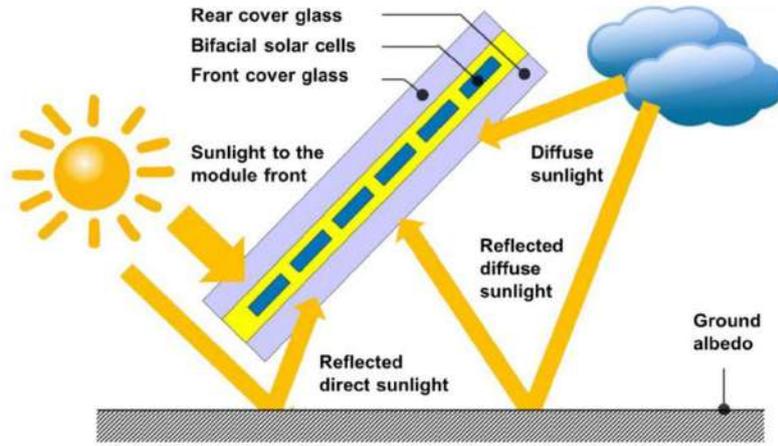
1. خلايا البيروفسكايت (Perovskites) تعتبر "الحصان الأسود" في عالم الطاقة الشمسية. تمتاز بقدرتها العالية على امتصاص الضوء وتكلفة تصنيعها الزهيدة. التوجه الحالي يركز على الخلايا الترادفية (Tandem Cells) التي تجمع بين السيليكون والبيروفسكايت لتحقيق كفاءة تتجاوز 30%.

PEROVSKITE SOLAR CELLS



شكل (24): خلايا البيروفسكايت.

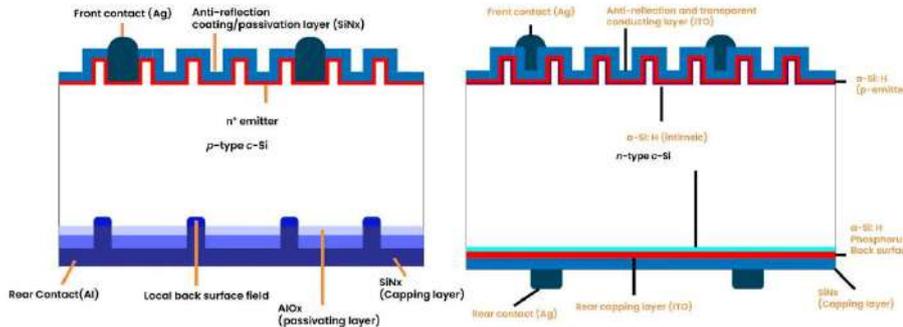
2. الخلايا ثنائية الوجهه (Bifacial Panels) تسمح هذه التقنية بامتصاص الضوء من الجهتين الأمامية والخلفية (عن طريق الضوء المنعكس من الأرض)، مما يزيد من إنتاجية الطاقة بنسبة تصل إلى 20% مقارنة بالألواح التقليدية.



شكل (25): الخلايا ثنائية الوجهه

(National Renewable Energy Laboratory, 2026)

3. تكنولوجيا الـ TOPCon والـ HJT هذه تحديثات متقدمة لخلايا السيليكون التقليدية تعمل على تقليل فواقد "إعادة الاتحاد" عند نقاط التلامس الكهربائية، مما يرفع الكفاءة التشغيلية للمشاريع التجارية الكبرى.



(A) p-type PERC solar cell

(B) n-type TOPCON solar cell

شكل (26): تكنولوجيا الـ TOPCon

(National Renewable Energy Laboratory, 2026)

ثانياً: التحديات التي تواجه القطاع

- رغم القفزات النوعية، لا تزال هناك عقبات تحاول الأبحاث تجاوزها:
- الاستقرار والديمومة: تعاني التقنيات الواعدة مثل البيروفسكايت من الحساسية الشديدة للرطوبة والحرارة، مما يجعل عمرها الافتراضي أقصر من السيليكون (الذي يعيش 25 عاماً).
- سلاسل التوريد والمواد الخام: تعتمد بعض الخلايا المتقدمة على مواد نادرة أو سامة (مثل الكاديوم أو الرصاص)، مما يطرح تساؤلات حول الأثر البيئي وسهولة التوسع العالمي.
- تكلفة التخزين: التحدي الأكبر ليس في توليد الطاقة نهاراً، بل في كيفية تخزينها بكفاءة ليلاً؛ حيث لا تزال تكلفة البطاريات (مثل ليثيوم-أيون) تشكل عائقاً أمام الاعتماد الكلي على الطاقة الشمسية.
- كفاءة المساحة: في المناطق المكتظة بالسكان، يظل البحث جارياً عن خلايا شفافة يمكن دمجها في نوافذ المباني (BIPV) لتوليد الطاقة دون الحاجة لمساحات أرضية واسعة.

