



التحليل المكاني للإشعاع الشمسي في إقليم البطنان بليبيا باستخدام مؤشر $H(h)_m$ ومؤشر $H(i_opt)_m$ خلال الفترة 2005م-2023م

ياسر عبدالناصر رمضان ضيف

طالب ماجستير بقسم الجغرافيا

كلية الآداب جامعة طبرق . ليبيا

yasserabdulnaser91@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-0998-8186>

تاريخ الاستلام 2026/06/11 تاريخ القبول 2026/07/18 تاريخ النشر 2026/10/01

الوصول مفتوح

مقالة بحثية

الملخص:

يهدف هذا البحث إلى تحليل التوزيع المكاني والزمني للإشعاع الشمسي في إقليم البطنان شرق ليبيا خلال الفترة (2005-2023م)، باستخدام مؤشري الإشعاع الشمسي على السطح الأفقي $H(h)_m$ والإشعاع الشمسي على السطح المائل بالزاوية المثلى $H(i_opt)_m$ ، بهدف تحديد درجة التباين المكاني للإشعاع الشمسي وتقييم ملاءمة مناطق الإقليم لاستغلال الطاقة الشمسية. اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي والمنهج المكاني التطبيقي باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، بالاستناد إلى بيانات منصة PVGIS ونموذج الارتفاع الرقمي (DEM). أظهرت النتائج وجود تباين زمني واضح، حيث سجل فصل الصيف أعلى قيم الإشعاع الشمسي، بينما سجل فصل الشتاء أدنى القيم. كما تبين وجود تدرج مكاني من المناطق الساحلية نحو المناطق الداخلية الجنوبية، إذ حققت محطة الجغبوب أعلى المتوسطات السنوية، في حين سجلت محطة طبرق أدنى القيم. وأكدت النتائج تفوق الإشعاع الشمسي على السطح المائل مقارنة بالسطح الأفقي، مما يعزز كفاءة استغلال الطاقة الشمسية. وخلصت الدراسة إلى أن إقليم البطنان يمتلك مقومات واعدة لتطوير مشروعات الطاقة الشمسية وتحقيق التنمية المستدامة. الكلمات المفتاحية: الإشعاع الشمسي، التحليل المكاني، إقليم البطنان، نظم المعلومات الجغرافية، الطاقة الشمسية، مؤشر $H(h)_m$ ، مؤشر $H(i_opt)_m$ ، ليبيا.



حقوق النشر محفوظة للمؤلف (المؤلفين) 2026. يُوزع هذا المقال بموجب بنود ترخيص المشاع الإبداعي نسبة المصنف 4.0 الدولي (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)، والذي يسمح بالاستخدام والتوزيع وإعادة الإنتاج غير المقيّد في أي وسيط، بشرط الإشارة إلى المؤلف (المؤلفين) الأصلي (الأصليين) والمصدر، وتوفير رابط ترخيص المشاع الإبداعي، وتوضيح ما إذا تم إجراء أي تغييرات.

Spatial Analysis of Solar Radiation in the Al-Butnan Region of Libya Using the $H(h)_m$ and $H(i_{opt})_m$ Indices During the Period 2005–2023

Yasser Abdalnasser Ramadan Deif

Master's Student, Department of Geography, Faculty of Arts

University of Tobruk, Libya

yasserabdalnasser91@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0009-0998-8186>

Received: 11/06/2026

Accepted: 18/07/2026

Published 01/10/2026

Research Article

open Access

Abstract:

This study aims to analyze the spatial and temporal distribution of solar radiation in the Al Butnan Region, eastern Libya, during the period (2005–2023), using two indicators: solar radiation on a horizontal surface ($H(h)_m$) and solar radiation on an optimally tilted surface ($H(i_{opt})_m$). The objective is to identify the degree of spatial variation in solar radiation and evaluate the suitability of different areas within the region for solar energy exploitation.

The study adopted a descriptive-analytical approach and an applied spatial approach using Geographic Information Systems (GIS), relying on data obtained from the PVGIS platform and a Digital Elevation Model (DEM). The results revealed a clear temporal variation in solar radiation, with the highest values recorded during the summer season and the lowest values during the winter season. The findings also showed a spatial gradient from the coastal areas toward the southern inland regions, where the Al Jaghbub station recorded the highest annual averages, while the Tobruk station registered the lowest values. Furthermore, the results confirmed that solar radiation received on the optimally tilted surface exceeded that on the horizontal surface, thereby enhancing the efficiency of solar energy utilization. The study concluded that the Al Butnan Region possesses promising potential for the development of solar energy projects and can play a significant role in achieving sustainable development.

Keywords: Solar Radiation, Spatial Analysis, Al-Butnan Region, Geographic Information Systems (GIS), Solar Energy, $H(h)_m$ Index, $H(i_{opt})_m$ Index, Libya.



The Author(s) 2026. This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made.



أولاً: المقدمة:

يُعد الإشعاع الشمسي من أهم عناصر النظام المناخي، إذ يمثل المصدر الأساسي للطاقة على سطح الأرض، ويتحكم بدرجة كبيرة في توازن الطاقة الحرارية، وديناميكية الغلاف الجوي، والأنظمة البيئية المختلفة. كما يشكل حجر الأساس في تطبيقات الطاقة المتجددة، خاصة في ظل التوجه العالمي نحو تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري. ويخضع توزيع الإشعاع الشمسي على سطح الأرض لتباينات مكانية وزمانية ناتجة عن مجموعة من العوامل الجغرافية والفلكية، أبرزها دوائر العرض، وزاوية سقوط الأشعة، وطول النهار، إضافة إلى العوامل المناخية مثل الغيوم، والغبار، وبخار الماء (Iqbal, 1983).

وفي هذا السياق، يبرز التحليل المكاني كأداة علمية متقدمة تهدف إلى دراسة توزيع الظواهر الجغرافية على سطح الأرض، وفهم أنماطها وتبايناتها باستخدام أساليب كمية وتقنيات حديثة، مثل نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بعد. ويسهم التحليل المكاني للإشعاع الشمسي في الكشف عن الاختلافات المكانية في كميات الإشعاع، وتحديد المناطق الأكثر ملائمة لاستغلال الطاقة الشمسية، مما يدعم اتخاذ القرار في مجالات التخطيط البيئي والطاقة (Burrough & McDonnell, 1998).

وعلى المستوى الإقليمي، تُعد منطقة شمال أفريقيا من أغنى مناطق العالم بالإشعاع الشمسي، نتيجة وقوعها ضمن النطاق شبه المداري الجاف، حيث تسود ظروف مناخية تتسم بصفاء السماء وارتفاع عدد ساعات السطوع الشمسي. وتأتي ليبيا في مقدمة الدول التي تمتلك إمكانات كبيرة للطاقة الشمسية، إذ تشير الدراسات إلى أن متوسط الإشعاع الشمسي اليومي يتراوح بين 5.5 إلى 7.5 كيلوواط ساعة/م²، مع تباين واضح بين المناطق الساحلية والداخلية الصحراوية (Elminir et al., 2007؛ NASA POWER Data, 2023).

ويُظهر التوزيع المكاني للإشعاع الشمسي داخل ليبيا تبايناً ملحوظاً يرتبط بعوامل الموقع الجغرافي، والقرب من البحر المتوسط، والارتفاع، وطبيعة السطح. فالمناطق الساحلية تتأثر نسبياً بالرطوبة والسحب، مما يؤدي إلى انخفاض طفيف في قيم الإشعاع مقارنة بالمناطق الداخلية، في حين تسجل المناطق الصحراوية أعلى معدلات الإشعاع بسبب صفاء الجو وانخفاض نسبة الغيوم (Al-Refai et al., 2019).

إلى أن بخار الماء والعوالق الجوية يسهمان في تقليل شفافية الغلاف الجوي، وبالتالي زيادة عمليات الامتصاص والتشتت الإشعاعي، وهو ما يؤثر في القيم الفعلية للإشعاع الشمسي، (Principles of Environmental Physics عام 2013) وفي دراسة حديثة أجراها (Solar Radiation Atlas for Libya عام 2019)، تم إعداد أطلس شمسي للبيبا باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد، حيث أظهرت النتائج وجود تباين مكاني واضح بين المناطق الساحلية والداخلية، مع ارتفاع قيم الإشعاع الشمسي في المناطق الجنوبية والصحراوية نتيجة صفاء الغلاف الجوي وانخفاض الغطاء السحابي.

ومن جانب آخر أشار (Solar Energy Potential in North Africa) في دراسة عام 2007)، إلى أن شمال أفريقيا يمتلك إمكانات استراتيجية كبيرة في مجال الطاقة الشمسية، نتيجة ارتفاع معدلات الإشعاع المباشر وطول فترة السطوع الشمسي السنوية، مؤكدين أن المناطق الصحراوية تُعد الأكثر ملاءمة لإقامة مشروعات الطاقة الشمسية الكبرى

وفي هذا الإطار، يُعد إقليم البطنان (شرق ليبيا) نموذجًا جغرافيًا مهمًا لدراسة التحليل المكاني للإشعاع الشمسي، نظرًا لموقعه الانتقالي بين التأثيرات البحرية للبحر المتوسط والخصائص الصحراوية للداخل الليبي. حيث يقع الإقليم ضمن العروض شبه المدارية، ما يجعله يتلقى كميات كبيرة من الإشعاع الشمسي على مدار العام، مع تباين مكاني ناتج عن اختلاف القرب من الساحل، وتوزيع التضاريس، والخصائص المناخية المحلية.

