Vol.4, No.1, Page 1528- 1544, 2026 https://doi.org/ 10.59628/jast.v3i5.2155 ISSN 2958-9568 JAST

مجلة جامعة صنعاء للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
Sana'a University Journal of Applied Sciences and Technology
https://journals.su.edu.ye/index.php/jast/

Assessment of the Potential Photovoltaic Power in Yemen Using Satellite Data and GIS

Adel M. Al-Weshali * and Abdullah M. Yaya.

Department of Agricultural Engineering and Modern Technologies, Faculty of Agriculture, Foods & Environment, Sana'a University, Sana'a Yemen.

***Corresponding author**: a.alweshali@su.edu.ye

ARTICLE INFO

Article history: 16 - August - 2025
Received: 07 - October -2025
Accepted: 23 - November - 2025
Published: 29 January 2026

KEYWORDS

1- solar energy
2- satellite data
3- photovoltaic power
4- renewable energy
5- SolarGIS

ABSTRACT

This study presents a comprehensive, high-resolution assessment of the theoretical and practical solar energy potential in the Republic of Yemen using satellite-derived data from the SolarGIS platform, available via the Global Solar Atlas. The analysis incorporates key solar radiation components including Direct Normal Irradiance (DNI), Diffuse Horizontal Irradiance (DIF), Global Horizontal Irradiance (GHI), and Global Tilted Irradiance at optimal tilt (GTI), along with auxiliary factors such as optimal tilt angle, air temperature, and elevation above sea level. GHI values across Yemen range between 5.46 and 6.88 kWh/m². Approximately 7.62% of the country's area exhibits the highest theoretical photovoltaic potential (6.8–7.05 kWh/m²), while 47.27% falls within a very high potential range (6.6–6.8 kWh/m²). For DNI, values vary between 3.76 and 7.29 kWh/m², with 1.45% of the land categorized as globally top-tier potential (7.2–7.75 kWh/m²), and 15.38% classified as high (6.7–7.2 kWh/m²). DIF values range from 1.83 to 2.76 kWh/m², with 38.5% of the area concentrated within the 2.1–2.2 kWh/m² range. GTI values vary between 5.66 and 7.27 kWh/m², where 13.64% of the country is classified under high irradiance (7.1–7.3 kWh/m²). Regarding practical photovoltaic output (PVOUT), around 2.35% of Yemen's area falls within the highest operational efficiency class (5.6–5.9 kWh/kWp), and 24.41% is classified as very high (5.4–5.6 kWh/kWp), while 90.09% of the land area achieves at least 5 kWh/kWp. Based on the three evaluation levels (0, 1, and 2), the assessed areas are 455,112 km², 235,748 km², and 219,364 km² respectively, representing 86.2%, 44.65%, and 41.54% of the total land area of Yemen (527,970 km²). Regions with PVOUT values above 5.6 kWh/kWp cover approximately 1.7–2% of the area, while the area exceeding the national average of 5.2 kWh/kWp amounts to 152,007 km². These findings highlight the abundance of solar resources in Yemen, demonstrating the country's strong potential for large-scale solar energy deployment. This supports the development of strategic, sustainable national energy plans aimed at electricity generation and long-term energy independence.

Vol.4, No.1, Page 1528- 1544, 2026 https://doi.org/ 10.59628/jast.v3i5.2155 ISSN 2958-9568 JAST

مجلة جامعة صنعاء للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
Sana'a University Journal of Applied Sciences and Technology
https://journals.su.edu.ye/index.php/jast/

SUN PUBLISHER

تقييم إمكانيات القدرة الكهروضوئية في اليمن باستخدام بيانات الأقمار الصناعية ونظم المعلومات الجغرافية

عادل محمد الوشلي* وعبد الله محمد يايه

قسم الهندسة الزراعية والتقنيات الحديثة، كلية الزراعة والأغذية والبيئة، جامعة صنعاء، صنعاء اليمن.

المؤلف: a.alweshali@su.edu.ye

معلومات المقالة

تاريخ المقالة: 16 ـ أغسطس -2025
تاريخ التقديم: 7 – أكتوبر -2025
تاريخ القبول: 23 – نوفمبر -2025
تاريخ النشر: 29 يناير 2026

الكلمات المفتاحية

01 الطاقة الشمسية
02 بيانات الأقمار الصناعية
03 القدرة الكهروضوئية
04 الطاقة المتجددة
05 سولارجيس (Solar GIS)

الملخص:

يتناول هذا البحث تقييماً شاملاً لإمكانات القدرة الكهروضوئية النظرية والعملية في الجمهورية اليمنية، بالاعتماد على بيانات الأقمار الصناعية الصادرة عن منصة "سولار جيس (SolarGIS) "المتاحة عبر "أطلس الطاقة الشمسية العالمي". تم تحليل عدة مؤشرات رئيسية، شملت الإشعاع الشمسي المباشر(DNI) ، الإشعاع المنتشر (DIF)، الإشعاع الأفقي الشامل (GHI)، والإشعاع على السطح المائل بالإمالة المثلى (GTI)، إلى جانب عوامل مساعدة مثل زاوية الميل المثلى، درجة حرارة الهواء، والارتفاع عن مستوى سطح البحر. أظهرت نتائج الإشعاع الشمسي الأفقي (GHI) أن القيم تراوحت بين (5.46–6.88 KWh/m^2) يومياً، حيث تمتلك 7.62% من مساحة اليمن أعلى إمكانات نظرية (6.8–7.05 KWh/m^2)، بينما تمتلك 47.27% إمكانات عالية جداً (6.6–6.8 KWh/m^2). أما الإشعاع المباشر (DNI) فقد بلغ أقصاه 7.29 وأدناه 3.76 KWh/m^2، مع تميّز 1.45% من مساحة اليمن بأعلى الإمكانات عالمياً (7.2–7.75 KWh/m^2)، ومساحة 15.38% ضمن فئة مرتفعة (6.7–7.2 KWh/m^2). وفيما يخص الإشعاع المنتشر (DIF)، تراوحت القيم بين 1.83 و2.76 KWh/m^2، حيث تقع 38.5% من المساحة ضمن الفئة (2.1–2.2 KWh/m^2). أما الإشعاع المائل (GTI_{OPTA})، فقد بلغت أعلى قيمة 7.27 وأدناها 5.66 KWh/m^2، مع 13.64% من المساحة ضمن فئة عالية (7.1–7.3 KWh/m^2). وفيما يتعلق بالإمكانات الكهروضوئية العملية (PV_{OUT})، بينت النتائج أن 2.35% من المساحة تمتلك أعلى كفاءة إنتاج (5.6–5.9 KWh/KWP) يومياً، و24.41% ضمن فئة عالية جداً (5.4–5.6 KWh/KWP)، بينما لا تقل الإمكانات في 90.09% من المساحة عن (5 KWh/KWP). وفقًا لمستويات التقييم الثلاثة (0، 1، 2)، بلغت المساحات 455,112 كم²، 235,748 كم²، و219,364 كم² على التوالي، ما يعادل 86.2%، 44.65%، و41.54% من إجمالي مساحة اليمن. بينما غطّت المناطق ذات الإمكانات الأعلى من (5.6 KWh/KWP) نحو 1.7–2% من المساحة، وبلغت المساحة التي تفوق الإمكانات فيها المتوسط الوطني (5.2 KWh/KWP) حوالي 152,007 كم². تؤكد هذه النتائج توفر موارد شمسية واعدة في اليمن، ما يعزز إمكانية الاعتماد على الطاقة الشمسية كخيار استراتيجي مستدام لإنتاج الكهرباء وتحقيق التنمية.

1. المقدمة:

بينت إحصائيات وكالة الطاقة الدولية [1] أن احتياطيات النفط المؤكدة بالعالم حوالي 1702 بليون برميل أي ما يعادل 10300 إكساجول (1 إكسا = 1018)، منها 3 بليون برميل بالجمهورية اليمنية. كما أن احتياطيات الغاز الطبيعي المؤكدة بالعالم حوالي 229 تريليون م^3 (أي حوالي 8900 إكساجول)، منها حوالي 0.27 تريليون م^3 بالجمهورية اليمنية. إن قدرة الطاقة المتجددة بالعالم تمثل حوالي 2537 جيجاوات (47% طاقة مائية و25% رياح و23% شمسية) منها 0.253 جيجاوات (أي 253 ميجاواط) طاقة شمسية فقط بالجمهورية اليمنية.

أكد [2] أن جميع أراضي اليمن تقريبًا مواتية لإنتاج الطاقة الشمسية. حيث بينت النتائج أن نسبة 30.8389% من مساحة اليمن ملائمة للغاية، بينما نسبة 69.1589% تعتبر مناسبة بشكل متوسط ونسبة أقل من 0.01% أقل ملاءمة، وذلك بشكل رئيسي ضمن المناطق الغربية الجبلية. وأشار إلى أن المناطق الواعدة تتركز في الشرق والجنوب والشمال، حيث تسود إشعاعات عالية وتضاريس مسطحة نسبيًا وأراضٍ يسهل الوصول إليها.

