

Study and Analysis of the Spatiotemporal Distribution of Global Solar Radiation in Libya Using NASA POWER Data and Geographic Information System (GIS) Techniques

Ahmed Mohammed Al-Ghrari^{1*}, Jalal Al-Nalouti Ali², Abdulraof Mohammed Elhamdi³, Ahmed Ibrahim Ekhmaj⁴, Muammar Qrira Al-Bashir⁵

^{1,2,3,5}Libyan Center for Remote Sensing and Space Science, Tripoli, Libya

⁴Soil and Water Department, University of Tripoli, Tripoli, Libya

دراسة وتحليل التوزيع المكاني والزمني للإشعاع الشمسي الكلي في ليبيا باستخدام بيانات NASA POWER وتقنيات نظم المعلومات الجغرافية GIS

أحمد محمد الغراري^{1*}، جلال النالوتي علي²، عبد الرؤوف محمد الحمدي³، أحمد إبراهيم خمّاج⁴، معمر قريرة البشير⁵

^{1,2,3,5}المركز الليبي للاستشعار عن بعد وعلوم الفضاء، طرابلس، ليبيا

⁴قسم التربة والمياه، جامعة طرابلس، طرابلس، ليبيا

*Corresponding author: a.ghrari@lcrsss.ly

Received: January 01, 2026

Accepted: February 03, 2026

Published: February 12, 2026

Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract

This study aimed to analyze the spatial and temporal distribution of global solar radiation in Libya, as well as to evaluate the accuracy of data derived from the NASA POWER platform by comparing it with ground-based measurements. The study relied on observed data from thirteen ground stations for the period (1984 - 1989), in addition to satellite-derived data represented by reanalysis data from the NASA POWER project for the period (1990–2024). Statistical indicators were employed to assess data accuracy, including RMSE, MAE, and R^2 . The Kriging interpolation method was also used to perform spatial distribution analysis using ArcGIS. The results showed a strong correlation between ground measurements and NASA POWER data, as indicated by a coefficient of determination (R^2) of 0.879, along with low estimation errors for both RMSE and MAE, which were 0.602 and 0.468 (kW.h/m²/day), respectively. Spatial distribution results, based on monthly, seasonal, and annual maps, revealed a clear gradient in global solar radiation from north to south, with higher values in southern and southeastern Libya, particularly in the regions of Jalu, Jaghub, and Kufra. The southern and southeastern areas exhibited the highest radiation levels, while northern regions recorded the lowest. Specifically, summer was found to represent the peak season of solar radiation, followed by spring, autumn, and winter, with values ranging between 6.55–7.74, 4.67–7.35, 3.01–6.66, and 2.41–6.53 (kW.h/m²/day), respectively. The study also demonstrated that global solar radiation data obtained from the NASA POWER platform can be reliably used after proper validation. Furthermore, the study recommends strengthening ground monitoring networks and integrating them with remote sensing data to better support the optimal site selection for solar power plants in Libya.

Keywords: Global solar radiation, Geographic Information Systems (GIS), NASA POWER, Libya.

الملخص

هدفت هذه الدراسة إلى تحليل التوزيع المكاني والزمني للإشعاع الشمسي الكلي، وتقييم دقة البيانات المستخرجة من منصة NASA POWER ومقارنتها بالقياسات الأرضية. اعتمدت الدراسة على البيانات المقاسة لثلاثة عشر محطة أرضية للفترة (1984 - 1989)، إضافة إلى بيانات الأقمار الصناعية والتمثلة في بيانات إعادة التحليل لمشروع NASA POWER للفترة (1984 - 2024). تم استخدام مؤشرات إحصائية للتحقق من دقة البيانات، والتي شملت كلاً من RMSE، MAE، R^2 . كما تم استخدام طريقة Kriging لإجراء التوزيع المكاني باستخدام برنامج ArcGIS. أظهرت النتائج وجود ارتباط جيد بين القياسات الأرضية والبيانات المستمدة من منصة NASA POWER، وذلك من خلال قيمة معامل التحديد R^2 والذي بلغ 0.879، إلى جانب أخطاء تقديرية منخفضة لكل من RMSE و MAE والتي كانت 0.602 و 0.468 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، على التوالي. كما أظهر التوزيع المكاني والزمني من خلال الخرائط الشهرية والفصلية والسنوية؛ وجود تباين وبتدرج واضح من الشمال إلى الجنوب، مع أفضلية لمناطق الجنوب والجنوب الشرقي لليبيا والتمثلة في مناطق جالو والجغبوب والكفرة ومرزق، حيث أظهرت المناطق الجنوبية والجنوبية الشرقية أعلى القيم، في حين أظهرت مناطق الشمال أدنى القيم. وعلى وجه الخصوص، وجد أن فصل الصيف يمثل ذروة الإشعاع الشمسي، يليه فصل الربيع، ثم فصل الخريف، ثم فصل الشتاء بقيم تراوحت ما بين 6.55 و 7.74، 4.67 و 7.35، و 3.01 و 6.66، 2.41 و 6.53 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، على التوالي. كما أظهرت نتائج التقييم أنه بالإمكان الاعتماد على البيانات الإشعاع الشمسي الكلي المستمدة من منصة NASA POWER بعد إجراء التقييم لها. توصي الدراسة بتعزيز شبكات الرصد الأرضي ودمجها مع بيانات الاستشعار عن بعد، بما يتيح توظيف النتائج بشكل أفضل في اختيار المواقع المثلى لإنشاء محطات الطاقة الشمسية في ليبيا.

الكلمات المفتاحية: الإشعاع الشمسي الكلي، نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، NASA POWER، ليبيا.

المقدمة

يُعد الإشعاع الشمسي أحد أهم المصادر الرئيسية للطاقة، التي يدخل في العديد من العمليات الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، كما أنه يُمثل متغيراً حاسماً في العديد من نماذج المحاكاة في مجالات الزراعة، والبيئة، والهيدرولوجيا، وعلوم النظم البيئية. كما تعد قياسات الإشعاع الشمسي الكلي مطلباً أساسياً لإجراء الدراسات للأنظمة التي تعتمد على الطاقة الشمسية، وهي مطلوبة في العديد من التطبيقات الزراعية والمتعلقة بتقديرات البخرنتج المرجعي، وإدارة الموارد المائية، وكذلك في دراسات الطاقة الشمسية. تعتبر المعرفة الدقيقة بالإشعاع الشمسي الخطوة الأولى في تقييم توافر الطاقة الشمسية، حيث تعتبر بيانات الإشعاع الشمسي الكلي المعلمة الأكثر أهمية وطلباً في تقييم توافر الطاقة الشمسية (Alkama and Ouali., 2014). إلى جانب ذلك، تُعد المعرفة الدقيقة بالإشعاع الشمسي الكلي وتوزيعه الزمني والمكاني، وفهم اختلافاته، ضرورة لضمان موثوقية نتائج هذه النماذج وتطبيقاتها. كما يحتاج ضمان موثوقية البيانات المقاسة توفر أكبر قدر ممكن من شبكات الرصد الأرضية المزودة بأجهزة قياس الإشعاع الشمسي الكلي، إلا أن توفر أجهزة الرصد الأرضية يعد أمراً مكلفاً، حيث يتطلب صيانة دورية ومعايرة لتلك الأجهزة، وهذا قد لا يتوفر بشكل دائم خصوصاً في البلدان النامية وذات الامكانيات المحدودة (Hunt., 1998).

وفي ظل تلك التحديات القائمة، تزداد الحاجة إلى إيجاد مصادر بديلة عن محطات الرصد لتوفير مثل تلك البيانات، لاسيما ما يشهده العالم من توسع في مشاريع الطاقة الشمسية، والتي تعتمد بشكل أساسي على تقدير الكميات الحقيقية للإشعاع الشمسي، حيث يتطلب تصميم أنظمة تجميع الطاقة الشمسية توفر بيانات موثوقة حول الطاقة الشمسية المتاحة. وبالتالي، فإن موثوقية وجودة البيانات تعد أمر حاسم في إجراء تقييم صحيح لمثل تلك المشاريع. يعتمد تقدير الإمكانيات الحقيقية للطاقة الشمسية في موقع معين على دقة البيانات المتاحة وجودتها، ويُعزى ذلك إلى التغير الكبير الذي يشهده الإشعاع الشمسي الكلي على المستويين الزمني والمكاني، الأمر الذي يستدعي استخدام تقنيات ونمذجة ملائمة (Sabo et al., 2014; Hofierka et al., 2017). لذلك، فإن فهم هذا التباين وتحليله بدقة يُعد أساساً لتصميم أنظمة الطاقة الشمسية بكفاءة عالية (Al Yahya & Irfan, 2016)، حيث يعد التباين الزمني المكاني وتحليل توزيعه من العوامل الهامة في تقييم كمية موارد الطاقة الشمسية المتاحة (Sullivan et al., 2014).

بالإمكان الحصول على هذه البيانات من خلال جمعها بواسطة شبكة واسعة من الأجهزة الأرضية، ومن ثم استيفاء القيم في المواقع غير المقاسة، أو باستخدام بيانات الأقمار الصناعية لرسم خرائط توزيع الإشعاع الشمسي الكلي، مع التحقق من دقتها من خلال مقارنتها بقياسات محطات رصد أرضية بهدف ضمان جودة وموثوقية البيانات المستخدمة (Carmona et al., 2017). وعلى الرغم من توفر تقنيات الأقمار الصناعية ومحطات الرصد الأرضي، إلا أن العديد من دول العالم لا تزال تعاني من نقص في البيانات المناخية. تُعد إعادة تحليل البيانات المناخية وتجميعها من نماذج الغلاف الجوي العالمية من أبرز الحلول المتاحة لسد الفجوة في نقص البيانات المناخية المقاسة ميدانياً.