وتزداد أهمية التحليل المكاني للإشعاع الشمسي في إقليم البطنان في ظل الحاجة إلى تقييم إمكانات الطاقة المتجددة وتوجيه الاستثمارات نحو المواقع الأكثر كفاءة. كما أن استخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وبيانات الأقمار الصناعية، مثل قاعدة بيانات NASA POWER، يوفر إمكانات عالية الدقة لتحليل التباين المكاني والزمني للإشعاع الشمسي، خاصة في المناطق التي تعاني من نقص في محطات الرصد المناخي.



وعليه، فإن دراسة التحليل المكاني للإشعاع الشمسي في إقليم البتنان تمثل مدخلاً علمياً مهماً لفهم أنماط التوزيع الجغرافي لهذه الظاهرة، وتحديد العوامل المؤثرة فيها، بما يسهم في دعم التخطيط المستدام لمشروعات الطاقة الشمسية وتحقيق التنمية الإقليمية.

● مشكلة البحث والأهداف:

يُعدُّ إقليم البتنان من الأقاليم الليبية التي تمتلك مقومات طبيعية ومناخية واعدة لاستغلال الطاقة الشمسية، نتيجة وقوعه ضمن الحزام الشمسي العالمي، وارتفاع قيم الإشعاع الشمسي وعدد ساعات السطوع السنوية. ورغم هذه الإمكانيات، لا تزال الاستفادة منها محدودة بسبب غياب دراسات مكانية تفصيلية تُبرز التباين الجغرافي للإشعاع الشمسي داخل الإقليم، وعدم توافر قاعدة بيانات مكانية وخرائط دقيقة تحدد مناطق الملاءمة المرتفعة والمتوسطة والمنخفضة لاستغلال الطاقة الشمسية، فضلاً عن محدودية الدراسات التي توظف نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وتقنيات الاستشعار عن بُعد في تحليل التوزيع المكاني للإشعاع الشمسي وإنتاج خرائط ملائمة تدعم التخطيط المكاني لمشروعات الطاقة الشمسية.

وانطلاقاً من هذه الإشكالية، يهدف البحث إلى تحليل التوزيع المكاني للإشعاع الشمسي في إقليم البتنان، وقياس درجة التباين المكاني بين أجزاء الإقليم، وإنتاج خرائط رقمية للإشعاع الشمسي الشهري والسنوي باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، بما يسهم في تحديد المواقع الأكثر ملاءمة لاستغلال الطاقة الشمسية، وتوفير قاعدة بيانات مكانية تدعم متخذي القرار في التخطيط لمشروعات الطاقة المتجددة وتعزيز كفاءة استثمار الموارد الطبيعية في الإقليم.

ولتحقيق هذه الأهداف، يسعى البحث إلى الإجابة عن التساؤلات الآتية:

* كيف يتوزع الإشعاع الشمسي الشهري والسنوي داخل إقليم البتنان؟

* ما درجة التباين المكاني للإشعاع الشمسي بين أجزاء الإقليم؟

* كيف يمكن توظيف نظم المعلومات الجغرافية (GIS) في إنتاج خرائط ملائمة مكانية

دقيقة لتحديد أفضل المواقع لاستغلال الطاقة الشمسية

● أهمية البحث:

تكمن أهمية البحث في كونه يتناول مورداً طبيعياً استراتيجياً يتمثل في الإشعاع الشمسي في منطقة تُعد من أكثر مناطق ليبيا تعرضاً للطاقة الشمسية، مع محدودية الدراسات المكانية التفصيلية التي تُبرز التباين الجغرافي لهذا المورد داخل إقليم البطنان، مما يُسهم في سد فجوة معرفية واضحة في الدراسات الجغرافية التطبيقية المتعلقة بالتحليل المكاني للإشعاع الشمسي على المستوى الإقليمي، حيث تتركز معظم الدراسات السابقة على التحليل الوصفي العام دون التعمق في البعد المكاني الدقيق. كما يدعم البحث توظيف تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتوفير خرائط ملائمة مكانية للإشعاع الشمسي تُسهم في تحديد المواقع الأكثر كفاءة لإنشاء محطات الطاقة الشمسية، بدلاً من الاعتماد على التقديرات العامة أو البيانات النقطية المحدودة.

● منهجية البحث:

اعتمدت الدراسة على منهجية تكاملية تجمع بين الأسلوب الوصفي التحليلي والمنهج المكاني التطبيقي باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد، بهدف تحليل التوزيع الجغرافي للإشعاع الشمسي وتحديد مناطق الملاءمة المكانية لاستغلال الطاقة الشمسية في إقليم البطنان.

وقد تم تنفيذ المنهجية عبر المراحل الآتية:

- المنهج الوصفي التحليلي:

استُخدم هذا المنهج لوصف الخصائص العامة للإشعاع الشمسي (الشهري، السنوي) داخل منطقة الدراسة، وتحليل الاتجاهات الزمنية العامة، اعتماداً على المتوسطات المناخية طويلة المدى، وذلك لتكوين إطار نظري يدعم التحليل المكاني اللاحق.

- المنهج المكاني باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS):

يمثل هذا المنهج الركيزة الأساسية للدراسة، وقد نفذ وفق الخطوات التالية:

- جمع البيانات المكانية والمناخية، والتي تم الاعتماد على مصادر متعددة لضمان دقة النتائج، وتشمل، بيانات الإشعاع الشمسي من منصة (PVGIS)، وبيانات الارتفاع الرقمي (DEM)، وخرائط حدود إقليم البطنان.



- إعداد قاعدة البيانات الجغرافية، وشملت هذه المرحلة:

- توحيد نظم الإحداثيات لجميع الطبقات المكانية.
- قص البيانات حسب حدود إقليم البطنان.
- تحويل البيانات النقطية إلى شبكية (Raster).
- بناء قاعدة بيانات مكانية متكاملة داخل بيئة GIS.

- أدوات الدراسة:

اعتمدت الدراسة على:

- برامج (ArcGIS).
- بيانات الأقمار الصناعية.
- الأساليب الإحصائية المكانية.

- سبب اختيار المحطات: رغم محدودية عدد المحطات، فإن اختيارها اعتمد على تمثيل التدرج الجغرافي والمناخي من الساحل باتجاه الصحراء، بما يحقق تمثيلاً مكانياً مناسباً للإقليم.

• منطقة الدراسة وخصائصها المناخية:

يقع إقليم البطنان في الجزء الشمالي الشرقي من دولة ليبيا، ويُعد من الأقاليم الجغرافية المهمة في شرق البلاد، نظراً لموقعه الاستراتيجي المطل على البحر المتوسط، وارتباطه بالحدود الليبية المصرية شرقاً، ويتميز الإقليم بموقع جغرافي انتقالي يجمع بين الخصائص الساحلية المتوسطية شمالاً والخصائص الصحراوية الجافة جنوباً، الأمر الذي يمنحه تنوعاً طبيعياً ومناخياً واضحاً.

فلكياً، يمتد الإقليم بين دائرتي عرض (25-47-28°، و 27-35-31°)، وبين خطي طول (40-52-22°، و 50-32-25°)، وهو بذلك يقع ضمن نطاق العروض شبه المدارية الجافة، التي تُعد من أكثر الأقاليم استقبالاً للإشعاع الشمسي على مستوى العالم، نتيجة ارتفاع زاوية سقوط أشعة الشمس وطول فترة السطوع الشمسي خلال معظم أشهر السنة (Iqbal, 1983).

أما جغرافياً، فيحد الإقليم من الشمال البحر المتوسط، ومن الشرق جمهورية مصر العربية، ومن الجنوب الامتدادات الصحراوية للهضبة الليبية، بينما يحده من الغرب إقليم الجبل الأخضر، ويشغل مساحة تُقدَّر بحوالي 83,860 كم²، مما يجعله من الأقاليم واسعة الامتداد في شرق ليبيا، ويُسهّم هذا الاتساع في تنوع الخصائص البيئية والمناخية داخله، ويضم الإقليم

عددًا من المدن والمراكز المهمة، من أبرزها طبرق، أمساعد، الجغبوب، إضافة إلى عدد من التجمعات الريفية والواحات الداخلية.