أشار تقرير [3] أن الإنتاجية السنوية في اليمن بلغت حوالي 741 جيجاوات–ساعة (مقارنة مع قدرة 1 ميجاواط وإنتاجية 2 جيجاوات–ساعة في عام 2010). خلال الفترة 2014–2016، تضاعفت القدرة الكهروضوئية حوالي 50 ضعفا، حيث أنها توفر الكهرباء– ولو جزئيا – لما يزيد عن نسبة 50% من البيوت، عن طريق منظومات كهروضوئية بمتوسط قدرة 150 واط/للأسرة غطت حوالي 75% من البيوت في المناطق الحضرية، وحولي 50% من البيوت في الريف. هذا جعل الطاقة الكهروضوئية المصدر الرئيسي للكهرباء في 13 محافظة من أصل 22 محافظة. هنالك عوائق حدت من التوسع في انتشارا الطاقة الشمسية منذ 2017، مثل غياب التأهيل والرقابة على الجودة وتطبيق معايير الصناعة والتوزيع، بالإضافة إلى ضعف كل من التنافس بين الموردين والثقة بأمداد الكهروضوئية والعمر الحقيقي للمنظومة، بالإضافة إلى التكاليف المرتفعة جداً للأنظمة الكهروضوئية، كل ذلك أدى إلى تباطؤ وتوقف انتشار الطاقة الشمسية. وبدلا عن ذلك، عادت مولدات الديزل التجارية الكبيرة إلى التواجد، صانعة تطورا أكثر كلفة مادية، وعائقا طويل المدى ضد أي تخطيط اقتصادي مستقبلي لتمكين الطاقة الشمسية النظيفة والمتجددة.

أهداف البحث:

1 – تحديد مدى إمكانية الاستفادة من إمكانات الطاقة الشمسية الكهروضوئية وأبراج التسخين في إنتاج الطاقة الكهربائية في الجمهورية اليمنية، وذلك باستخدام بيانات الأقمار الصناعية الصادرة عن منصة "سولار جيس" (SolarGIS) المتاحة عبر "أطلس الطاقة الشمسية العالمي" [4]. تم تحليل عدة مؤشرات رئيسية بواسطة [5] والتي تضم إشعاع كل من المباشر، المنتشر، الأفقي الشامل، والأفقي ذو الإمالة المثلى. كذلك العوامل المساعدة والتي تضم كل زاويا الإمالة المثلى للوحدات الشمسية ودرجات حرارة الهواء الجوي والطبوغرافيا الارتفاع عن سطح البحر في اليمن بشكل عام. أيضاً إمكانات الطاقة الكهروضوئية النظرية والعملية للمستويات الثلاثة 0، 1، و2. وذلك لكل محافظة بالجمهورية اليمنية.

2 – زيادة الوعي وتحفيز الاهتمام بالاستثمار في إنتاج الطاقة الكهروضوئية وإثراء النقاش العام بالطاقة المتجددة الشمسية.

3 – دعم صانعي السياسات ومطوري المشاريع والقطاعات المالية والأكاديمية ووسائط الإعلام ومحترفي الاتصال، فضلاً عن المهتمين.

2. مواد وطرق العمل:

نظراً لضعف قواعد البيانات المناخية في الجمهورية اليمنية، تم الاستعانة بقواعد البيانات المناخية المتحصل عليها من الخرائط المناخية للأقمار الصناعية، والتي تشمل فترات زمنية طويلة لكل نقطة أو موقع بالجمهورية اليمنية.

بيانات الخرائط المناخية للأقمار الصناعية: تم حساب البيانات التي تمثل مورد الطاقة الشمسي والمخرجات للإمكانات القدرة الكهروضوئية لكل نقطة في الجمهورية اليمنية بواسطة شركة سولار جيس (https://solargis.com)، والتي يتم إصدارها عبر موقع أطلس العالمي للطاقة الشمسية، وهي أداة قائمة على الويب (https://globalsolaratlas.info/) بالإضافة إلى تقرير برنامج مساعد إدارة الطاقة [5].

طبقات البيانات الأساسية والمساعدة:

(1) الإشعاع الطبيعي المباشر (DNI)، يُشير إلى كمية التدفق الشمسي (إشعاع الموجة القصيرة الشمسي) الذي يصل لسطح المنظومة الشمسية أو الأرض بالوضع الطبيعي بالنسبة للشمس. وهو العامل الأكثر أهمية لتقييم تركيز الطاقة الشمسية (أبراج التسخين الحراري) (Direct normal irradiation 2019).

(2) الإشعاع الأفقي الشامل GHI (الإمكانات الكهروضوئية النظرية)، يُشير إلى كمية الموارد الشمسية (إشعاع الموجة القصيرة) المكون من مجموع الإشعاع المباشر والمنتشر المستلم على سطح أفقي على الأرض (Global horizontal irradiation 2019).

(3) الإشعاع الأفقي المنتشر (DIF) هو أشعة الشمس المبعثرة أو المشتتة نتيجة وجود السحب، والرطوبة، الأتربة التي يمكن استقبالها على سطح الأرض أو المنظومة الشمسية من جميع الاتجاهات (Global horizontal irradiation 2019).

(4) الإشعاع المائل بزاوية مثالية، هو الإشعاع الأفقي الشامل عند زاوية عمودية لسقوط الإشعاع الشمسي.

(5) زاوية الإمالة المثلى، هي زاوية إمالة الوحدات الكهروضوئية أو الواح التسخين الشمسي للحصول على الإشعاع المائل بزاوية مثالية.

(6) درجة حرارة الهواء الجوي، هي متوسط درجة حرارة الهواء باليوم. أن درجة حرارة الهواء الجوي تعد ثاني أهم عامل طبيعي يؤثر على إنتاج الطاقة الكهروضوئية (Air temperature 2019).

(7) ارتفاع التضاريس، هو الارتفاع عن مستوى سطح البحر.

(8) إمكانية الطاقة الكهروضوئية العملية، هي ناتج الطاقة الكهروضوئية لنظام الكهروضوئية على المدى الطويل.

هنالك العديد من طبقات البيانات التي يتم استخدامها لإنشاء المناطق المستبعدة من تقييم إمكانات الطاقة الكهروضوئية العملية في الجمهورية اليمنية، حيث أن تحديد المناطق التي يمكن فيها إنشاء محطة كهروضوئية الكبيرة يكون مقيداً إما مادياً أو تقنياً أو حيثما توجد قيود تنظيمية (PV Power Potential 2019).

إن مجموعة البيانات الأساسية المستخدمة لتحليل وتحديد مناطق إمكانيات الطاقة الكهروضوئية العملية تكون على ثلاثة مستويات (0)، (1)، (2)، وهم على النحو التالي:

- **المستوى 0**، فيه يُفترض أن الجمهورية اليمنية يمكنها أن تصل إلى إمكاناتها الكهروضوئية العملية الكاملة دون أي عوائق أو قيود تقنية.
- **المستوى** 1، الذي فيه يتم تحديد "مناطق الاستبعاد" بالجمهورية اليمنية بسبب قيود استخدام الأراضي المادية أو التقنية. مثل مناطق التضاريس المعقدة، المناطق داخل المدن، مناطق التجمعات السكانية غير المأهولة، الغابات وكثافة الغطاء النباتي، المسطحات المائية الكبيرة.
- **المستوى** 2، والذي يتم فيه تحديد واستبعاد المناطق الغير مناسبة بسبب القيود التنظيمية على استخدام الأراضي مثل الأراضي الزراعية والمناطق المحمية.

حدود الدراسة أخذت في الاعتبار التالي:

(أ) محطة الطاقة الكهروضوئية (حجم كبير) تتكون من هياكل قائمة بذاتها مع وحدات كهروضوئية بلورية أحادية الوجه، مثبتة

بإمالة لإنتاج اقصى طاقة سنوية، مع استخدام محولات عالية الكفاءة [5].

(ب) يأخذ **الحساب** في الاعتبار الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة الهواء والتضاريس لمحاكاة تحويل خسائر الطاقة في الوحدات الكهروضوئية والمكونات الأخرى لمحطة الكهروضوئية. حيث تفترض المحاكاة خسارة قدرها 3.5% بسبب الأوساخ والغبار. كما يُفترض أن يكون التأثير التراكمي لخسائر التحويل الأخرى بما في ذلك التظليل بين الصفوف، وعدم التوافق، والعاكسات، والكابلات، والمحولات 7.5%. [5].

(ج) تمت محاكاة البيانات الأساسية بفترات زمنية مدتها 10 أو 15 أو 30 دقيقة، على حسب منطقة القمر الصناعي، وتمثل البيانات المجمعة متوسطات سنوية وشهرية طويلة المدى لإجمالي PVOUT اليومي، محسوبة للفترة من 1994 إلى 1999 ثم إلى 2007 ثم إلى 2018 بدقة مكانية تبلغ 30 ثانية قوسية (اسميًا 1 كم) [5].

(د) وبالنسبة **لعدم اليقين** النموذجي في بيانات الإشعاع الشمسي المدخلة فيقدر بما يتراوح بين ±4% و±8%، ويصل إلى ±10% في المناطق ذات الجغرافيا المعقدة [5].