وفي هذا السياق، تعتبر البيانات المناخية، وعلى وجه الخصوص بيانات الإشعاع الشمسي الكلي المستنبطة من خلال الأقمار الصناعية مهمة، خصوصاً في المناطق التي تفتقر إلى أجهزة قياس أرضية، ومن أهم تلك المصادر المتوفرة هي منصة NASA POWER. وعلى ذلك، فإن عملية التحقق من البيانات المقطرة ومقارنتها بالبيانات المقاسة تعد خطوة أساسية لضمان دقة البيانات المستخلصة من المصادر غير الأرضية (Orte et al., 2021).

في المقابل، يعتبر تقييم البيانات المناخية ومدى دقتها مثل البيانات المتاحة من منصة NASA POWER محدود من خلال الدراسات التي تناولت مدى صلاحيتها للاستخدام في التطبيقات المختلفة (Jha et al., 2018). فقد أجرى كل من (Grossi, 1998; Grossi & Righini, 2007) دراسة في الأرجنتين لإنتاج خرائط للإشعاع الشمسي الكلي اليومي بالاعتماد على تقنيات الاستيفاء المكاني للبيانات الأرضية. كما قام (Grossi, 1998) بدراسة التوزيع الشهري لمتوسطات الإشعاع الشمسي الكلي اليومي، استناداً إلى البيانات المتوفرة من مختلف أنحاء الأرجنتين. كما تناولت بعض الدراسات الأخرى تقدير وتحليل للإشعاع الشمسي الكلي باستخدام مجموعة بيانات مستمدة من تقنيات الاستشعار عن بعد (Huld et al., 2012).

كما بينت العديد من الدراسات العالمية، إمكانية استخدام بيانات منصة باور ناسا في تقدير الإشعاع الشمسي الكلي وتطبيقاته في النماذج البيئية والزراعية. فعلى سبيل المثال، استخدم (Bai et al., 2010) بيانات منصة NASA POWER لسد النقص في البيانات المناخية في الصين، حيث وجد توافقاً مقبولاً بينها وبين القياسات الأرضية. وفي الولايات المتحدة، قام (White et al., 2011) بمقارنة بيانات NASA POWER مع سجلات 295 محطة أرضية، وأثبتت النتائج أنها مصدر مناسب لتحليل التغيرات المناخية التاريخية. كما أظهرت دراسة (Monteiro et al., 2018) في البرازيل أن البيانات المستمدة من منصة NASA POWER، يمكن أن تستخدم للتنبؤات في المجالات الزراعية. وبناءً على ذلك، فإن هذه الدراسات مجتمعة تشير إلى أن بيانات ناسا باور تعد كمصدرًا بديلاً للبيانات المناخية في المناطق التي تعاني من إنعدام أو محدودية القياسات الأرضية، باشرط أن يتم التحقق المحلي من دقتها قبل استخدامها في التطبيقات المختلفة. في هذا الإطار، تعد ليبيا من الدول التي تعاني من شح في البيانات المناخية عموماً، إضافة إلى بيانات الإشعاع الشمسي الكلي على وجه الخصوص، نتيجة لقلّة محطات الرصد الأرضية وتوزيعها الجغرافي المحدود، حيث تعد هذه الفجوة في البيانات عائقاً أمام التخطيط الفعال لمشاريع الطاقة الشمسية، والتي تعتمد بدرجة كبيرة على توفر معلومات دقيقة عن الكميات والتوزيع المكاني والزمني للإشعاع الشمسي الكلي.

عليه، فإن وكالة الفضاء الأمريكية ناسا من خلال مشروع باور ناسا توفر بيانات مناخية وبيئية شاملة ومختلفة، والتي تعد بديلاً محتملاً لسد هذه الفجوة في نقص ومحدودية البيانات المناخية بشكل عام. ومع ذلك، فإن استخدام هذه البيانات يتطلب التحقق من دقتها ومقارنتها مع القياسات الأرضية المتاحة لضمان موثوقيتها في التطبيقات المحلية. وانطلاقاً من هذه الحاجة، يهدف هذا البحث إلى تقييم موثوقية بيانات الإشعاع الشمسي الكلي Rs المستخرجة من منصة NASA POWER من خلال مقارنتها مع القياسات الأرضية المسجلة في عدد من محطات الرصد داخل ليبيا خلال سنوات سابقة، كما يسعى إلى إنتاج خرائط رقمية تُظهر التوزيع المكاني للإشعاع الشمسي الكلي وتحليل توزيعها وكمياتها، وذلك بهدف دعم جهود التخطيط الاستراتيجي لمشروعات الطاقة المتجددة وتعزيز استخدام مصادر الطاقة النظيفة في ليبيا.

المواد وطرائق البحث

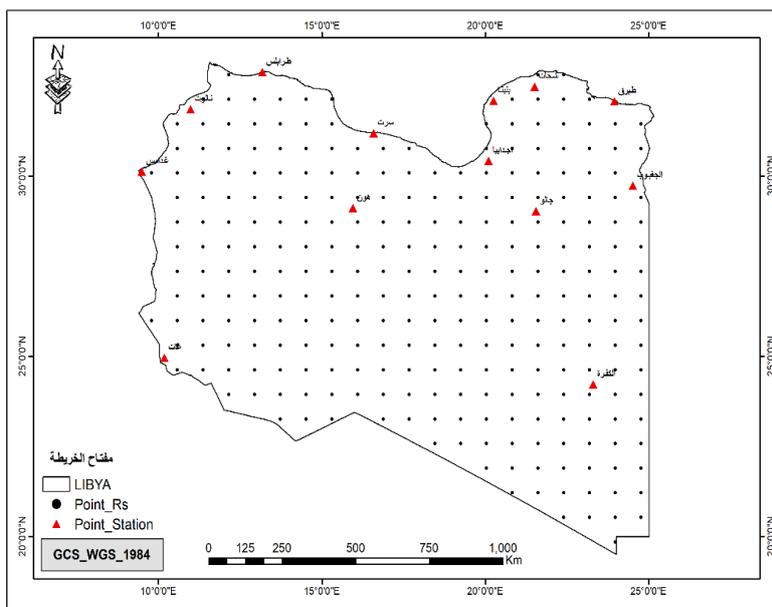
موقع منطقة الدراسة

أجريت هذه الدراسة في ليبيا، حيث تقع جغرافياً في شمال أفريقيا يحدها من الشمال البحر الأبيض المتوسط ومن الجنوب كل من تشاد والنيجر والسودان الشرق ومن الشرق مصر ومن الغرب كل من تونس والجزائر، وتشمل مساحة جغرافية شاسعة تقدر بحوالي 1,75954 كم²، وتقع فلكياً بين خطي طول 9.4° و 25.15° شرقاً ودائرتي عرض 19.45° و 33.16° شمالاً، كما موضح بالشكل (1).

مصادر البيانات

بيانات الإشعاع الشمسي الكلي المقاسة

تم الحصول على بيانات الإشعاع الشمسي الكلي في ليبيا من خلال الاستعانة بالبيانات المتوفرة في عدد من محطات القياس الأرضية خلال الفترة من سنة 1984 - 1989 لعدد من محطات مناخية والموزعة على بعض المناطق في ربوع البلاد وعددها 13 محطة مناخية، كما موضح بشكل (1) والجدول (1)، والتي تم الحصول عليها من خلال مكتبة مركز بحوث الطاقة الشمسية تاجوراء (ليبيا).



شكل 1. منطقة الدراسة ومحطات القياس الأرضية ونقاط الرصد.

جدول 1. احداثيات ومواقع المحطات المستخدمة في الدراسة.

ر.م	المحطة	خط الطول	دائرة العرض	الإرتفاع (متر)
1	طرابلس	13.11	32.54	25
2	سرت	16.58	32.20	13
3	أجدابيا	20.10	30.43	11
4	غات	10.15	25.13	692
5	غدامس	9.30	30.08	346
6	طبرق	23.92	32.10	50
7	نالوت	10.98	31.86	621
8	الكفرة	23.30	24.22	436
9	بنينا	20.09	32.06	130
10	هون	15.95	29.12	263
11	جالو	21.57	29.03	45
12	الجغبوب	24.32	29.45	1-
13	شنحات	21.51	32.49	626

بيانات الاشعاع الشمسي الكلي المقدر NASA POWER

توفر وكالة الفضاء الأمريكية (NASA) بيانات من خلال مشروع التنبؤ بمصادر الطاقة العالمية The Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER)، الممول من برنامج العلوم التطبيقية بوكالة ناسا ضمن قسم علوم الأرض في مديرية المهام العلمية. يهدف المشروع إلى دعم وكالة ناسا والمجتمع العلمي من خلال تعزيز الاستفادة الاجتماعية والاقتصادية من علوم الأرض، وتقنيات المعلومات، والبحث والتطوير. تم إطلاق مشروع التنبؤ بموارد الطاقة العالمية (POWER) لتحسين بيانات الطاقة المتجددة المتوفرة حالياً، وتطوير مجموعات بيانات جديدة باستخدام تقنيات الأقمار الاصطناعية. كما يهتم مشروع NASA POWER بخدمة ثلاث فئات رئيسية من المستخدمين، والتي تضم مجالات الطاقة المتجددة، المباني المستدامة، وعلوم المناخ (Ikhneifir وآخرون، 2023). وبناء على ذلك، تم تحميل بيانات الاشعاع الشمسي الكلي الساقط على السطح الأفقي خلال الفترة 1984 - 2024 والمستخدم في هذه الدراسة، والذي يوفر بيانات مناخية مشتقة من خلال ملاحظات الأقمار الصناعية والنماذج المناخية والقياسات الأرضية.