جدول (5): التطورات الحديثة للخلايا الكهروضوئية

شرحها	الخلايا الكهروضوئية الحديثة
تجمع بين البيروفسكايت عالي الكفاءة والسيليكون لتحقيق كفاءات تتجاوز 30%	الخلايا الترادفية من البيروفسكايت والسيليكون
تلتقط الضوء من كلا الجانبين، مما يزيد من إنتاجية الطاقة	الخلايا ثنائية الوجه
تعزز كفاءة خلايا السيليكون عن طريق تقليل إعادة الاتحاد في السطح الخلفي (PERC).	خلية الباعث السليبي والجهة الخلفية

15. التحديات

- **حدود الكفاءة:** يحد حد شوكلي-كويزر من كفاءة الخلية أحادية الوصلة عند حوالي ~33% بسبب القيود الديناميكية الحرارية.
- **الاستقرار والمتانة:** تعاني خلايا البيروفسكايت والخلايا العضوية من التدهور تحت الضغط البيئي.
- **التكلفة وقابلية التوسع:** الخلايا عالية الكفاءة (مثل متعددة الوصلات) مكلفة، مما يحد من انتشارها على نطاق واسع.
- **إعادة التدوير والأثر البيئي:** يشكل التخلص من المواد السامة (مثل تيلوريد الكاديوم) تحديات بيئية.

16. النتائج والمناقشة

يلخص الجدول 6 المعايير الجوهرية المستخرجة من منحنيات الخصائص الكهربائية للخلية الشمسية المدروسة عند ظروف تشغيل محددة. تعكس هذه القيم الكفاءة التحويلية والقدرة التشغيلية للخلية:

جدول (6): نتائج خرج الخلايا الكهروضوئية

القيمة المرجعية	الدلالة العلمية	المعامل المحسوب
8.000 A	يمثل أقصى تيار يمكن أن تولده الخلية عند انعدام المقاومة.	تيار القصر (I_{sc})
0.879 V	يمثل أقصى جهد تولده الخلية عندما يكون التيار صفراً.	جهد الدائرة المفتوحة (V_{oc})
5.225 W	نقطة التشغيل المثلى التي تعطي أعلى حصاد للطاقة.	القدرة القصوى (P_{max})
0.743	مؤشر على جودة الخلية (كلما اقترب من 1 كانت الخلية مثالية).	عامل الملء (FF)
20.52%	نسبة الطاقة الشمسية المتحولة إلى طاقة كهربائية مفيدة.	الكفاءة (η)

17. التوجهات المستقبلية

يكمن مستقبل تكنولوجيا الخلايا الكهروضوئية في تحسين الكفاءة، وخفض التكاليف، وتعزيز الاستدامة. تشمل المجالات الرئيسية ما يلي:

- تطوير خلايا بيروفسكايت ترادفية مستقرة وعالية الكفاءة.
- تطوير تقنيات التصنيع من أجل إنتاج فعال من حيث التكلفة وعلى نطاق واسع.
- دمج الخلايا الكهروضوئية في مواد البناء (مثل النوافذ الشمسية) والركائز المرنة.

• تحسين عمليات إعادة التدوير لتقليل الأثر البيئي.

18. الاستنتاج

تُعد الخلايا الكهروضوئية حجر زاوية في الطاقة المتجددة، حيث تقدم مسارًا مستدامًا لتلبية الطلب العالمي على الطاقة. يعد فهم مبادئ عملها وخصائص أدائها أمرًا ضروريًا لتطوير التكنولوجيا ومواجهة التحديات. سيقود البحث المستمر في المواد الجديدة وتصميمات الخلايا وتقنيات التصنيع تطور أنظمة الخلايا الكهروضوئية، مما يجعل الطاقة الشمسية أكثر كفاءة وبأسعار معقولة ومتاحة.

