Solar Energy
And Sustainable Development
Refereed, biannual scientific journal issued by:
The Libyan Center for Solar Energy Research and Studies

Utilizing Geographic Information Systems to Identify Optimal Locations for Establishing Solar Power Plants in the Sebha Region

Embarka Najem[1]*, Faraj Alhadar[2].

[1]Libyan Centre for Desert Research and Development of Desert Communities, Libya.
[2]Department of Geography - Faculty of Education - Elmergib University, Libya.

E-*mail:* [1] ambarknajem@gmail.com ,[2] fmalhadar@elmergib.edu.ly .

SPECIAL ISSUE ON:

The 1st International Conference on Technical Sciences, 2024.
"Investing in Renewable Energies"
11 November 2024 SEBHA, LIBYA.

KEYWORDS

Solar energy, Geographic Information Systems, Multi-criteria, Optimal sites, Sebha regio.

ABSTRACT

This study aims to determine the most suitable location for establishing solar power stations in the Sebha region using Geographic Information Systems (GIS). It focuses on integrating geographic and climatic data and applying specific criteria to evaluate the spatial suitability for these stations. The study aims to leverage the region's natural potential by utilizing solar radiation and guiding decision-makers towards optimal sites that offer economic and environmental efficiency.

The study used a descriptive-analytical approach and applied several criteria in the analysis, such as solar radiation, slope degree, proximity to transportation and energy networks, and distance from urban areas. The Multi-Criteria Evaluation (MCE) method was also applied within the GIS environment to assess suitable areas. The results showed that climatic factors, such as solar radiation, temperature, and wind, play a crucial role in determining site suitability for solar power stations.

The study utilized a Digital Elevation Model (DEM) of the region to produce maps using Spatial Analyst tools within the Arc Map 10.8 package, along with land use maps to create a spatial suitability map. The spatial suitability results for establishing a solar power station indicated that highly suitable areas constitute about 60% of the total studied area, while moderately suitable areas represent around 22%, and areas with low suitability cover approximately 18% of the total area. These findings support efforts to diversify energy sources and establish a scientifically-based database that promotes renewable energy use and sustainable development in the region.

*Corresponding author.

DOI: https://doi.org/10.51646/jsesd.v14iFICTS-2024.442

This is an open access article under the CC BY-NC license (http://Attribution-NonCommercial 4.0 (CC BY-NC 4.0)).

توظيف نظم المعلومات الجغرافية لتحديد المواقع المثلى لإنشاء محطات الطاقة الشمسية في منطقة سبها

امبارکة صالح محمد ناجم ، فرج مصطفي مختار الهدار .

ملخص: تسعى الدراسة إلى تحديد الموقع الأنسب لإنشاء محطات الطاقة الشمسية في منطقة سبها باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، من خلال التركيز على دمج البيانات الجغرافية والمناخية، وتطبيق معايير محددة لتقييم الملاءمة المكانية لهذه المحطات، وهدفت الدراسة إلى استغلال الإمكانات الطبيعية في المنطقة؛ وذلك للاستفادة من الإشعاع الشمسي، وتوجيه صنّاع القرار نحو المواقع المثلى التي توفر الكفاءة الاقتصادية والبيئية، واعتمدت الدراسة على منهج الوصفي التحليلي، وقد تم استخدام عدة معايير في التحليل مثل: الإشعاع الشمسي، ودرجة الانحدار، والقرب من شبكات النقل والطاقة، والمسافات من المناطق العمرانية، وتم كذلك تطبيق أسلوب التحليل متعدد المعايير(MCE) داخل بيئة (GIS) وتقييم المناطق المناسبة.

أوضحت نتائج الدراسة أن العوامل المناخية، مثل الإشعاع الشمسي، ودرجة الحرارة، والرياح، تؤدي دورًا جوهريًا في تحديد مدى ملاءمة المواقع لإنشاء محطات الطاقة الشمسية. فقد اعتمدت الدراسة على نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) للمنطقة لإنتاج الخرائط باستخدام أدوات Analyst Spatial ضمن حزمة Arc Map 10.8 ، إضافةً إلى خرائط استخدام الأراضي للحصول على خريطة الملاءمة المكانية. وأظهرت نتائج الملاءمة المكانية لإنشاء محطة طاقة شمسية أن المساحات ذات الملاءمة العالية تشكل نحو 60% من إجمالي المنطقة المدروسة، في حين تمثل المساحات ذات الملاءمة المتوسطة حوالي 22%، بينما تشكل المناطق ذات الملاءمة المنخفضة نحو 18% من المساحة الإجمالية. وهذه النتائج تشارك في دعم جهود تنوع مصادر الطاقة والوصول إلى قاعدة بيانات مبنية على أدلة علمية تسهم في تعزيز استخدام الطاقة المتجددة وتحقيق التنمية المستدامة في المنطقة.

الكلمات المفتاحية – الطاقة الشمسية، نظم المعلومات الجغرافية، المعايير المتعددة، المواقع المثلى، منطقة سبها.

1. مقدمة

في ظل توجه العالم نحو تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية؛ برزت الطاقة المتجددة باعتبارها عنصراً استراتيجياً مهماً في تحقيق التنمية المستدامة.

وتعد الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقة النظيفة والمتجددة؛ لأنها تتميز بوفرتها واستمرارها، ولاسيما في الدول التي تتمتع بمعدلات عالية من الإشعاع الشمسي، وتمتلك ليبيا معدلات كبيرة من الإشعاع الشمسي طوال العام تقريباً، مما يجعلها بيئة مثالية للاستثمار في مشاريع الطاقة الشمسية، وتتمتع منطقة سبها الواقعة في الجنوب الغربي من ليبيا بظروف مناخية مميزة؛ إذ تشهد منطقة الدراسة معدلات إشعاع شمسي عالية على مدار العام تقريباً، مما يجعلها مثالية لإقامة محطات توليد الطاقة الشمسية، وهذا الأمر يتطلب إجراء دراسة لعمل الملاءمة المكانية، مع الأخذ في الاعتبار عدة معايير مثل: العمران، البنية التحتية، والبيئة الطبيعية.

تكمن مشكلة الدراسة في عدم وجود دراسات كافية وشاملة تستخدم تقنيات نظم المعلومات الجغرافية لتحديد المواقع المثلى لإنشاء محطات الطاقة الشمسية في منطقة الدراسة، وبناء على ذلك تم طرح التساؤلات التالية:

1. هل تتطابق المقومات الجغرافية بمنطقة الدراسة مع شروط ومعايير إنشاء محطة للطاقة الشمسية ؟
2. كيفية استخدام نظم المعلومات الجغرافية في تحليل وتقييم العوامل المختلفة لتحديد المواقع المثلى لإنشاء محطات الطاقة الشمسية.
3. كيف يمكن لهذه العملية أن تسهم في دعم جهود تنمية الطاقة المتجددة وتحقيق التنمية المستدامة في المنطقة؟

كما تهدف الدراسة إلى تحقيق الآتي:

1. دراسة العوامل البيئية والجغرافية والبشرية التي تؤثر في تحديد المواقع المثلى لإنشاء محطات الطاقة الشمسية مثل: الإشعاع الشمسي والتضاريس، والقرب من شبكات الكهرباء والمناطق العمرانية.
2. توظيف تقنية نظم المعلومات الجغرافية لتحديد المواقع المثلى لإنشاء محطة للطاقة الشمسية بناءً على معايير متعددة مثل الإشعاع الشمسي، التضاريس، القرب من البنية التحتية الكهربائية، وتوفر الأراضي، بالإضافة إلى إنشاء خرائط رقمية لدرجات الملاءمة المكانية لدعم تخطيط وتنفيذ مشاريع الطاقة الشمسية في منطقة سبها.
3. تقديم توصيات قائمة على نتائج التحليل تسهم في تحسين التخطيط المستقبلي لمشاريع الطاقة الشمسية في منطقة الدراسة بما يحقق الكفاءة الاقتصادية.

وتتجلى أهمية هذه الدراسة في تحديد المواقع المناسبة لإنشاء محطات الطاقة الشمسية في منطقة سبها، نظراً لدورها الكبير في تعزيز الجوانب الاقتصادية، البيئية، والاجتماعية. كما تسهم هذه الدراسات في دعم التنمية المستدامة من

خلال ضمان الاستخدام الأمثل للموارد الطبيعية المتاحة، والسعي نحو مستقبل أكثر استدامة للمنطقة.

وبرزت مبررات الدراسة فيما يلي:

1. توفير معلومات دقيقة حول المواقع المثلى لجذب المستثمرين وتنفيذ مشاريع كبرى للطاقة الشمسية.
2. دعم توفير الطاقة للمناطق النائية التي تفتقر للبنية التحتية الكهربائية.
3. تشجيع تطوير تقنيات محلية متقدمة وتحفيز البحث العلمي والابتكار في مجالات الطاقة المتجددة.