3. النتائج والمناقشة:

مؤشرات الطاقة الشمسية والعوامل المؤثرة فيها بالجمهورية اليمنية

يتضح من الجداول (1) و(2) و(3) قيم المقاييس الإحصائية لمؤشرات الطاقة الشمسية والعوامل المؤثرة فيها بجميع محافظات الجمهورية اليمنية، كما أن البيانات التي في الجدول (3) تبين توزيع الفئات، ونسبها، والمساحات لتلك المؤشرات والعوامل التي تتضمن الإشعاع (بوحدة kWh/m²) لكل من، الأفقي الشامل GHI (الإمكانات النظرية)، الطبيعي المباشر DNI (**اللازم لإنتاج الطاقة من الاشعاع الشمسي بواسطة أبراج تسخين المياه**)، الأفقي المنتشر DIF، الأفقي ذو الإمالة الأمثل GTI_{opta}، بالإضافة إلى الإمكانات العملية PV_{OUT} (**اللازم لإنتاج الطاقة من الخلايا الشمسية الكهروضوئية**) في المستوى 1 (بوحدة kWh/kWp)، وكذلك العوامل المؤثرة التي تتضمن كل من درجة حرارة الهواء الجوي TEMP (درجة مئوية)، زاوية إمالة مثلى للوحدات OPTA (درجة)، وارتفاع التضاريس ELE (متر).

(1) مؤشر الإمكانات الكهروضوئية النظرية (GHI)

يبين الجدول (1) قيم المقياس الإحصائية لمؤشر الإمكانات الكهروضوئية النظرية GHI، حيث أن قيمتي المتوسط والوسيط هما 6.47 و6.57 kWh/m^2 على التوالي، بينما أعلى وأقل قيمة كانتا 6.88 و5.46 kWh/m^2 على التوالي وبمدى طوله بلغ 1.42 kWh/m^2. في حين أن قيم الإمكانات الكهروضوئية النظرية لنسبتي 90% و75% (الربع الثالث) من الإمكانات بلغتا 6.73 و6.65 kWh/m^2 على التوالي، وبفارق بينهما قدره 0.08 kWh/m^2.

من خلال العلاقة الإحصائية السابقة يتبين أن توزيع قيم الإمكانات الكهروضوئية النظرية GHI يميل في اتجاه القيمة الأعلى 6.88 kWh/m^2، كما أن معظم قيم الإمكانات النظرية ترتكز أعلى المتوسط الحسابي، والذي يعد الأعلى بالعالم. إن النتائج بالجدول (3) توضح توزيع فئات الإمكانات النظرية (الإشعاع الأفقي GHI)، والتي تبين أن حوالي 47.27% من مساحة الأراضي اليمنية ذات إمكانات كهروضوئية نظرية GHI (تميل نحو القيمة الأعلى) تتراوح بين 6.6–6.8 kWh/m^2، كما أن حوالي 7.62% من مساحة اليمن، تكون من بين أعلى إمكانات كهروضوئية نظرية بالعالم، وتتراوح بين 6.8–7.05. وكانت المؤشرات الإحصائية لمتوسط واعلى واقل قيمة

لتوزيع الإشعاع الأفقي الشامل الإمكانات النظرية على مستوى المحافظات اليمنية (جدول 2) كما يلي:

مؤشر متوسط الإشعاع الأفقي الشامل: بلغ المتوسط العام لمؤشر الإشعاع الأفقي الشامل في اليمن 6.47 kWh/m^2، حيث احتلت محافظة البيضاء المركز الأول بمتوسط 6.65 kWh/m^2، بينما حصلت محافظة الحديدة على المركز الأخير بمتوسط 5.65 kWh/m^2.

الجدول (1) يبين قراءات المقاييس الإحصائية لإمكانات الموارد الشمسية بالجمهورية اليمنية.

قراءة المقياس الإحصائي للمؤشر	مؤشرات الإمكانات الكهروضوئية					العوامل المؤثرة على الكهروضوئية		
	الإمكانات الكهروضوئية العملية PVOUT kWh/kWp	الإشعاع الطبيعي المباشر DNI kWh/m²	الإمكانات النظرية (إشعاع أفقي) GHI kWh/m²	الإشعاع الأفقي المنتشر DIF kWh/m²	إشعاع مائل بزاوية مثالية GTI_{opta} kWh/m²	درجة حرارة الهواء TEMP مئوية	زاوية إمالة مثلى للوحدات OPTA درجة	ارتفاع التضاريس ELE متر
اعلى قيمة 99.5%	5.69	7.29	6.88	2.76	7.27	30.9	25	3666
القيمة لـ 90%	5.5	6.78	6.73	2.43	7.13	29.1	24	1780
القيمة لـ 75%	5.41	6.53	6.65	2.34	7.05	27.8	23	1175
لـ 50% الوسيط	5.3	6.17	6.57	2.21	6.96	26.5	21	877
المتوسط	5.24	6.04	6.47	2.22	6.83	25.8	21	935
القيمة لـ 25%	5.18	5.84	6.41	2.09	6.75	24.4	20	551
القيمة لـ 10%	4.8	4.86	6	1.99	6.21	21.3	18	273
اقل قيمة 0.5%	4.32	3.76	5.46	1.83	5.66	15.6	15	7

- **مؤشر أعلى قيم الإشعاع الأفقي الشامل:** أن معدل أعلى قيم الإشعاع الأفقي الشامل في اليمن بلغ 6.88 kWh/m^2، حيث احتلت محافظة حضرموت المركز الأول بأعلى قيمة بلغت 6.91 kWh/m^2، بينما حصلت محافظة الحديدة على المركز الأخير لأعلى قيمة بلغت 5.93 kWh/m^2.

- **مؤشر أدني قيم الإشعاع الأفقي الشامل:** أن معدل أدني قيم الإشعاع الأفقي الشامل في اليمن بلغ 5.46 kWh/m^2، كما احتلت محافظة مارب على المركز الأول لأدني قيمة بلغت 6.47 kWh/m^2، بينما حصلت محافظة المحويت على المركز الأخير لأدني قيمة بلغت 4.97 kWh/m^2.

(2) مؤشر الإشعاع الطبيعي المباشر (DNI) في الجمهورية اليمنية.

إن النتائج بالجدول (1) تبين قيم المقاييس الإحصائية المختلفة للإشعاع الطبيعي المباشر DNI **(اللازم لإنتاج الطاقة من الاشعاع الشمسي بواسطة أبراج تسخين المياه)** بالجمهورية اليمنية، حيث بلغت قيمة المتوسط 6.04 kWh/m^2، في حين أن أقل وأعلى قيمة كانتا 3.76 و7.29 kWh/m^2 على التوالي، وبمدى طوله 3.53 kWh/m^2. بينما القيمة لنسبة 50% (الوسيط) كانت 6.17 kWh/m^2، والقيم لنسبة 75% و90% كانتا

6.78 و6.53 kWh/m^2 على التوالي. من خلال العلاقة الإحصائية السابقة يتبين أن توزيع قيم الإشعاع المباشر DNI يميل في اتجاه القيمة الأعلى 7.29 kWh/m^2، كما أن معظم قيم الإشعاع المباشر DNI ترتكز أعلى من المتوسط الحسابي (6.04 kWh/m^2) بالجمهورية اليمنية.

إن النتائج بالجدول (3) توضح توزيع فئات الإشعاع الطبيعي المباشر بالجمهورية اليمنية، والتي تبين أن حوالي 1.45% من مساحة الجمهورية اليمنية، تكون من بين أعلى إمكانات للإشعاع الطبيعي المباشر بالعالم لإنتاج الطاقة الكهربائية (أبراج تركيز التسخين الشمسية)، والتي تتراوح بين 7.2–7.75 kWh/m^2.

كما أن حوالي 15.38% من مساحة الأراضي اليمنية تمتلك توزيع إشعاع طبيعي مباشر (يميل نحو أعلى قيمة من DNI) تتراوح بين 6.7–7.2 kWh/m^2. في حين حوالي 34.79% من مساحة اليمن تمتلك توزيع إشعاع طبيعي مباشر (أعلى من المتوسط) وتتراوح بين 6.2–6.7 kWh/m^2. أن المؤشرات الإحصائية المتوسط واعلى واقل قيمة لتوزيع قيم الإشعاع الطبيعي المباشر على مستوى المحافظات اليمنية كما بالجدول(2) كانت كالتالي:

مؤشر متوسط قيم الإشعاع الطبيعي المباشر: أن متوسط العام لقيم الإشعاع الطبيعي المباشر في اليمن بلغ 6.04 kWh/m^2، حيث احتلت محافظة البيضاء المركز الأول بمتوسط عام بلغ 6.7 kWh/m^2، بينما حصلت محافظة الحديدة على المركز الأخير بمتوسط عام بلغ 4.04 kWh/m^2.

– **مؤشر أعلى قيم الإشعاع الطبيعي المباشر:** أن معدل أعلى قيم الإشعاع الطبيعي المباشر في اليمن بلغ 7.29 kWh/m^2، حيث احتلت محافظة حضرموت المركز الأول لأعلى قيمة بلغ 7.41 kWh/m^2، بينما حصلت محافظة الحديدة على المركز الأخير لأعلى قيمة بلغت 4.63 kWh/m^2.

– **مؤشر أدني قيم الإشعاع طبيعي المباشر:** أن المعدل الأدنى للإشعاع الطبيعي المباشر في اليمن بلغ 3.76 kWh/m^2، حيث احتلت أمانة العاصمة على المركز الأول لأدني قيمة بلغت 6.02 kWh/m^2، بينما حصلت محافظة المحويت على المركز الأخير لأدني قيمة بلغت 3.13 kWh/m^2.