المراجع

1. Abdulhadi, Mohamed, Faraj Hamad, Mansour Khalifa, and Hamad Mohammed. 2025. "Investigation and Modelling of a Dual Solar Photovoltaic System for Consistent Energy Supply at Al-Brega Clinic , Libya." *Journal of Scientific and Human Dimensions* 1(2): 96–105.
2. Abdussalam Ali Ahmed, and HudaElislam Mohamed. 2025. "Accelerating the Green Transition: An Experimental Study on the Integration of Renewable Energy with Electric Vehicle Infrastructure." *Journal of Insights in Basic and Applied Sciences* 1(1): 01–09. doi:10.65421/jibas.v1i1.4.
3. Alsharif, A., Ibrahim, A. A., Waheshi, Y. A. A., Alsharif, M., Alhoudier, T. E., Esmail, E. M. A., & Dalla, L. O. F. B. (2025). An Analysis of Power Sector Investment by Technology in the Middle East and North Africa. *African Journal of Academic Publishing in Science and Technology (AJAPST)*, 1(4), 25-39.
4. Alsharif, A., Agaal, A., Ahmed, A. A., Khaleel, M., Ali, T. M. A., & Qasim, K. (2025). The Role of Artificial Intelligence Tools in Enhancing Sustainability in Scientific Research. *The Open European Journal of Engineering and Scientific Research (OEJESR)*, 24-39.
5. Allam, Essam M., Sameh M. Metwalley, and Noha Muhammad. 2018. "Improving Electric Vehicle Performance Using Photovoltaic Cells." *International Journal of Clean Coal and Energy* 07(01): 1–19. doi:10.4236/ijcce.2018.71001.
6. Alsharif, Abdulgader, Karam Sameer Qasim Qassab, Abdulhakeem Dobi, Abdulssalam Ali Ahmed, Mohamed A Alsharif, Ali Almaktoof, and Ibrahim Imbamy. 2026. "A Comprehensive Review of Energy Storage Batteries for Solar Energy Systems." *Journal of Insights in Basic and Applied Sciences*: 154–71.
7. Alsharif, Abdulgader, Chee Wei Tan, Razman Ayop, Abdulhakeem Dobi, and Kwan Yiew Lau. 2021. "A Comprehensive Review of Energy Management Strategy in Vehicle-to-Grid Technology Integrated with Renewable Energy Sources." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 47(January): 101439. doi:10.1016/j.seta.2021.101439.
8. Alsharif, Abdulgader, Chee Wei Tan, Razman Ayop, Kwan Yiew Lau, and Chuen Ling Toh. 2021. "Sizing of Photovoltaic Wind Battery System Integrated with Vehicle-to-Grid Using Cuckoo Search Algorithm." In *2021 IEEE Conference on Energy Conversion (CENCON)*, IEEE, 22–27. doi:10.1109/CENCON51869.2021.9627291.
9. Nassar, Yasser F, Hala J El-khozondar, Ghaboun Ghaboun, Mohamed Khaleel, Ziyodulla Yusupov, and Abdussalam Ahmed; Abdulgader Alsharif. 2023. "Solar and Wind Atlas for Libya." *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)* 1(3): 27–43. <https://ijeess.org/index.php/ijeess/index>.
10. Alsharif, A., & Milad, W. A. A. (2025). AI in Renewable Energy Forecasting: Bridging the Gap Between Data Science and Energy. *Eurasian Journal of Theoretical and Applied Sciences (EJTAS)*, 36-56.