الدراسات السابقة:

من أبرز الدراسات السابقة التي تم الاطلاع عليها والاستفادة منها:

1. دراسة الحلفي (2012) تناولت تطور استخدام الطاقة المتجددة في الإمارات العربية المتحدة، مع التركيز على الطاقة الشمسية. استعرضت الدراسة تطور مصادر الطاقة المتجددة، والتقنيات المستخدمة، وتحليل الجوانب الاقتصادية للطاقة الشمسية، إلى جانب عرض أحدث التطورات في القطاع. تُعد هذه الدراسة مرجعًا قيّمًا في تطبيق تقنيات الطاقة الشمسية، بما يعزز سياق دراستنا [1].
2. دراسة داود وآخرين (2017) بعنوان «تحديد أفضل المواقع لتجميع الطاقة الشمسية في مكة المكرمة باستخدام نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير»، هدفت إلى إنشاء قاعدة بيانات جغرافية لتحديد المواقع المثلى للطاقة الشمسية. تُعد هذه الدراسة نموذجًا يمكن الاستفادة منه في تصميم قواعد بيانات جغرافية مماثلة لتحليل مواقع الطاقة الشمسية في مناطق أخرى باستخدام نظم المعلومات الجغرافية [2].
3. دراسة دلير عزيز (2017) بعنوان «المقومات الجغرافية لإنشاء محطات توليد الطاقة الكهربائية من الإشعاع الشمسي في محافظة السليمانية»، أظهرت تأثير الموقع الجغرافي على كمية الإشعاع الشمسي وطول النهار، وحددت إقليم السهول كأفضل منطقة لاستغلال الطاقة الشمسية. توفر الدراسة فهماً لأهمية الموقع الجغرافي في استغلال الطاقة الشمسية، ويمكن الاعتماد على نتائجها لاختيار مواقع مشابهة بناءً على العوامل الجغرافية [3].
4. دراسة قلية (2017) حول استخدام الطاقة الشمسية في ليبيا، ركزت على التوزيع الجغرافي للإشعاع الشمسي وخصائص الطاقة في البلاد، واستعرضت أبرز مشاريع الطاقة. خلصت الدراسة إلى أهمية تبني الطاقة الشمسية كبديل للطاقة التقليدية، ويمكن الاستفادة من نتائجها في تحديد مناطق ذات إشعاع شمسي عالي في منطقتنا [4].
5. دراسة الطائي (2018) بعنوان «تقييم الملاءمة المكانية لمحطات الطاقة الكهربائية في محافظة القادسية باستخدام GIS»، استخدمت معايير متعددة لتقييم المواقع الحالية لمحطات الطاقة، وأظهرت اختلافات في درجة الملاءمة بين المواقع. يُمكن تطبيق هذا النهج لتقييم ملاءمة مواقع محطات الطاقة الشمسية بناءً على معايير محددة باستخدام نظم المعلومات الجغرافية [5].
6. دراسة الزردومي وآخرين (2022) بعنوان «تقدير الإشعاع الشمسي واختيار أنسب المواقع لمحطات الطاقة الشمسية في جالو، هون، سبها، مرزق»، ركزت على تقدير معدلات الإشعاع الشمسي لتحديد المواقع المثلى للمحطات. تُعد الدراسة أداة هامة لتقدير الإشعاع الشمسي، وهو عامل حاسم في اختيار المواقع المناسبة، ويمكن الاعتماد عليها في تحديد المواقع المثلى في دراستنا [6].
7. دراسة Zulkifly و Said (2022) ركزت على تحديد المواقع المثلى لمحطات الطاقة الشمسية في ماليزيا باستخدام GIS. دمجت الدراسة عوامل اقتصادية وبيئية، مثل الإشعاع، التضاريس، الغطاء الأرضي، المناخ، والقرب من الطرق والأنهار، واعتمدت على تحليل القرار متعدد المعايير (MCDM) باستخدام التحليل الهرمي (AHP). هذا النموذج يعتبر مرجعًا مفيدًا في تحليل العوامل المؤثرة لاختيار المواقع المثلى [7].
8. دراسة آل مشيط (2024) بعنوان «الملاءمة المكانية لتحديد أنسب مواقع الطاقة الشمسية في منطقة عسير باستخدام SIG متعددة المعايير»، استخدمت منهجية MCDA لتحديد المواقع المثلى لمحطات الطاقة الشمسية، وتُعد منهجية MCDA المستخدمة هنا قابلة للتطبيق في مناطق أخرى بناءً على معايير محددة [8].

2. فروض الدراســـــــــــــة

1. تمتلك منطقة الدراسة كثيراً من المقومات الطبيعية التي تتيح لها الحصول على كميات كبيرة من الإشعاع الشمسي على مدار السنة، مما يجعلها بيئة مثالية لإنشاء وتطوير مشاريع الطاقة الشمسية.
2. ساعدت نظم المعلومات الجغرافية في تحليل وتحديد المناطق التي تتلقى أعلى معدلات الإشعاع الشمسي، وتحليل طبيعة المنطقة جغرافياً، وتقييم مدى ملاءمتها لمشاريع الطاقة الشمسية.
3. للطاقة الشمسية أهمية كبيرة كونها تعتمد على طاقة الشمس المتجددة وتحويلها إلى طاقة كهربائية أو حرارية.

منهجية الدراسة وأسلوبها البحثي:

1- المنهج الوصفي التحليلي: الذي يعتمد على جمع البيانات المكانية ومعالجتها وتحليلها، من خلال استخدام أدوات التحليل المكاني بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتحديد المواقع المثلى للطاقة الشمسية تشمل مجموعة من الوظائف المتخصصة، وهي:

أ- تحليل الإشعاع الشمسي (Solar Radiation Analysis): يتم استخدام أدوات مثل Area Solar Radiation أو Point Solar Radiation لحساب كمية الإشعاع الشمسي المتاحة بمنطقة الدراسة. هذه الأدوات تأخذ في الاعتبار التضاريس، زاوية الشمس، والتغيرات المناخية الموسمية؛ وتحدد قيمة درجات الإشعاع من المرتفع إلى المنخفض.

ب- تحليل نموذج الارتفاع الرقمي (Digital Elevation Model - DEM): يتم استخدام الأداة Raster Calculator لتحليل التضاريس وتحديد تأثير الارتفاع والظلال على المواقع المرشحة لمحطات الطاقة الشمسية. يساعد على تحديد المناطق ذات المنحدرات الملاءمة والأماكن التي لا تتعرض للظلال.

ج- تحليل المسافة (Proximity Analysis): يُستخدم لحساب المسافة بين الموقع المرشح للبنية التحتية الرئيسية مثل الطرق أو محطات الكهرباء. تساعد هذه الأداة في تقليل التكلفة عن طريق اختيار المواقع القريبة من الشبكات الحالية.

د- تحليل شبكات الطرق: (Network Analysis): يستخدم لتحليل القرب من الطرق والبنية التحتية، ما يساعد في تقدير تكاليف النقل والتطوير لمحطات الطاقة الشمسية.

ه- تحليل الملاءمة (Suitability Analysis): يتم استخدام هذه الأداة للجمع بين عدة عوامل لتحديد المواقع المثلى. يمكن دمج معايير مثل الإشعاع الشمسي، التضاريس، القرب من البنية التحتية (الطرق والشبكات الكهربائية)، والحماية البيئية للوصول إلى أفضل المواقع.

و- التحليل المكاني متعدد المعايير (Multi-Criteria Decision Analysis - MCDA): يعتمد على الجمع بين عدة معايير باستخدام طرق الترجيح (weighting) لتحديد أفضل المواقع بناءً على مجموعة محددة من الشروط (مثل التضاريس، المناخ، التكاليف، الخدمات، استعمالات الأراضي)

باستخدام هذه الأدوات معاً، نتمكن من تحديد المواقع المثلى لبناء محطات الطاقة الشمسية بأعلى كفاءة وأقل تكلفة.

كما اعتمدت الدراسة على عدة أساليب منها:

1- الأسلوب المكتبي: وذلك من خلال الاطلاع والبحث، وتجميع البيانات من المراجع والدوريات والتقارير النهائية للدراسات والمجالات العلمية.

2- البيانات الإحصائية: اعتمدت الدراسة على بيانات الهيئة العامة للأرصاد الجوية لمحطة منطقة الدراسة، وحساب متوسط عدد ساعات السطوع الشمسي والإشعاع الشمسي للفترة 1990-2023.

3- المرئيات الفضائية: تم استخدام نموذج الارتفاعات الرقمية (DEM) بدقة 30 متر، المستمد من القمر الصناعي التابع لوكالة الفضاء الأمريكية، والمقدم من هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية [9]؛ وذلك لإنتاج خريطة الارتفاعات، ومناسيب السطح، وخريطة اتجاه الميل باستخدام برنامج Arc Map 10.8.

4- أسلوب المعايير المتعددة وتحديد الأوزان: يهدف إلى التوصل لنموذج نهائي يحدد الملاءمة المكانية لإنشاء محطة الطاقة الشمسية، من خلال إدخال جميع المعايير للوصول إلى نموذج الملاءمة المكانية.