تم الحصول على هذه البيانات من خلال الموقع الإلكتروني الرسمي للمشروع من خلال رابط موقع <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>، حيث تمثلت في بيانات الاشعاع الشمسي الكلي قصير الموجة من نوع (All sky SFC-SW-DWN CERES SYN1 deg) لعدد 274 نقطة موزعة على كامل الأراضي الليبية كما موضح بالشكل (1) والمشار إليه سلفاً. كما تتميز بيانات منصة NASA POWER بالتغطية المكانية والزمانية، حيث تتمثل التغطية المكانية في إمكانية الحصول على بيانات أي موقع سواء كان ممثل بخط طول أو دائرة عرض أو

منطقة بمساحة محددة، بينما التغطية الزمانية تتمثل في الفترة المحددة لتلك البيانات والتي تتوفر من سنة 1981 وحتى الآن، وذلك على أساس ساعة، يوم، شهر، سنة (Ruane وآخرون، 2015).

منهجية الدراسة

اعتمدت الدراسة في المقام الأول التحقق من البيانات الأرضية الموجودة في ليبيا، والتي تتوفر فيها بيانات أرضية للإشعاع الشمسي الكلي خلال الفترة الزمنية 1984-1989، وبيانات الأقمار الصناعية بغية التحقق من دقة البيانات المستنبطة، والتي توفرها منصة باور ناسا عبر موقع <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>. وفي المقام الثاني، نظراً لمحدودية محطات الرصد والقياس الأرضية والتي تغطي كامل منطقة الدراسة، ولغرض الوصول إلى هدف الدراسة، قسمت المساحة الكلية لمنطقة الدراسة إلى شبكة نقاط محددة بخط طول ودائرة عرض والتي تم تحديدها باستخدام برنامج ArcGIS؛ والتي من خلالها تم تحميل بيانات الإشعاع الشمسي الكلي لكل نقطة بمعلومية إحداثياتها الجغرافية لسنوات حديثة تمثل المتوسطات الشهرية للفترة (1984 - 2024) والتحقق من دقتها، ومن ثم انتاج خرائط للتوزيع المكاني للإشعاع الشمسي الكلي على كامل التراب الليبي، حيث تم تنفيذ الدراسة على مرحلتين رئيسيتين هما:

مرحلة التحقق من البيانات

تم في هذه المرحلة التركيز على الفترة الزمنية 1984 - 1989 لكونها تمثل المدة التي تتوفر فيها بيانات أرضية مفاصة للإشعاع الشمسي الكلي في ليبيا. ومن تم استخراج البيانات المقابلة لها لنفس الفترة الزمنية من منصة NASA POWER، ومن ثم إجراء تحليل إحصائي مقارنة باستخدام مؤشرات معامل التحديد (R^2)، والجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE)، ومتوسط الخطأ المطلق (MAE)، إضافة إلى تحليل الانحدار الخطي البسيط لاستنباط معادلة خط الانحدار.

الإجراءات الإحصائية لتقييم دقة البيانات

تحليل الانحدار

تم تطبيق تقنيات تحليل الانحدار الخطي البسيط (Simple Linear Regression) للتحقق من دقة البيانات كأحد الأساليب الإحصائية الأساسية لتقييم قوة العلاقة بين القيم المقدرة ونظيراتها المفاصة في محطات الرصد الأرضية. وبالإمكان كتابة الصيغة العامة لمعادلة خط الانحدار البسيط المستخدمة على النحو التالي:

$$y = ax \dots\dots\dots (1)$$

في هذا الإطار، تعتبر القيم المفاصة المتغير المستقل (x) نظراً لكونها تمثل بيانات الأساس للمقارنة، بينما اعتُبرت القيم المقدرة المتغير التابع (y) بوصفها ناتج النموذج المراد تقييمه، كما تمثل القيمة (a) معامل الانحدار أو ميل الخط المستقيم. تم إجراء التحليل باستخدام برنامج Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)، بالإضافة إلى استخدام برنامج Microsoft Excel لإنتاج معادلة خط الانحدار، ويهدف ذلك إلى التحقق من مدى تمثيل البيانات المقدرة من خلال بيانات إعادة التحليل NASA POWER للمواقع الأرضية بدقة، وتحديد مدى إمكانية الاعتماد عليها في هذه الدراسة، أو الحاجة إلى تعديل القيم المقدرة عند وجود انحرافات جوهرية.

المعايير الإحصائية لتقييم البيانات

تُعد الاختبارات الإحصائية من أهم الأدوات للتحقق من جودة ودقة القيم المقدرة مقارنة بالقيم المفاصة. في هذه الدراسة، تم تطبيق مجموعة من المؤشرات الإحصائية باستخدام برنامج Microsoft Excel للمقارنة بين البيانات المنتجة (المقدرة) من خلال منصة NASA POWER الشهرية وبيانات محطات الرصد الأرضية (المفاصة). تم حساب عدة مؤشرات كمية لقياس دقة الأداء، بهدف تحديد مقدار التباين والانحراف بين القيم المقدرة والمفاصة، وتقييم قدرة القيم المقدرة على تمثيل القيم الحقيقية للإشعاع الشمسي في المواقع المدروسة، حيث شملت المؤشرات كل من:

معامل التحديد (R^2)

يعد معامل التحديد مقياس إحصائي يُظهر مقدار التباين في البيانات الملاحظة التي يفسرها التباين في البيانات المتوقعة (Pineiro وآخرون، 2008)، وتتراوح قيمته ما بين 0 و 1، حيث تشير القيم الأعلى إلى تباين خطأ أقل وأن النموذج يتناسب جيداً، وعادةً ما تُعتبر القيم التي تزيد عن 0.5 مقبولة (Santhi وآخرون، 2001؛ Van Liew وآخرون، 2003؛ Moriasi وآخرون، 2007).

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (P_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{M}_i)^2} \dots\dots\dots (2)$$

حيث: تمثل P_i القيم المقدرة، وتمثل M_i القيم الفعلية أو المفاصة، و \bar{M} متوسط القيم الفعلية.

الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE)

يمثل الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ (RMSE) الانحراف المعياري لمتوسط الفروق بين القيم المتنبأ بها والقيم المرصودة، ويُعد من أهم مؤشرات تقييم دقة النماذج (Kobayashi & Salam, 2000; Gao et al., 2003; Pineiro et al., 2008; Bai et al., 2010).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - M_i)^2} \dots\dots\dots (3)$$

حيث: تمثل P_i القيم المقدرة، وتمثل M_i القيم الفعلية أو المقاسة.

متوسط الخطأ المطلق (MAE)

يعتبر متوسط الخطأ المطلق (MAE) مقياس لمتوسط القيمة المطلقة للفروق بين القيم المقدرة والقيم المقاسة، ويعتبر أقل حساسية للقيم الشاذة (Willmott and Matsuura، 2005)، ويمكن حسابه من خلال العلاقة التالية:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |M_i - P_i| \dots\dots\dots (4)$$

حيث: تمثل P_i القيم المقدرة، وتمثل M_i القيم الفعلية أو المقاسة.

مرحلة التوزيع والاستيفاء المكاني

بناءً على نتائج مرحلة التحقق، تم اعتماد بيانات الإشعاع الشمسي الكلي من منصة NASA POWER لتغطية الفترة 1990-2024، نظراً لعدم توفر بيانات أرضية حديثة لهذه المدة وذلك يعتمد على نتائج دقة وجودة البيانات في المرحلة السابقة. حيث تم استخدام هذه البيانات لإنتاج خرائط مكانية موسمية وسنوية، وتحليل التباين الزمني والمكاني للإشعاع الشمسي الكلي على مستوى ليبيا، باستخدام تقنيات الاستيفاء المكاني ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) بالاعتماد على طريقة k-riking.

النتائج والمناقشة

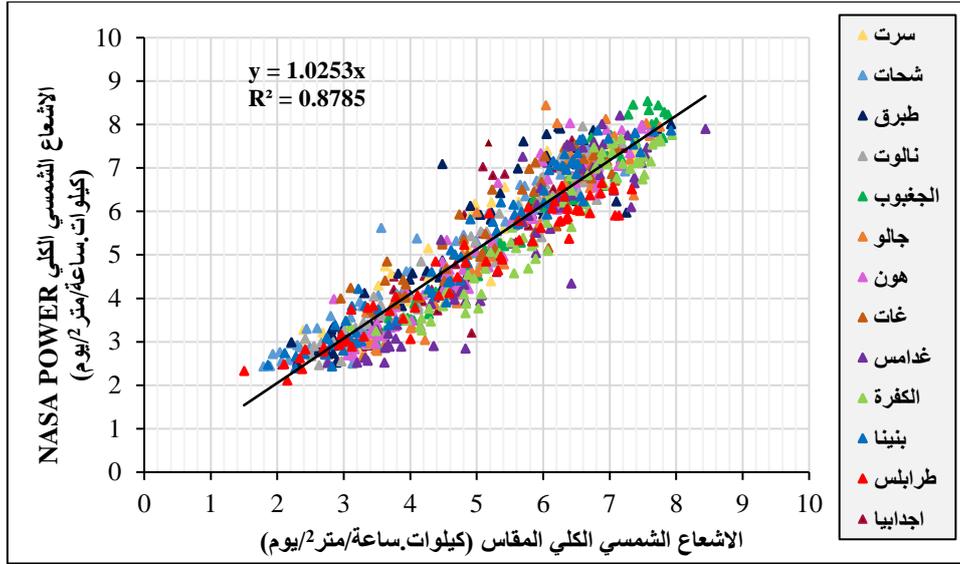
نتائج تحليل الانحدار وتقييم دقة البيانات

بالاعتماد على نتائج تحليل الانحدار الخطي البسيط الموضحة في الجدول رقم (1)، تم تقييم دقة بيانات الإشعاع الشمسي الكلي المقدرة بواسطة بيانات إعادة التحليل التابعة لمشروع NASA POWER، وذلك من خلال مقارنتها مع بيانات الإشعاع الشمسي المقاسة. أظهرت النتائج وجود علاقة قوية بين البيانات المقدرة والبيانات المقاسة كما موضح بالشكل (2)، حيث بلغ معامل الارتباط R قيمة قدرها 0.937، مما يشير إلى وجود ارتباط خطي قوي بين القيم المقدرة بواسطة الأقمار الاصطناعية والنماذج المناخية (بيانات إعادة التحليل) والقيم المقاسة فعلياً في محطات الرصد الأرضية. كما بلغت قيمة معامل التحديد R^2 في حدود 0.879، وهو ما يفسر على أن ما نسبته 87.9% من التباين في القيم المقاسة يمكن تفسيره باستخدام القيم المقدرة، وهذا يشير إلى كفاءة النموذج في تمثيل العلاقة بين المتغيرين.

