

Between Coast and Desert: Performance Comparison of Monocrystalline Silicon (Mono-Si) And Cadmium Telluride (CdTe) For Electricity Generation in Seven Libyan Cities

Ali Saleem Abu Nouwar *

Information Technology Department, Faculty of Technical Engineering, Mesallata, Libya

* Email (for reference researcher): asabunouwar@fitem.edu.ly

بين الساحل والصحراء: مقارنة أداء السيليكون أحادي البلورة (Mono-Si) وتيلورايد الكادميوم (CdTe) في سبع مدن ليبية لإنتاج الكهرباء

علي سليم علي أبونوار

هندسة تقنية المعلومات، كلية التقنية الهندسية، مسلاتة، ليبيا

Received: 25-03-2026; Accepted: 25-05-2026; Published: 05-06-2026

Abstract

Libya relies heavily on fossil fuels (oil and natural gas) for electricity generation, leading to significant greenhouse gas emissions, global warming, and severe environmental pollution. Conversely, Libya possesses a strategic geographical location in North Africa, with approximately 88% of its 1.75 million km² area being desert terrain. The country exhibits exceptional solar potential, with Global Horizontal Irradiance (GHI) ranging from 1,940 to 2,338 kWh/m²/year and annual sunshine duration reaching 3,670 hours in the southern regions. Accordingly, this paper presents an integrated spatial, technical, and economic assessment of solar photovoltaic (PV) potential in Libya. The study conducts a comprehensive performance comparison between two leading technologies: Monocrystalline Silicon (Mono-Si) and Cadmium Telluride (CdTe) across seven strategically selected climatic zones (Tripoli, Benghazi, Misrata, Sabha, Murzuq, Al-Kufra, and Hun), utilizing validated datasets from the Global Solar Atlas and NASA POWER platforms. The analytical framework employs robust scientific simulation models, including the single-diode equivalent circuit model, cell temperature calculation algorithms, and the Capacity Factor (CF) determination. These two technologies were specifically selected due to their suitability for Libya's extreme climatic conditions, characterized by arid, dusty environments and desert temperatures exceeding 40°C. The results demonstrate the superior productivity of the southern regions (Murzuq, Al-Kufra, and Sabha), with Murzuq achieving the highest Capacity Factor (CF) of 24.77% using CdTe technology, which proved highly efficient in hot desert environments due to its favorable low-temperature coefficient. The study recommends the development of a strategic roadmap prioritizing utility-scale solar installations in the south and promoting distributed generation systems in the north, thereby providing a scientific foundation for sustainable energy transition policies in Libya.

Keywords: Monocrystalline silicon (Mono-Si), Cadmium telluride (CdTe), Photovoltaic performance, Capacity factor, Libya solar energy.

المخلص

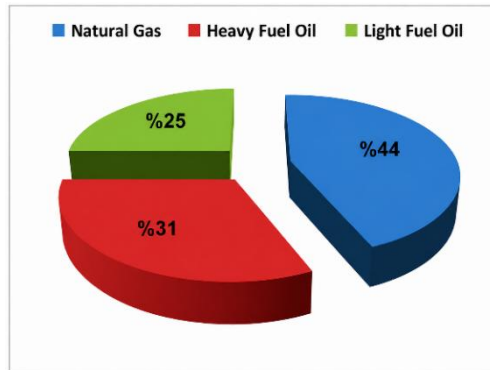
تعتمد ليبيا بشكل كبير على الوقود الأحفوري (النفط والغاز الطبيعي) في توليد الطاقة الكهربائية، مما يؤدي إلى زيادة انبعاثات الغازات الدفيئة وتفاقم الاحتباس الحراري والتلوث البيئي. وفي المقابل، تتمتع ليبيا بموقع جغرافي استراتيجي في شمال إفريقيا؛ حيث تغطي الصحراء 88% من مساحتها البالغة 1.75 مليون كم²، مع توفر إشعاع شمسي مرتفع يتراوح بين 1940 و2338 كيلوواط/ساعة/م² سنوياً (GHI)، وتصل ساعات السطوع في المناطق الجنوبية إلى 3670 ساعة سنوياً.