5- تم الاعتماد في إنتاج الخرائط على نظام الإحداثيات المسقط:

. (Projected Coordinate System (WGS_1984_UTM_Zone_33N))

نظام الإحداثيات الجغرافية:

.(Geographic Coordinate System (GCS_WGS_1984))

3. حدود الدراسة

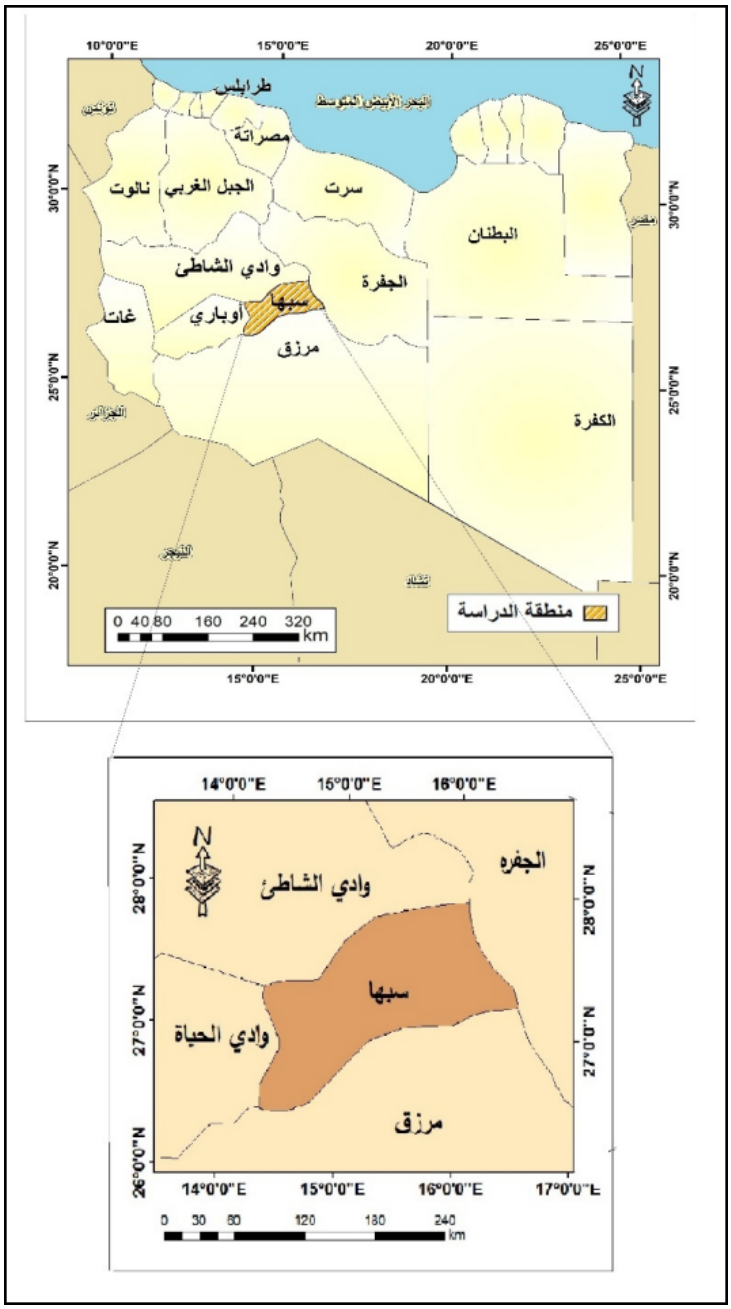
تتمثل في الآتي:

أ - الحدود الزمنية: تناولت الدراسة تحديد الفترة المناخية 1990 إلى 2023 م .

ب - الحدود المكانية: تتمثل في منطقة سبها.

ج - الحدود الفلكية والجغرافية: تقع منطقة الدراسة فلكياً بين خطي طول (14:12:30 شرقاً – 14:37:00: شرقاً) ودائرتي عرض (26:50:00 شمالاً - 27:10:00 شمالاً)، وجغرافياً تقع في الجزء الجنوبي الغربي من ليبيا، وتبعد عن مدينة طرابلس مسافة 800 كم تقريباً، إن هذا الموقع يتميز بارتفاع الحرارة، وارتفاع درجات الإشعاع الشمسي، وهذا يعطيها أهمية في استثمار الطاقة الشمسية، والشكل (1) يبين موقع منطقة الدراسة من إعداد باحثين استناداً إلى مصلحة المساحة (2020) م .

د -الحدود الموضوعية: توظيف نظم المعلومات الجغرافية لتحديد أفضل المواقع لإنشاء محطات الطاقة الشمسية بمنطقة سبها.



الشكل (1) منطقة الدراسة.

4. المحور الأول ـ أهمية ومزايا الطاقة الشمسية باعتبارها مصدراً للطاقة المتجددة

تعد الطاقة الشمسية من أكبر مصادر الطاقة المتجددة على سطح هذا الكوكب، حيث تستقبل الأرض ما يعادل عشرة أضعاف الطاقة المدخرة في جميع احتياطي الطاقة غير المتجددة، ويقدر ما يسقط على الأرض من إشعاع شمسي حوالي (178 تيراواط)، أي ما يعادل خمس عشرة ألف مرة الطلب العالمي على الطاقة الأولية، ينعكس منه 30% إلى الفضاء الخارجي، وتمتص منه الأرض 50%، وبقية النسبة هي المحرك الرئيس للرياح، ودورة المياه، وعمليات البناء الضوئي [10]، وبالنظر إلى خارطة السياسة العالمية فإننا سنجد أن معظم الدول العربية تقع وسط هذه المنطقة، التي يمكن أن يطلق عليها مصطلح (الحزام الشمسي)، مما يجعلها من أكثر الدول حظاً في صناعة الطاقة [11]، وتتجلى أهمية الطاقة الشمسية في الآتي:

1.4. أهمية ومزايا الطاقة الشمسية

تعد الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقة المتجددة فهي تؤدي دوراً جوهرياً في تحقيق حلول الطاقة للتنمية، علاوة

على أن الكمية الهائلة من الطاقة الشمسية النظيفة التي يمكن الحصول عليها يومياً تجعلها مورداً جذاباً للغاية لتوليد الكهرباء [12]، ومن أبرز جوانب أهميتها:

1- تحقيق الاستدامة البيئية والاقتصادية: فالطاقة الشمسية مصدر نظيف للطاقة، وتسهم في الحد من التغير المناخي، وتقليل تأثير الاحتباس الحراري، إضافة إلى أن استثمار مشاريع الطاقة الشمسية يخلق فرص عمل جديدة، مما يعزز النمو الاقتصادي المحلي.

2- تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري: يمكن تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية مثل النفط والفحم.

3- تحقيق طاقة أمنية: يمكن للطاقة الشمسية أن تعزز استقلالية الدول في مجال الطاقة، خاصة تلك التي تعتمد بشكل كبير على استيراد الوقود الأحفوري، مما يقلل من تعرضها لتقلبات الأسعار والأزمات الجيوسياسية، وكذلك خفض تكاليف الطاقة.

4- تحسين جودة الحياة: توفير الكهرباء من خلال الطاقة الشمسية يمكن أن يغير حياة الناس، خاصة في المناطق النائية أو الفقيرة التي لا تصلها شبكات الكهرباء التقليدية.

5- الاستثمار في الطاقة الشمسية: وذلك بتطوير تقنيات جديدة، وتحسين كفاءة الألواح الشمسية وأنظمة التخزين.

بالتالي؛ فإن أهمية الطاقة الشمسية تتجلى في قدرتها على توفير حلول مستدامة وصديقة للبيئة، باعتبارها واحدة من أهم مصادر الطاقة المتجددة؛ وذلك لسهولة نشرها لأغراض مختلفة [13].

وهناك طريقتان لتجميع الطاقة الشمسية. الأولى بأن يتم تركيز أشعة الشمس على مجمع بواسطة مرايا محدبة الشكل. ويتكون مجمع عادة من عدد من الأنابيب بها ماء أو هواء حيث يسخن حرارة الشمس الهواء وتحول إلى بخار. أما الطريقة الثانية ففيها يمتص المجمع ذو اللوح المستوي حرارة الشمس وتستخدم الحرارة لتنتج هواء ساخنا أو بخارا. [14]

5. المحور الثاني ـ دور المقومات الجغرافية بمنطقة الدراسة في إنشاء محطة للطاقة الشمسية

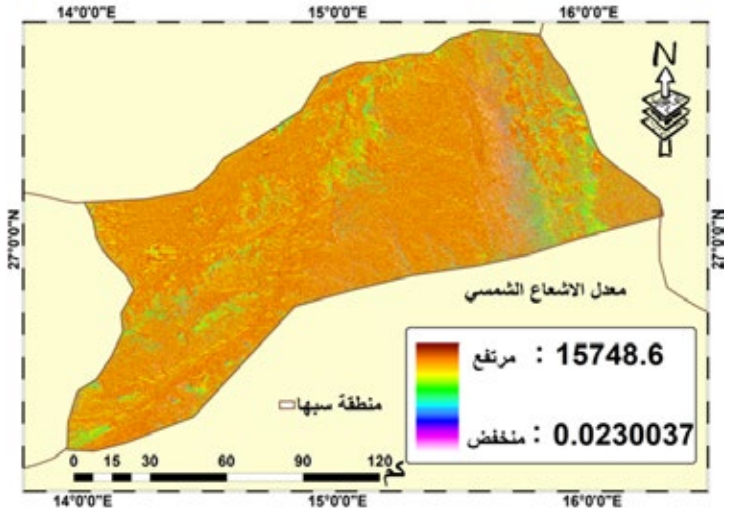
1.5. العناصر المناخية

تساهم العناصر المناخية دوراً حاسماً في تحديد المواقع المثلى لإنشاء محطات الطاقة الشمسية، حيث تعتمد كفاءة هذه المحطات بشكل كبير على الظروف البيئية والمناخية المحيطة، وقد صُنفت منطقة الدراسة مناخياً حسب تقسيم كوين (Cowen)، ضمن المناخ الصحراوي الجاف؛ لوقوعها ضمن نطاق الصحراء الكبرى [15] ، ومن بين العوامل المناخية الأكثر تأثيراً هي:

أ- الإشعاع الشمسي: يأتي في المقام الأول، فهو المصدر الأساس للطاقة التي تولدها المحطات الشمسية، وتعد دراسة بياناتها على قدر كبير من الأهمية؛ وذلك لكونها تمثل مدخلات أساسية لتطبيقات الطاقة الشمسية، بالإضافة إلى دورها في تقييم تقنيات الطاقة الشمسية وتحسين كفاءتها [16]، ويتأثر الإشعاع الشمسي بزاوية سقوط الأشعة؛ لذلك تكون ساعات سطوع الشمس في فصل الصيف أكثر، وذلك بسبب طول النهار، ويعمل سطوع الشمس على الاستفادة من الطاقة الشمسية، وتكمن أهميته في الطاقة الكهرومغناطيسية التي تتكون من الضوء والحرارة، اللذان يمثلان معاً النطاق الكهربائي والمغناطيسي، الذي يمثل الغلاف الجوي والفضاء الذي يؤثر في المادة ويتفاعل معها، والملحق (1) يُبين المتوسطات الشهرية والمعدل السنوي لعدد ساعات سطوع الشمس بمنطقة الدراسة خلال الفترة من 1990م / 2023م، استناداً إلى بيانات قسم المعلومات بالمركز الوطني للأرصاد الجوية.