من جانب آخر، أظهرت نتائج تحليل التباين (ANOVA) أن النموذج الإحصائي المستخدم ذو دلالة معنوية عالية، حيث بلغت قيمة F ما مقداره 5858.303 مما يدل على أن النموذج يفسر جزء كبير من التباين، وكانت القيمة الاحتمالية المصاحبة (P-value) أقل من 0.001، مما يدل على أن النموذج يحقق معنوية إحصائية قوية. ومن حيث الأخطاء التقديرية للنموذج، فقد أظهرت المعايير الإحصائية المستخدمة لكل من الجذر التربيعي لمتوسط الخطأ RMSE ومتوسط الخطأ المطلق MAE قيم منخفضة، حيث كانت (0.602 و 0.468 كيلوات/ساعة/متر²/يوم)، على التوالي. ويعكس هذا النموذج قدرة عالية على محاكاة وتقدير الإشعاع الشمسي الكلي في منطقة الدراسة، ويعزز من موثوقية استخدام بيانات إعادة التحليل والأقمار الصناعية كمصدر بديل في حالة عدم توفر البيانات الأرضية أو تعويض البيانات في المناطق التي تعاني من نقص في محطات الرصد. وبالتالي، تؤكد هذه النتائج أن بيانات NASA POWER تعكس بدقة بيانات القياس الأرضي، مما يجعلها أداة موثوقة يمكن الاعتماد عليها كبديل للبيانات المقاسة، خاصة في المواقع التي تفتقر إلى محطات رصد أرضية.

جدول 2. نتائج التحليل الإحصائي والمؤشرات الإحصائية المستخدمة.

القيمة	الرمز	المؤشر الإحصائي
0.937	R	معامل الارتباط
0.879	R^2	معامل التحديد
0.602	RMSE	الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ
0.468	MAE	متوسط الخطأ المطلق
5858.30	F	إختبار F
0.001	P-value	القيمة الاحتمالية (مستوى الدلالة)
812	N	حجم العينات (البيانات المستخدمة)



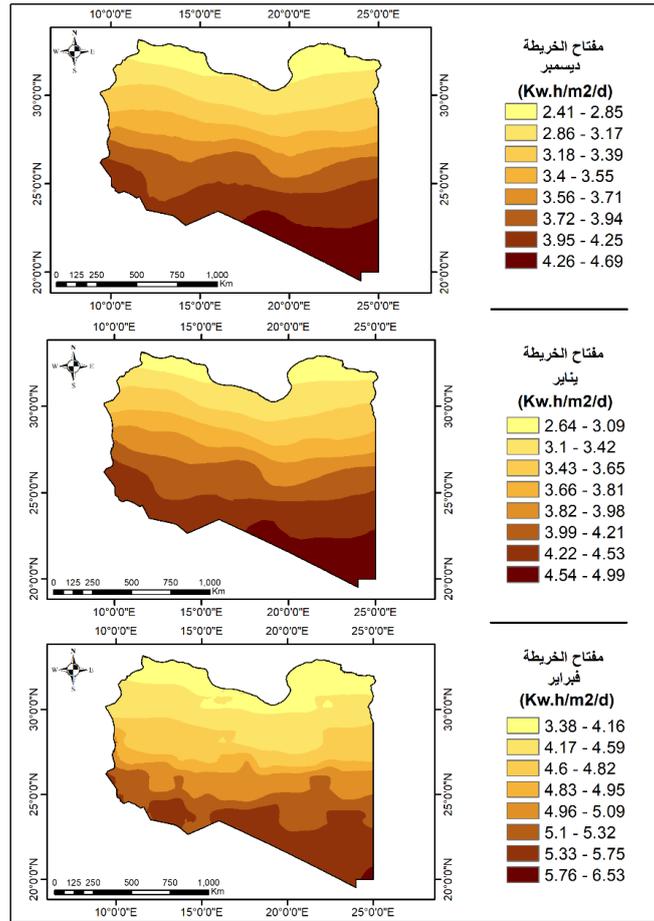
شكل 2. مقارنة بيانات NASA POWER والبيانات المقاسة من محطات القياس الأرضية.

نتائج التباين المكاني والزمني لكميات الإشعاع الشمسي الكلي في ليبيا خلال فصول السنة التباين المكاني والزمني للإشعاع الشمسي الكلي خلال فصل الشتاء

يوضح الشكل (3) التوزيع المكاني لكميات الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على السطح الأفقي في ليبيا خلال فصل الشتاء وذلك لأشهر (ديسمبر ويناير وفبراير)، حيث تراوحت كميات الإشعاع الشمسي الكلي في شهر ديسمبر ما بين 2.41 و 4.69 (كيلوات. ساعة/متر²/يوم). بحيث أظهرت المناطق الشمالية الغربية والشمالية الشرقية من البلاد والتمثلة في الشريط الساحلي ومناطق الدواخل والجبل الأخضر أدنى القيم والتي تراوحت ما بين 2.41 و 3.17 (كيلوات. ساعة/متر²/يوم)، في حين أظهرت المناطق الوسطى ارتفاعاً طفيفاً في القيم والتي تراوحت ما بين 3.18 و 3.71 (كيلوات. ساعة/متر²/يوم). في حين كانت أعلى القيم في المناطق الجنوبية وخصوصاً مناطق الجنوب الشرقي والتي تراوحت ما بين 3.72 و 4.69 (كيلوات. ساعة/متر²/يوم)، فمن خلال ما تقدم يلاحظ أن كميات الإشعاع الشمسي الكلي المستقبل خلال شهر ديسمبر تقل شمالاً وذلك بسبب الغيوم وارتفاع نسبة الرطوبة النسبية في الجو، بينما المناطق الجنوبية والتي تتميز بمناخ صحراوي جاف مما يسمح بوصول إشعاع شمسي أعلى.

فيما يتعلق بشهر يناير، فقد شهد هذا الشهر ارتفاع نسبي عن شهر ديسمبر في كميات الإشعاع الشمسي الكلي، حيث تراوحت القيم ما بين 2.64 و 4.99 (كيلوات. ساعة/متر²/يوم)، فقد أعطت مناطق الشمال الغربي والشمال الشرقي أدنى القيم في استقبال كميات الإشعاع الشمسي الكلي والتي تراوحت ما بين 2.64 و 3.42 (كيلوات. ساعة/متر²/يوم)، في حين أظهرت المناطق الجنوبية الغربية وأجزاء من المناطق الجنوبية الشرقية والتمثلة في مناطق سبها ومرزق وغات والكفرة أعلى القيم، والتي تراوحت ما بين 3.82 و 4.99 (كيلوات. ساعة/متر²/يوم). وتجدر الإشارة هنا إلى أن المناطق الجنوبية تحافظ على إشعاع شمسي جيد بسبب صفاء الجو مقارنة بمناطق الشمال. أما فيما يتعلق بشهر فبراير، فقد شهد هذا الشهر أيضاً زيادة في كميات الإشعاع الشمسي الكلي على كامل التراب الليبي وتحسن واضح في جميع أنحاء البلاد مقارنة بأشهر ديسمبر ويناير، حيث تراوحت القيم ما بين 3.38 و 6.53 (كيلوات. ساعة/متر²/يوم).

بالنسبة للمناطق الشمالية تعتبر أقل نسبياً من المناطق الجنوبية، حيث تتراوح قيم الإشعاع الشمسي المستقبل ما بين 3.38 و 4.16 (كيلوات. ساعة/متر²/يوم)، فيما كانت مناطق وسط البلاد ومناطق الجنوب الشرقي والجنوب الغربي قد أعطت أعلى القيم والتي تراوحت ما بين 4.6 و 6.54 (كيلوات. ساعة/متر²/يوم). بشكل عام، فإن قيم الإشعاع الشمسي الكلي أظهرت أن هناك تدرجاً واضحاً من الشمال إلى الجنوب في كل شهر من فصل الشتاء، حيث يزيد الإشعاع تدريجياً كلما اتجهنا جنوباً. وأن الفرق بين أشهر ديسمبر ويناير وفبراير؛ أن شهر فبراير قد أعطى أعلى معدل إشعاع شمسي خلال فصل الشتاء، وهذا ما يشير إلى اقتراب انتهاء الشتاء وبداية التحول إلى فصل الربيع. كذلك، ويلاحظ أن هناك نمط تزايد واضح للإشعاع الشمسي من ديسمبر إلى فبراير، وأن الجنوب الليبي يتمتع بإشعاع ثابت وعال حتى في أقل فصول السنة استقبلاً للإشعاع الشمسي الكلي (الشتاء والخريف). كذلك، تُشير نتائج التوزيع المكاني لكميات الإشعاع الشمسي في فصل الشتاء إلى أن الاستثمار في الطاقة الشمسية مناسب طوال العام في مناطق الجنوب، بينما يتطلب تصميمًا محسّنًا للألواح الشمسية في الشمال كزاوية ميلان أنظمة تتبع الشمس وتقنيات أخرى متقدمة في هذا المجال لتعويض الانخفاض في الإشعاع المستقبل.