(3) مؤشر الإشعاع الأفقي المنتشر (DIF)

إن النتائج التي بالجدول (1) تبين قيم كل مقياس إحصائي للإشعاع الأفقي المنتشر DIF بوحدة كيلوواط–ساعة /م^2، لفترة طويلة الأجل. حيث بلغت قيمة المتوسط 2.22 kWh/m^2. وتراوحت القيم بين أقل قيمة 1.83 kWh/m^2، وأعلى قيمة 2.76 kWh/m^2، وبمدى طوله 0.93 kWh/m^2. في حين أن القيمة لنسبة 50% (الوسيط) بلغت 2.21 kWh/m^2، وقد تفاوت الإشعاع المنتشر DIF بين قيمة الربع الأول (نسبة 25% من الإشعاع DIF) والتي كانت 2.09 kWh/m^2، وبين قيمة الربع الثالث (نسبة 75% من الإشعاع DIF) والتي كانت 2.34 kWh/m^2، بفارق طوله 0.25 kWh/m^2. من خلال العلاقة الإحصائية السابقة يتبين أن توزيع قيم الإشعاع المنتشر بالجمهورية اليمنية يميل قليلا في اتجاه القيمة الأصغر 1.83 kWh/m^2، كما أن معظم قيم الإشعاع المنتشر بالجمهورية اليمنية تكون اقل من المتوسط الحسابي، وذلك يعود لتأثير تشتت وامتصاص الاشعة الشمسية الذي ينتج عن وجود سحب وبخار ماء وغبار.

إن النتائج الموضحة بالجدول (3) تبين أن حوالي 1.9% من مساحة الأراضي اليمنية ذات قيم إشعاع منتشر (DIF) تتراوح بين 1.7–1.9 kWh/m^2، كما أن حوالي 26.3% من مساحة الأراضي اليمنية، ذات إشعاع منتشر يتراوح بين 1.9–2.1 kWh/m^2.

(4) مؤشر الإشعاع الأفقي ذو الإمالة الأمثل (GTI_{OPTA})

أن بيانات الإشعاع الأفقي الشامل (الإمكانات النظرية GHI) والإشعاع الطبيعي المباشر DNI يتم استخدامهما لحساب الإشعاع الأفقي ذو الإمالة المثلى GTI_{OPTA}، الذي يتم استلامه بواسطة سطح الوحدات الكهروضوئية (أي الإشعاع المستلم بالوحدات المائلة بزاوية مثلى والمتعقبة للشمس).

الجدول (2) يبين متوسط واقل واعلى قيمة يومية لمؤشرات الأشعة الشمسية وإمكانية إنتاجية الكهروضوئية لكل محافظة بالجمهورية اليمنية

المحافظة	ناتج الكهروضوئية (PV_{OUT}) kWh/kWp	الإشعاع الطبيعي المباشر (DNI) kWh/m²	الإشعاع الأفقي الشامل (GHI) kWh/m²	الإشعاع الأفقي المنتشر (DIF) kWh/m²	إشعاع الإمالة بزاوية مثالية (GTI_{opta}) kWh/m²	درجة حرارة الهواء (C^O)	زاوية الإمالة المثلى (OPTA) °	الارتفاع عن سطح البحر (m)
	أعلى–اقل ,متوسط	أعلى–اقل ,متوسط	أعلى–اقل ,متوسط	أعلى–اقل ,متوسط	أعلى–اقل ,متوسط	أعلى–اقل ,متوسط	أعلى–اقل ,متوسط	أعلى–اقل ,متوسط
البيضاء	5.46,5.06 - 5.62	6.7,5.62 - 7.01	6.65,6.21 - 6.77	1.98,1.87 - 2.13	6.98,6.49 - 7.12	20,14.6 - 24.4	19,18 – 20	1950,1334 – 2733
الأمانة	5.42,5.25 - 5.54	6.47,6.02 - 6.68	6.55,6.34 - 6.68	2.08,2.00 - 2.10	6.91,6.66 - 7.07	19.2,15.8 - 20.0	20,20 – 21	2234, 2123 – 2651
صنعاء	5.36,4.42 - 5.74	6.21,4.01 - 7.00	6.49,5.51 - 6.82	2.11,1.90 - 2.58	6.83,5.70 - 7.21	19.6,12.9 - 28.5	20,17 – 21	2084,721 – 3053
المهرة	5.35,4.81 - 5.63	6.37,5.03 - 7.04	6.55,5.84 - 6.79	2.12,1.90 - 2.36	6.96,6.17 - 7.22	25.9,22.8 - 28.9	22,19 – 25	620,9 – 1221
الجوف	5.32,5.20 - 5.57	6.11,5.86 - 6.77	6.58,6.43 - 6.70	2.31,2.02 - 2.39	6.97,6.80 - 7.10	25.8,18.9 - 27.5	22,20 – 23	1146,812 – 2180
حضرموت	5.32,4.50 - 5.71	6.3,4.39 - 7.41	6.57,5.53 - 6.91	2.18,1.80 - 2.42	6.97,5.72 - 7.30	27.1,20.6 - 29.5	22,14 – 25	770,20 – 1717
شبوة	5.32,4.95 - 5.62	6.32,5.35 - 7.13	6.61,6.18 - 6.85	2.15,1.90 - 2.39	6.95,6.42 - 7.22	25.6,19.4 - 28.3	20,17 – 23	1000,11 – 1961
عمران	5.31,4.62 - 5.73	6.02,4.44 - 7.01	6.45,5.65 - 6.79	2.2,1.96 - 2.50	6.81,5.85 - 7.19	21.4,13.5 - 27.6	21,18 – 22	1825,994 – 3084
الضالع	5.3,4.91 - 5.56	6.12,5.12 - 6.75	6.47,6.13 - 6.67	2.1,1.87 - 2.35	6.76,6.33 - 7.00	20.6,14.9 - 24.8	19,16 – 20	1709,881 – 2647
صعدة	5.29,4.24 - 5.55	6.09,3.75 - 6.75	6.43,5.32 - 6.67	2.16,1.96 - 2.65	6.81,5.52 - 7.08	22,16.0 - 30.8	21,18 – 23	1739,385 – 2639
مارب	5.29,5.21 - 5.61	6.11,5.87 - 7.01	6.57,6.47 - 6.81	2.27,1.95 - 2.38	6.93,6.78 - 7.16	25.5,18.5 - 27.6	21,19 – 22	1222,828 – 2197
ذمار	5.23,4.35 - 5.62	5.92,3.86 - 6.98	6.36,5.51 - 6.72	2.16,1.88 - 2.65	6.67,5.70 - 7.09	20.4,14.1 - 30.0	19,17 – 21	1939,362 – 2788
إب	5.06,4.60 - 5.46	5.55,4.44 - 6.62	6.18,5.68 - 6.49	2.19,1.91 - 2.53	6.45,5.87 - 6.82	20.7,12.8 - 29.1	19,17 – 20	1854,601 – 3004
أبين	5.01,4.44 - 5.58	5.45,4.22 - 6.87	6.22,5.50 - 6.69	2.31,1.92 - 2.55	6.46,5.65 - 7.01	25.3,17.7 - 28.7	17,14 – 19	685,3 – 2160
تعز	4.81,4.46 - 5.16	4.92,4.15 - 5.72	6,5.62 - 6.33	2.4,2.11 - 2.59	6.23,5.82 - 6.57	26.9,18.4 - 30.7	17,15 – 18	752,1 – 2230
لحج	4.81,4.58 - 5.53	4.91,4.40 - 6.83	6.03,5.78 - 6.66	2.44,1.93 - 2.57	6.23,5.93 - 6.99	26.6,17.9 - 29.3	16,14 – 19	560,3 – 2227
عدن	4.8,4.64 - 4.90	4.86,4.48 - 5.09	6.05,5.88 - 6.15	2.51,2.45 - 2.63	6.24,6.05 - 6.37	29,27.6 - 29.4	16,14 – 17	24,0 – 186
المحويت	4.72,3.92 - 5.46	4.59,3.13 - 6.38	5.83,4.97 - 6.41	2.46,2.00 - 2.71	6.07,5.07 - 6.75	24.9,13.5 - 30.9	18,15 – 21	1299,191 – 3074
ريمة	4.7,3.94 - 5.21	4.54,3.17 - 5.52	5.83,4.99 - 6.30	2.44,2.21 - 2.67	6.05,5.09 - 6.59	25,16.7 - 30.4	18,15 – 19	1263,331 – 2579
سقطري	4.66,4.30 - 4.94	4.69,4.01 - 5.28	5.76,5.30 - 6.17	2.38,2.23 - 2.49	5.93,5.44 - 6.34	25.4,23.0 - 27.0	15,12 – 18	303,0 – 723
حجة	4.59,4.32 - 5.12	4.22,3.71 - 5.39	5.75,5.46 - 6.26	2.65,2.32 - 2.78	5.99,5.63 - 6.58	28.7,21.0 - 31.3	19,17 – 20	533,4 – 1977
الحديدة	4.5,4.21 - 4.80	4.04,3.56 - 4.63	5.65,5.36 - 5.93	2.69,2.50 - 2.78	5.87,5.53 - 6.16	30.2,25.9 - 31.7	18,16 – 19	129, 1 – 1125
اليمن	**5.24,4.32 - 5.69**	**6.04,3.76 - 7.29**	**6.47, 5.46 - 6.88**	**2.22, 1.83 - 2.76**	**6.83, 5.66 - 7.27**	**25.8, 15.6 - 30.9**	**21, 15 – 25**	**915, 7 – 3666**