كما توضح بيانات الملحق (1) بأن فصل الصيف يعد من أطول فترات السطوع الشمسي بمنطقة الدراسة؛ وذلك نتيجة حركة الشمس الظاهرية، وتعامد الشمس على مدار السرطان ووصول الأشعة بشكل عمودي في المناطق الواقعة جنوب منطقة الدراسة، وبالتالي زيادة ساعات النهار، وبذلك وصل متوسط طول النهار بالمحطة نحو(11.8)؛ وهذا بدوره يساعد في إنشاء محطات للطاقة الشمسية للاستفادة منها في توليد الطاقة الكهربائية، وقد تم إنتاج خريطة الإشعاع الشمسي لمنطقة الدراسة بالاعتماد على نموذج الارتفاع الرقمي (DEM)، حيث استُخرجت قيم الإشعاع الشمسي من البيانات الرقمية المتاحة في النموذج.

وتم ذلك باستخدام أداة Area Solar Radiation في برنامج Arc Map لحساب كمية الإشعاع الشمسي المتاحة في منطقة الدراسة. والشكل (2) يبين الإشعاع الشمسي بمنطقة الدراسة.



شكل (2) متوسطات الإشعاع الشمسي بمنطقة سبها.

ب- الحـرارة: تُعد من أهم عناصر المناخ؛ لأنها تؤثر في بقية العناصر الأخرى، فتتميز منطقة الدراسة بارتفاع في درجة الحرارة في فصل الصيف، لذلك كانت الفروق الحرارية كبيرة، فهي عرضة للتباين بين الليل والنهار، والشتاء والصيف، ومن الملحق (2) استناداً إلى بيانات قسم المعلومات بالمركز الوطني للأرصاد الجوية؛ نستخلص من بياناته أن درجة الحرارة تنخفض في فصل الشتاء ليبلغ أدنى قيمة لها خلال شهر يناير بنحو 13,7 مْ، ويرجع ذلك إلى هبوب الرياح الشمالية الشرقية والشمالية الغربية الباردة، أما فصل الصيف ونتيجة لموقع منطقة الدراسة، وقربها من مدار السرطان، وسقوط الأشعة العمودية وزيادة مدة الإشعاع نتيجة لطول فترة النهار؛ ولجميع هذه الأسباب ترتفع درجات الحرارة خلال أشهر الصيف: يونيه، ويوليه، وأغسطس لتبلغ 32,4 مْ، وهذا بدوره يساعد في الاستفادة من الطاقة الحرارية في أماكن تجميع محطات الطاقة الشمسية.

إن عنصر الحرارة أهمية كبيرة عند اختيار مواقع تجميع محطات الطاقة الشمسية في منطقة سبها؛ لأن لدرجة الحرارة دوراً في تحديد كفاءة الألواح الشمسية والمردود الإجمالي للطاقة، ففي المناطق الصحراوية مثل منطقة سبها، حيث تكون درجات الحرارة مرتفعة نسبياً على مدار العام، فإن هذا يمكن أن يكون له تأثير إيجابي وسلبي على حد سواء.

ج. الريـاح : تلعب الرياح دوراً مهماً في أداء وكفاءة محطات الطاقة الشمسية، حيث يكون لها تأثير مزدوج يتطلب توازناً دقيقاً عند اختيار موقع المحطة وتصميمها،فمن جهة؛ يمكن أن تكون الرياح مفيدة لتنظيف الألواح الشمسية من الغبار والأتربة التي تتراكم على سطحها، مما يحسن من كفاءتها في امتصاص الإشعاع الشمسي ويزيد من إنتاجيتها، ومن جهة أخرى فإن الرياح القوية قد تشكل خطراً على البنية التحتية للمحطة، حيث تحتاج الألواح والهياكل الداعمة إلى أن تكون مصممة لتحمل القوى الناتجة عن الرياح العاتية لتجنب التلف أو التأثير على الأداء[17].

- اتجاهات الرياح:

تعد اتجاهات الرياح من العوامل البيئية الحاسمة التي يجب أخذها في الاعتبار عند التخطيط، فمن خلال دراسة بيانات الملحق (3) استناداً إلى بيانات قسم المعلومات بالمركز الوطني للأرصاد الجوية نستخلص الحقائق الآتية:

- يسود هبوب الرياح الشمالية والشمالية الشرقية على منطقة الدراسة، وهي رياح جافة تثير الأتربة والغبار في أغلب الأحيان، تمثل نسبتها 30٪ تقريباً من إجمالي الرياح التي تهب على المنطقة، وتتراوح سرعتها ما بين 9,11 عقدة / ساعة، ويهب هذا النمط من الرياح من مناطق الضغط المرتفع وراء المدارين، نحو مناطق الضغط المنخفض الاستوائي.
- أما فترات السكون فقد بلغت نسبتها 6,1٪ من جملة الهبوب؛ حيث بلغ أعلاها في بلدية سبها بنسبة 6,5٪.

- سرعة الرياح:

تتباين الرياح في سرعتها لتشكل عنصراً مناخياً له تأثيره في محطات الطاقة الشمسية، ويختلف دور الرياح باختلاف سرعتها، ويبين الملحق (4) بالملحق استناداً إلى بيانات قسم المعلومات بالمركز الوطني للأرصاد الجوية متوسط سرعة الرياح بالعقدة للفترة ما بين 1990م إلى 2023م. [18]

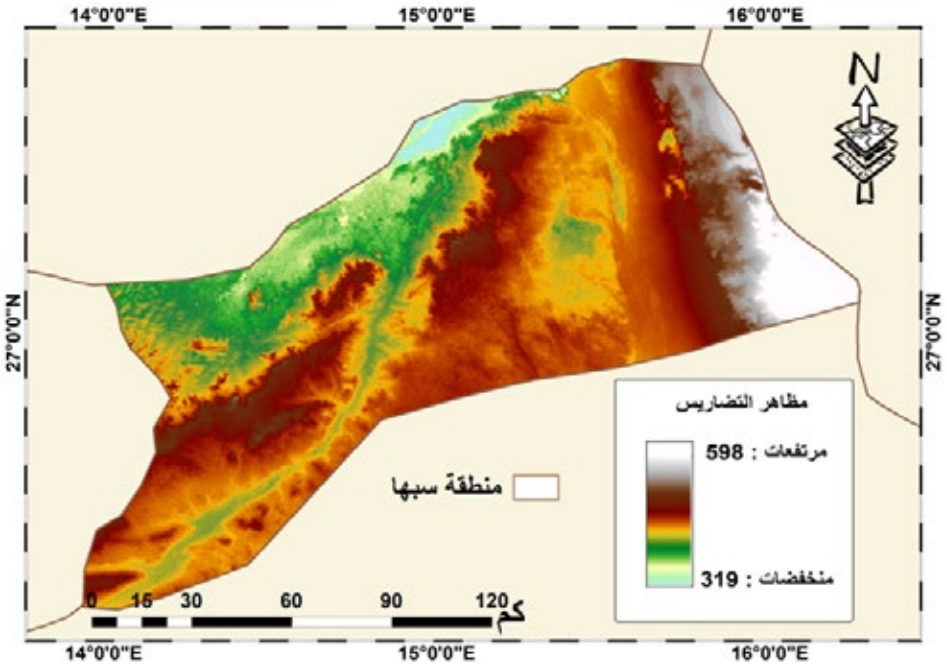
نستنتج من خلال دراسة بيانات الملحق (4) بالملحق ما يلي :

أ - المتوسط السنوي العام لسرعة الرياح على مستوى المنطقة سجل في شهر مايو(فصل الربيع) أعلى معدل بمحطة

سبها، لتصل إلى11,4 كم /ساعة، ويرجع ذلك لهبوب رياح القبلي.
وسرعة الرياح تؤثر على التبريد الطبيعي للألواح الشمسية، فعندما تكون الرياح معتدلة، يمكن أن تساعد في خفض درجة حرارة الألواح، مما يحسن من كفاءتها، ولكن في المقابل، الرياح الزائدة قد تفرض تحديات هندسية، خاصة في المناطق التي تتعرض لعواصف شديدة أو رياح قوية بانتظام؛ لذلك من الضروري تقييم هذه العوامل بدقة عند اختيار المواقع والتصميمات الهيكلية لمحطات الطاقة الشمسية، لضمان استدامتها وكفاءتها على المدى الطويل.