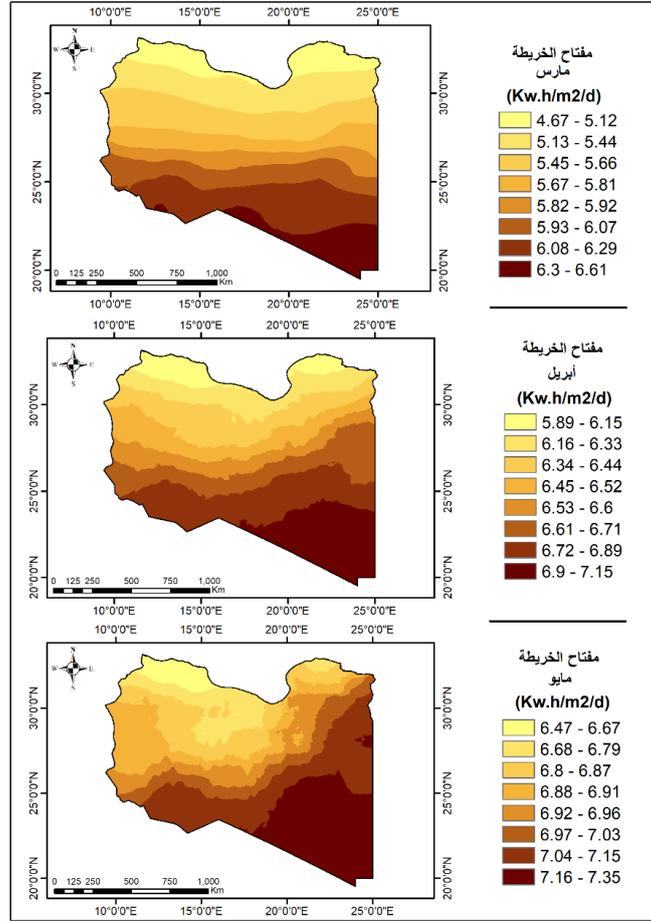
شكل 3. التوزيع المكاني للإشعاع الشمسي الكلي لفصل الشتاء. التباين المكاني والزمني للإشعاع الشمسي الكلي خلال فصل الربيع

يوضح الشكل (4) التوزيع المكاني لكميات الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على السطح الأفقي في ليبيا خلال فصل الربيع وذلك لأشهر (مارس وإبريل ومايو)، حيث تراوحت كميات الإشعاع الشمسي الكلي في شهر مارس ما بين 4.67 و 6.61 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم). ويلاحظ من خلال خرائط التوزيع المكاني لكميات الإشعاع الشمسي الكلي يزداد تدريجياً من الشمال إلى الجنوب وخصوصاً أقصى الجنوب الشرقي، ففي شهر مارس أظهرت مناطق الشمال الشرقي والشمال الغربي أدنى القيم والتي تراوحت ما بين 4.67 و 5.44 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، بينما في مناطق وسط البلاد والتي تعتبر مناطق انتقالية والتي تراوحت فيها كميات الإشعاع الشمسي الكلي ما بين 5.45 و 5.92 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، بينما تركزت أعلى القيم في مناطق أقصى الجنوب وخصوصاً الجنوب الشرقي وأجزاء من الجنوب الغربي والمتمثلة في مناطق الكفرة ومرزق وغات. بشكل عام، في شهر مارس لا تزال الزاوية الشمسية منخفضة نسبياً، مما يقلل من قيم الإشعاع الشمسي الكلي في مناطق الشمال، حيث التأثيرات المناخية كالغيوم والرطوبة النسبية تؤثر في المناطق الساحلية والقريبة منها، وهذا ما يفسر انخفاض كميات الإشعاع الشمسي في تلك المناطق، في حين أن المناطق الجنوبية تستقبل كميات أعلى نتيجة لصفاء الجو، مما يسمح باستقبال كميات أعلى من الإشعاع الشمسي الكلي.

فيما يتعلق بشهر أبريل، فقد شهد هذا الشهر زيادة عن شهر مارس في كميات الإشعاع الشمسي الكلي، حيث تراوحت كميات الإشعاع الشمسي الكلي ما بين 5.89 و 7.15 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم). حيث أظهرت المناطق الشمالية الساحلية وبعض مناطق الدواخل كميات أقل للإشعاع الشمسي الكلي المستقبل والتي تراوحت ما بين 5.89 و 6.33 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، فيما تركزت أعلى القيم في مناطق الجنوب الشرقي والوسط الشرقي والمتمثلة في الكفرة وتازربو والواحات وبعض مناطق الوسط الغربي، والتي تشير إلى زيادة ملحوظة في كميات الإشعاع الشمسي الكلي، حيث تراوحت القيم ما بين 6.45 و 7.15 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم). بشكل عام، في شهر إبريل تزداد زاوية سقوط الأشعة الشمسية وهذا ما يعكس إمكانية استقبال إشعاع شمسي أعلى عن الأشهر الذي تسبقه، بالإضافة إلى انخفاض الغطاء السحابي مع قرب ذروة الإشعاع الصيفي والذي يعزز من زيادة في الكميات المستقبلية جنوباً، وعلى وجه الخصوص مناطق الجنوب الشرقي. أما فيما يتعلق بشهر مايو، فيلاحظ ارتفاع ملحوظ في كميات الإشعاع الشمسي الكلي على كامل البلاد مع تركز أعلى القيم في المناطق الجنوبية والشرقية، حيث تراوحت كميات الإشعاع الشمسي الكلي ما بين 6.47 و 7.35

(كيلوات.ساعة/متر²/يوم). حيث أظهرت النتائج أن المناطق الشرقية والجنوبية الشرقية من البلاد أعلى المناطق استقبالا للاشعة الشمسية بقيم تتراوح ما بين 6.92 و 7.35 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، فيما أظهرت المناطق الشمالية الغربية وبعض مناطق الشمال الشرقي ومناطق الوسط أقل القيم نسبياً، على الرغم من التحسن على كامل البلاد، حيث تراوحت القيم ما بين 6.47 و 6.87 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم).

بشكل عام، إن كميات الإشعاع الشمسي الكلي تزداد تدريجياً من مارس إلى مايو، مما يعكس انتقال الشمس نحو خط الاستواء وتكون عمودية أكثر على تلك المناطق. ومن خلال التباين المكاني في فصل الربيع، فقد وجد أن كميات الإشعاع الشمسي الكلي كانت أعلى في مناطق الجنوب والشرق، نتيجة قلة الغيوم وارتفاع زاوية سقوط الشمس إضافة إلى صفاء الجو، حيث يعتبر شهر مايو ذروة الإشعاع الشمسي في فصل الربيع، حيث الأجواء تصبح أكثر جفافاً، وزاوية سقوط الشمس تكون شبه عمودية، مما يزيد كمية الإشعاع المستقبلة، خصوصاً في المناطق الصحراوية المكشوفة، بالإضافة إلى أن شهر مايو يمثل نهاية فصل الربيع وبداية الانتقال نحو أشهر الصيف، بزواوية سقوط شمسية أعلى من ذي قبل.



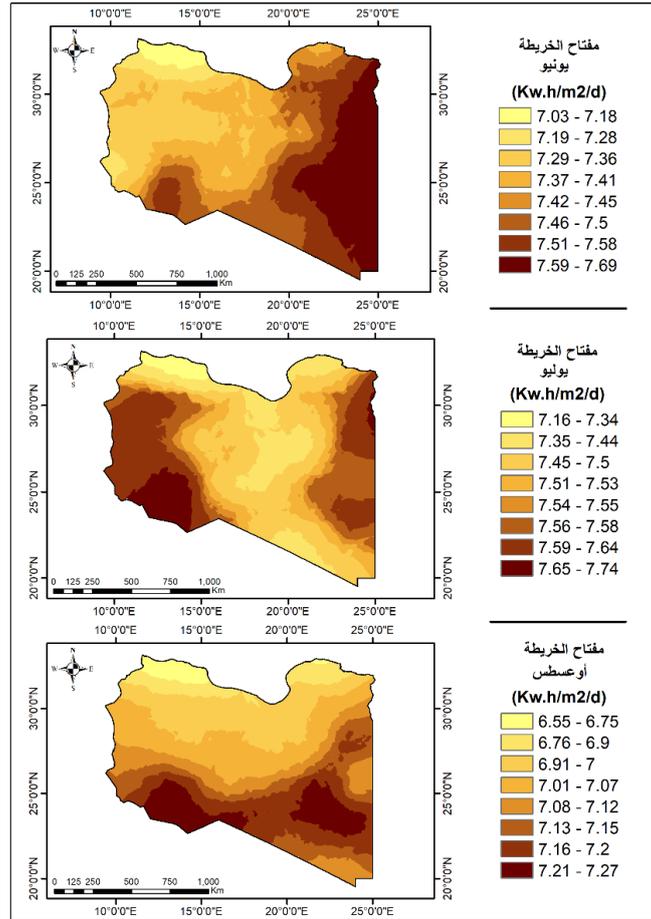
شكل 4. التوزيع المكاني للإشعاع الشمسي الكلي لفصل الربيع.

التباين المكاني والزمني للإشعاع الشمسي الكلي خلال فصل الصيف

يوضح الشكل (5) التوزيع المكاني لكميات الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على السطح الأفقي في ليبيا خلال فصل الصيف وذلك لأشهر (يونيو و يوليو و اغسطس)، حيث تراوحت كميات الإشعاع الشمسي الكلي في شهر يونيو ما بين 7.03 و 7.69 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، حيث أظهرت المناطق الشرقية والجنوب الشرقية أعلى كميات للإشعاع الشمسي الكلي والتي تركزت فيها أعلى القيم، حيث تراوحت القيم ما بين 7.42 و 7.69 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم) والتي تمثلت في مناطق كل من الكفرة و جالو والجغبوب والواقعة على الحدود الشرقية للبلاد، لكون تلك المناطق تعتبر مناطق صحراوية جافة وتقل فيها السحب وتتمتع بزواوية سقوط مثالية في هذا الوقت من السنة، في حين أظهرت مناطق الشمال الغربي ومناطق الوسط وبعض مناطق أقصى الجنوب الغربي أدنى القيم ويتدرج واضحاً من الشمال إلى الجنوب، حيث تراوحت القيم ما بين 7.16 و 7.36 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم).