الجدول (3) يبين توزيع فئات ونسب ومساحات مؤشرات الإمكانات الكهروضوئية والعوامل المؤثرة فيها باليمن

(1) الإشعاع الأفقي الشامل (GHI)			(2) الإشعاع الأفقي المنتشر (DIF)			(3) الإشعاع الطبيعي المباشر (DNI)		
الفئات [kWh/m²]	%	كم²	الفئات [kWh/m²]	%	كم²	الفئات [kWh/m²]	%	كم²
7.05 ≥ − 6.8	7.62	40231	1.9 > −1.7	1.9	10137	7.75 ≥ −7.2	1.45	7656
6.8 > − 6.6	47.27	249571	2.1 > −1.9	26.3	138856	7.2 > − 6.7	15.38	81202
6.6 > − 6.4	22.91	120958	2.3 > −2.1	38.5	203374	6.7 > − 6.2	34.79	183681
6.4 > − 6.0	13.6	71804	2.5 > −2.3	25.8	136111	6.2 > − 5.7	29.44	155434
6.0 > − 5.6	7.14	37697	2.7 > −2.5	5.0	26346	5.7 > − 4.7	11.8	62300
5.6 >− 4.95	1.46	7708	2.8 ≥ −2.7	2.5	13146	4.7 >− 3.15	7.14	37697
(4) إشعاع الإمالة المثلى (GTI_{OPTA})			**(5) درجة حرارة الهواء (TEMP)**			**(6) ارتفاع التضاريس (ELE)**		
الفئات [kWh/m²]	%	كم²	الفئات [C°]	%	كم²	الفئات متر [m]	%	كم²
7.45 ≥−7.3	0.16	845	14 > − 11.7	0.11	581	3550 ≥−3000	0.05	264
7.3 > − 7.1	13.64	72015	16 > − 14	0.62	3273	3000 > −2500	1.27	6705
7.1 > − 6.9	49.62	261979	18 > − 16	1.93	10190	2500 > −2000	4.81	25395
6.9 > − 6.5	20.73	109448	20 > − 18	3.97	20960	2000 > −1500	8.67	45775
6.5 > − 6.1	8.69	45881	25 > − 20	23.96	126502	1500 > −1000	21.75	114833
6.1 > − 5.7	6.36	33579	30 > − 25	65.83	347563	1000 > − 500	41.22	217629
5.7 >−5.05	0.80	4224	32.5 ≥ −30	2.80	14783	500 >− (−50)	22.23	117368
(7) زاوية الإمالة للوحدات (OPTA)			**(8) الإمكانات الكهروضوئية (PV_{OUT})**					
الفئات [°]	%	كم²	فئات [kWh/kWp]	%	كم²			
25 ≥ − 23	12.24	64624	5.9 ≥ − 5.6	2.35	12407			
23 > − 21	34.27	180935	5.6 > − 5.4	24.41	128877			
21 > − 19	29.33	154854	5.4 > − 5.2	45.67	241124			
19 > − 17	16.20	85531	5.2 > − 5.0	12.99	68583			
17 > − 15	6.63	35004	5.0 > − 4.8	4.67	24656			
15 > − 13	1.16	6124	4.8 > − 4.4	8.59	45353			
13 >−10.75	0.17	898	4.4 > − 3.9	1.32	6969			

إن النتائج بالجدول (1) تبين قيم كل مقياس إحصائي بالنسبة للإشعاع الأفقي الشامل ذو الإمالة الأمثل GTI_{OPTA} بوحدة كيلوواط−ساعة /م^2، لفترة طويلة الأجل.

حيث كانتا قيم المتوسط والوسيط 6.83 و6.96 kWh/m^2 على التوالي، في حين كانتا أقل وأعلى قيم 5.66 و7.27 kWh/m^2 على التوالي، وبمدى طوله

1.61 kWh/m^2. بينما كانت القيم لنسبتي كل من 90% و75% (الربع الثالث) 7.13 و7.05 kWh/m^2 على التوالي. من خلال العلاقة السابقة يتبين أن توزيع قيم إشعاع الإمالة الأمثل GTI_{OPTA} في الجمهورية اليمنية يميل في اتجاه أعلى قيمة والتي تكون 7.27 kWh/m^2، كما أن معظم قيم الإشعاع GTI_{OPTA} ترتكز أعلى من المتوسط الحسابي. إن النتائج بالجدول (3) تبين توزيع فئات إشعاع الإمالة الأمثل GTI_{OPTA} في الجمهورية اليمنية، والذي يبين أن حوالي 0.16% من مساحة أراضي الجمهورية اليمنية تصنف بانها ذات أعلى توزيع إشعاع الإمالة GTI_{OPTA} بالعالم، والذي تتراوح بين 7.3–7.45 kWh/m^2. كما أن حوالي 13.64% من مساحة الأراضي اليمنية تمتلك توزيع إشعاع الإمالة الأمثل GTI_{OPTA} عالي جداً، والذي تتراوح بين 7.1–7.3% kWh/m^2. في حين أن حوالي 49.62% من مساحة أراضي الجمهورية اليمنية تمتلك توزيع إشعاع الإمالة GTI_{OPTA} أعلى من المتوسط، والذي تتراوح بين 6.9–7.1 kWh/m^2.

إن المؤشرات الإحصائية لمتوسط وأعلى وأقل قيمة لتوزيع الإشعاع الأفقي الشامل ذو الإمالة الأمثل على مستوى المحافظات اليمنية كما بالجدول (2) كانت كما يلي:

– **مؤشر متوسط الإشعاع الأفقي الشامل العام ذو الإمالة الأمثل:** إن متوسط العام لمؤشر الإشعاع الأفقي الشامل ذو الإمالة الأمثل في اليمن بلغ 6.83 kWh/m^2، حيث احتلت محافظة البيضاء المركز الأول بمتوسط عام بلغ 6.98 kWh/m^2، بينما حصلت محافظة الحديدة على المركز الأخير بمتوسط عام بلغ 5.87 kWh/m^2.

– **مؤشر الإشعاع الأفقي الشامل الأعلى ذو الإمالة الأمثل:** إن معدل الإشعاع الأفقي الشامل الأعلى ذو الإمالة الأمثل في اليمن بلغ 7.27 kWh/m^2، حيث احتلت محافظة حضرموت المركز الأول بأعلى قيمة بلغت 7.3 kWh/m^2، بينما حصلت محافظة الحديدة على المركز الأخير لأعلى قيمة بلغت 6.16 kWh/m^2.

– **مؤشر الإشعاع الأفقي الشامل الأدنى ذو الإمالة الأمثل:** إن معدل الإشعاع الأفقي الشامل الأدنى ذو الإمالة في اليمن بلغ 5.66 kWh/m^2، كما احتلت محافظة الجوف على المركز الأول لأدني قيمة بلغت 6.8 kWh/m^2، بينما حصلت محافظة المحويت على المركز الأخير لأدني قيمة بلغت 5.07 kWh/m^2.

(5) زاوية الإمالة المثلى للوحدات الكهروضوئية (OPTA)

إن قيمة زاوية الإمالة المثلى السنوية للوحدات الكهروضوئية OPTA (درجة) تعتبر من العوامل المؤثرة جداً في الإنتاج الأقصى السنوي للطاقة من الوحدات الكهروضوئية. النتائج بالجدول (1) تبين قيم كل مقياس إحصائي **لمعلمة** زاوية الإمالة المثلى السنوية للوحدات الكهروضوئية OPTA، حيث بلغ قيمتي المتوسط والوسيط 21 درجة لكليهما، وتراوحت بين أقل قيمة زاوية والتي كانت 15 درجة، وأعلى قيمة زاوية كانت 25 درجة، وبمدى طوله 10 درجات. في حين أن القيم لنسبة كل من 90% و75% (الربع الثالث) بلغتا 24 و23 درجة على التوالي. من خلال العلاقة السابقة يتبين أن توزيع قيم زاوية الإمالة الأمثل للوحدات الكهروضوئية OPTA في الجمهورية اليمنية يميل في اتجاه القيمة الأعلى والتي تكون 25 درجة، كما أن معظم قيم زاوية الإمالة المثلى للوحدات OPTA في اليمن تكون أعلى من المتوسط الحسابي 21 درجة في الجمهورية اليمنية. إن نتائج بالجدول (3) توضح التوزيع النسبي لفئات زاوية الإمالة المثلى OPTA السنوية

للوحدات الكهروضوئية بالجمهورية اليمنية، والتي تبين أن حوالي 75.84% (تقريباً ثلثي) من مساحة الأراضي اليمنية ذات زاوية إمالة مثلى OPTA تتراوح بين 19–25 درجة، في حين أن حوالي 16.20% من مساحة اليمن ذات زاوية إمالة OPTA تتراوح بين 17–19 درجة.