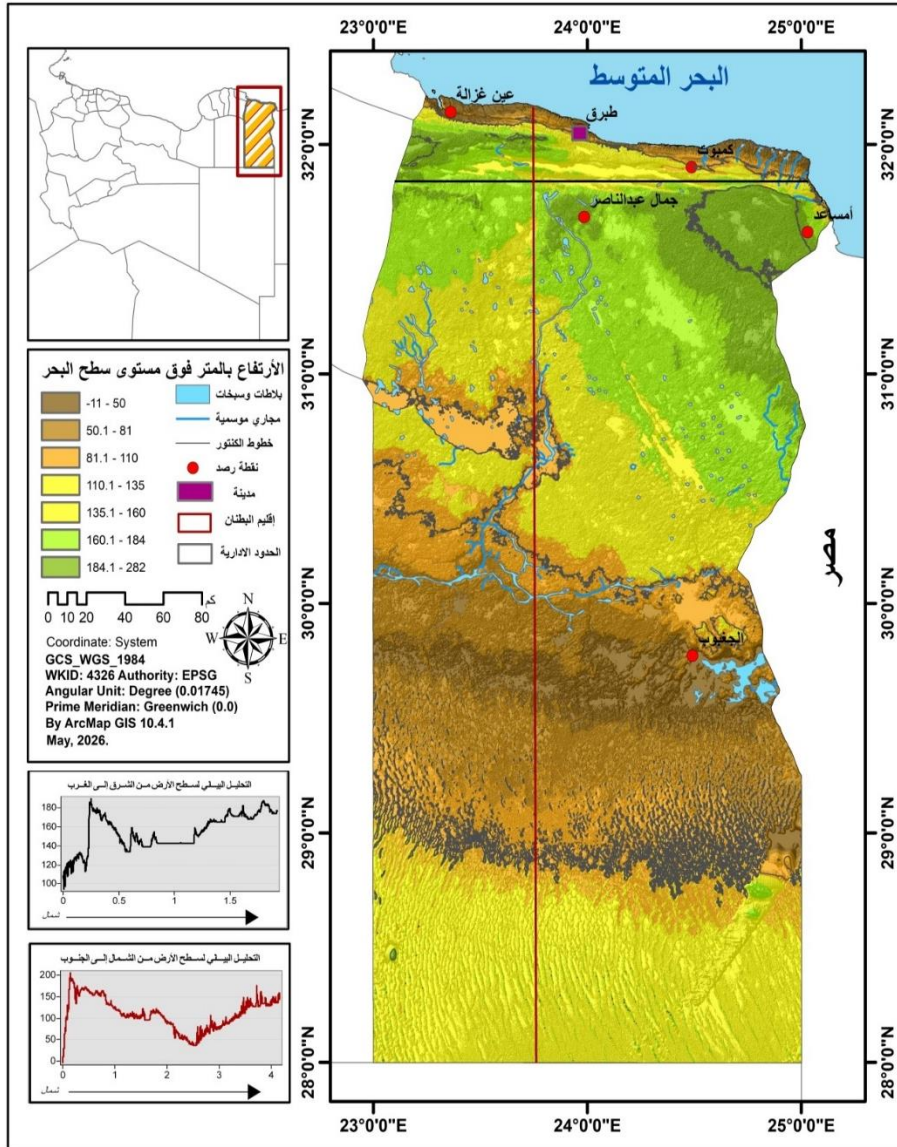
بينما توضح خريطة (1) ان إقليم البطنان يتخذ شكلاً طويلاً يمتد من الشمال إلى الجنوب، حيث يبدأ من الشريط الساحلي المطل على البحر المتوسط شمالاً، ثم يمتد تدريجياً نحو الداخل الصحراوي جنوباً، ويُعد هذا الامتداد الطولي من السمات الجغرافية المهمة التي أسهمت في ظهور تباين واضح في الخصائص المناخية والطبيعية داخل الإقليم، ويظهر التدرج الطبيعي للإقليم على النحو الآتي:

نطاق ساحلي متوسطي في الشمال، ونطاق انتقالي شبه جاف في الوسط، ونطاق صحراوي جاف في الجنوب، وقد أدى هذا الامتداد الجغرافي إلى تدرج تأثير البحر المتوسط، حيث يكون التأثير البحري واضحاً في المناطق الشمالية الساحلية، ثم يتناقص تدريجياً كلما اتجهنا جنوباً، لتظهر الخصائص الصحراوية بصورة أكثر وضوحاً في المناطق الداخلية.

كما انعكس هذا الامتداد على عناصر المناخ المختلفة، مثل درجات الحرارة والرطوبة والغطاء السحابي والإشعاع الشمسي، إذ ترتفع درجات الحرارة وتزداد قيم الإشعاع الشمسي باتجاه الجنوب نتيجة انخفاض الرطوبة الجوية وصفاء الغلاف الجوي.

ويؤكد علماء المناخ أن الامتداد من المناطق الساحلية نحو المناطق الصحراوية يؤدي إلى تباين كبير في الخصائص الإشعاعية والمناخية بسبب اختلاف خصائص الكتل الهوائية والرطوبة الجوية (Barry & Chorley, 2010).

الخريطة (1) الموقع والخصائص الطبيعية لإقليم البطنان



المصدر: من إعداد الباحث باستخدام برنامج (Arc map 10.4.1).

كما يتميز إقليم البطنان بتدرج تضاريسي ومناخي واضح من الشمال إلى الجنوب، حيث تسود المناطق الساحلية الشمالية خصائص مناخ البحر المتوسط، الذي يتمثل في اعتدال درجات الحرارة نسبيًا خلال فصل الشتاء وارتفاع نسبة

الرطوبة وتأثر المنطقة بالمنخفضات المتوسطة، بينما تتحول الظروف المناخية تدريجيًا نحو المناخ شبه الجاف ثم الصحراوي كلما اتجهنا جنوبًا نحو المناطق الداخلية مثل الجغبوب، حيث ترتفع درجات الحرارة، وتقل كميات الأمطار، ويزداد صفاء الغلاف الجوي.

كما يُعد الإقليم من المناطق ذات الإمكانيات العالية في مجال الطاقة الشمسية، نتيجة وقوعه ضمن الحزام الشمسي العالمي، وارتفاع عدد ساعات السطوع الشمسي السنوية، وانخفاض الغطاء السحابي في المناطق الداخلية، خاصة خلال فصل الصيف.

وتظهر الخصائص المناخية للإقليم تبايناً مكانياً واضحاً؛ إذ تتأثر المدن الساحلية مثل طبرق وأمسعاد وكمبوت وعين غزالة بالرطوبة البحرية والسحب الموسمية، مما يؤدي إلى انخفاض نسبي في قيم الإشعاع الشمسي مقارنة بالمناطق الداخلية الصحراوية مثل الجغبوب، التي تتميز بصفاء السماء وانخفاض الرطوبة الجوية، وبالتالي ارتفاع معدلات الإشعاع الشمسي.

وتسهم هذه الخصائص الطبيعية والمناخية في جعل إقليم البطنان منطقة ملائمة لإقامة مشروعات الطاقة الشمسية، خاصة في المناطق الجنوبية والداخلية التي تسجل أعلى قيم الإشعاع الشمسي السنوي، وهو ما يعزز أهمية الإقليم في الدراسات التطبيقية المتعلقة بالطاقة المتجددة والتنمية المستدامة.

• النتائج والمناقشة:

. التمثيل البياني لمؤشرات الإشعاع الشمسي في منطقة الدراسة:

- نتائج المؤشر $H(h)_m$.

يُعد الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي $H(h)_m$ من أهم المؤشرات المناخية المستخدمة في تقييم موارد الطاقة الشمسية، حيث يعكس كمية الطاقة الشمسية المستقبلية مباشرة على سطح الأرض دون تعديل زاوية الميل، مما يجعله أساساً في الدراسات الجغرافية والمناخية المرتبطة بالطاقة المتجددة.



وتكتسب دراسة هذا النوع من الإشعاع أهمية خاصة في المناطق شبه الجافة والصحراوية، مثل شرق ليبيا، نظرًا لما تتميز به من صفاء الغلاف الجوي وارتفاع معدلات السطوع الشمسي، الأمر الذي يجعلها من المناطق الواعدة في مجال استغلال الطاقة الشمسية. ويُستخدم $H(h)_m$ كمؤشر مرجعي للمقارنة بين المواقع المختلفة، وكذلك لفهم التغيرات الزمنية في الإشعاع الشمسي على مدار السنة.

يعتمد تحليل بيانات هذا الجدول على القيم الشهرية المستخرجة من قاعدة بيانات PVGIS، والتي تُعد من أهم النماذج العالمية المعتمدة في تقدير الإشعاع الشمسي باستخدام بيانات الأقمار الصناعية والنماذج الفيزيائية. وتتيح هذه البيانات إمكانية دراسة التباين الزمني (الشهري والفصلي) والتباين المكاني بين محطات منطقة الدراسة بدقة علمية عالية. ويهدف تحليل بيانات $H(h)_m$ إلى تحقيق مجموعة من الأهداف العلمية، من أبرزها:

- * تحديد النمط الموسمي للإشعاع الشمسي بين فصول السنة المختلفة.
 - * الكشف عن فترات الذروة والانخفاض في الإشعاع.
 - * تحليل الفروق المكانية بين المحطات وعلاقتها بالعوامل الجغرافية مثل خط العرض والقرب من البحر.
 - * تقييم مدى ملائمة المنطقة لإنتاج الطاقة الشمسية اعتمادًا على القيم الفعلية للإشعاع.
- ويرتكز هذا التحليل على أسس نظرية تؤكد أن كمية الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي تتأثر بعدة عوامل، أهمها زاوية سقوط الأشعة، وطول النهار، وشفاء الغلاف الجوي.