وعلى وجه الخصوص، يلاحظ أن هناك تدرجاً واضحاً من الغرب إلى الشرق مع الاتجاه نحو الشرق والجنوب الشرقي تزداد كميات الإشعاع الشمسي الكلي على كامل التراب الليبي، وهذا ما يشير ويبرز التأثير القاري والبعد عن المؤثرات

البحرية وقلة السحب والذي بدوره يؤدي إلى زيادة كميات الإشعاع الشمسي الكلي. فيما يتعلق بشهر يوليو، يتميز نمط التوزيع المكاني في هذا الشهر بتوزيع بوجود منطقتين تشكلن مرتفعتين في كميات الإشعاع الشمسي الكلي غرب وشرق البلاد، حيث سجلت المناطق الشرقية والتي تمثلت في كل من جالو والجغبوب والواحات وطبرق أعلى المستويات من كميات الإشعاع الشمسي، بالإضافة إلى مناطق الغرب والمتمثلة في الشويرف ووادي الشاطي وأوباري وجنوب الجبل الغربي والحماة والتي تشير إلى الذروة الصيفية في تلك المناطق، حيث تراوحت كميات الإشعاع الشمسي الكلي ما بين 7.51 و 7.74 (كيلوات ساعة/متر²/يوم)، في حين كانت أدنى القيم بانخفاض نسبي قد سجلت في المناطق الشمالية الساحلية، وكذلك مناطق الوسط وأقصى الجنوب والجنوب الشرقي بتدرج نسبي، والتي تراوحت فيها كميات الإشعاع الشمسي الكلي ما بين 7.16 و 7.50 (كيلوات ساعة/متر²/يوم).



شكل 5. التوزيع المكاني للإشعاع الشمسي الكلي لفصل الصيف.

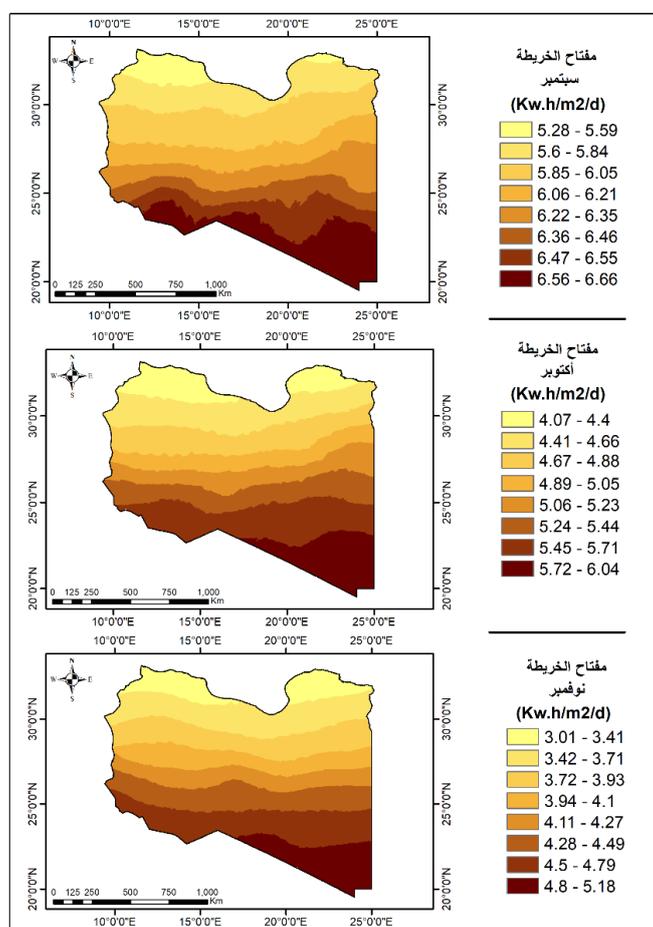
أما فيما يتعلق بشهر أوغسطس، فقد شهد هذا الشهر انخفاض نسبي مقارنة بأشهر يونيو ويوليو مع انخفاض تدريجي لكميات الإشعاع الشمسي من الشرق إلى الغرب، مع التميز النسبي في المناطق الجنوبية الشرقية عن الغربية من البلاد، حيث تركزت أعلى القيم في المناطق الشرقية وخصوصاً في الصحراء الشرقية والمتمثلة في مناطق الكفرة بدرجة أعلى والجغبوب بدرجة أقل، كما كانت مرتفعة القيم في مناطق أقصى الجنوب الغربي والمتمثلة في مناطق مرزق واجزاء من غات، حيث تراوحت أعلى القيم ما بين 7.08 و 7.27 (كيلوات ساعة/متر²/يوم)، في حين لوحظت أدنى القيم في المناطق الشمالية الشرقية والغربية الساحلية والمناطق الداخلية والوسطى، حيث تراوحت ما بين 6.55 و 7.00 (كيلوات ساعة/متر²/يوم). ومن حيث نمط التوزيع فيشير ذلك إلى انخفاض موسمي في القيم الكلية لكميات الإشعاع الشمسي الكلي.

بشكل عام، أظهرت النتائج أن فصل الصيف تتركز الذروة الإشعاعية في أشهر يونيو ويوليو، حيث يمثل شهر أوغسطس بداية التراجع الموسمي للإشعاع المستقبل، ولكنه يبقى ذو أشعاع شمسي عالي ويعبر عن أعلى القيم مقارنة بأشهر السنة الأخرى. كذلك، أظهرت المناطق الشرقية أنها تستقبل أكبر كمية من الإشعاع الشمسي الكلي في أشهر الصيف المختلفة وخصوصاً يونيو ويوليو، بينما الجنوب الليبي بالرغم أنه يحتفظ بكميات إشعاع شمسي مرتفع إلا أنه أحياناً يتأثر بالعواصف الرملية والرياح المحملة بالغبار مما يؤثر على كميات الإشعاع الشمسي الكلي المستقبل، أما عن المناطق الشمالية الساحلية

فهي تظهر أدنى القيم لتأثرها بالمؤثرات البحرية والرطوبة المرتفعة أحياناً. وبالتالي فإن فصل الصيف يعد من الفصول الغنية بالطاقة الشمسية، حيث تتجاوز قيم الإشعاع الشمسي الكلي غالباً أكثر من 7 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، وأن هذه الكمية تعتبر ممتازة لاقامة المشاريع المختلفة وحصاد الطاقة الشمسية. إن التوزيع الزمني والمكاني للإشعاع الشمسي الكلي في فصل الصيف يعكس تداخلاً بين كل من العوامل الفلكية (زاوية ميلان الشمس)، والجغرافية (دوائر العرض والارتفاع)، وكذلك المناخية (كمية السحب والرطوبة والغبار).

التباين المكاني للإشعاع الشمسي الكلي خلال فصل الخريف

يوضح الشكل (6) التوزيع المكاني لكميات الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على السطح الأفقي في ليبيا خلال فصل الخريف وذلك لأشهر (سبتمبر وأكتوبر ونوفمبر)، حيث شهدت كميات الإشعاع الشمسي الكلي في هذه الأشهر إنخفاض طفيف في القيم المسجلة عن فصل الصيف، إلا أن شهر سبتمبر يحمل طابعاً صيفياً من حيث قوة الإشعاع الشمسي الكلي خصوصاً مناطق أقصى الجنوب والجنوب الشرقي، حيث تراوحت كميات الإشعاع الشمسي الكلي في شهر سبتمبر ما بين 5.28 و 6.66 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، حيث أظهرت المناطق الجنوبية الشرقية والمتمثلة في مناطق الكفرة ومرزق وما جاورها بالإضافة إلى مناطق الوسط والتي امتدت إلى الوسط والحدود الجنوبية الغربية من البلاد أعلى القيم، والتي تعكس ذروة الإشعاع في هذا الشهر، والتي تراوحت ما بين 6.22 و 6.66 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم).



شكل 6. التوزيع المكاني للإشعاع الشمسي الكلي لفصل الخريف.

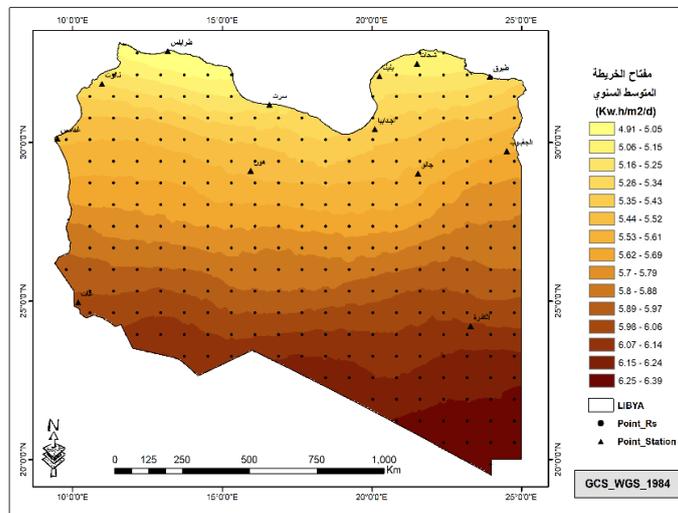
فيما شهدت المناطق الشمالية الغربية والشرقية الساحلية وصولاً إلى مناطق الدواخل والتي أظهرت أدنى القيم بتدرج وانخفاض نسبي والتي تراوحت ما بين 5.28 و 6.21 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم). فيما أظهر التوزيع المكاني للإشعاع الشمسي لشهر أكتوبر، انخفاضاً ملحوظاً أكثر عن شهر سبتمبر على كامل الأراضي الليبية، ومع ذلك تفضل مناطق الجنوب الشرقي والمتمثلة في مناطق الكفرة وما جاورها، بالإضافة إلى بعضاً من أجزاء أقصى الجنوب والمتمثلة في مناطق مرزق والتي سجلت أعلى القيم، والتي تراوحت ما بين 5.06 و 6.04 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، في حين شهدت المناطق الشمالية الشرقية والغربية انخفاضاً ملحوظاً في كميات الإشعاع الشمسي الكلي، والمتمثلة في مناطق الشريط الساحلي ومناطق الدواخل والجبل الاخضر والجبل الغربي وجنوبه، والتي اظهرت أدنى القيم، حيث تراوحت ما بين 4.07 و 4.66 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم).