11. Solman, Fathalla I, Zead Hamad Abdulkarim, Salih Abdulqadir Salih, and Naser F Faraj. 2026. "Design, Implementation, and Techno-Economic-Environmental Assessment of a Hybrid Solar Energy System: A Case Study of an Educational Institution in Al-Qubbah, Libya." *Journal of Insights in Basic and Applied Sciences*: 82–111.
12. Alsharif, A., Wei, T. C., & Ayop, R. (2021). Ant Lion Optimization of On-Grid Supported by PV/Wind Considering Libyan Energy. *Science Proceedings Series*, 3(1), 9-15.
13. Nassar, Y. F., El-Khozondar, H. J., Khaleel, M. M., Ahmed, A. A., Alsharif, A. H., Elmnifi, M. H., ... & Mangir, I. (2024). Design of reliable standalone utility-scale pumped hydroelectric storage powered by PV/Wind hybrid renewable system. *Energy Conversion and Management*, 322, 119173.
14. Alsharif, A. (2025). Hybrid Solar-Piezoelectric Pavement Systems: A Dual-Mode Approach to Renewable Energy Harvesting and Sustainable Infrastructure. *Libyan Journal of Health, Science, and Development (LJHSD)*, 23-31.
15. Alsharif, A., Ahmed, A., Mohamed, H. E., Khaleel, M., Hebrisha, H., Almabsout, E., ... & Al-Naas, Y. (2023). Applications of solar energy technologies in north Africa: Current practices and future prospects. *Int. J. Electr. Eng. and Sustain.*, 164-173.
16. Alsharif, A., Ahmed, A. A., Khaleel, M. M., Alarga, A. S. D., Jomah, O. S., & Alrashed, A. B. E. (2023, May). Stochastic method and sensitivity analysis assessments for vehicle-to-home integration based on renewable energy sources. In *2023 IEEE 3rd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)* (pp. 783-787). IEEE.
17. Alsharif, A. (2025). Global Trends in Electric Vehicle Charging Demand and Infrastructure Development. *Libyan Open University Journal of Applied Sciences (LOUJAS)*, 20-28.
18. Dalla, L. B., Karal, Ö., Mhamed, E. S., & Alsharif, A. (2026). An IoT-enabled, THD-based fault detection and predictive maintenance framework for solar PV systems in harsh climates: integrating DFT and machine learning for enhanced performance and resilience. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, 41-55.
19. Nassar, Y. F., Amer, K. A., El-Khozondar, H. J., Ahmed, A. A., Alsharif, A., Khaleel, M. M., ... & Salem, A. (2023, May). Thermoelectrical analysis of a new hybrid PV-thermal flat plate solar collector. In *2023 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES)* (pp. 1-5). IEEE.
20. Alsharif, A., Qassab, K. S. Q., Dobi, A., Ahmed, A. A., Alsharif, M. A., Almaktoof, A., & Imbamy, I. (2026). A Comprehensive Review of Energy Storage Batteries for Solar Energy Systems. *Journal of Insights in Basic and Applied Sciences*, 154-171.
21. National Renewable Energy Laboratory. (2026). Best research-cell efficiency chart. <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>
22. Khaleel, M., Ahmed, A. A., & Alsharif, A. (2023). Artificial intelligence in engineering. *Brilliance: Research of Artificial Intelligence*, 3(1), 32-42.
23. Alsharif, A., Qassab, K. S. Q., Dobi, A., Ahmed, A. A., Alsharif, M. A., Almaktoof, A., & Imbamy, I. (2026). A Comprehensive Review of Energy Storage Batteries for Solar Energy Systems. *Journal of Insights in Basic and Applied Sciences*, 154-171.
24. Khaleel, M., Hesri, A., Ibra, A. A., Nassar, Y. F., El-Khozondar, H. J., Ahmed, A. A., ... & Imbayah, I. (2024). Emerging issues and challenges in integrating of solar and wind. *Int. J. Electr. Eng. and Sustain.*, 1-11.
25. Alsharif, A., Ahmed, A. A., Khaleel, M., Nassar, Y. F., Sharif, M. A., & El-Khozondar, H. J. (2023). Power management and sizing optimization for isolated systems