بناءً على ذلك، تقدم هذه الورقة تقييماً متكاملاً (مكانيًا، وتقنيًا، واقتصاديًا) لإمكانات الطاقة الشمسية الكهروضوئية في ليبيا. أجرت الدراسة مقارنة تحليلية لأداء تقنيتين رائدتين: السيليكون أحادي البلورة (Mono-Si) وتيلورايد الكاديوم (CdTe)، وذلك عبر سبع مناطق مناخية تمثل مدنًا رئيسية (طرابلس، بنغازي، مصراتة، سبها، مرزق، الكفرة، هون)، بالاعتماد على بيانات مستمدة من (Global Solar Atlas) و (NASA POWER) ولتحليل الأداء، تم تطبيق نماذج محاكاة علمية شملت نموذج الدائرة الواحدة، وخوارزميات حساب درجة حرارة الخلية، ومعامل السعة (CF). وقد تم اختيار هاتين التقنيتين نظراً لتوافقهما مع الظروف المناخية المتطرفة في ليبيا، خاصة في المناطق الصحراوية التي تتجاوز درجات الحرارة فيها 40 درجة مئوية، وتتسم ببيئة جافة ومغبرة. أظهرت النتائج تفوق مناطق الجنوب الليبي (مرزق، الكفرة، سبها) من حيث الإنتاجية؛ حيث سجلت مدينة مرزق أعلى معامل سعة (CF) بنسبة 24.77% باستخدام تقنية (CdTe)، التي أثبتت كفاءة عالية في البيئات الحارة بفضل انخفاض معاملها الحراري. وتوصي الدراسة بتبني خارطة طريق استراتيجية تعطي الأولوية لإنشاء محطات طاقة شمسية كبرى في الجنوب، مع تعزيز المنظومات الموزعة في المناطق الشمالية، بما يدعم سياسات الانتقال المستدام للطاقة في ليبيا.

الكلمات المفتاحية: السيليكون أحادي البلورة، كاديوم تيلورايد، الأداء الكهروضوئي، معامل السعة، الطاقة الشمسية في ليبيا.

المقدمة

تُصنّف ليبيا ضمن أكثر دول العالم اعتماداً على الوقود الأحفوري في توليد الكهرباء، إذ يُشكّل النفط والغاز الطبيعي المصدرين الوحيدين للطاقة الكهربائية، يبين الشكل 1 توزيع الوقود المستخدم في التوليد وفق عدة تقارير رسمية للشركة العامة للكهرباء بالإضافة إلى عدة دراسات بحثية كالآتي: 44% غاز طبيعي، و31% غاز ثقيل، و25% غاز خفيف (Asheibi & Khalil, 2013). وفي ظل النمو السكاني المتسارع وتنامي الطلب على الكهرباء، باتت الحاجة ملحة إلى مصادر بديلة ومستدامة لتوليد الطاقة (Ayora et al., 2023)، يكتسب هذا التحول أهمية بالغة ليس في ليبيا وحدها، بل على المستوى العالمي؛ إذ يُجمع الباحثون على أن الاحتراق المتصاعد للوقود الأحفوري يسبب تفاقم ظاهرة الاحتباس الحراري ويُهدد النظام البيئي بأسره، هذه المخاطر جعلت من الضروري بمكان البحث عن خيارات أخرى تقلّل من هذه المخاطر البيئية، حيث يظل أمر الحفاظ على البيئة من التحديات الكبيرة التي تواجه العالم وخاصة تلك المناطق في العالم التي تفتقر إلى كثافة مناسبة من الإشعاع الشمسي.



شكل 1. توليد الطاقة الكهربائية حسب الوقود المستخدم. (Asheibi & Khalil, 2013)

في المقابل لهذه التحديات، تمتلك ليبيا ثروة شمسية عالية واستثنائية؛ فمساحتها البالغة نحو 1,750,000 كم² تجعلها ثامن أكبر دول العالم مساحةً (Mohamed & Masood, 2018)، وما يزيد على 88% من هذه المساحة أراضي صحراوية مكشوفة لأشعة الشمس (Aldali et al., 2011). وتُقدّر بيانات الأطلس الشمسي العالمي متوسط الإشعاع الأفقي الكلي بنحو 8 كيلوواط ساعة/م²/يوم في المناطق الجنوبية، فيما يتجاوز متوسط ساعات السطوع الشمسي 3500 ساعة سنوياً ورغم هذه الإمكانيات الهائلة، تظل ليبيا متأخرة في استثمار طاقتها الشمسية مقارنةً بدول أخرى حدودية كمصر وتونس والمغرب وإيطاليا، وهو ما يستدعي دراسات علمية متكاملة تتجاوز التوصيف العام إلى تقديم تقييمات دقيقة تشمل المقارنة بين التقنيات، وحساب المؤشرات الاقتصادية، وتحديد أولويات النشر المكاني. تسعى هذه الورقة إلى ملء هذه الفجوة من خلال تقديم نموذج منهجي متكامل يخدم صانعي القرار والمستثمرين على حدٍ سواء في اتخاذ مشاريع مستدامة على المدى المتوسط والطويل تسهم بشكل فعال وجذري في التحول نحو الطاقة النظيفة