فيما يتعلق بشهر نوفمبر، فقد أظهر التوزيع المكاني لكميات الإشعاع الشمسي الكلي انخفاضاً ملحوظاً أيضاً من سبتمبر إلى نوفمبر، حيث تراوحت القيم ما بين 3.01 و 5.18 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، فيما احتفظ أقصى الجنوب ومناطق الوسط بمستويات أعلى ومعتدلة في قيم الإشعاع المستقبل خلال هذا الشهر، والتي تركزت في مناطق الكفرة ومرزق وأجزاء من غات وما جاورها، حيث تراوحت القيم ما بين 4.11 و 5.18 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، بينما شهدت المناطق الشمالية سواء الشرقية والغربية، بالإضافة إلى المناطق الداخلية منها والوسطى انخفاضاً ملحوظاً أيضاً في القيم مع تدرج في نمط التوزيع، حيث تراوحت القيم ما بين 3.01 و 4.10 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم). ويمثل شهر نوفمبر نهاية الخريف وبداية دخول الشتاء، حيث يقل الإشعاع الشمسي بشكل أوضح نتيجة انخفاض زاوية الشمس وتراكم الغيوم خاصة في المناطق الساحلية. بشكل عام، يتسم فصل الخريف بقوة نسبية بكميات الإشعاع الشمسي الكلي في المناطق الجنوبية طوال أشهر الخريف، ويقابله انخفاضاً ملحوظاً في الشمال، حيث زمانياً تكون كميات الإشعاع الشمسي الكلي تبدأ في التناقص التدريجي من بداية الفصل إلى نهايته؛ بينما مكانياً يتضح أن هناك تفاوتاً مكانياً واضح بين الجنوب المرتفع في قيم الإشعاع الشمسي الكلي إلى الشمال والذي يتسم بالانخفاض في القيم المستقبلية، حيث إن هذا الانخفاض يعكس التغير الموسمي من نهاية الصيف إلى بداية الشتاء.

التوزيع المكاني والزمني للمتوسط السنوي لكمية الإشعاع الشمسي الكلي في ليبيا

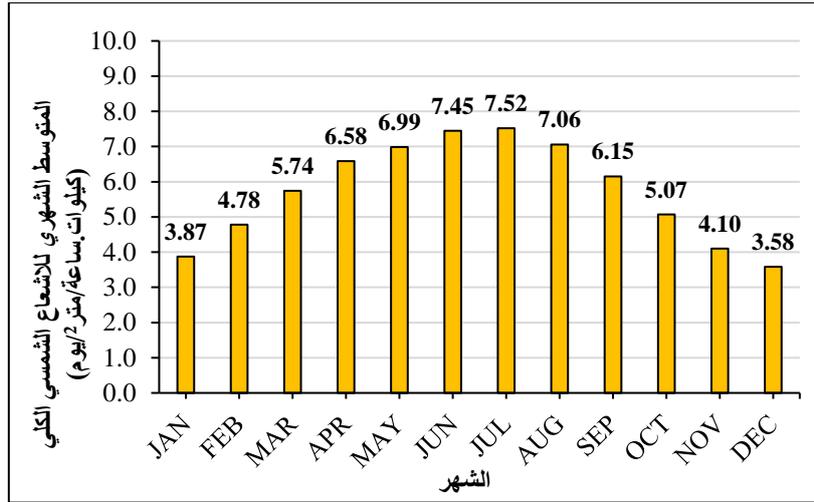
يوضح الشكل (7) التباين المكاني السنوي لتوزيع كميات الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على السطح الأفقي في ليبيا. فمن خلال التوزيع المكاني يلاحظ أن معدلات الإشعاع الشمسي الكلي تظهر تدرج بشكل واضح في القيم وذلك على امتداد المساحة الكلية للأراضي الليبية، تراوحت ما بين 4.91 و 6.39 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، فقد أظهرت المناطق الشمالية (الساحلية) الممتدة من طبرق شرقاً إلى زوارة غرباً، بالإضافة إلى المناطق الداخلية والمتمثلة في مناطق جنوب الجبل الأخضر و جنوب الجبل الغربي، حيث أظهرت أدنى القيم والتي تراوحت ما بين 4.91 و 5.43 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، ويعزى ذلك إلى تأثرها بالمناخ المتوسطي المعتدل، بالإضافة إلى زيادة نسبة السحب والرطوبة النسبية، كما أن الزوايا الشمسية تكون أقل مما هي عليه في مناطق الجنوب بسبب الموقع الجغرافي والذي يحدده خطوط الطول ودوائر العرض والارتفاع.

فيما شهدت المناطق الوسطى زيادة بتدرج ملحوظ في كميات الإشعاع الشمسي الكلي، حيث تتميز بجزر صحراوي صافي مما يسمح بوصول كميات أكبر من الإشعاع الشمسي الكلي عنها من مناطق الشمال، حيث تتراوح القيم في تلك المناطق ما بين 5.44 و 5.79 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، بينما شهدت المناطق الجنوبية الشرقية والجنوبية الغربية والمتمثلة في الكفرة والسرير وتازربو ومرزق وغات وكذلك أجزاء المناطق الوسطى والجنوبية الغربية والمتمثلة في مناطق (الصحراء الكبرى) بشكل عام والتي تشمل مناطق الجفرة والشاطي وسبها، والتي أظهرت أعلى القيم من حيث استقبال الإشعاع الشمسي الكلي خلال السنة، حيث تراوحت ما بين 5.80 و 6.39 (كيلوات.ساعة/متر²/يوم)، حيث إن تلك المناطق تعتبر مثالية للاستثمار في قطاعات الطاقة الشمسية، وتعد من المناطق الواعدة في إنتاج الطاقة الشمسية النظيفة. بشكل عام، يعد الجنوب الليبي والذي يمثل أكثر المناطق استقبالا للإشعاع الشمسي، وبالتالي فهو ملائم لمشروعات الطاقة الشمسية نظراً للارتفاع الكبير في كميات الإشعاع الشمسي الكلي المستقبلية. من جهة أخرى يعكس التدرج في قيم الإشعاع الشمسي من الشمال إلى الجنوب تأثير الموقع الجغرافي، حيث تزداد قيم الإشعاع الشمسي الكلي كلما اتجهنا ناحية الجنوب وخصوصاً الجنوب الشرقي، ويعزى ذلك إلى قلة نسبة تغطية السحب وارتفاع زاوية سقوط الأشعة الشمسية جنوباً، بالإضافة إلى زيادة طول اليوم وبالتالي زيادة في عدد ساعات السطوع الشمسي، والتي تعد المحددات الرئيسية للتباين في كميات الإشعاع الشمسي الكلي واستقباله.



شكل 7. التوزيع المكاني للمتوسط السنوي لكمية الإشعاع الشمسي الكلي في ليبيا.

كما يوضح الشكل (8) التغيرات الشهرية في متوسط كميات الإشعاع الشمسي الكلي في ليبيا، حيث يلاحظ أن القيم تكون في أدنى مستوياتها خلال شهري ديسمبر ويناير نتيجة لقصر ساعات النهار وانخفاض زاوية سقوط الأشعة الشمسية، إضافة إلى زيادة تأثير الغيوم والرطوبة خاصة في المناطق الشمالية ذات المناخ المتوسطي. ومع بداية فصل الربيع تزداد القيم تدريجياً لتبلغ ذروتها في أشهر يونيو ويوليو، وذلك بسبب طول فترة النهار، وارتفاع الزوايا الشمسية، وصفاء الجو في معظم المناطق الداخلية والصحراوية. ثم تبدأ القيم في الانخفاض التدريجي من شهر أغسطس وحتى نوفمبر نتيجة لتناقص ساعات السطوع الشمسي. إذ يعكس نمط التوزيع الشهري بوضوح العلاقة المباشرة بين كمية الإشعاع الشمسي الكلي من جهة، والعوامل الفلكية كزاوية سقوط الشمس وطول النهار، إضافة إلى الظروف المناخية مثل السحب والرطوبة والغبار من جهة أخرى، وهذا ما يؤكد أن ليبيا تتمتع بموارد طاقة شمسية عالية طوال العام مع تباين موسمي ملحوظ يمكن استثماره في التنمية والتخطيط لمشاريع الطاقة الشمسية، حيث تكون فترات الصيف والخريف الأكثر إنتاجية للطاقة الكهروضوئية والحرارية الشمسية.



شكل 8. المتوسطات الشهرية لكميات الإشعاع الشمسي الكلي في ليبيا.