2.5. مظاهر التضاريس

لتضاريس دوراً مهماً في تحديد المواقع المناسبة لإنشاء محطات الطاقة الشمسية، حيث تعتمد كفاءة هذه المحطات بشكل كبير على توفر الأراضي المسطحة والمفتوحة، ومن مظاهرها:
- الأراضي المستوية: تتيح تركيب الألواح الشمسية بكفاءة أكبر، مما يسمح بتوزيعها بالتساوي دون الحاجة إلى تسوية مكلفة، إضافة إلى ذلك تسهم التضاريس المسطحة في تقليل تكاليف النقل والصيانة، ومنطقة الدراسة تتميز بمظهر واحة تتخللها عدد من القباب والهضاب، من أبرزها قويرة المال في الشمال الشرقي من المدينة، وجبل بن عريف في الشمال، والكثبان الرملية المتحركة (زلاف) شمال وشمال غرب مدينة سبها، كما هو موضح في الشكل (3)
- اتجاه الأرض وانحدارها: يؤثر اتجاه الأرض وانحدارها بشكل كبير في توجيه الألواح الشمسية نحو الشمس بأفضل طريقة ممكنة، مما يزيد من كفاءة توليد الطاقة الكهربائية، يفضل توجيه الموقع نحو الجنوب، وعلى الرغم من أن المرتفعات قد تتلقى كمية أكبر من الإشعاع الشمسي لقربها من الغلاف الجوي؛ إلا أن التضاريس الجبلية الوعرة قد تفرض تحديات كبيرة من حيث تكاليف البناء.
بشكل عام؛ تؤثر التضاريس بشكل مباشر على جدوى إنشاء محطات الطاقة الشمسية، سواء بالارتفاع أو الانخفاض، وسوف يتم إنتاج خريطة التضاريس من خلال عملية الاشتقاق من نموذج الارتفاع الرقمي.



الشكل (3) مظاهر السطح بمنطقة سبها.

6. المحور الثالث - استخدام نظم المعلومات الجغرافية في اختيار أفضل المواقع الملاءمة

ساهمت تقنيات نظم المعلومات الجغرافية المدعمة بمعطيات الاستشعار عن بُعد، ونظام تحديد المواقع، في تحليل المعلومات المكانية، من أجل الوصول إلى حلول سريعة، لما لهذه التقنية من فوائد كثيرة؛ أهمها: التحليل والدقة وسرعة المقارنة بالأساليب التقليدية، وفيما يخص الجانب التقني فإنها هي الوعاء المثالي لجمع وتخزين ومعالجة وتحليل وعرض البيانات المكانية وغير المكانية؛ لاستنباط حلول لقضايا متعددة المجالات [19] كما ساعدت في إيجاد المواقع المناسبة لإنشاء محطات الطاقة الشمسية، ومثل هذه المجالات مناسبة تماماً لتطبيق قاعدة بيانات جغرافية

للاستفادة من نتائجها،ولذلك يُعْتَمَد بشكل كبير على تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية لقدرتها على دعم مجموعة الاستفسارات المكانية التي يمكن استخدامها في اختيار المكان الأمثل [20].

أ. خطوات إنتاج الخرائط الأساسية بمنطقة سبها:

استنادًا إلى قاعدة البيانات الجغرافية التي قام الباحثان بتجميعها، المتمثلة في (البيانات المناخية، نموذج الارتفاع الرقمي، الخرائط الورقية الخاصة بمنطقة الدراسة)؛ تم الاعتماد على برنامج Arc Map 10.8 لبناء نموذج يتناسب مع طبيعة المنطقة، وتم التركيز على اختيار المتغيرات التي تتوافق مع الخصائص المتوقعة للمنطقة، وقد تم إتباع المراحل التالية:

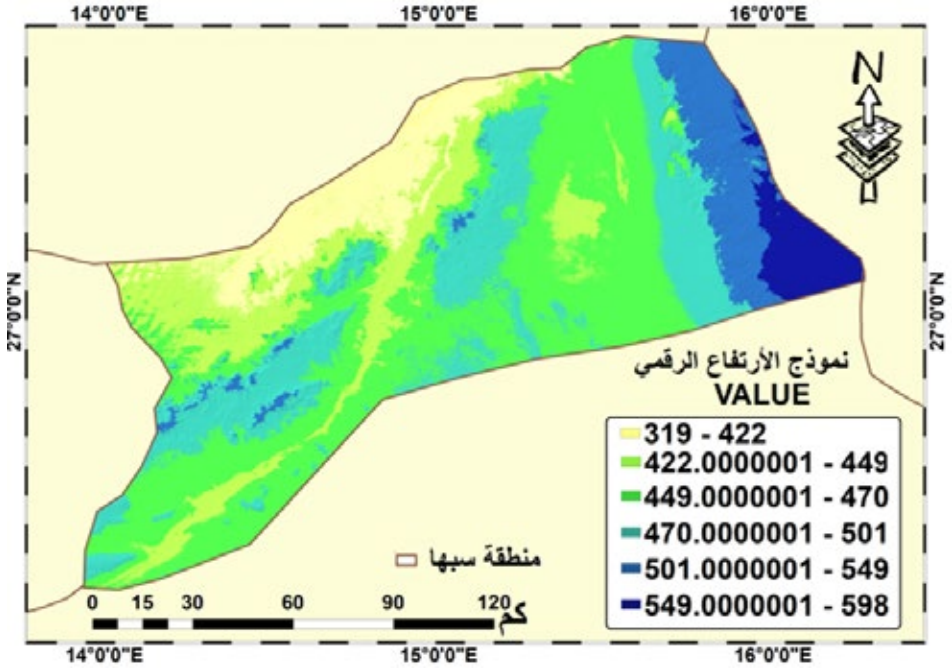
1.6. المرحلة الأولى - جمع البيانات وإنتاج الخرائط الأساسية:

اعتمدنا فيها على البيانات DEM (نموذج الارتفاعات الرقمية) المأخوذ من (Digital elevation model) الخاص بمنطقة الدراسة، فتم عمل الآتي:

- الاشتقاق (Euclidean Distance): أداة الحصول على بيانات من الطبقات التي حُدِّدَت لغرض اختيار أنسب مكان، وقد أُدْخِلَت إلى برنامج (ARC GIS10.8) بهدف إنشاء معلومات جديدة، ولكي يتم الوصول إلى خرائط الملاءمة المكانية، لابد من استخراج الخرائط الأساسية التي سَيُعْتَمَد عليها في النماذج، وهي:

1.1.6 نموذج الارتفاعات الرقمية:

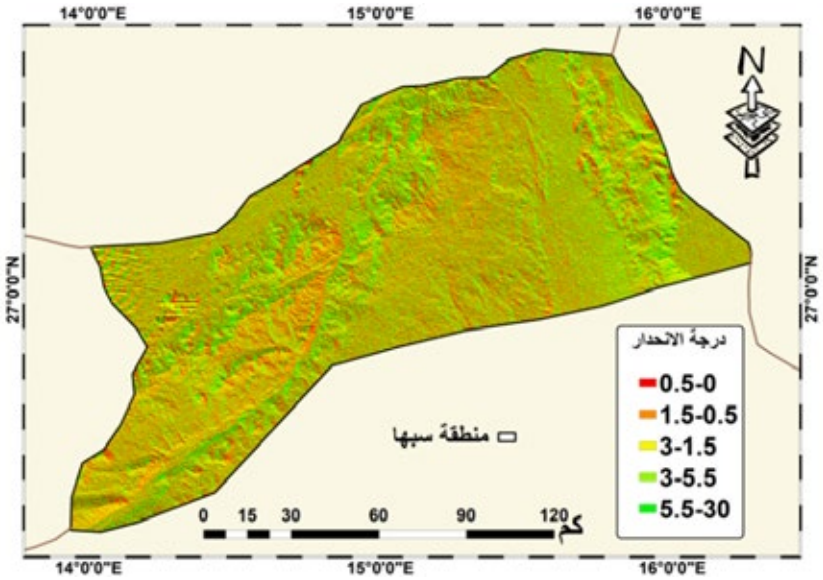
هي بيانات ذات تمثيل رقمي على صيغة Raster ، فكل pixel يحتوي على قيمة رقمية تمثل متوسط ارتفاع سطح الأرض في مساحة هذا الـــــ pixel . هذه الملفات توجد ضمن برنامج (GIS)، وتكون عادة كبيرة المقياس، وهي مفيدة لأغراض التخطيط، وسوف تعتمد الدراسة على استخدام (DEM) نموذج الارتفاع والانخفاض الرقمي للتضاريس ، كما هو مبين في الشكل (4) .



شكل (4) نموذج الارتفاعات الرقمية بمنطقة سبها.

2.1.6. إنتاج خريطة درجة الانحدار(Slope Map) :

عن طريق أستخدم أداة Slope لحساب درجة الانحدار لكل خلية في نموذج الارتفاع الرقمي (DEM). تُنتج خريطة تُظهر التغير في الارتفاع بالنسب المئوية أو بالدرجات و تتصف العلاقة المكانية بين انحدار طبوغرافية سطح الأرض والملاءمة المكانية لتشيد محطات الطاقة بالعكسية، فكلما زاد الانحدار التضاريس قلت الملاءمة بسبب صعوبة وصول هذه المناطق وارتفاع تكاليف الإنشاء المحطات الواسعة ذات قدرات الكبيرة للطاقة [21] فيبين الشكل (5) درجة الانحدار بمنطقة سبها.