مراجعة الأدبيات والفجوة البحثية

حظي موضوع الطاقة الشمسية في ليبيا باهتمام متزايد في الأدبيات العلمية خلال العقد الأخير. فقد أشار (علي الشيباني وأشرف خليل 2013) إلى أن الكمية الهائلة من الإشعاع الشمسي الموزعة على مساحة ليبيا البالغة 1,750,000 كم² قادرة على تغطية احتياجات الكهرباء المستقبلية لليبيا ودول الجوار (Asheibi & Khalil, n.d.)، وفي السياق ذاته، أكدت دراسة (حكيم موريا، منعم المنفي 2020) أن ليبيا تحتل مكانة متميزة على مستوى العالم من حيث إمكانات إنتاج الطاقة الشمسية (Moria & Elmnifi, 2020). وعلى صعيد التقييم التقني، أجرى (يوسف قاسم وآخرون 2020) دراسة جدوى

لمحطة طاقة شمسية بقدرة 10 ميجاواط متصلة بالشبكة، وخلصوا إلى أن مدينتي الكفرة ومرزق تمثلان أفضل المواقع الممكنة لمحطات الطاقة الكهروضوئية (Yahya et al., 2020b). منهجي، وثق (مريم مهدي و نبيل عماري وآخرون 2023) دراسة تجريبية أجريت في المغرب أن تقنية CdTe تُظهر أداءً حراريًا متفوقاً في المناخات الصحراوية الحارة، وبهذا يمكن استخدام تقنية CdTe في البيئات الصحراوية (Mehdi et al., 2023) ، هذا التوجه يدعم تبني هذه التقنية في المناخات الليبية الحارة. وعلى مستوى أشمل والاستفادة منه بشكل كامل .

الفجوة البحثية والإسهام العلمي

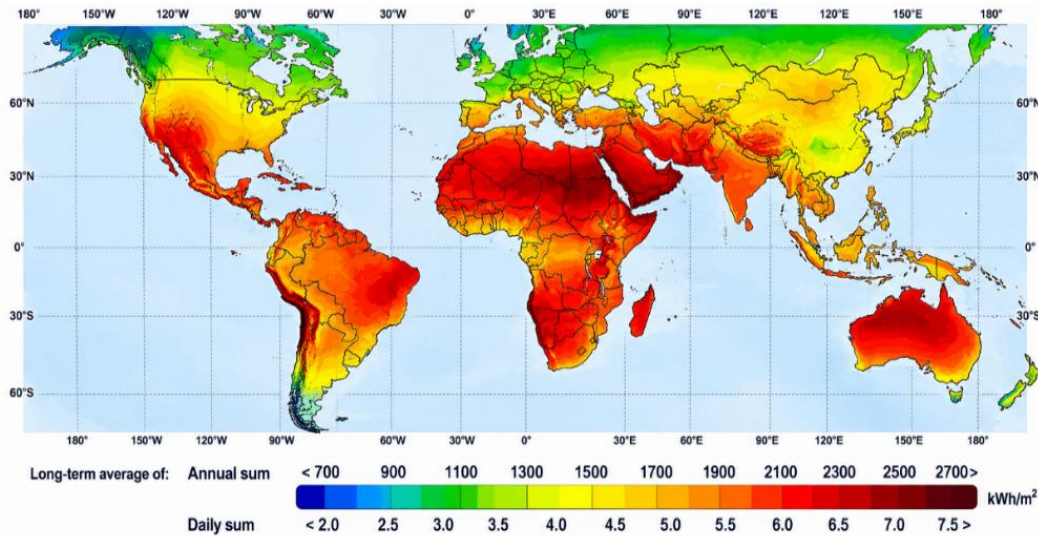
على الرغم من القيمة العلمية لهذه الأدبيات التي تم ذكرها ، تتسم معظمها بالطابع الوصفي، أو تركز على موقع واحد أو تقنية بعينها بمعزل عن التباين المناخي والمقارنة لأنواع الألواح الشمسية متعددة التقنيات ويتمثل الإسهام العلمي الأساسي لهذه الدراسة في تقديم مقارنة منهجية موحدة لتقنيتين رائدتين من تقنيات الخلايا الكهروضوئية عبر سبعة مدن ليبية مختلفة، بالإضافة إلى ربط التباين الإشعاعي بالأداء الحراري للتقنيات وبمؤشرات الجدوى الاقتصادية، وكذلك بناء منطوق علمي لترتيب أولويات النشر المكاني على المستوى الوطني للخروج بنتائج علمية تكون خارطة طريق مبنية على سياسات عملية للانتقال المستدام للطاقة باستخدام الألواح الشمسية في ليبيا.