الخلاصة والاستنتاجات

أظهرت نتائج الدراسة أن بيانات الإشعاع الشمسي الكلي المستخرجة من منصة NASA POWER تتسم بدرجة عالية من الدقة المقبولة عند مقارنتها بالقياسات الأرضية في ليبيا، حيث بلغ كل من معامل الارتباط (R) ومعامل التحديد (R^2) 0.937 و 0.879، على التوالي. مع قيم منخفضة لخطأ التقدير لكل من $RMSE$ و MAE ، والتي بلغت 0.602 و 0.468 (كيلوات ساعة/متر²/يوم)، على التوالي. مما يدل على موثوقية عالية لهذه البيانات. كما أظهرت الخرائط المكانية والزمانية وجود تدرج واضح في مستويات الإشعاع الشمسي الكلي من الشمال إلى الجنوب مع تباين زمني بين أشهر السنة والعروض المختلفة، مع تسجيل أعلى القيم في المناطق الجنوبية الشرقية وأقصى الجنوب، وأدنى القيم لوحظت في المناطق الشمالية وخصوصاً الشريط الساحلي.

كما تبين أن فصل الصيف يمثل الذروة في معدلات الإشعاع الشمسي الكلي، يليه فصلي الربيع والخريف، بينما يسجل فصل الشتاء أقل المعدلات إشعاعاً، مع استمرار ملحوظ لارتفاع كميات الإشعاع في الجنوب حتى خلال الأشهر التي لا تمثل الذروة كالخريف والشتاء. تؤكد هذه النتائج أن بيانات NASA POWER تمثل مصدرًا موثوقًا كمصدر بديل لبيانات الإشعاع الشمسي الكلي في ليبيا، وبالتالي يمكن الاعتماد عليها في التخطيط لمشاريع الطاقة الشمسية خاصة في المناطق التي تعاني من نقص القياسات الأرضية. ومن خلال ما تقدم توصي الدراسة بإمكانية استخدام بيانات NASA POWER في دراسات وتخطيط وتصميم محطات تجميع الطاقة الشمسية في ليبيا، بالإضافة إلى إنشاء محطات رصد أرضية إضافية في المناطق التي تفتقر للقياسات بغرض التحقق المستمر من دقة بيانات إعادة التحليل المنتجة من خلال النماذج المناخية والأقمار الصناعية، كما يمكن الاعتماد والاستفادة من الخرائط الموسمية المنتجة واتباع هذه المنهجية لتحديد الفترات والمواقع المثلى للاستثمار في مشاريع الطاقة الشمسية. أخيراً، توسيع نطاق الدراسة وإدخال برمجيات الذكاء الاصطناعي كالتشبيكات العصبية في تحسين دقة التنبؤ بكميات لأشعاع الشمسي الكلي على صعيد الدراسات المحلية.

المراجع

1. Sabo, Mahmoud Lurwan; Mariun, Norman; Hizam, Hashim; Mohd Radzi, Mohd Amran; Zakaria, Azmi. (2017). Spatial matching of large-scale grid-connected photovoltaic power generation with utility demand in Peninsular Malaysia. Applied Energy, Elsevier, vol. 191(C), pages 663-688. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.01.087>
2. Ouali, Kamel; Alkama, Rezak. (2014). A new Model of global solar radiation based on meteorological data in Bejaia city (Algeria). Energy Procedia. 50:670-676. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.06.082>

3. Hofierka, Jaroslav; Kanuk Jan; Gally Michal. (2014). The spatial distribution of photovoltaic power plants in relation to solar resource potential: the case of the Czech Republic and Slovakia. *Moravian Geogr Rep.* 22:26–33. <http://dx.doi.org/10.2478/mgr-2014-0009>
4. Chen JL, Li GS. (2012). Parameterization and mapping of solar radiation in data sparse regions. *Asia-Pac J Atmos Sci.* 48(4):423–31. <https://doi.org/10.1007/s13143-012-0038-y>
5. Sullivan, Patrick; Eurek, Kelly; Margolis, Robert. (2014). Advanced methods for incorporating solar energy technologies into electric sector capacity-expansion models: literature review and analysis, technical report. Golden, CO, USA: NREL; 2014. <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61185.pdf>
6. Hunt, Leslie Anthony; Kuchar, Leszek; Swanton, Clarence. (1998). Estimation of solar radiation for use in crop modelling. *Agric. Forest Meteorol.*, 91, 293-300. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00055-0)
7. Orte, Facundo; Lusi, Anabela; Carmona, Facundo; D'Elia, Raul; Faraminan, Adan; Wolfram, Elian. (2021). Comparison of NASA-POWER solar radiation data with ground-based measurements in the south of South America. DOI: 10.1109/RPIC53795.2021.9648428
8. Prakash K. Jha; Panos Athanasiadis; Silvio Gualdi; Antonio Trabucco; & Valentina Mereu; Vakhtang Shelia; Gerrit Hoogenboom. (2018). Evaluating the applicability of using daily forecasts from seasonal prediction systems (SPSs) for agriculture: a case study of Nepal's Terai with the NCEP CFSv2. *Theor. Appl. Climatol.* <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2433-5>
9. Bai, J., Chen, X., Dobermann, A., Yang, H., Cassman, K., Zhang, F. (2010). Evaluation of NASA satellite- and model-derived weather data for simulation of maize yield potential in China. *Agron. J.* 102 (1), 9. <https://doi.org/10.2134/agronj2009.0085>
10. White, Jeffrey; Hoogenboom, Gerrit; Stackhouse, Paul; Hoell, James. (2008). Evaluation of NASA satellite- and assimilation model-derived long term daily temperature data over the continental US. *Agric. For. Meteorol.* 148 (10), 1574–1584 <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2008.05.017>
11. White, Jeffrey; Hoogenboom, Gerrit; Wilkens, Paul; Stackhouse, Paul; Hoel, James. (2011). Evaluation of satellite-based, modeled-derived daily solar radiation data for the continental United States. *Agron J.* 103, 1242–1251. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0038>
12. Wart, Justin van; Grassini, Patricio; Cassman, Kenneth. (2013). Impact of derived global weather data on simulated crop yields. *Glob. Change Biol.* 19, 3822–3834. <https://doi.org/10.1111/gcb.12302>
13. Monteiro, Leonardo; Sentelhas, Paulo; Pedra, George. (2018). Assessment of NASA POWER satellite-based weather system for Brazilian conditions and its impact on sugarcane yield simulation. *Int. J. Climatol.* 38 (6), 1571–1581. <https://doi.org/10.1002/joc.5282>
14. Alyahya, S., Irfan, M.A., 2016. Analysis from the new solar radiation Atlas for Saudi Arabia. *Solar Energy* 130, 116–127. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.01.053>
15. Grossi, Gallegos; Righini Raúl. (2007). Atlas de Energía solar de la Republica Argentina. Publicado por la Universidad Nacional de Lujan y la Secretaría de Ciencia y Tecnología, Buenos Aires, Argentina, 74 paginas + 1 CD-ROM, mayo de 2007 (ISBN 978-987-9285-36-7), Registro de la Propiedad Intelectual No. 554247 del 15.
16. Grossi, Gallegos H., 1998. Distribución de la radiación solar global en la Republica Argentina. II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente* 5, 33–42. ISBN: 978-987-9285-36-7
17. Huld, T., Müller, R., Gambardella, A., 2012. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar Energy* 86 (6), 1803–1815. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006>
18. Duffie, John; Beckman, William. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes* (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. New York. <https://doi.org/10.1002/9781118671603>
19. Pineiro, Gervasio; Perelman, Susana; Guerschman, Juan Pablo; Paruelo, Jose. (2008). How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling*, 216(3–4), 316–322. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.05.006>
20. Van Liew, Michael W., Arnold, Jeffrey G., & Bosch, Daniel D. (2003). Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Transactions of the ASAE*, 46(6), 1539–1551. <https://doi.org/10.13031/2013.15643>
21. Moriasi, Daniel; Arnold, Jeff; Liew, Van Michael W., Bingner, Ronald L., Harmel, Robert D., & Veith, Tamie L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
22. Kiyoshi Kobayashi & Mohammad Uzzal Salam (2000). Comparing simulated and measured values using mean squared deviation and its components. *Agronomy Journal*, 92(2), 345–352. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.922345x>

23. Xiaogang Gao, Qianlai Hu, & Dennis P. Lettenmaier (2003). Evaluation of the VIC land surface model using streamflow and surface water balance in the Arkansas–Red River basin. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 108(D3). <https://doi.org/10.1029/2002JD003265>
24. Gabriel Pineiro, Susana B. Perelman, Juan P. Guerschman, & José M. Paruelo (2008). How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecological Modelling*, 216(3–4), 316–322. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.05.006>
25. Yongqiang Bai, Yonghong Zha, Bo Li, Yongmei Shuai, & Yongxue Ding (2010). An improved method for accuracy assessment of object-oriented image classification. *International Journal of Remote Sensing*, 31(22), 603–614. <https://doi.org/10.1080/01431160903140880>
26. Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30(1), 79–82. <https://doi.org/10.3354/cr030079>
27. Montgomery, Douglas; Runger, George. (2014). *Applied Statistics and Probability for Engineers* (6th ed.). Wiley. ISBN: 9781118744123
28. Jha, Prakash; Athanasiadis, Panos; Gualdi, Silvio; Trabucco, Trabucco; Mereu, Valentina; Shelia, Vakhtang. (2028). Evaluating the applicability of using daily forecasts from seasonal prediction systems (SPSs) for agriculture: a case study of Nepal's Terai with the NCEP CFSv2. *Theoretical and Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2433-5>
29. Ikhneifir, A. A., Bubareek, H. M. Y., & Balomi, F. M. H. (2023). Reference Evapotranspiration Mapping of Libya. *Al-Mukhtar Journal of Sciences*, 38(2), 201–214. <https://doi.org/10.54172/mjsc.v38i2.672>
30. Ruane, A. C., Goldberg, R., & Chryssanthacopoulos, J. (2015). Climate forcing datasets for agricultural modeling: Merged products for gap-filling and historical climate series estimation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 200, 233–248. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.016>