- considering solar, battery, and diesel generator based on cost and reliability under Murzuq and Sabha cities weather. *Power*, 28, 29th.
26. Alsharif, A. H., Ahmed, A. A., Nassar, Y. F., Khaleel, M. M., El-Khozondar, H. J., Alhoudier, T. E., & Esmail, E. M. (2023). Mitigation of dust impact on solar photovoltaics performance considering Libyan climate zone: A review. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, 22-27.
 27. Al-Hashmi, S. A., Alsharif, A., Almathnani, A. O., & Nasir, I. A. (2025). The infrastructure of the Libyan electric grid & the opportunities and obstacles of utilizing solar and wind Energies. *African Journal of Academic Publishing in Science and Technology (AJAPST)*, 42-50.
 28. Alnaas, J. F., Sharif, A., & Altraiki, M. S. (2025, March). Sustainable energy future for Libya:: Assessing the solar energy potential of twenty-three urban areas. In *Journal of the Academic Forum* (Vol. 9, No. 1, pp. 119-140).
 29. Nassar, Y. F., El-Khozondar, H. J., Khaleel, M. M., Ahmed, A. A., Alsharif, A. H., Elmufi, M., & Nyasapoh, M. A. (2025). Sensitivity of global solar irradiance to transposition models: Assessing risks associated with model discrepancies. *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, 11, 100887.
 30. RAMADAN, A. Technical Report on Solar Ponds Project in Libya, 2020, Centre for Solar Energy Research and Studies (CSERS), Libya.
 31. Khaleel, M., Yusupov, Z., Ahmed, A., Alsharif, A., Nassar, Y., & El-Khozondar, H. (2023). Towards sustainable renewable energy. *Applied solar energy*, 59(4), 557-567.
 32. Alsharif, A. (2025). Empirical Analysis of Electric Vehicle Battery Performance, Charging Behaviour, and Degradation: A Meta-Study of Published Experimental Results. *Albahit Journal of Applied Sciences*, 1-8.
 33. د. عثمان زكي مبارك علي. (2022). تحسين عمل الخلايا الشمسية السيلكونية. مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية, 3(2), 695-759.
 34. بشارة أحمد, رحمة الزير, محمد أبو قيلة, سهيلة محمد, علي الخازمي, عبد السلام علي أحمد, ... & محمد محمد خليل. (2023). أطلس تقنيات الطاقة الشمسية (الخلايا الشمسية والطاقة الشمسية المركزة) وطاقة الرياح في ليبيا. مجلة شمال إفريقيا للنشر العلمي (NAJSP), 8-24.
 35. Moustafa, Y. (2020). الطاقة الشمسية: النظرية والتطبيق. Dr. Yosry Moustafa.
 36. شحاته عبد الفتاح & شربن. (2022). برنامج في التكنولوجيا الخضراء لتنمية التفكير المستقبلي والحس العلمي لدى طلاب كلية التربية. مجلة كلية التربية (أسيوط), 38(1.2), 1-60.
 37. علي سليم أبونوار, أحمد الطاهر زقلم, & اسماعيل الطاهر زقلم. (2024). دراسة تحليلية عن الطاقة الشمسية كطاقة متجددة وتأثيرها على التنمية المستدامة في ليبيا. *African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences*, 290-299.
 38. م. د. لقاء احمد عبد الرحمن, م. م. غدير محمد حاكم. (2025). الاعتبارات التصميمية وعلاقتها باستخدام التقنيات الذكية في تصميم الفضاء الداخلي للمصارف (المصارف المالية في دول الخليج نموذجاً). مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية, 6(10), 150-168.
 39. أبوبكر صالح نصر, عبد القادر حسين الشريف, & فتحي بن كوره. (2024). تكنولوجيا النانو في مجال هندسة الاتصالات والمعلومات (القضايا والتطبيقات وإمكانيات المستقبل). *African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences*, 342-353.
 40. أحمد السنوسي العربي, أريج أحمد تيتوي, لميس آدم سعد, & محمد دراويل. (2024). استراتيجية الطاقة الشمسية في ليبيا (الإمكانات التخطيطية-آليات التنفيذ). *African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences*, 96-104.
 41. محمد بن شتوان, & د/تهاني. (2025). "التحليل المكاني لمشروعات الطاقة الشمسية المستقبلية في ليبيا وأبعادها الجغرافية في تعزيز التحول الطاقوي وتحقيق التنمية المستدامة". مجلة كلية الآداب بالوادي الجديد, 11(22), 106-127.
 42. أ. عفاف علي حسين الربيب. (2024). التحديات التي تواجه استخدام الطاقات المتجددة واستغلال الطاقة الشمسية في تحقيق التنمية المستدامة في ليبيا. مجلة شروس, 5(2), 522-540.

43. أ. صالح أمهني، د. عصام عبدالصمد، د. حسن دواس، أ. سالم النعاس، أ. حمال عبدالناصر الراعي، أ. إدريس التواتي. (2025). مقومات التنمية المكانية المستدامة في واحة الجغبوب شرق ليبيا: تحليل للفرص والتحديات. مجلة العلوم الإنسانية والطبيعية, 6(4), 240-221.
44. سلامة عمر أحفيظة, محمد الكيلاني المدني, إيهاب علي أقدورة, آدم عبدالفتاح قرشي, أبو القاسم محمد الغنودي, & فهد صالح رجب. (2025). تحليل الجدوى الاقتصادية لمحطات الطاقة الشمسية المربوطة بالشبكة في المناطق الصحراوية. *Journal of Technology Research*, 6(4), 641-627.
45. كريمة سالم أبونقاب. (2023). مصادر الطاقة الكهربائية المتجددة في ليبيا. جامعة الزاوية-مجلة كلية الأداب, 23(42), 74-47.
46. علي منصور علي سعد, & الطاهر محمد الطاهر الزروق. (2024). تحديد أفضل المواقع لإنشاء محطة ألواح تجميع الطاقة الشمسية في الجزء الشمالي الغربي من ليبيا بواسطة نظم المعلومات الجغرافية. مجلة جامعة سرت للعلوم الإنسانية, 14(2), 72-79.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **JSHD** and/or the editor(s). **JSHD** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.