(6) درجة حرارة الهواء الجوي (TEMP)

النتائج بالجدول (1) تبين متوسطات القيم لكل مقياس إحصائي لدرجة حرارة الهواء TEMP عند ارتفاع 2 متر بوحدة درجة مئوية، حيث بلغت قيم المتوسط والوسيط 25.8 و26.5 م^0 على التوالي، وكانتا أقل وأعلى قيم 15.6 و30.9 م^0 على التوالي، وبمدى طوله كان 10.3م^0. في حين تفاوتت درجة الحرارة الهواء بين قيمة 24.4 م^0 في الربع الأول (نسبة 25% من قيم TEMP)، وقيمة 27.8 م^0 في الربع الثالث (نسبة 75% من قيم TEMP)، بفارق طوله يكون 3.4 م^0. من خلال العلاقة السابقة يتبين أن توزيع قيم درجة حرارة الهواء الجوي في الجمهورية اليمنية في الغالب تميل في اتجاه القيمة الأعلى، وأن معظم قيم درجة الحرارة الهواء تتركز حول المتوسط الحسابي 25.8 م^0 (أعلى بمقدار 5.8 م^0 عن الحرارة المعيارية)، وهذا هو السبب في أن الجمهورية اليمنية تحتل المرتبة الخامسة عالميا بالإمكانات الكهروضوئية العملية برغم إنها تحتل المرتبة الأولى عالميا بالنسبة الإمكانات الكهروضوئية النظرية. النتائج في الجدول (3) توضح التوزيع النسبي للفئات درجة حرارة الهواء بالجمهورية اليمنية، التي تبين أن حوالي 6.63% من مساحة الأراضي اليمنية ذات درجة حرارة الهواء تتراوح بين 11.7–20 م^0 (درجة الحرارة المعيارية لأفضل إنتاجية PV_{OUT} تكون ≥ 20 م^0). في حين أن حوالي 23.96% من المساحة تكون ذات درجة حرارة هواء تتراوح بين 20–25 م^0.

(7) ارتفاع التضاريس (ELE)

إن ارتفاع التضاريس يقلل من المسافة التي تقطعها الأشعة الشمسية لتصل إلى سطح الأرض، فكلما زاد ارتفاع التضاريس انخفضت درجة الحرارة الهواء وبالتالي تزيد الإمكانات PV_{OUT}. إن النتائج التي بالجدول (1) تبين متوسط القيم لكل مقياس إحصائي لارتفاع تضاريس ELE (بالمتر) فكانت قيم المتوسط والوسيط 935 و877 متر على التوالي، بينما أقل قيمة 7 متر، وأعلى قيمة 3666 متر، وبمدى طوله يكون 3659 متر. في حين أن القيم لنسبة كل من 90% و75% (الربع الثالث) بلغتا 1780 و1175 متر على التوالي. من خلال العلاقات السابقة يتبين أن توزيع قيم ارتفاع التضاريس في الجمهورية اليمنية يميل قليلا في اتجاه متوسط القيمة الصغرى، وأن معظم قيم ارتفاع التضاريس تتركز حول المتوسط الحسابي. النتائج بالجدول (3) تبين توزيع النسبي للفئات ارتفاع التضاريس ELE بالجمهورية اليمنية، حيث أن حوالي 1.31% من مساحة الأراضي ذات ارتفاع تضاريس تتراوح بين 2500–3550 متر (وفيها تكون الإمكانات PV_{OUT} ممتازة جدا، نتيجة أن حرارة الهواء اقل من المعيارية). كما أن حوالي 13.48% من مساحة الأراضي ذات ارتفاع تضاريس يتراوح بين 1500–2500 متر. بينما حوالي 62.97% من المساحة ذات ارتفاع تضاريس تتراوح بين 500–1500 متر.

(8) مؤشر الإمكانات الكهروضوئية العملية (PV_{OUT})

النتائج بالجدول (1) تبين توزيع متوسط القيم لكل مقياس إحصائي للإمكانات العملية PV_{OUT} (**اللازم لإنتاج الطاقة من الخلايا الشمسية الكهروضوئية**) في المستوى 1، بوحدة kWh/kWp (كيلوواط–ساعة/كيلوواط–ذروة) في

الجمهورية اليمنية، تبين النتائج أن متوسط الإمكانات الكهروضوئية العملية PV_{OUT} يكون 5.24 kWh/kWp، وقد تراوحت قيم الإمكانات PV_{OUT} بين اقل قيمة 4.32 kWh/kWp، واعلى قيمة 5.69 kWh/kWp، وبمدى طوله 1.37 kWh/kWp. في حين أن القيمة لنسبة 50% (الوسيط) من الإمكانات PV_{OUT} تكون 5.3 kWh/kWp، وقد تفاوتت قيم الإمكانات PV_{OUT} بين القيمة 5.5 kWh/kWp لنسبة 90% من الإمكانات وبين قيمة 5.41 kWh/kWp لنسبة 75% من الإمكانات. من خلال العلاقات السابقة، يتبين أن توزيع قيم الإمكانات العملية PV_{OUT} بالجمهورية اليمنية يميل في اتجاه القيمة الأعلى 5.69 kWh/kWp، كما أن معظم قيم الإمكانات PV_{OUT} ترتكز حول المتوسط الحسابي 5.24 kWh/kWp. إن النتائج الموضحة بالجدول (3) تبين أن حوالي 2.35% من مساحة الأراضي اليمنية ذات أعلى إمكانات كهروضوئية عملية PV_{OUT} في العالم، والتي تتراوح بين 5.6–5.9 kWh/kWp، كما أن حوالي 24.41% من المساحة تكون إمكاناتها PV_{OUT} عالية جداً تتراوح بين 5.4–5.6 kWh/kWp. في حين أن 90.09% من مساحة الأراضي اليمنية لا تقل الإمكانات PV_{OUT} فيها عن 5 kWh/kWp.

إن المؤشرات الإحصائية لمتوسط وأعلى وأقل قيمة لتوزيع قيم الإمكانات الكهروضوئية العملية على مستوى المحافظات اليمنية كما بالجدول (2) كانت على النحو التالي:

– **مؤشر متوسط قيم الإمكانات الكهروضوئية العملية:** إن المتوسط العام لقيم الإمكانات الكهروضوئية العملية في اليمن بلغ 5.25 kWh/kWp، حيث احتلت محافظة البيضاء المركز الأول بمتوسط عام بلغ 5.46 kWh/kWp، بينما حصلت محافظة الحديدة على المركز الأخير بمتوسط عام بلغ 4.5 kWh/kWp.

– **مؤشر أعلى قيم الإمكانات الكهروضوئية العملية:** إن معدل أعلى قيم الإمكانات الكهروضوئية العملية في اليمن بلغ 5.69 kWh/kWp، حيث احتلت محافظة صنعاء المركز الأول بقيمة بلغت 5.74 kWh/kWp، بينما حصلت محافظة الحديدة على المركز الأخير بقيمة بلغت 4.8 kWh/kWp.

– **مؤشر أدني قيم الإمكانات الكهروضوئية العملية:** إن المعدل الأدنى لقيم الإمكانات الكهروضوئية العملية في اليمن بلغ 4.32 kWh/kWp، حيث احتلت الأمانة على المركز الأول بقيمة بلغت 5.25 kWh/kWp، بينما حصلت محافظة المحويت على المركز الأخير بقيمة بلغت 3.92 kWh/kWp.

مقارنة الإمكانات الكهروضوئية العملية في المستويات الثلاثة بالجمهورية اليمنية.

إن الإمكانات العملية في الجمهورية اليمنية تم دراستها باستخلاص قيم الإمكانات العملية الفعلية التي تمثل الأراضي اليمنية: **المستوى 0**، يُفترض أن الجمهورية اليمنية يمكنها أن تصل إلى إمكاناتها الكهروضوئية العملية الكاملة دون أي عوائق أو قيود تقنية. بينما في **المستوى 1**، يتم استبعاد المناطق ذات قيود استخدام الأراضي المادية أو التقنية، مثل التضاريس المعقدة، المناطق داخل المدن والتجمعات السكانية غير المأهولة، الغابات والمسطحات المائية. أما **المستوى 2**، ففيه يتم استبعاد المناطق ذات القيود التنظيمية على استخدام الأراضي مثل الأراضي الزراعية والمناطق المحمية. إن توزيع فئات الإمكانات العملية PV_{OUT} ونسبها ومساحاتها في

المستويات الثلاثة 0، 1، و2 بالنسبة للجمهورية اليمنية هي كما بالجدول (4).

1- إن المساحة التي تم تقييمها بالنسبة للإمكانات الكهروضوئية العملية في المستوى 0 كانت حوالي 455112 كيلومتر مربع أي حوالي 86.20% من إجمالي مساحة الجمهورية اليمنية 527970 كيلومتر مربع. في حين كانت المساحتين تحت التقييم للمستويين 1، 2 هما على الترتيب حوالي 235748، و219364 كم^2، ونسبتيهما كانتا 65.44، 41.54% على التوالي.

2- إن نسب ومساحات التوزيع للإمكانات الكهروضوئية العملية ذات القيمة الأعلى من 5.6 kWh/kWp بلغت حوالي 9102 كم^2 ما يمثل حوالي 1.7% من المساحة المقيمة لكل من المستويين 1 و2. في حين كانت حوالي 10923 كم^2 ما يمثل حوالي 2% من المساحة المقيمة للمستوى 0.

3- إن قيم الإمكانات الكهروضوئية العملية الأعلى من 5.21 kWh/kWp (أي اعلى من أو يساوي متوسط الإمكانات العملية باليمن) تتوزع على مساحة تقدر بحوالي 152007 كم^2 وتمثل حوالي 28.79% من المساحة المقيمة بالجمهورية اليمنية للمستوى 2، وهو ما يتوافق تقريباً مع [2] (أن نسبة 30.8389% من مساحة اليمن ملائمة للغاية) يقل بمقدار 0.69% عن النسبة والمساحة بالنسبة للمستوى 1.