جدول (1) يوضح مجموع المتوسط الشهري لمؤشر الإشعاع الشمسي على سطح أفقي، $H(h)_m$ (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) لخطات منطقة الدراسة من 2005م - 2023م.

محطات منطقة الدراسة						
الاشهر	أمساعد	كمبوت	طبرق	عين غزالة	جمال عبدالناصر	الجغبوب
يناير	107	101	95	101	105	122
فبراير	124	118	111	119	122	137
مارس	179	176	164	175	179	192
ابريل	211	209	195	208	211	220
مايو	242	239	224	238	241	245
يونيو	252	250	237	249	252	253
يوليو	262	259	248	260	262	263
أغسطس	241	238	228	237	240	244
سبتمبر	195	193	186	192	195	204
أكتوبر	155	153	146	150	153	170
نوفمبر	113	110	107	110	114	128
ديسمبر	97	92	89	92	96	113
المتوسط	181	178	169	178	181	191

المصدر: من اعداد الباحث بناء علي بيانات PVGIS.

- التحليل الزمني والمكاني للمؤشر الإشعاع الشمسي $H(h)_m$:

- التحليل الزمني:

تظهر البيانات من خلال الجدول (1) وشكل (1) ما يلي:

- فصل الشتاء (ديسمبر - يناير - فبراير)، تُظهر البيانات انخفاضاً واضحاً في قيم المؤشر الإشعاع الشمسي $H(h)_m$ خلال فصل الشتاء، حيث سجل شهر ديسمبر أدنى القيم السنوية، إذ بلغت 89 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق مقابل 113 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب، بفارق قدره 24 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) الوحدة، وفي شهر يناير تراوحت القيم بين 95 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، و 122 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب، بينما ارتفعت في فبراير إلى ما بين 111 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق و 137 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب.



ويُفسَّر هذا الانخفاض بانخفاض زاوية ارتفاع الشمس وقصر فترة السطوع الشمسي، حيث يؤكد أن كمية الإشعاع الشمسي تعتمد بشكل رئيسي على زاوية سقوط الأشعة وطول النهار (Iqbal, 1983).

- فصل الربيع (مارس - أبريل - مايو)، يُلاحظ ارتفاع تدريجي في الإشعاع الشمسي في شهر مارس، من 164 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق إلى 192 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب، بينما في شهر أبريل يتدرج الإشعاع من 195 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق إلى 220 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب، وأيضاً يسجل شهر مايو ارتفاع تدريجي واضحاً من 224 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق إلى 245 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب، أي أن الزيادة بين مارس ومايو تصل إلى نحو 53 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) الوحدة في محطة الجغبوب، وهو ارتفاع كبير يعكس تحسن الظروف الإشعاعية، ويرتبط ذلك بزيادة زاوية سقوط الإشعاع وتحسن صفاء الغلاف الجوي (Duffie & Beckman, 2013).

- فصل الصيف (يونيو- يوليو- أغسطس)، يمثل فصل الصيف ذروة الإشعاع الشمسي، فهنا يزداد مؤشر $H(h)_m$ ليصل في شهر يونيو 237 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، بينما سجلت الجغبوب 253 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، وقد سجلت محطة الجغبوب أعلى قيمة بلغت 263 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في يوليو، بينما سجلت طبرق 248 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في نفس الشهر، بفارق 15 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) الوحدة، وكانت أعلى قيمة سنوية سجلت في هذه الشهر، وأيضاً سجل شهر أغسطس 228 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، وإلى 244 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب.

ويؤكد أن المناطق شبه المدارية تسجل أعلى إشعاع خلال الصيف نتيجة تعاملد الشمس وطول النهار (Duffie & Beckman, 2013).

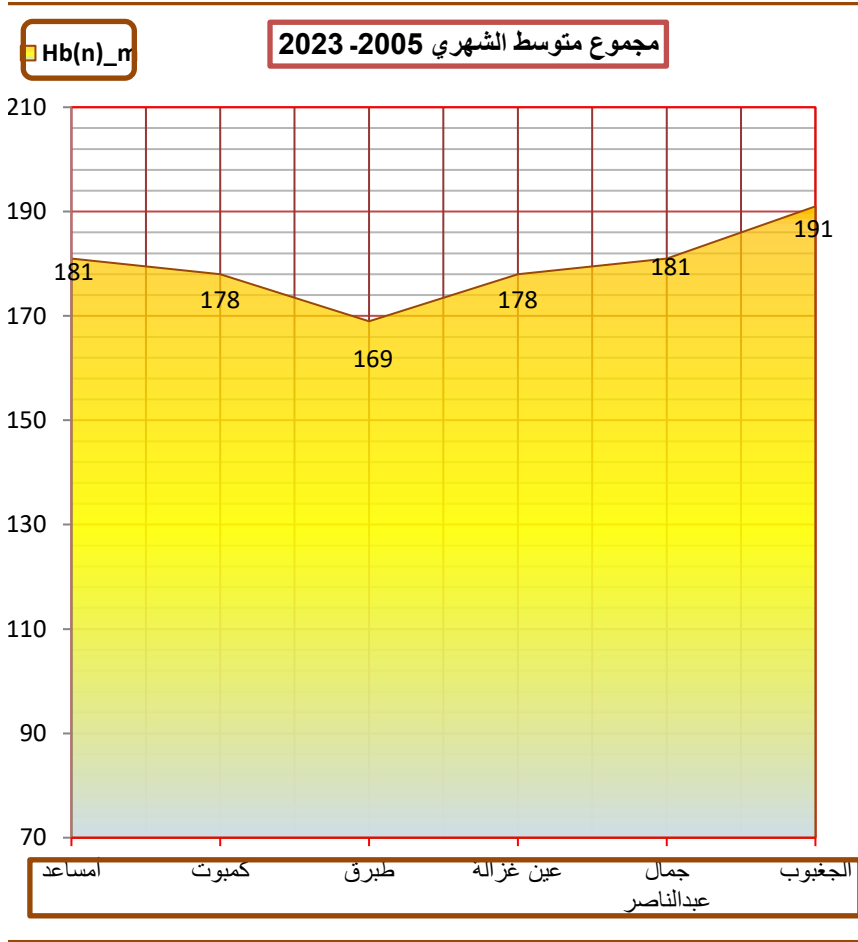
- فصل الخريف (سبتمبر- أكتوبر - نوفمبر)، يظهر انخفاض تدريجي ملحوظ، وقد سجل في شهر سبتمبر 186 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، وإلى 204 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب، يأتي هنا انخفاضاً واضحاً عن فصل

الصيف، بينما سجلت في شهر أكتوبر 146 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، ونحو 170 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب، وأيضاً يسجل شهر نوفمبر 107 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، وفي نفس الشهر سجلت الجغبوب 128 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، بينما يبلغ الانخفاض من سبتمبر إلى نوفمبر نحو 76 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) الوحدة في بعض المحطات.

وذلك بسبب تفاعل معقد بين العوامل الفلكية والمناخية، فمن الناحية الفلكية، يؤدي الانتقال الموسمي بعد الاعتدال الخريفي إلى انخفاض زاوية السقوط، حيث تصبح أشعة الشمس أكثر ميلاً، فتتوزع الطاقة الشمسية على مساحة أوسع وتفقد جزءاً من شدتها الإشعاعية، كما تتناقص ساعات النهار تدريجياً، مما يقلل من مدة التعرض اليومي للإشعاع الشمسي (Iqbal, 1983؛ (Duffie & Beckman, 2013)، أما من الناحية المناخية، فيتأثر الإقليم بمناخ البحر المتوسط، حيث تزداد خلال فصل الخريف فعالية المنخفضات الجوية المتوسطة، المصحوبة بارتفاع الغطاء السحابي وزيادة الرطوبة النسبية، الأمر الذي يؤدي إلى امتصاص وتشتيت جزء كبير من الإشعاع الشمسي قبل وصوله إلى سطح الأرض (Barry & Chorley, 2010)، كما تسهم العوالق الجوية وبخار الماء في الغلاف الجوي في تقليل شفافية الغلاف الجوي وزيادة التشتت الإشعاعي، وهو ما ينعكس سلباً على القيم الكلية للإشعاع الشمسي الساقط (Monteith & Unsworth, 2013)، وعليه، فإن الانخفاض الملحوظ في الإشعاع الشمسي خلال فصل الخريف في هذا الإقليم يُعد نتيجة مباشرة لتكامل العوامل الفلكية مع الظروف المناخية السائدة في حوض البحر المتوسط.



شكل (1) يوضح مجموع المتوسط الشهري لمؤشر الإشعاع الشمسي على سطح أفقي،
 $H(h)_m$ (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) لخطات منطقة الدراسة من 2005م -
2023م.



المصدر: بالاعتماد على بيانات الجدول (1).