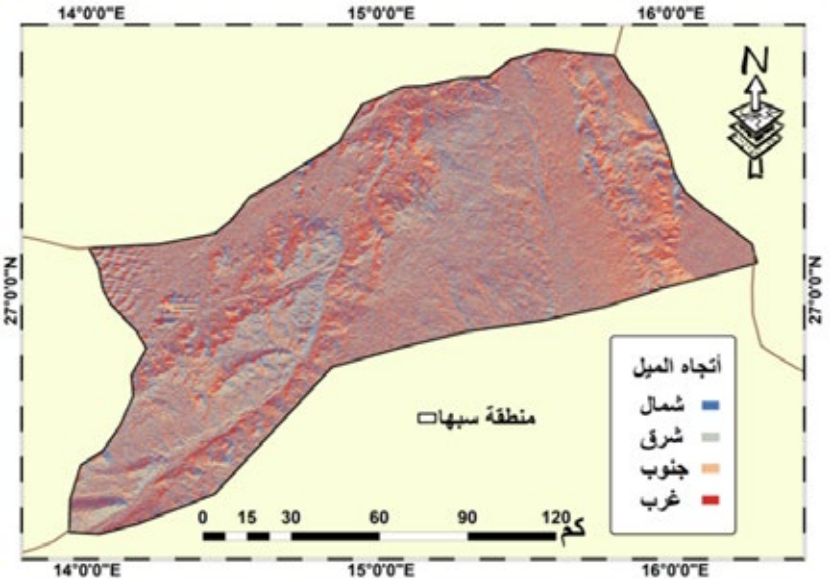


شكل (5) درجة الانحدار بمنطقة سبها.

فمن خلال الشكل السابق يوضح تباين درجة الانحدار، فتتراوح من 0-30 درجة، ونلاحظ انتشار الدرجة من 0,5-1,5 في خريطة المنطقة.

3.1.6. إنتاج خريطة اتجاه الميل (Aspect Map):

عن طريق الأداة: Aspect و تُستخدم لحساب الاتجاه الذي يميل إليه السطح لكل خلية في نموذج الارتفاع الرقمي، وتُظهر خريطة الاتجاه الزوايا في الاتجاهات الجغرافية (شمال، جنوب، شرق، غرب). وتحدد اتجاه التضاريس مدة بقاء الإشعاع الشمسي في إي منطقة وهذا يؤثر في تحديد أفضل مواقع الطاقة الشمسية، وبالتالي تعتبر المناطق المستوية (FLAT) والجنوبية من أفضل مواقع محطات الطاقة، وتعتبر التضاريس المواجه للشمال أقل ملاءمة لبناء محطات الطاقة الشمسية [22] والشكل (6) يبن ذلك.



شكل (6) اتجاه الميل بمنطقة سبها.

كل هذه الأدوات تقع ضمن مجموعة Toolbox Spatial Analyst في Arc GIS وتحديدًا ضمن الأدوات الخاصة بـ Surface، كما تتطلب توفر طبقة نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) كأساس لإنتاج هذه الخرائط.

2.6. المرحلة الثانية - تحديد المعايير والشروط وتوزيع الأوزان النسبية للشروط لاختيار أنسب المواقع الملاءمة لمحطات تجميع الطاقة الشمسية:

فقد أثبت تطبيق أسلوب نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير كفاءة كبيرة بوصفه نظاماً يعمل على مساعدة متخذي القرار من خلال تحديد أفضل مواقع تجميع الطاقة الشمسية [23].
لذا فقد أُختيرت أفضل المواقع لإنشاء شبكات تجميع الطاقة الشمسية - بوصفها طاقةً بديلةً - لتوليد الطاقة التشغيلية في مجال الطاقة بمنطقة الدراسة، باستخدام أداة (Slope)، كما هو موضح بالملحق(5) أُعتُمِد على الأوزان النسبية للشروط (المعايير والمواصفات) لاختيار أنسب مكان لإنشاء محطات الطاقة الشمسية الآتية:

3.6. المرحلة الثالثة - تصميم نموذج لاختيار أنسب المواقع لإنشاء محطات الطاقة الشمسية:

يهدف تحليل الملاءمة المكانية (Spatial Suitability) إلى اختيار موقع مكاني مناسب لأداء وظيفة معينة، وتعد من أفضل أدوات التحليل في نظم المعلومات الجغرافية، حيث إن اختيار أي موقع جغرافي ملائم لابد من توافر بعض المعايير والمواصفات التي تحددها، مع توافر بعض الطبقات المكانية الخاصة بالمنطقة وفيما يأتي تتناول الدراسة أهم الخطوات المتبعة في إنتاج نموذج الملاءمة المكانية:

- **مدخلات النموذج (Input):**

حَدَّدْتُ البيانات الأساسية المطلوبة لبدء العمل، التي على أساسها أُخْتِيرت مجموعة من الطبقات تشمل:

- DEM الخاصة بمنطقة الدراسة (التضاريس).
- البيانات المناخية (الإشعاع الشمسي– الحرارة – الرياح).
- خريطة درجة ميول سطح الأرض لمنطقة الدراسة.
- خريطة اتجاه الانحدار لمنطقة الدراسة.
- خريطة استعمالات الأراضي.
- خريطة الشبكة الكهربائية.

تم عمل نموذج (Model) الموضح في الشكل (7) باستخدام برنامج Arc Map 10.5. بإتباع الخطوات التالية:

1.3.6. دمج متغيرات المعيار الطبوغرافيا:

باستخدام الصيغة الرياضية التالية [24]:

$$\text{Float} \ \left(\text{Reclas_Slope} \ 0.35 + \text{Reclas_Distream} \ 0.25 + " \text{Reclas_Aspect} \ 0.25 + " \text{Reclas_Relief} \ 0.15 \right)$$

2.3.6. دمج متغيرات معيار المناخ:

باستخدام الصيغة الرياضية التالية:

$$\text{Float}\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\left(" \text{Reclas_Radiation} " * 0.40 + " \text{Reclas_Clouds} " * 0.25 + " \text{Reclas_Rainday} " * 0.20 + " \text{Reclas_Temperatures} " * 0.15 \right)\text{Reclas_Temperatures} " * 0.15 \right)$$

3.3.6. دمج متغيرات معيار البيئة:

باستخدام الصيغة التالية:

$$\text{Float} \left(" \text{Reclas_Dust} " * 0.55 + " \text{Reclas_Landcover} " * 0.45 \right)$$

4.3.6. دمج متغيرات المعيار الاقتصادي:

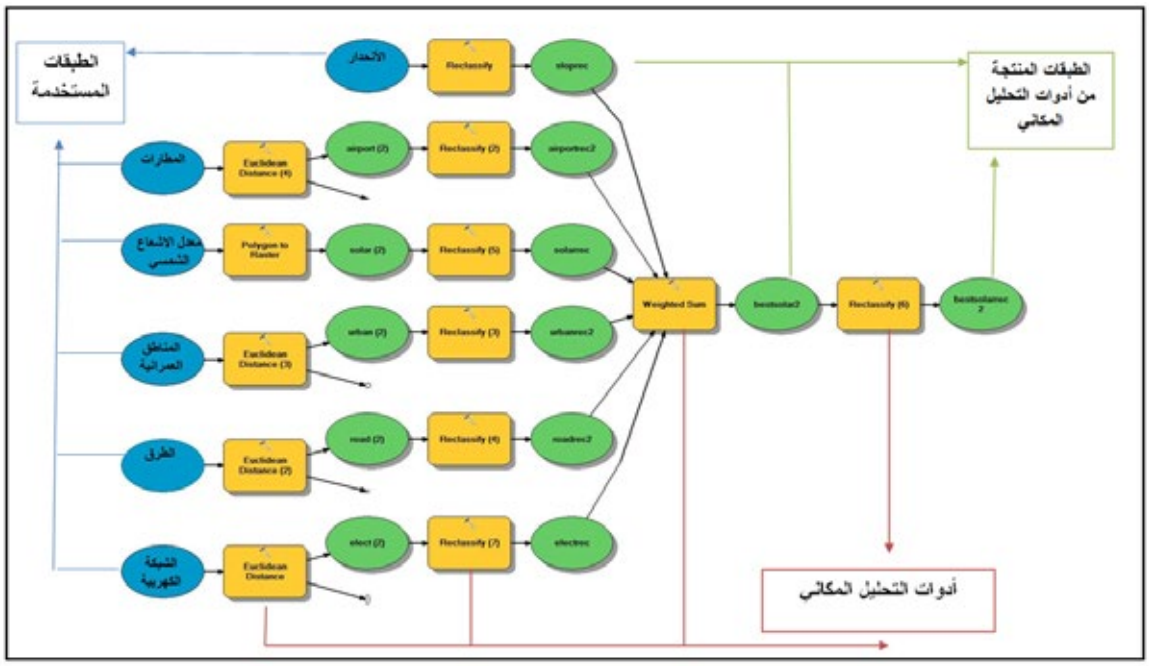
التي تشمل البعد عن تجمعات السكان، خطوط الكهرباء والطرق، باستخدام الصيغة الرياضية التالية:

$$\text{Float} \left(" \text{Reclas_Popgatherings} " * 0.40 + " \text{Reclas_Powerlines} " * 0.35 + " \text{Reclas_Roads} " * 0.25 \right)$$

5.3.6. دمج طبقات معيار نموذج الملائمة المكاني:

تم دمج الطبقات الأربعة الناتجة أعلاه حسب أوزانها النسبية باستخدام الصيغة التالية:

\text{Float} \left(“ \text{Climatecriterion} “ * 0.30 + “ \text{Environmentcriterion} “ * 0.25 + “ \text{Economycriterion} “ * 0.25 + “ \text{Topographycriterion} “ * 0.20 \right)



شكل (7) نموذج اختيار أفضل موقع لإنشاء محطة تجميع الطاقة الشمسية بمنطقة سبها.