منهجية بيانات الدراسة

اعتمدت الدراسة على نهج يدمج بين تحليل نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والتقييم التقني-الاقتصادي، وذلك وفق مخطط منهجي متسلسل يبدأ بجمع البيانات وينتهي بتحليل السياسات. استُخلصت بيانات الإشعاع الشمسي والمعطيات المناخية من مصدرين رئيسيين هما: الأطلس الشمسي العالمي (Global Solar Atlas) الذي يبين أن ليبيا موجودة في قلب الحزام الشمسي بكثافة إشعاع شمسي عالية ومنصة وكالة ناسا للطاقة المتجددة (NASA POWER) ، وتمت مقاطعتها مع سجلات محطات الأرصاد الجوية الليبية المتاحة للتحقق سلامة وصحة البيانات ، حيث شمل التحليل سبعة مواقع تمثل الأقاليم المناخية الليبية الرئيسية.

كثافة تدفق الإشعاع الشمسي في ليبيا

تعد الشمس المصدر الرئيس للطاقة الشمسية، وهو العامل الرئيس والأهم لاستغلال الطاقة الشمسية في العالم ، وليبيا لديها فرص كبيرة للاستفادة من شدة الإشعاع الشمسي الساقط عليها وذلك لموقعها في قلب الحزام الشمسي كما هو مبين في الشكل 2 (Global Solar Atlas, n.d.)، لذلك فإن فرص الاستفادة من الإشعاع الشمسي في توفير الطاقة الشمسية للحصول على الطاقة هو خيار استراتيجي ناجح يوفر للبلاد مليارات الدولارات، وبناءً على العديد من الدراسات وكذلك البيانات التي وفرتها محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية في العديد من المدن الليبية من منصة باور تكنولوجي والمعلومات التي نشرها مركز بحوث ودراسات الطاقة الشمسية فإن متوسط ساعات سطوع الشمس في ليبيا تصل إلى 3550 ساعة سنوياً، ويبلغ متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (6.4 كيلوواط /م²-يوم). وهذه معدلات عالية جداً تجعل الاستخدام الناجح للشمس للحصول على الطاقة بديلاً مهماً وناجحاً وذلك باستخدام التقنيات الحديثة لتقنيات الألواح الشمسية ، لذلك من المهم عمل مقارنات بين هذين النوعين من التقنيات



شكل 2. موقع ليبيا في قلب الحزام الشمسي . المصدر (Global Solar Atlas, n.d.)

جدول 1 مقارنة للإشعاع الشمسي المباشر العادي والإشعاع الأفقي الشامل والإشعاع الأفقي المنتشر لبعض المدن في ليبيا

العالم . المصدر (Global Solar Atlas, n.d.)

البلد	المدينة	الإشعاع الشمسي المباشر العادي	الإشعاع الأفقي العالمي	الإشعاع الأفقي المنتشر
أمريكا	سان برناردينو	2505.4	2031.5	508.7
إسبانيا	أشبيلية	2096.3	1847	596.9
أستراليا	سيدني	1785.1	1641.1	588.8
مصر	القاهرة	2035.3	2102.2	756.5
العراق	الموصل	1879.5	1871.9	700.9
السودان	الخرطوم	1843.9	2255	937.9
ليبيا	الجفرة	2300.4	2119.1	724
ليبيا	طرابلس	1887.5	1926.5	724.9
ليبيا	بنغازي	1960.1	1988.5	716.9
ليبيا	سبها	2205.4	2226.9	782.6
ليبيا	مرزق	2358.6	2338	772.4
ليبيا	سرت	1884.6	1979.4	763.1
ليبيا	اجدابيا	2021.7	2059.7	750.3
ليبيا	مصراثة	2005.8	1988.4	715