مقارنة الإمكانات الكهروضوئية النظرية والعملية في المستوى 1 بالجمهورية اليمنية

إن البيانات التي تظهر بالشكل (1) تبين مقارنة قيم المقاييس الإحصائية للإمكانات الكهروضوئية النظرية (GHI) كيلوواط-ساعة/م^2، والإمكانات الكهروضوئية العملية (PV_{OUT}) كيلوواط-ساعة/كيلوواط-ذروة في المستوى 1، بالجمهورية اليمنية.

إن القيم الإحصائية للإمكانات الكهروضوئية العملية بشكل عام تكون دائماً اقل من الإمكانات الكهروضوئية النظرية عند كل المقاييس الإحصائية وذلك نتيجة ارتفاع درجة حرارة الهواء عن الحرارة المعيارية، حيث تفاوت الاختلاف بمقدار يتراوح من 1.16-1.19 كيلوواط-ساعة من اقل إلى اعلى قيمة، بينما يكون الفرق حوالي 1.22 كيلوواط-ساعة لكل من المتوسط والربعين الأول (لنسبة 25%) والثالث (لنسبة 75%)، بينما اعلى فرق بينهما كان 1.25 كيلوواط-ساعة عند الوسيط.

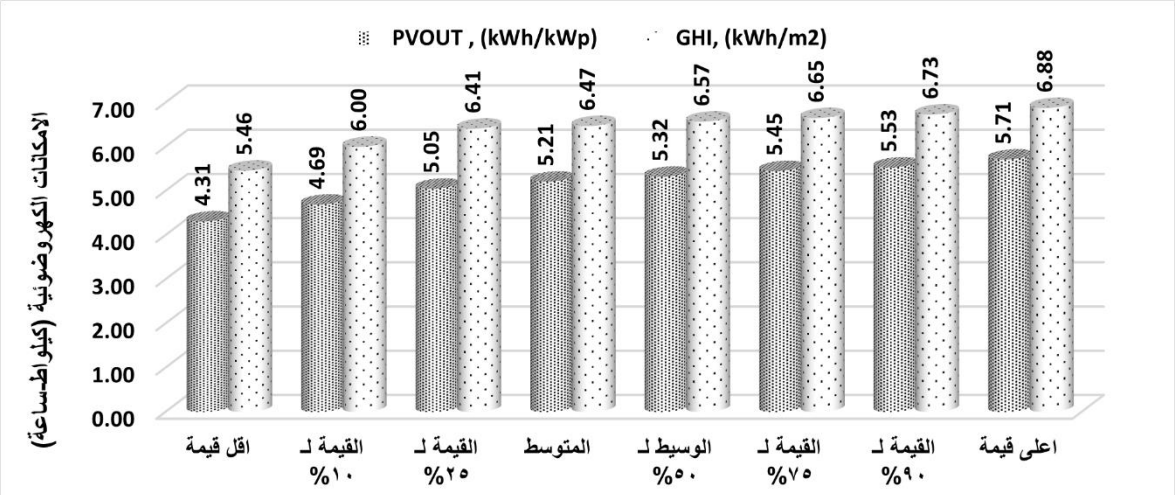
موسمية الإمكانات الكهروضوئية العملية، المستوى 1 في الجمهورية اليمنية

إن البيانات التي بالشكل (2) تبين متوسط الاختلافات الشهرية للإمكانات الكهروضوئية العملية طويل الأجل بالمستوى 1 بالجمهورية اليمنية. من الشكل (2) يتبين أن المتوسط الأعلى للإمكانات العملية الشهري كان على الترتيب للأشهر **فبراير، مارس، أكتوبر، نوفمبر، يناير، ديسمبر، أبريل، سبتمبر، مايو حيث** بلغ 5.75، 5.71، 5.70، 5.64، 5.52، 5.52، 5.45، 5.35، و5.06 kWh/kWp على التوالي مقارنة مع المتوسط العام باليمن 5.21 kWh/kWp.

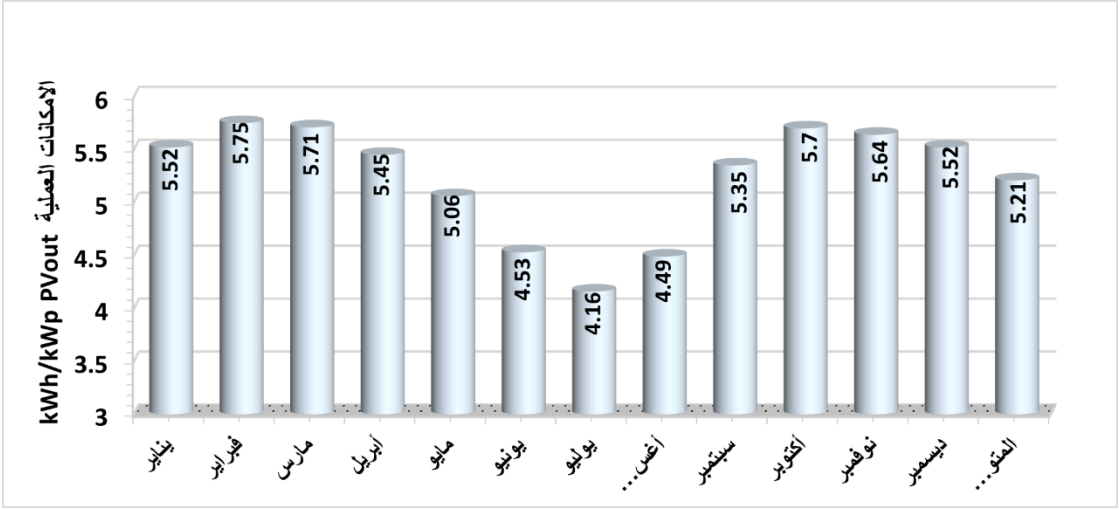
الجدول (4) يبين توزيع فئات الإمكانات PV_{OUT} والنسب والمساحة للمستويات الثلاثة بالجمهورية اليمنية

إمكانات	مستوى 2		مستوى 1		مستوى0		% من المساحة المُقيّمة
PV_{OUT} kWh/kWp	النسبة %	المساحة كم^2	النسبة %	المساحة كم^2	النسبة %	المساحة كم^2	
5.6 <	2.0	9102	2.0	9102	2.4	10923	
5.6 – 5.4	15.6	70997	16	72818	24.4	111047	
5.4 – 5.2	15.8	71908	16.2	73728	45.7	207986	
5.2 – 5.0	5.9	26852	6.3	28672	13	59165	
5.0 – 4.8	2.9	13198	3.2	14564	4.7	21390	
4.8 – 4.6	3.9	17749	4.3	19570	5.2	23666	
4.6 – 4.4	1.9	8647	2.8	12743	3.4	15474	
4.4 >	0.2	910	1	4551	1.2	5461	
الإجمالي	**48.2**	**219364**	**51.8**	**235748**	**100**	**455112**	**النسبة والمساحة المقيمة**
إجمالي ≤ 5.2	**33.4**	**152007**	**34.2**	**155648**	**72.5**	**329956**	**نسبة ومساحة فوق المتوسط**

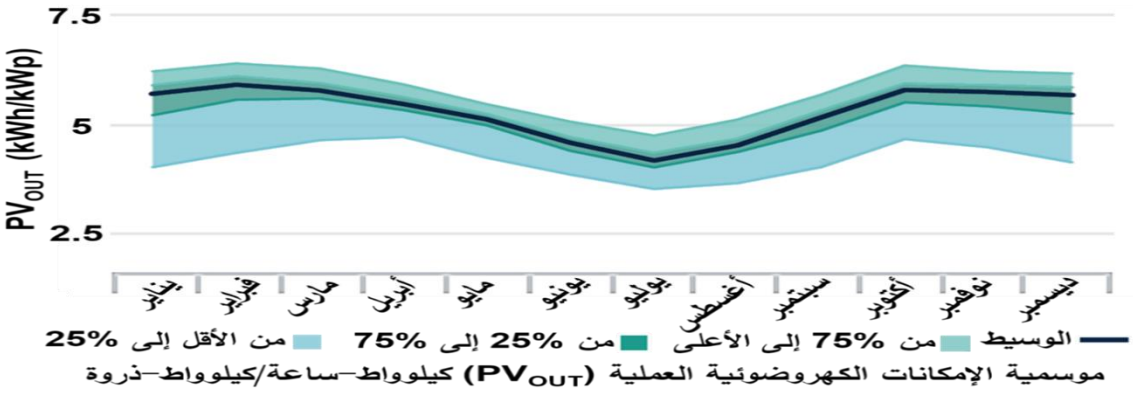
كما يتبين أن متوسط الإمكانات العملية الشهري لم ينخفض عن 5 kWh/kWp سوى في ثلاثة أشهر هي على الترتيب تنازلياً يونيو، أغسطس، ويوليو حيث بلغت 4.53، 4.49، و4.16 kWh/kWp على التوالي، **ويعود السبب إلى أن هذه الأشهر تكون خلالها موسم أمطار وغيوم وتشكل سحب في الجمهورية اليمنية.** كما يوضح الشكل (3) توزيع قيم المقاييس الإحصائية للإمكانات الكهروضوئية العملية خلال كل شهر بالسنة، ويصف تقلب إمكانات إنتاج القدرة الكهروضوئية العملية على مدار العام.