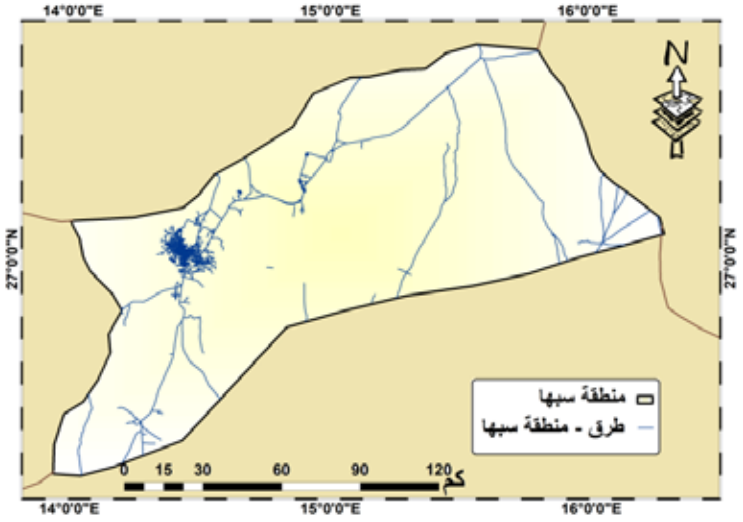
4.6. المرحلة الرابعة – إعادة التصنيف (Reclassify) وإنتاج الخرائط حسب الملاءمة وحسب المعايير المتعددة:

أُغثُمِد على الأوزان النسبية للشروط (المعايير والمواصفات) لاختيار أنسب مكان لإنشاء محطات الطاقة الشمسية كما هو موضح الملحق (5) للحصول على خرائط الملاءمة لابد من التصنيف على الطبقة المنتجة من عملية الاشتقاق، وذلك من خلال أداة Reclassify. وتهدف عملية التصنيف إلى قياس ملاءمة نوعية الأراضي المناسبة لإنشاء المحطة. وقد تم إنتاج عدة خرائط طبوغرافية والمرئية الفضائية لمنطقة الدراسة في ترقيم طبقات وتوضح الإشكال (8)، (9)، (10)، (11)، (12) نماذج لطبقات من أجل استخدامها في التحليل المعياري وهي[25]:

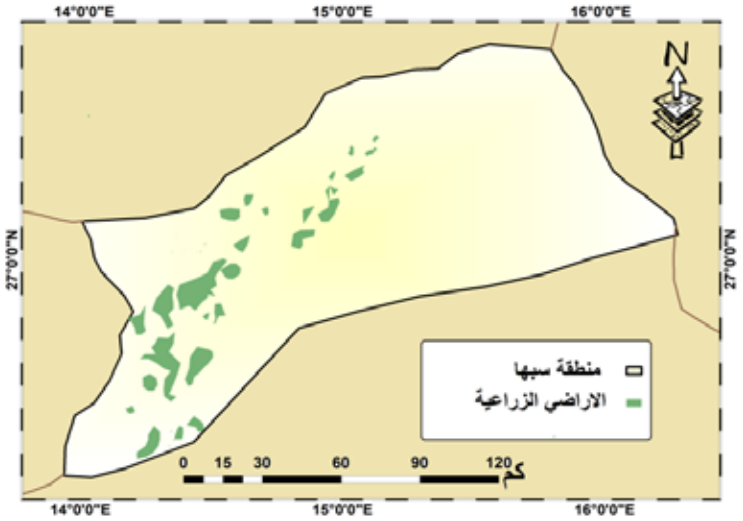
- خريطة الطرق الرئيسية.
- خريطة الأراضي الزراعية.
- خريطة استعمالات الأراضي
- خريطة الشبكة الكهربائية.

وتتضمن القيود الاقتصادية سبعة معايير من أهمها: شبكة النقل، شبكة الكهرباء، إذ يلعب هذان العاملان دوراً إيجابياً في استدامة مرافق الطاقة الشمسية [26].

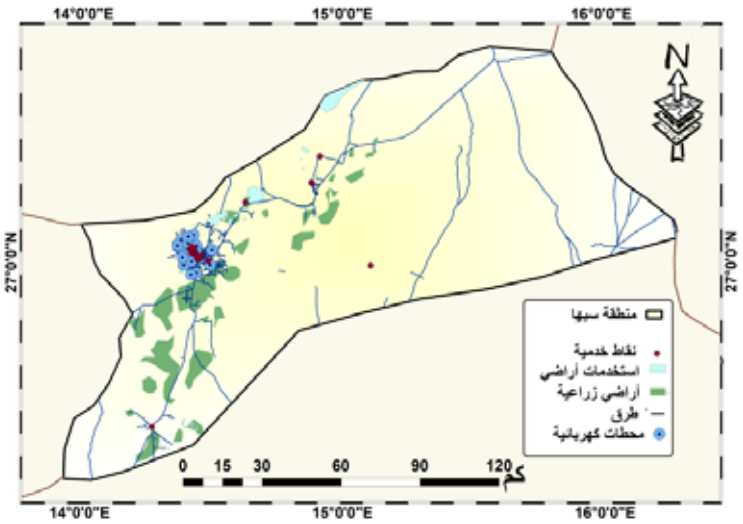
كما تساعد هذه المعايير في سهولة الوصول إلى مواقع محطة الطاقة الشمسية، وتقلل التكاليف التي تنطوي عليها عملية البناء والدعم اللوجستي أثناء مرحلة البناء والتشغيل [27] .



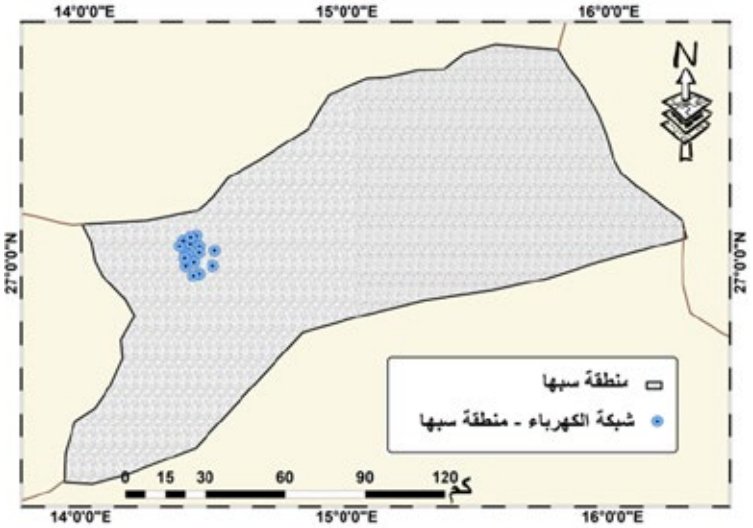
شكل (8) شبكة الطرق بمنطقة سبها.



شكل (9) الأراضي الزراعية بمنطقة سبها.



شكل (10) استعمالات الأراضي بمنطقة سبها.

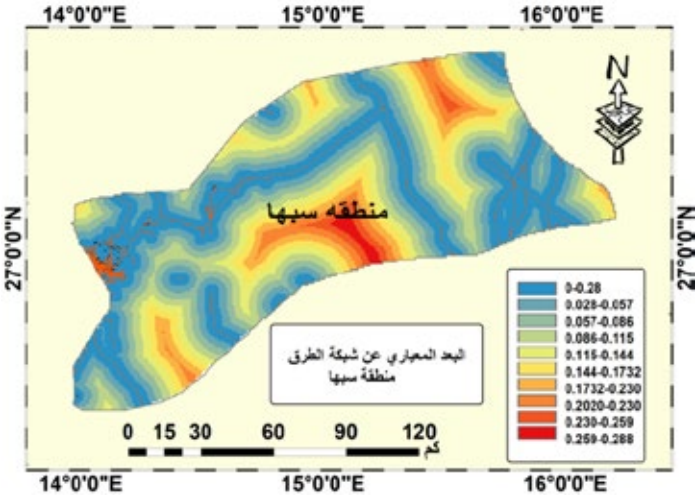


شكل (11) محطات الكهرباء بمنطقة سبها.

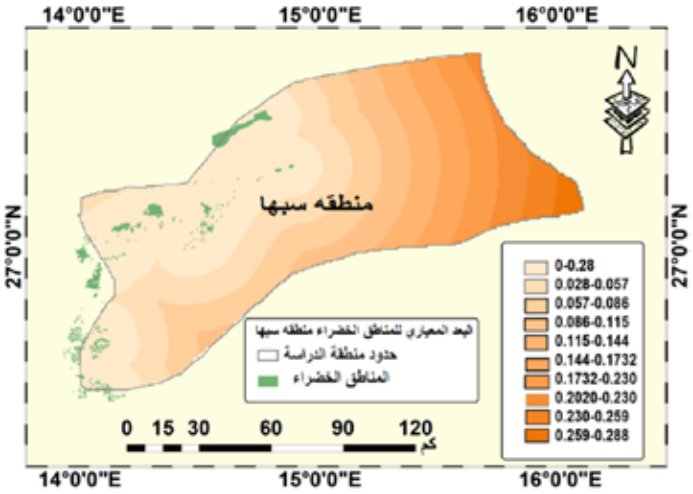
ويبين الشكل (11) محطات توليد الكهرباء بمنطقة سبها، ولأهميتها بالنسبة للطاقة الشمسية فمن واقع الدراسة الميدانية نجدها تعتمد على ثلاثة محاور رئيسة لتزويد المنطقة بالطاقة الكهربائية:

- المحور الأول - يغذي المدينة من طرابلس عبر شبكة أم الجداول في منطقة الشاطئ، وهو المصدر الأساس الذي يربط سبها بالشبكة الكهربائية في الشمال الغربي.
- المحور الثاني - يعتمد على شبكة قادمة من منطقة سمنو عبر محطة مصراتة، ويوفر تغذية إضافية من اتجاه مختلف، مما يعزز استقرار الشبكة ويقلل من تأثير الأعطال المحتملة.
- المحور الثالث - يعتمد على محطة أوباري الغازية في منطقة الفجيج، وهي محطة محلية تعمل بالغاز، وتسهم في تلبية جزء من احتياجات الطاقة في المنطقة.