- التحليل المكاني:

يُعد التحليل المكاني للإشعاع الشمسي من أهم أدوات الدراسات الجغرافية التطبيقية، إذ يُسهم في الكشف عن التباين في توزيع الطاقة الشمسية بين المواقع المختلفة داخل منطقة الدراسة، ويعكس هذا التباين تأثير مجموعة من العوامل الطبيعية، مثل الموقع الفلكي، والارتفاع، والقرب من المسطحات المائية، وخصائص الغلاف الجوي،

وتُظهر بيانات $H(h)_m$ المستخرجة من (PVGIS) تبايناً واضحاً بين محطات منطقة الدراسة، في الخريطة (2).

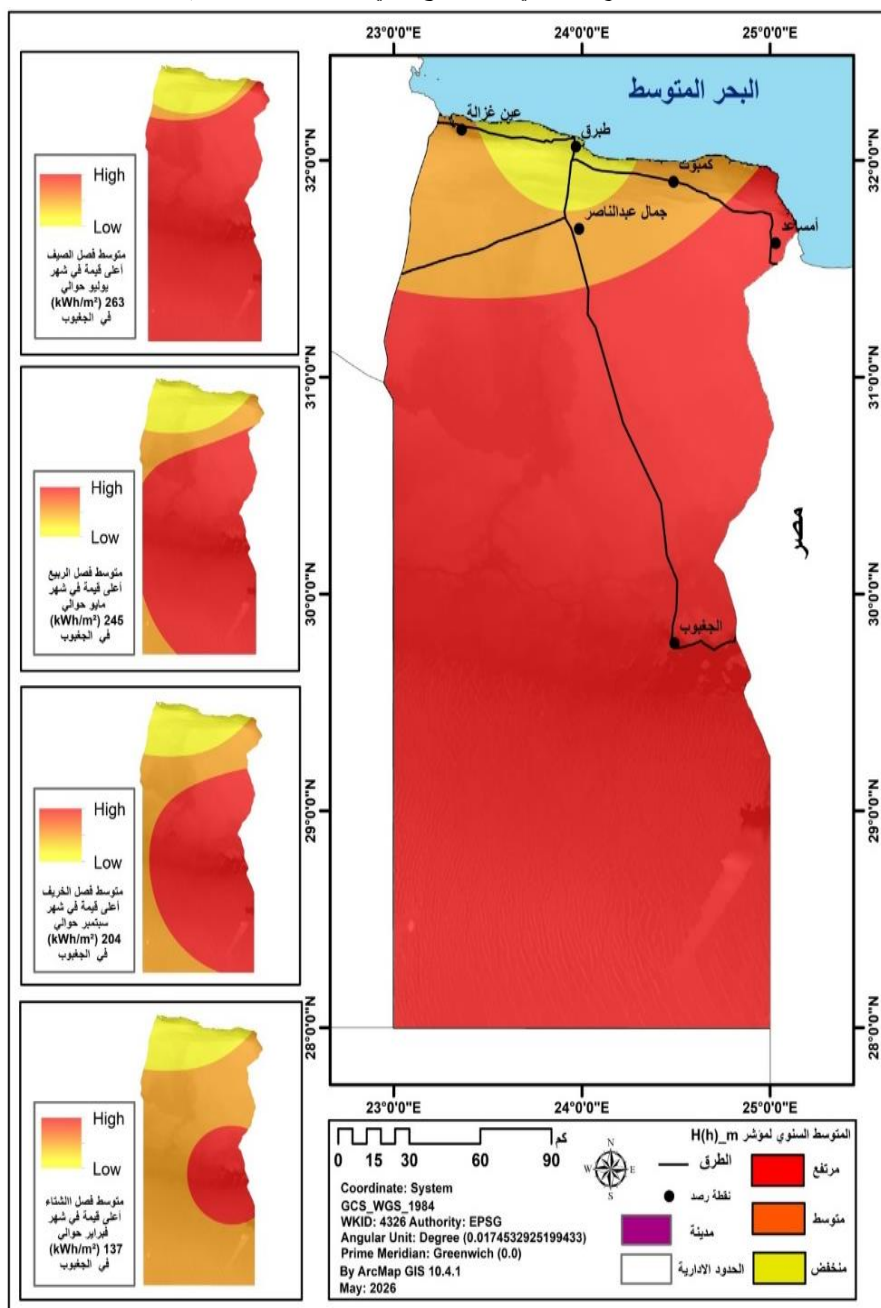
كما يوضح التباين المكاني بين المحطات وفق لمجموع المتوسط الشهري لمؤشر ، اختلافات مكانية ملحوظ، حيث سجلت محطة الجغبوب أعلى متوسط سنوي بلغ 191 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، بينما سجلت محطة طبرق أدنى متوسط بلغ 169 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، في حين جاءت باقي المحطات بقيم متوسطة، فقد سجلت محطة أمساعد ومحطة جمال عبدالناصر حوالي 181 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، بينما سجلت محطة عين غزالة ومحطة كمبوت حوالي 178 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر).

وبذلك يبلغ الفرق بين أعلى وأدنى محطة حوالي 22 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) الوحدة، وهو ما يدل على وجود تباين مكاني متوسط إلى واضح في توزيع الإشعاع الشمسي داخل منطقة الدراسة.

وأيضاً يفسر التباين المكاني أن الموقع الفلكي وخط العرض لهما دور كبير أي أن تزداد قيم الإشعاع كلما اتجهنا جنوباً، حيث ترتفع زاوية سقوط أشعة الشمس، مما يزيد من كمية الطاقة المستقبلية، ويؤكد أن زاوية الشمس تُعد من أهم العوامل المحددة للإشعاع الشمسي (Iqbal, 1983).

كما يوضح أيضاً التباين المكاني التأثير البحري والقرب من البحر المتوسط، يؤثر علي كمية الاشعة ، أي بمعنى تسجل المناطق الساحلية مثل طبرق أدنى القيم، بسبب ارتفاع نسبة الرطوبة، وزيادة السحب، مما ادي الي تشتت الإشعاع الشمسي. ويشير أيضاً التباين المكاني الي صفاء الغلاف الجوي، تتميز المناطق الداخلية كلما اتجهنا جنوب إقليم البطنان بصفاء الغلاف الجوي، مما يقلل من عمليات التشتت والامتصاص، وبالتالي يزيد من شدة الإشعاع الشمسي. ويشير إلى أن نقاء الغلاف الجوي يعزز وصول الإشعاع المباشر (Duffie & Beckman, 2013).

خريطة (2) مؤشر الإشعاع الشمسي على سطح أفقي، $H(h)_m$ لإقليم البطان



المصدر: من إعداد الباحث باستخدام برنامج (Arc map 10.4.1) اعتماداً على البيانات في الجدول (1).

- نتائج المؤشر $H(i_opt)_m$.

متوسط الإشعاع الشمسي الشهري على سطح مائل بالزاوية المثلى.
ويعتمد هذا التحليل على بيانات شهرية للإشعاع الشمسي المستلم على سطح مائل بالزاوية المثلى $H(i_opt)_m$ ، والمستخرجة من قاعدة بيانات PVGIS، والتي تُعد من أهم المصادر العالمية المعتمدة في تقدير الإشعاع الشمسي باستخدام تقنيات الاستشعار عن بعد والنماذج الإشعاعية.
ويهدف تحليل بيانات الجدول إلى تحقيق عدة غايات علمية، من أبرزها:
* الكشف عن النمط الزمني لتغير الإشعاع الشمسي على المستوى الشهري والفصلي.
* تحديد التباين المكاني بين محطات منطقة الدراسة.
* تقييم تأثير العوامل الجغرافية والمناخية، مثل الموقع الفلكي والقرب من المسطحات المائية، على توزيع الإشعاع.
* إبراز الفروق بين فترات الذروة والانخفاض، ومدى انعكاس ذلك على كفاءة استغلال الطاقة الشمسية.
كما يُسهم هذا التحليل في تقديم صورة كمية دقيقة عن ديناميكية الإشعاع الشمسي، من خلال توظيف القيم الرقمية الواردة في الجدول داخل التفسير العلمي، وربطها بالإطار النظري الذي يؤكد أن الإشعاع الشمسي يتأثر بعوامل رئيسية مثل زاوية سقوط الأشعة، ومدة السطوع، وصفاء الغلاف الجوي.
وعليه، فإن تحليل بيانات هذا الجدول لا يقتصر على الوصف الكمي للقيم، بل يمتد ليشمل تفسير الأنماط الزمانية والمكانية، التي تدعم التخطيط الأمثل لمشروعات الطاقة الشمسية في منطقة الدراسة.



جدول (2) يوضح مجموع المتوسط الشهري لمؤشر الإشعاع الشمسي على سطح مائل بالزاوية المثلى، $H(i_opt)_m$ (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) لخطات منطقة الدراسة من 2005م – 2023م.

محطات منطقة الدراسة						
الأشهر	أمساعد	كمبوت	طبرق	عين غزالة	جمال عبدالناصر	الجغبوب
يناير	154	144	136	145	153	176
فبراير	161	153	144	155	160	177
مارس	209	206	191	204	209	222
أبريل	219	217	202	217	220	226
مايو	229	227	214	227	228	230
يونيو	226	227	216	227	227	227
يوليو	240	239	229	240	240	239
أغسطس	243	238	228	238	240	241
سبتمبر	218	217	208	215	219	225
أكتوبر	196	193	184	190	194	214
نوفمبر	160	154	151	157	162	179
ديسمبر	144	134	132	136	144	167
المتوسط	200	196	186	196	200	210

المصدر: من اعداد الباحث بناء علي بيانات PVGIS.