من الشكل 2 والذي بين أن وجود ليبيا في قلب الحزام الشمسي ، وكذلك ما بينه الجدول 1 يتضح أن ليبيا من الدول التي ينبغي أن تستثمر بجدية وفعالية في الاستفادة من الطاقة الشمسية والاستفادة من الإشعاع الشمسي باستخدام التقنيات الحديثة والمتطورة للألواح الشمسية وذلك لأسباب عدة منها:

1. موقع ليبيا الجغرافي يوفر لها ظروفًا مناسبة لاستغلال الطاقة الشمسية، نظرًا لطول فترات ضوء الشمس، وخاصة في المناطق الصحراوية.
2. مساحة ليبيا الشاسعة، التي تغطي الصحراء 88% منها، تجعل من الضروري استغلال هذه المناطق الجافة والاستفادة من الطاقة الشمسية في توليد الكهرباء لمدها والمناطق المجاورة باستخدام الألواح الشمسية.
3. يوضح الجدول 1 أن ليبيا تتمتع بمعدلات إشعاع شمسي سنوية عالية، مما يُسهل نجاح إقامة مشاريع للاستفادة من الطاقة الشمسية وتوليد الكهرباء وبدء التنمية المستدامة لهذه المشاريع، واستخدام تقنيات الألواح الشمسية المختلفة في ذلك .
4. قرب ليبيا من دول الاتحاد الأوروبي يُتيح لها فرصة القيام بمشاريع كبرى لإنتاج الطاقة الشمسية وتصديرها إلى الدول الأوروبية.

وبذلك فإنّ هذه الورقة تدرس مقارنة السيليكون أحادي البلورة (Mono-Si) وتيلورايد الكاديوم (CdTe) والتي يمكن الاستفادة منها في البدء في مشاريع مستدامة للطاقة البديلة، حيث سيتم تطبيق معادلات محكمة على هذين النوعين، وستكون المقارنة من حيث حساب درجة حرارة الخلية، وكفاءة الخلية بدلالة درجة الحرارة، وحساب معدل الطاقة للخلية، حيث تمت إختيار سبع مدن ليبية صحراوية منها ووسطى أخرى جنوبية للحصول على بيانات المحاكاة.



شكل 3. يبين مواقع المدن التي تم إختيارها للدراسة. المصدر (Global Solar Atlas, n.d.)

المعادلات الحاكمة

تم تطبيق ثلاثة نماذج رياضية معتمدة في الأدبيات العلمية المتخصصة لتقييم الأداء الكهروضوئي والتي باستخدامها سيتم اعتماد المقارنة .

نمذجة درجة حرارة الخلية

لتقدير درجة الحرارة التشغيلية الفعلية للخلية الكهروضوئية في الظروف الميدانية، اعتمدت المعادلة المبينة على مفهوم درجة حرارة تشغيل الخلية الاسمية حيث يمكن حساب درجة حرارة الخلية من المعادلة التالية (Ebhot & Tabakov, 2023):

$$T_{cell} = T_{amb} + \frac{(NOCT - 20) G_t}{800}$$

حيث :

T_{cell} : درجة حرارة الخلية الشمسية (°C)

T_{amb} : درجة حرارة الهواء المحيط (°C)

NOCT : درجة الحرارة التشغيلية الاسمية للخلية - (Nominal Operating Cell Temperature)

G_t : شدة الإشعاع الشمسي (W/m^2)

بفرضية أن قيم NOCT عند درجة حرارة 45 درجة مئوية ودرجة حرارة G_t 1000 W/m^2

الجدول 2 يوضح نتائج المحاكاة للمعادلة السابقة

T_{cell} (°C)	T_{amb} (°C)	المدينة
51.75	20.5	طرابلس
51.05	19.8	بنغازي
51.45	20.2	مصراتة
56.85	25.6	سبها
58.05	26.8	مرزق
57.55	26.3	الكفرة
54.75	23.5	هون