الشكل (1) يبين مقارنة المقاييس الإحصائية للإمكانات الكهروضوئية النظرية والعملية في الجمهورية اليمنية



الشكل (2) يبين متوسط الإمكانات العملية الشهرية بالمستوى 1 في الجمهورية اليمنية



الشكل (3) يبين الاختلافات الشهرية للإمكانات العملية بالمستوى 1 بالجمهورية اليمنية.

الاستنتاجات

1) بينت نتائج توزيع فئات قيم الإمكانات النظرية (الإشعاع الأفقي GHI) أن حوالي 7.62% من مساحة اليمن تمتلك أعلى إمكانات كهروضوئية نظرية (تتراوح بين 6.8–7.05 kWh/m^2)، وأن حوالي 47.27% من مساحة اليمن ذات إمكانات نظرية عالية جداً (تتراوح بين 6.6–6.8 kWh/m^2). حيث احتلت محافظة حضرموت المركز الأول بأعلى قيمة بلغت 6.91 kWh/m^2، بينما حصلت محافظة المحويت على المركز الأخير لأدني قيمة بلغت 4.97 kWh/m^2.

2) بينت نتائج توزيع فئات قيم الإشعاع المباشر (DNI) أن حوالي 1.45% من مساحة الجمهورية اليمنية تمتلك الإمكانات الأعلى عالميا لإنتاج الطاقة الكهربائية (أبراج تركيز التسخين الشمسي للمياه) (تتراوح بين 7.2–7.75 kWh/m^2)، وأن حوالي 15.38% من المساحة تمتلك توزيع إشعاع مباشر (يتراوح بين 6.7–7.2 kWh/m^2). حيث احتلت محافظة حضرموت المركز الأول لأعلى قيمة بلغ 7.41 kWh/m^2، بينما حصلت محافظة المحويت على المركز الأخير لأدني قيمة بلغت 3.13 kWh/m^2.

3) بينت نتائج توزيع فئات قيم الإشعاع الأفقي ذو الإمالة المثلى (GTI) أن حوالي 0.16% من مساحة الجمهورية اليمنية ذات إشعاع إمالة أمثل عالي جداً (يتراوح بين 7.3–7.45 kWh/m^2)، وأن حوالي 13.64% من المساحة تمتلك إشعاع إمالة أمثل عالي (يتراوح بين 7.1–7.3% kWh/m^2). حيث احتلت محافظة حضرموت المركز الأول بأعلى قيمة بلغت 7.3 kWh/m^2، بينما حصلت محافظة المحويت على المركز الأخير لأعلى قيمة بلغت 5.07 kWh/m^2.

4) بينت نتائج توزيع فئات قيم الإمكانات الكهروضوئية العملية (PV_{OUT}) أن حوالي 2.35% من مساحة الجمهورية اليمنية تمتلك أعلى إمكانات عملية (تتراوح بين 5.6 – 5.9 kWh/kWp)، وأن حوالي 24.41% من المساحة إمكاناتها العملية عالية جداً (تتراوح بين 5.4 – 5.6 kWh/kWp)، وأن 90.09% من المساحة لا تقل الإمكانات فيها عن 5 kWh/kWp.

حيث احتلت محافظة صنعاء المركز الأول بقيمة بلغت 5.74 kWh/kWp، بينما حصلت محافظة المحويت على المركز الأخير بقيمة بلغت 3.92 kWh/kWp.

5) بينت النتائج أن مساحة ونسب التوزيع للإمكانات الكهروضوئية العملية بلغت للقيم الأعلى من 5.6 kWh/kWp حوالي 9102 كم^2 بنسبة 1.7% من المساحة المقيمة لكل من المستويين 1 و2. في حين بلغت حوالي 10923 كم^2 بنسبة 2% من المساحة المقيمة للمستوى 0. في حين بلغت قيم الإمكانات الكهروضوئية العملية الأعلى من المتوسط اليمني 5.2 kWh/kWp مساحة 152007 كم^2 بنسبة 28.79% من المساحة المقيمة في الجمهورية اليمنية للمستوى 2، والذي يقل بمقدار 0.69% عن النسبة والمساحة بالنسبة للمستوى 1.

6) بينت نتائج مقارنة الإمكانات الكهروضوئية النظرية والعملية في المستوى 1 بالجمهورية اليمنية أن القيم الإحصائية للإمكانات الكهروضوئية العملية بشكل عام تكون دائماً اقل من الإمكانات الكهروضوئية النظرية عند كل المقاييس الإحصائية وذلك نتيجة ارتفاع درجة حرارة الهواء عن الحرارة المعيارية، حيث تفاوت الاختلاف بمقدار يتراوح من 1.16–1.19 كيلوواط–ساعة من اقل إلى اعلى قيمة، بينما يكون الفرق حوالي 1.22 كيلوواط–ساعة لكل من المتوسط والربعين الأول (لنسبة 25%) والثالث (لنسبة 75%)، بينما اعلى فرق بينهما كان 1.25 كيلوواط–ساعة عند الوسيط.

7) بينت نتائج موسمية الإمكانات الكهروضوئية العملية، المستوى 1 في الجمهورية اليمنية أن المتوسط الأعلى للإمكانات العملية الشهري كان على الترتيب لأشهر **فبراير، مارس، أكتوبر، نوفمبر، يناير، ديسمبر، أبريل، سبتمبر، مايو حيث** بلغ 5.75، 5.71، 5.70، 5.64، 5.52، 5.52، 5.45، 5.35، 5.06 kWh/kWp على التوالي مقارنة مع المتوسط العام باليمن 5.21 kWh/kWp. حيث أن المتوسط الإمكانات العملية الشهري لم ينخفض عن 5 kWh/kWp سوى في ثلاثة أشهر هي على الترتيب تنازلياً يونيو، أغسطس، ويوليو حيث بلغت 4.53، 4.49، و4.16 kWh/kWp على التوالي، ويعود السبب إلى أن هذه الأشهر تكون موسم الأمطار والغيوم والسحب في الجمهورية اليمنية.

التوصيات

1) أثبتت النتائج أن محافظة حضرموت هي الأفضل لإقامة مشاريع إنتاج الطاقة من الاشعاع الشمسي بواسطة أبراج تسخين المياه، حيث أن قيمة للإشعاع الشمسي المباشر DNI سجلت 7.41 KWh/m^2 وهو الأعلى عالمياً،

وبمساحة 7657Km2 تغطي 1.45% من إجمالي مساحة الجمهورية اليمنية.

2) أثبتت النتائج أن محافظة صنعاء هي الأفضل لإقامة مشاريع إنتاج الطاقة من الخلايا الشمسية الكهروضوئية، حيث أن الإمكانات الكهروضوئية العملية PV_{out} لها كانت الأعلى على مستوى محافظات الجمهورية اليمنية بقيمة 5.74 KWh/KWP.

3) أثبتت النتائج أن مساحة $12407Km^2$ والتي تشكل نسبة 2.35% من مساحة الجمهورية اليمنية تمتلك الإمكانات الكهروضوئية العملية PVout الأعلى على مستوى العالم بقيم أكبر من 5.6 KWh/KWP وتشمل (صنعاء، عمران، حضرموت، المهرة، ذمار، مارب، شبوة)، وهي المحافظات الواعدة لإقامة مشاريع إنتاج الطاقة من الخلايا الشمسية الكهروضوئية.

4) أثبتت النتائج أن الفترة التي يمكن خلالها الاعتماد على إنتاج الطاقة من الخلايا الشمسية الكهروضوئية هي خلال أشهر (فبراير، مارس، أكتوبر، نوفمبر، يناير، ديسمبر، أبريل، سبتمبر، مايو) بالترتيب التنازلي.

5) يوصي المؤلفون إلى ضرورة عمل دراسة مقارنة للتحقق من دقة النتائج المحسوبة اعتماداً على بيانات الأقمار الصناعية ونظم المعلومات الجغرافية بواسطة تطبيق اطلس الطاقة العالمي وذلك بمقارنتها باستخدام أجهزة قياس أرضية.

المراجع

[1] R. Newell, D. Raimi, S. Villanueva, and B. Prest, "Global energy outlook 2020: energy transition or energy addition," *Resources for the Future,* 2020.

[2] A. A. Noman, M. A. Shukri, and M. Q. AL-Moutawakel, "Suitability Analysis of Solar Energy Plant Sites in Yemen Using AHP, BSM and GIS Methods," 2024.

[3] G. Koutoudjian, L. Diniz, R. Cespedes, and V. G. UNDP, "About IRENA The International Renewable Energy Agency (IRENA) is an intergovernmental organisation that supports countries in their transition to a sustainable energy future, and serves as the principal platform for international co-operation, a centre of excellence, and a repository of policy, technology, resource and financial knowledge on renewable energy," *IRENA promotes the. IRENA promotes the,* vol. 24, 2021.

[4] G. S. Atlas, "Validation Report," ed, 2019.

[5] W. Bank, "Global Photovoltaic Power Potential by Country," *Energy Sector Management Assistance Program, Washington, DC,* 2020.

مجموعات البيانات التطبيقية

1- Administrative Boundaries © 2019 Cartography Unit, ESDPM, World Group.

2- Air temperature © 2019 ECMWF, NASA, and Solargis https://solargis.com

3- Direct Normal Irradiation © (2019). SolarGIS https://solargis.com

4- Global Horizontal Irradiation © (2019). SolarGIS https://solargis.com

5- PV Power Potential © (2019). SolarGIS https://solargis.com