التحليل الزمني والمكاني للمؤشر للإشعاع الشمسي على سطح مائل $H(i_opt)_m$.
التحليل الزمني:

تظهر البيانات من خلال الجدول (2) وشكل (2) ما يلي:

- فصل الشتاء (ديسمبر — يناير — فبراير)، تظهر البيانات أن الإشعاع الشمسي على السطح المائل يسجل قيمًا أعلى مقارنة بالسطح الأفقي حتى في فصل الشتاء، حيث سجل شهر ديسمبر حوالي 132 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في محطة طبرق، كما سجل في نفس الشهر في محطة الجغبوب 167 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، وأيضًا بلغت في يناير من 136 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، إلى 176 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب، تم يزداد الإشعاع بالتدرج حيث سجل في فبراير من 144 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، إلى 177 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب.

كما نلاحظ أن أدنى قيمة قد سجلت في محطة طبرق 132 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، أعلى بكثير من نظيرتها في السطح الأفقي $H(h)_m$ (89 في الجدول السابق)، مما يدل على أهمية الميل في زيادة استقبال الإشعاع شتاءً. ويفسر ذلك بأن زاوية الميل تعوض انخفاض زاوية الشمس، وهو ما أكدته بأن الأسطح المائلة تزيد من كفاءة استقبال الإشعاع في الفصول منخفضة الشمس (Duffie & Beckman, 2013, p. 238–245).

- فصل الربيع (مارس – أبريل – مايو)، يظهر هذا الفصل ارتفاع تدريجي واضح، بينما تشير القيم في شهر مارس حوالي 191 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، وكذلك سجلت في الجغبوب حوالي 222 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، كما سجلت في شهر أبريل قيم تصل حوالي 202 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، كما سجلت في الجغبوب حوالي 226 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، ثم يأتي شهر مايو بأعلى قيم في هذه الفصل، حيث سجلت طبرق حوالي 214 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، بينما سجلت الجغبوب قيم حوالي 230 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، أي أن مقدار الزيادة من مارس إلى مايو في الجغبوب = 8 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) الواحد فقط (222 → 230)، مما يدل على أن الإشعاع يقترب من حالة الاستقرار النسبي.

- فصل الصيف (يونيو- يوليو- أغسطس)، يمثل فصل الصيف فترة الذروة الإشعاعية في إقليم البطان، نظراً لارتفاع زاوية سقوط أشعة الشمس وطول ساعات النهار، وهو ما يؤدي إلى تسجيل أعلى قيم للإشعاع الشمسي، كما تظهر البيانات في جدول (2) أن شهر يونيو قد سجل 216 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، بينما سجلت حوالي 227 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب، ثم يأتي شهر يوليو ليسجل في محطة طبرق حوالي 229 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، أما محطة الجغبوب فقد سجلت حوالي 240 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، يُلاحظ أن أعلى قيم قد سجلت الإشعاع الشمسي في شهر أغسطس، بينما سجلت في طبرق حوالي 228 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، وفي نفس الشهر سجلت أمساعد حوالي 243 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، أي أن أعلى قيمة سُجلت في شهر



أغسطس في محطة أمساعد 243 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، وليس يوليو كما في السطح الأفقي $H(h)_m$ ، وهو فرق مهم.
كما أن الفروق بين المحطات تقل، حيث الفرق بين أعلى وأدنى قيمة في يوليو = 11 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) الوحدة فقط .

ويفسر ذلك أن فصل الصيف تكون الشمس شبه عمودية، وبالتالي يقل تأثير زاوية الميل، وتصبح جميع المواقع متقاربة إشعاعياً، وهذا يتفق مع ما ذكره بأن تأثير زاوية الميل يقل مع زيادة ارتفاع الشمس (Iqbal, 1983).

- فصل الخريف (سبتمبر- أكتوبر- نوفمبر)، يمثل فصل الخريف مرحلة انتقالية يتراجع خلالها الإشعاع الشمسي تدريجياً من الذروة الصيفية نحو القيم الشتوية، وتبرز أهمية السطح المائل في هذه الفترة، إذ يُسهم في تحسين استقبال الإشعاع مقارنة بالسطح الأفقي $H(h)_m$ نتيجة تغير زاوية سقوط أشعة الشمس.

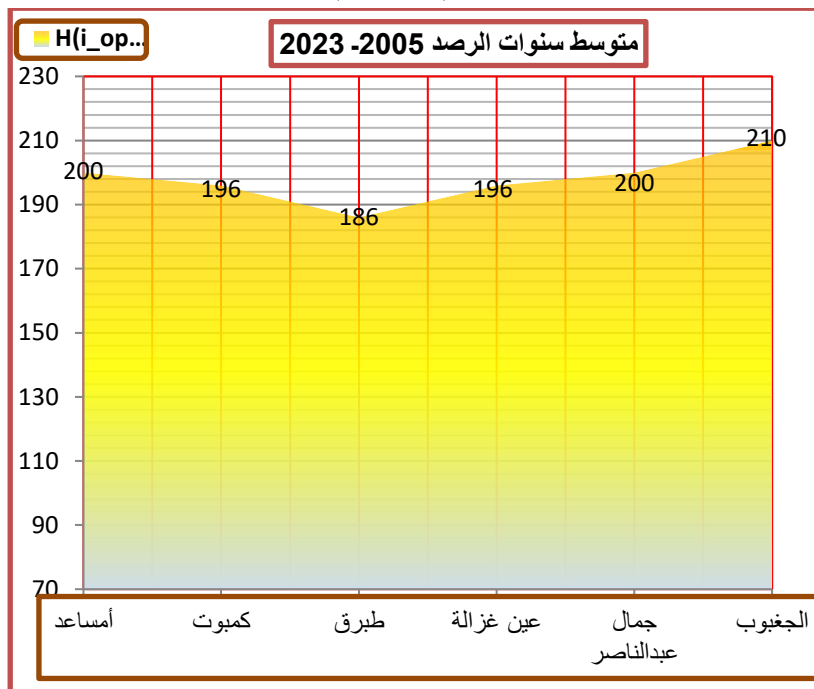
تظهر بيانات الجدول (2) في شهر سبتمبر، أن القيم الإشعاعية تتراوح بين 208 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، وحوالي 225 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب، ويحافظ سبتمبر على مستويات إشعاع مرتفعة نسبياً رغم بداية الخريف، إذ تقل القيم عن الذروة الصيفية 243 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في أغسطس بحوالي 18 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) الوحدة فقط، ما يدل على استمرار التأثير الصيفي، ويرجع السبب إلى استمرار ارتفاع زاوية الشمس نسبياً، و طول ساعات النهار، وكفاءة السطح المائل في استقبال الأشعة بزوايا أقرب للعمودية، ويوضح أن التغير في الإشعاع يحدث تدريجياً مع تغير زاوية الشمس وليس بشكل فجائي (Iqbal, 1983).

كما تتراوح القيم الإشعاعية في شهر أكتوبر بين 184 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، وحوالي 214 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب، مما يظهر انخفاض واضح في القيم مقارنة بشهر سبتمبر، ويكون أكثر وضوحاً في بعض المحطات الساحلية، والسبب هو انخفاض زاوية سقوط الإشعاع الشمسي، وتناقص طول النهار، وبداية زيادة السحب والرطوبة خاصة في المناطق الساحلية،

تم يسجل شهر نوفمبر القيم الإشعاعية التي تتراوح بين 151 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في طبرق، وحوالي 179 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) في الجغبوب، ويتضح أن شهر نوفمبر قد سجل انخفاضاً حاداً وواضحاً، انتقل فعلياً إلى مناخ قريب من الشتاء،

والسبب يرجع الى انخفاض كبير في زاوية الشمس، وقصر ملحوظ في ساعات النهار، وزيادة كثافة السحب والرطوبة الجوية، وزيادة الفقد الإشعاعي نتيجة التشتت والامتصاص، و يشير إلى أن انخفاض زاوية الشمس يؤدي إلى زيادة الفاقد الإشعاعي (Duffie & Beckman, 2013).

شكل (2) يوضح مجموع المتوسط الشهري لمؤشر الإشعاع الشمسي على سطح مائل بالزاوية المثلى، $H(i_opt)_m$ (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) لخطات منطقة الدراسة من 2005م – 2023م.



المصدر: بالاعتماد على بيانات الجدول (2).