نمذجة كفاءة الألواح الشمسية بتأثير درجة الحرارة

هذه المعادلة تُستخدم لحساب كفاءة الألواح الكهروضوئية (PV) عند درجات حرارة مختلفة (Dubey et al., 2013a; Skoplaki & Palyvos, 2009) :

$$\eta(T) = \eta_{STC} [1 + \gamma(T_{cell} - 25)]$$

حيث:

$\eta(T)$: الكفاءة عند درجة حرارة T

η_{STC} : الكفاءة عند الظروف القياسية (25°C)

γ : معامل الحرارة للكفاءة - (Temperature coefficient)

T_{cell} : درجة حرارة الخلية الفعلية (°C)

حساب معامل الطاقة

يُعد معامل الطاقة (CF) مؤشراً كميّاً أساسياً يعكس مدى استثمار المنظومة لطاقتها الإنتاجية الاسمية على مدار العام، ويُحسب وفق العلاقة التالية (Ayora et al., 2023) :

$$CF = E_{actual} / (P_{rated} \times 8760)$$

حيث:

CF : معامل السعة (بدون وحدة)

E_{actual} : الطاقة الكهربائية الفعلية المنتجة سنوياً (kWh أو MWh)

P_{rated} : القدرة الاسمية المُقننة للمنظومة (kW أو MW)

8760 : إجمالي عدد ساعات السنة (ساعة/سنة)

سيتم محاكاة المعادلات المحكمة للحصول على نتائج تمكننا من تكون هي المعيار للمقارنة بين أداء السيليكون أحادي البلورة (Mono-Si) وتيلورايد الكادميوم ، وسيتم محاكاة المعادلات على موقع Desmos online على شبكة الانترنت <https://www.desmos.com/calculator> باستخدام لغة البايثون.

النتائج

المؤشرات الإشعاعية والمناخية

الجدول 3 يوضّح المؤشرات الإشعاعية والمناخية للمواقع السبعة المدروسة، المستخرجة من بيانات الأطلس الشمسي العالمي و NASA POWER.

المدينة	GHI (kWh/m ² /year)	DNI (kWh/m ² /year)	متوسط الحرارة (°C)	ساعات السطوح سنويًا
طرابلس	1940	1887.5	20.5	3340
بنغازي	1955	1960.1	19.8	3360
مصراتة	1965	2005.8	20.2	3380
سبها	2220	2205.4	25.6	3610
مرزق	2338	2358.6	26.8	3670
الكفرة	2255	2300.4	26.3	3650
هون	2190	2300.4	23.5	3520

يتبين من الجدول وجود تدرّج إشعاعي واضح من الشمال نحو الجنوب، إذ تتجاوز قيم GHI في مرزق نظيراتها في طرابلس بنسبة تزيد على 20%، وهو ما ينعكس مباشرةً على الطاقة الكهربائية المنتجة ومعاملات الأداء.

المقارنة بين التقنيات الرائدة

الجدول 4 مقارنة الأداء بين تقنيتي Mono-Si و CdTe في المواقع الرئيسية

المدينة	التقنية	العائد السنوي (kWh/year/kWp)	معامل السعة (CF %)	LCOE (USD/kWh)
طرابلس	Mono-Si	1607	18.35%	0.048
	CdTe	1400	15.98%	0.041
مرزق	Mono-Si	2232	25.47%	0.041
	CdTe	2170	24.77%	0.032
الكفرة	Mono-Si	2089	23.85%	0.044
	CdTe	2044	23.33%	0.034
سبها	Mono-Si	2068	23.61%	0.045
	CdTe	2015	23.00%	0.035
هون	Mono-Si	1998	22.81%	0.047
	CdTe	1940	22.13%	0.036

التحليل الحراري المقارن

استناداً إلى النتائج الكمية المستخلصة من تطبيق المعادلات السابقة والمعروضة في الجداول السابقة، يمكن استخلاص الملاحظات التحليلية الآتية:

تتميز تقنية كاديوم تيلورايد (CdTe) بمعامل حراري منخفض مقابل معامل حراري أعلى لتقنية السيليكون أحادي البلورة (Mono-Si) وهذا يعني أن انخفاض الكفاءة الناتج عن ارتفاع درجة حرارة الخلية يكون أقل حدةً في تقنية CdTe مقارنةً بتقنية Mono-Si، ويتجلى أثر هذا الفارق بوضوح خلال أشهر الصيف في المواقع الصحراوية الليبية التي تتجاوز فيها درجات الحرارة المحيطة 40°C، مثل مدن مرزق وسبها والكفرة، حيث ينعكس ذلك في انخفاض ملموس في الفاقد الحراري (Thermal Losses) لصالح تقنية CdTe. وتُعزّز هذه النتائج ما توصلت إليه دراسات سابقة أجريت في بيئات صحراوية مشابهة بمنطقة شمال أفريقيا، إذ أظهرت أن تقنية CdTe تحقق تفوقاً في نسبة الأداء (Performance Ratio) عند درجات الحرارة المرتفعة. علاوةً على ذلك، أكدت دراسات أخرى أن هذه التقنية تُبدي مقاومةً أفضل لتأثير تراكم الغبار (Soiling Effect) على سطح الألواح، مما يُحافظ على مستوى أعلى من الإنتاجية الكهربائية في البيئات الجافة والمغبرة. (Dupré et al., 2017), (Dubey et al., 2013b), et al., (2010) (Makrides et al., 2010).

المناقشة

دلالات التباين المكاني

يعكس التباين المكاني الواضح في قيم GHI و DNI والأداء الكهروضوئي عبر المواقع السبعة ضرورةً استراتيجية قصوى في تبني نهج تمييزي للنشر يُراعي الخصائص المناخية لكل منطقة. فالجنوب الليبي، ممثلاً في مرزق والكفرة وسبها وهون، يُقدّم مزيجاً استثنائياً من الإشعاع الشمسي العالي، مما يؤهله ليكون المحرك الأساسي لأي استراتيجية وطنية للطاقة المتجددة.

دلالات اختيار التقنية المناسبة

تُقدّم بيانات الأداء دليلاً علمياً على أن اختيار التقنية يجب أن يخضع لتحليل مناخي دقيق لا اعتبارات السعر وحدها. ففي المناطق الجنوبية الحارة، تُقدّم تقنية CdTe مزيجاً غير مسبوق من انخفاض الحساسية الحرارية، في المقابل، تحافظ تقنية Mono-Si على تفوقها في معامل الطاقة المطلق مما يجعلها الخيار الأمثل في التطبيقات التي تكون فيها المساحات صغيرة

القيود وحدود الدراسة

تجدر الإشارة إلى أن هذا التحليل اعتمد جزئياً على بيانات إشعاعية ثانوية مستمدة من الأقمار الصناعية، وغابت القياسات الميدانية طويلة الأمد لتأثير تراكم الغبار (Soiling) والتغيرات الفعلية في درجات حرارة الألواح التشغيلية في البيئة الصحراوية الليبية تحديداً.

التوصيات التطبيقية والسياساتية

- بناءً على التقييم التقني-الاقتصادي المُجرى، يمكن لصانعي القرار والجهات الاستثمارية الاستفادة من التوصيات الآتية:
1. اعتماد بروتوكول وطني موحد لترتيب أولويات المواقع الجغرافية استناداً إلى معايير كمية تجمع بين الإنتاجية والموقع من الشبكة القومية.
 2. إعطاء الأولوية الكاملة لتقنيات الأغشية الرقيقة (CdTe) و (CIGS) في العطاءات المتعلقة بمشاريع الجنوب الصحراوي.
 3. إطلاق برنامج وطني للرصد الميداني يهدف إلى جمع قياسات طويلة الأمد لمعدلات الغبار (Soiling) والإشعاع الفعلي ودرجات حرارة الألواح التشغيلية.
 4. تحسين البيئة التشريعية والاستثمارية، بما يشمل إصدار اتفاقيات شراء الطاقة (PPAs) وسنّ تشريعات جاذبة لتمويل مشاريع الطاقة المتجددة.
 5. تنفيذ خارطة طريق وطنية متدرجة وفق ثلاث مراحل:
 - المرحلة الأولى (1-3 سنوات): التحقق التجريبي من خلال محطات نموذجية في مرزق والكفرة وهون.
 - المرحلة الثانية (3-8 سنوات): التوسع الإقليمي في المحطات المتوسطة والكبرى.
 - المرحلة الثالثة (8-15 سنة): التكامل الوطني الذي يدمج الإنتاج الساحلي الموزع مع الإنتاج الصحراوي المركزي.