2. التحليل المكاني:

يُعد التحليل المكاني للإشعاع الشمسي على السطح المائل بالزاوية المثلى $H(i_opt)_m$ من أهم الأساليب المستخدمة في تقييم كفاءة الطاقة الشمسية، إذ يعكس كمية الإشعاع الشمسي المستقبل بعد تعديل زاوية السطح بما يتناسب مع زاوية سقوط أشعة الشمس، الأمر الذي يؤدي إلى تحسين كفاءة الاستقبال الإشعاعي مقارنة



بالسطح الأفقي، ويُستخدم هذا المؤشر بصورة واسعة في دراسات تخطيط مشروعات الطاقة الشمسية وتحديد المواقع الأكثر ملاءمة للاستثمار الطاقة، من خلال خريطة | (3).
كما يوضح التباين المكاني بين المحطات وفق المتوسطات الشهرية، اختلافات مكانية ملحوظة، حيث سجلت محطة الجغبوب أعلى متوسط سنوي بلغ 210 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، بينما سجلت محطة طبرق أدنى متوسط بلغ 186 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، في حين جاءت باقي المحطات بقيم متوسطة، فقد سجلت محطة أمساعد ومحطة جمال عبدالناصر حوالي 200 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)، بينما سجلت محطة عين غزاله ومحطة كمبوت حوالي 196 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر).
وبذلك بلغ الفرق بين أعلى وأدنى محطة حوالي 24 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) الوحدة، وهو ما يعكس وجود تدرج مكاني واضح في توزيع الإشعاع الشمسي داخل الإقليم.

وتُظهر بيانات إقليم البطنان وجود تباين مكاني واضح في قيم $H(i_opt)_m$ ، يرتبط بعدة عوامل جغرافية ومناخية، مثل الموقع الفلكي، بينما يقع إقليم البطنان ضمن العروض شبه المدارية، الأمر الذي يؤدي إلى، ارتفاع زاوية سقوط أشعة الشمس، وزيادة كمية الإشعاع السنوي، ويؤكد أن خط العرض يُعد من أهم العوامل المحددة لكمية الإشعاع الشمسي المستقبلية (Iqbal, 1983).

كما يوضح أيضاً التباين المكاني التأثير البحري والقرب من البحر المتوسط، تُعد المناطق الساحلية مثل طبرق الأقل استقبلاً للإشعاع الشمسي بسبب، ارتفاع الرطوبة الجوية، وزيادة الغطاء السحابي، زيادة عمليات التشتت والامتصاص، مما يؤدي إلى انخفاض القيم الإشعاعية مقارنة بالمناطق الداخلية.

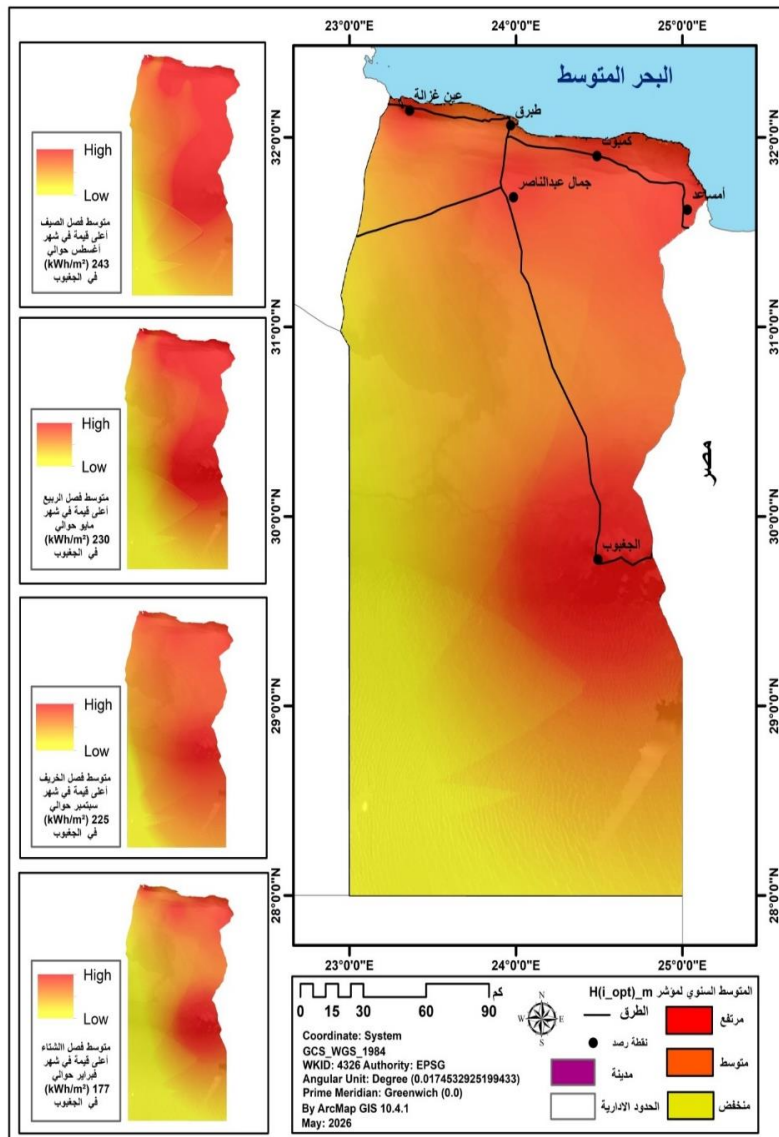
ويُفسّر هذا النمط بتراجع التأثير البحري تدريجياً كلما اتجهنا نحو الداخل، حيث تقل الرطوبة والسحب ويزداد صفاء الغلاف الجوي.

وتشير تقارير إلى أن السحب تُعد من أكثر العوامل تأثيراً في تقليل الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض (WMO, 2008).

كما يشير أيضاً التباين المكاني إلى صفاء الغلاف الجوي، تتميز المناطق الجنوبية بصفاء نسبي للغلاف الجوي، الأمر الذي، يقلل من عمليات التشتت، وبالتالي يزيد من الإشعاع

المباشر، ويؤكد أن نقاء الغلاف الجوي يؤدي إلى تحسين كفاءة استقبال الإشعاع الشمسي (Duffie & Beckman, 2013).

خريطة (3) مؤشر الإشعاع الشمسي على سطح مائل بالزاوية المثلى، $H(i_opt)_m$ لإقليم البطان



المصدر: من إعداد الباحث باستخدام برنامج (Arc map 10.4.1) اعتماداً على البيانات في الجدول (2).



• الانحراف المعياري للقيم المكاني (SSD) للإشعاع الشمسي بين محطات الدراسة.

يعد الانحراف المعياري المكاني (Spatial Standard Deviation) من أهم الأساليب الإحصائية المستخدمة في التحليل المكاني، إذ يُستخدم لقياس درجة تشتت الظاهرة الجغرافية حول المتوسط العام، ويُساعد في تحديد مدى التجانس أو التباين المكاني لقيم الإشعاع الشمسي بين محطات الدراسة داخل إقليم البطنان. ويُعبّر هذا المؤشر عن مقدار ابتعاد القيم عن المتوسط الحسابي، فكلما ارتفعت قيمة الانحراف المعياري دلّ ذلك على زيادة التباين المكاني، بينما تشير القيم المنخفضة إلى تقارب القيم وتجانسها.

• المعادلة الرياضية للانحراف المعياري المكاني:

يُحسب الانحراف المعياري المكاني باستخدام المعادلة الآتية:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n}}$$

حيث إن:

• SSD = الانحراف المعياري المكاني (Spatial Standard Deviation).

• x_i = قيمة الإشعاع الشمسي في كل محطة.

• $\bar{x}$ = المتوسط الحسابي العام لقيم الإشعاع الشمسي.

• n = عدد المحطات.

• $\sum$ = مجموع الفروق التربيعية بين القيم والمتوسط الحسابي.

وفي هذه الدراسة، استُخدم الانحراف المعياري المكاني لتحليل درجة التباين المكاني للإشعاع الشمسي بين محطات إقليم البطنان، وذلك اعتمادًا على المتوسطات السنوية لمؤشري:

• $H(h)_m$ الإشعاع الشمسي على سطح أفقي .

• $H(i_opt)_m$ الإشعاع الشمسي على سطح مائل بالزاوية المثلى .

ويهدف هذا التحليل إلى تحديد مدى انتشار القيم الإشعاعية داخل الإقليم، والكشف عن الفروق المكانية بين المناطق الساحلية والمناطق الداخلية الصحراوية.

1. الانحراف المعياري المكاني لمؤشر $H(h)_m$:

اعتمد التحليل على مجموع المتوسط الشهري لمحطات منطقة الدراسة، والتي جاءت على النحو الآتي:

جدول (3) نتائج مؤشر $H(h)_m$

المحطات	القيمة x_i (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر)	$x_i - \bar{x}$	تربيع الفرق
أمساعد	181	1.33	1.77
كمبوت	178	-1.67	2.79
طبرق	169	-10.67	113.85
عين غزالة	178	-1.67	2.79
جمال عبدالناصر	181	1.33	1.77
الجغبوب	191	11.33	128.36

المصدر: اعتماداً على بيانات (PVGIS) وتطبيق المعادلة رقم (3).

وباستخدام معادلة الانحراف المعياري، فقد بلغت قيمة الانحراف المعياري المكاني نحو:

$$SD = 6.5 \text{ (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر).}$$

تفسير النتائج لمؤشر $H(h)_m$

تشير قيمة الانحراف المعياري المكاني البالغة 6.5 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) إلى وجود تباين مكاني متوسط في توزيع الإشعاع الشمسي على السطح الأفقي داخل إقليم البطنان.

ويلاحظ أن:

- القيم الإشعاعية تزداد تدريجياً باتجاه الجنوب .
- المناطق الساحلية، خاصة طبرق، سجلت أدنى القيم بسبب تأثير الرطوبة والغطاء السحابي .
- المناطق الداخلية الجنوبية، خاصة الجغبوب، سجلت أعلى القيم نتيجة صفاء الغلاف الجوي وقلة الرطوبة .



كما تدل القيمة المتوسطة للانحراف المعياري على أن التوزيع الإشعاعي داخل الإقليم لا يتسم بالتجانس الكامل، بل يظهر تدرجاً مكانياً واضحاً من الشمال الساحلي نحو الجنوب الصحراوي.

2. الانحراف المعياري المكاني لمؤشر $H(i_opt)_m$:

اعتمد التحليل على مجموع المتوسط الشهري لمحطات منطقة الدراسة، والتي جاءت على النحو الآتي:

جدول (4) نتائج مؤشر $H(i_opt)_m$

الخطات	القيمة x_i (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر).	$x_i - \bar{x}$	تربيع الفرق
أمساعد	200	2	4
كمبوت	196	-2	-4
طبرق	186	-12	-144
عين غزالة	196	-2	-4
جمال عبدالناصر	200	2	4
الجغبوب	210	12	144

المصدر: اعتماداً على بيانات (PVGIS) وتطبيق المعادلة رقم (4).

وباستخدام معادلة الانحراف المعياري، فقد بلغت قيمة الانحراف المعياري المكاني نحو:

$$SD = 7.1 \text{ (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر).}$$

تفسير النتائج لمؤشر $H(i_opt)_m$

تظهر قيمة الانحراف المعياري المكاني البالغة 7.1 (كيلوواط ساعة / متر مربع بالشهر) وجود تباين مكاني واضح مرتفع نسبياً مقارنة بمؤشر $H(h)_m$ ، مما يعكس تأثير زاوية الميل في إبراز الفروق المكانية بين المحطات.

وقد تبين أن:

- المناطق الجنوبية الداخلية أكثر استفادة من الإشعاع الشمسي عند استخدام الأسطح المائلة .
 - الفروق الإشعاعية بين الساحل والداخل تصبح أكثر وضوحاً مع استخدام زاوية الميل المثلى .
 - السطح المائل يزيد من كفاءة استقبال الإشعاع خاصة في الفصول منخفضة الشمس .
- ويُفسَّر ذلك بأن الأسطح المائلة تستقبل الأشعة بزوايا أقرب إلى العمودية، مما يرفع كمية الإشعاع المستقبل، خاصة في المناطق الصحراوية ذات السماء الصافية.

الاستنتاج والتوصيات:

نتائج الدراسة، من خلال تحليل التوزيع المكاني والزمني للإشعاع الشمسي في إقليم البطنان باستخدام مؤشري $H(h)_m$ و $H(i_opt)_m$ خلال الفترة (2005-2023م)، إلى مجموعة من النتائج العلمية، يمكن تلخيصها فيما يأتي:

- أظهرت الدراسة أن إقليم البطنان يتمتع بإمكانات مرتفعة من الإشعاع الشمسي على مدار العام، نتيجة وقوعه ضمن نطاق العروض شبه المدارية الجافة وارتفاع عدد ساعات السطوع الشمسي .

- تبين وجود تباين زمني واضح في قيم الإشعاع الشمسي، حيث سجل فصل الصيف أعلى القيم الإشعاعية، خاصة خلال شهري يوليو وأغسطس، في حين سجل فصل الشتاء أدنى القيم، لاسيما في شهري ديسمبر ويناير .

- كشفت النتائج عن وجود تدرج مكاني واضح للإشعاع الشمسي داخل الإقليم، إذ ترتفع القيم تدريجياً باتجاه الجنوب الصحراوي، بينما تنخفض نسبياً في المناطق الساحلية الشمالية المتأثرة بالرطوبة والغطاء السحابي .

- سجلت محطة الجغبوب أعلى متوسط سنوي للإشعاع الشمسي، حيث بلغ :

$$\circ \quad 191 \text{ kWh/m}^2 \text{ لمؤشر } H(h)_m.$$

$$\circ \quad 210 \text{ kWh/m}^2 \text{ لمؤشر } H(i_opt)_m.$$

- سجلت محطة طبرق أدنى متوسط سنوي للإشعاع الشمسي، حيث بلغ :

$$\circ \quad 169 \text{ kWh/m}^2 \text{ لمؤشر } H(h)_m.$$

$$\circ \quad 186 \text{ kWh/m}^2 \text{ لمؤشر } H(i_opt)_m.$$

- أوضحت الدراسة أن الإشعاع الشمسي على السطح المائل بالزاوية المثلث $H(i_opt)_m$ يفوق الإشعاع الشمسي على السطح الأفقي $H(h)_m$ في معظم أشهر السنة، مما يؤكد أهمية استخدام الأسطح المائلة في رفع كفاءة استقبال الطاقة الشمسية .

- تبين أن تأثير زاوية الميل يكون أكثر وضوحاً خلال فصلي الشتاء والخريف، حيث تسهم الأسطح المائلة في تعويض انخفاض زاوية سقوط أشعة الشمس .



- أظهرت نتائج الانحراف المعياري وجود تباين مكاني متوسط إلى واضح في توزيع الإشعاع الشمسي داخل الإقليم، إذ بلغ :

$$H(h)_m. 6.5 \text{ kWh/m}^2 \text{ لمؤشر}$$

$$H(i_opt)_m. 7.1 \text{ kWh/m}^2 \text{ لمؤشر}$$

- أكدت الدراسة أن المناطق الداخلية الصحراوية أكثر ملائمة لإقامة مشروعات الطاقة الشمسية مقارنة بالمناطق الساحلية، بسبب صفاء الغلاف الجوي وانخفاض الرطوبة والغيوم .
- أثبتت الدراسة فاعلية استخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS) وبيانات PVGIS في تحليل التوزيع المكاني للإشعاع الشمسي وإنتاج خرائط دقيقة تساعد في التخطيط المكاني لمشروعات الطاقة المتجددة.

استناداً إلى الاستنتاج التي توصلت إليها الدراسة، توصي الدراسة بضرورة التوسع في استغلال الطاقة الشمسية في إقليم البطنان، خاصة في المناطق الجنوبية والداخلية مثل الجغبوب، لما تتميز به من ارتفاع واضح في معدلات الإشعاع الشمسي وشفاء الغلاف الجوي مقارنة بالمناطق الساحلية. كما تؤكد الدراسة أهمية الاعتماد على الأسطح المائلة بالزاوية المثلى عند تصميم أنظمة الطاقة الشمسية، لما لذلك من دور كبير في رفع كفاءة استقبال الإشعاع الشمسي وزيادة إنتاج الطاقة، خاصة خلال فصلي الشتاء والخريف. وتوصي الدراسة أيضاً بضرورة توظيف تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بعد في التخطيط المكاني لمشروعات الطاقة المتجددة، لما توفره من دقة عالية في تحديد المواقع الأكثر ملائمة للاستثمار الشمسي. كذلك توصي بإنشاء وتطوير شبكة محطات للرصد المناخي والإشعاعي داخل الإقليم، خاصة في المناطق الصحراوية التي تعاني من نقص البيانات المناخية، مع تحديث قواعد البيانات وربطها ببيانات الأقمار الصناعية بشكل مستمر. كما تدعو الدراسة إلى تشجيع الجهات الحكومية والمؤسسات الاستثمارية على توجيه الاستثمارات نحو مشروعات الطاقة الشمسية ضمن خطط التنمية المستدامة، مع دعم الدراسات المستقبلية التي تتناول تأثير التغيرات المناخية على موارد الطاقة الشمسية في ليبيا، والتوسع في إنتاج خرائط رقمية دقيقة تساعد في التخطيط الإقليمي واتخاذ القرار في مجال الطاقة المتجددة.

المراجع:

- * Al-Refai, M., et al. Solar Radiation Atlas for Libya Using GIS and Remote Sensing Techniques. 2019.
- * ArcGIS. برنامج نظم المعلومات الجغرافية المستخدم في التحليل المكاني وإنتاج الخرائط.
- * Badescu, V. Modeling Solar Radiation at the Earth Surface. Springer, 2008.
- * Barry, R. G., & Chorley, R. J. Atmosphere, Weather and Climate. 9th ed. Routledge, 2010.
- * Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. Principles of Geographical Information Systems. Oxford University Press, 1998.
- * Duffie, J. A., & Beckman, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4th ed. Wiley, 2013.
- * Elminir, H. K., et al. "Assessment of Solar Energy Potential in Libya." Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007.
- * Iqbal, M. An Introduction to Solar Radiation. Academic Press, New York, 1983.
- * Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. Principles of Environmental Physics. 4th ed. Academic Press, 2013.
- * PVGIS. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) Official Website.
- * World Meteorological Organization (WMO). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. Geneva, 2008.