الخاتمة

قدّمت هذه الورقة إطاراً علمياً متكاملاً لتقييم الإمكانيات الكهروضوئية في ليبيا، ومقارنة لأداء نوعين من أنواع الألواح الشمسية، السيليكون أحادي البلورة (Mono-Si) وتيلورايد الكادميوم (CdTe) للاستفادة منه بشكل أكبر يمكن الاستثمار والتخطيط الدقيق ووضع خطط مستدامة في المدى الطويل للحصول على الكهرباء من الطاقة الشمسية. حيث أثبتت الدراسات أن التحول الشمسي في ليبيا ليس ضرورة بيئية فحسب، بل هو خيار استراتيجي ذا جدوى اقتصادية تنافسية تفوق في عدة مناطق تكلفة التوليد بالوقود الأحفوري التقليدي، تقف مدن مرزق والكفرة وهون في طليعة الواجهات الاستثمارية، مدعومة بتفوق تقنية CdTe في الأداء الحراري. في حين تُقدّم تقنية Mono-Si الحل الأمثل للتطبيقات الحضرية والمنظومات الموزعة في الشريط الساحلي. إن ترسيخ استراتيجية طاقة وطنية مبنية على هذه المعطيات العلمية، والمدعومة بالإصلاح التشريعي والاستثمار في البنية التحتية سيسهم في تمكين ليبيا من تحقيق انتقال طاقي آمن ومستدام، بما يدعم بناء منظومة طاقة أكثر كفاءة ومرونة، ويعزز الاعتماد على مصادر الطاقة النظيفة، بما يرسخ استقلالية قطاع الطاقة ويهيئ الطريق نحو مستقبل آمن منخفض الكربون.

المراجع

1. Aldali, Y., Henderson, D., & Muneer, T. (2011). A 50 MW very large-scale photovoltaic power plant for Al-Kufra, Libya: Energetic, economic and environmental impact analysis. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 6(4), 277–293. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctr015>
2. Asheibi, A., & Khalil, A. (2013.). THE RENEWABLE ENERGY IN LIBYA: PRESENT DIFFICULTIES AND REMEDIES.
3. Ayora, E., Munji, M., & Kabere, K. K. (2023). Performance Analysis of 600 Kw Grid-Tied Rooftop Solar Photovoltaic Systems at Strathmore University in Kenya (SSRN Scholarly Paper No. 4415956). *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4415956>
4. Dubey, S., Sarvaiya, J. N., & Seshadri, B. (2013a). Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World – A Review. *Energy Procedia*, 33, 311–321. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.05.072>
5. Dupré, O., Vaillon, R., & Green, M. A. (2017). A Thermal Model for the Design of Photovoltaic Devices. In O. Dupré, R. Vaillon, & M. A. Green (Eds), *Thermal Behavior of Photovoltaic Devices: Physics and Engineering* (pp. 75–103). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-49457-9_3
6. Ebhota, W. S., & Tabakov, P. Y. (2023). Influence of photovoltaic cell technologies and elevated temperature on photovoltaic system performance. *Ain Shams Engineering*

- Journal, 14(7), 101984. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101984>
7. Global Solar Atlas. (n.d.). Retrieved 10 April 2025, from <https://globalsolaratlas.info/map?s=1,20.5&m=site&c=1.116758,20.632324,11>
 8. Makrides, G., Zinsser, B., Norton, M., Georghiou, G. E., Schubert, M., & Werner, J. H. (2010). Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2), 754–762. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.021>
 9. Mehdi, M., Ammari, N., Alami Merrouni, A., El Gallassi, H., Dahmani, M., & Ghennioui, A. (2023). An experimental comparative analysis of different PV technologies performance including the influence of hot-arid climatic parameters: Toward a realistic yield assessment for desert locations. *Renewable Energy*, 205, 695–716. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.01.082>
 10. Mohamed, O. A., & Masood, S. H. (2018). A brief overview of solar and wind energy in Libya: Current trends and the future development. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 377(1), 012136. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/377/1/012136>
 11. Moria, H., & Elmnifi, M. (2020). Feasibility Study into Possibility Potentials and Challenges of Renewable Energy in Libya. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 29(03).
 12. Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, 83(5), 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>
 13. Yahya, W., Nassar, A., Mansur, F. A., Al-Nehari, M., & Alnakhlani, M. M. (2020a). Future Study of Renewable Energy in Libya. *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, 7(10), 1–6. <https://doi.org/10.22161/ijaers.710.1>

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 LOUJAS and/or the editor(s). LOUJAS 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.