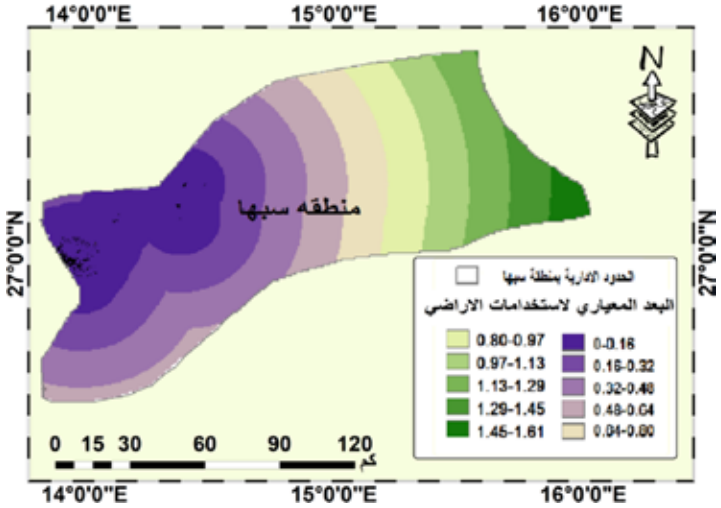
يسهم هذا النظام المتعدد المحاور في تعزيز استمرارية الإمداد الكهربائي، مما يضمن استقرار الشبكة في سبها والمناطق المجاورة، والمدينة تحتوي على سبع عشرة محطة كهرباء فرعية، معظمها بقدرة 66 كيلو فولت، وبعضها بقدرة تصل إلى 220 كيلو فولت، ومحطة واحدة 400 كيلو فولت، ولكنها لم تستكمل بعد، هذه المحطات تعتمد على ثلاث محطات رئيسة،وهذا بدوره يساعد في ربط المحطة بالطاقة الشمسية، ويعمل حلاً مستداماً يمكن أن يدعم الشبكة الكهربائية، ويمكن لمشاريع الطاقة الشمسية أن تخفف الضغط على الشبكة، وتعزز مصادر الطاقة البديلة النظيفة. وقد عمل الباحثان على تطبيق مجموعة متنوعة من المعايير لتحقيق الملاءمة المكانية، حيث تضمنت البعد المعياري لعدد من الطبقات الأساسية مثل: طبقة الطرق، وطبقة الأراضي الزراعية، وطبقة استخدام الأراضي، وطبقة الكهرباء. ومن خلال دمج هذه المعايير،باستخدام أداة التحليل المكاني (Spatial Analysis Tool) تم تحليل المسافة (Distance Analysis) للوصول إلى النتيجة النهائية لتقييم الملاءمة المكانية. والأشكال (12)، (13)، (14) ، (15) توضح ذلك.



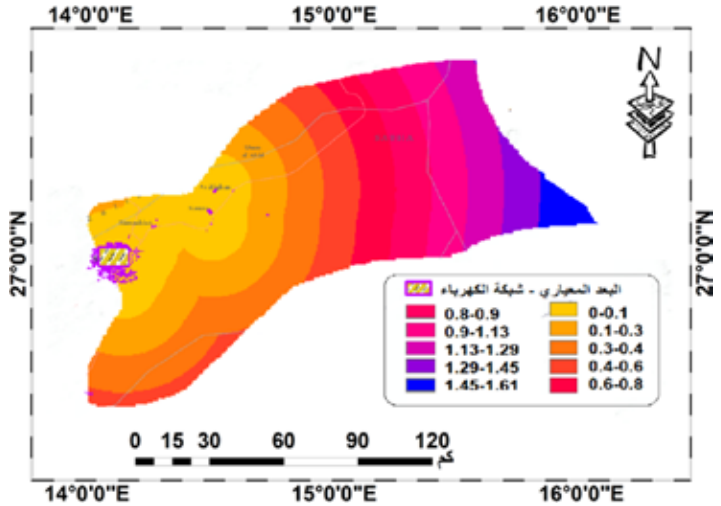
شكل (12) البعد المعياري لشبكة الطرق بمنطقة سبها.



شكل (13) البعد المعياري للأراضي الزراعية بمنطقة سبها.



شكل (14) البعد المعياري للاستخدامات الأراضي بمنطقة سبها.



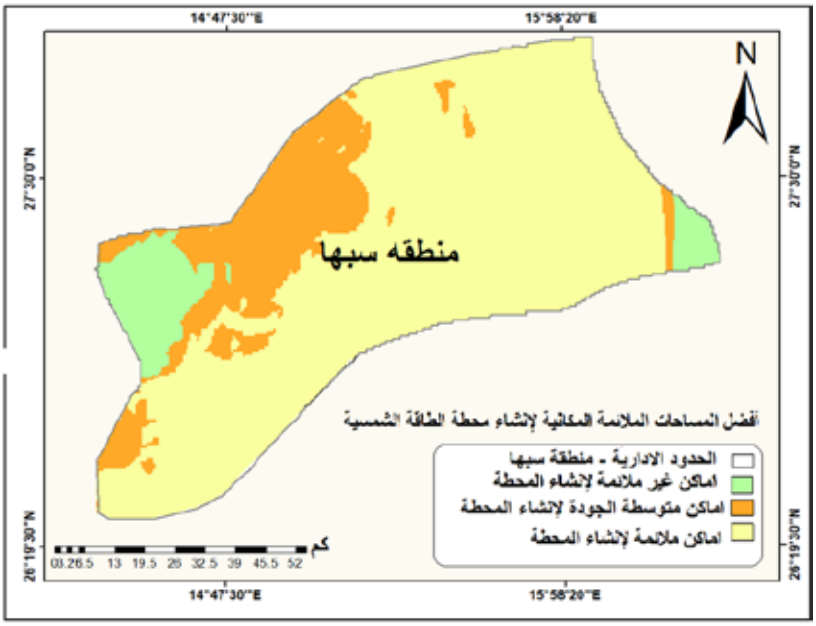
شكل (15) البعد المعياري لشبكة الكهرباء بمنطقة سبها.

7. النتائج والمناقشة

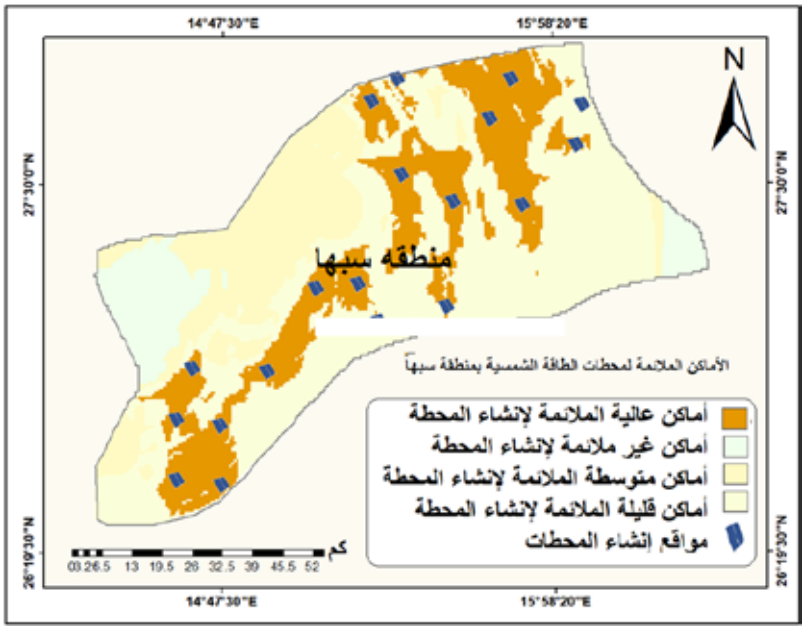
1.7. نماذج الملاءمة النهائية لاختيار أفضل الأماكن لإنشاء محطات تجميع الطاقة الشمسية:

يجب الاعتماد على عدة معايير أساسية، منها معايير القيود الطبيعية والبشرية والاقتصادية لإيجاد مستوى الملاءمة العالي والمتوسط والضعيف، بالإضافة إلى الأماكن غير الملاءمة لإنشاء المحطات، وللحصول على ذلك تم التعامل مع الآتي:

يعتمد بناء نموذج الملاءمة النهائي لاختيار مواقع المحطات على تحليل الأوزان باستخدام أداة Weighted Overlay Tool، التي تعتبر أساسية في التحليل متعدد المعايير. تتيح هذه الأداة دمج طبقات مختلفة، مثل الإشعاع الشمسي، الانحدار، والقرب من الطرق، مع تخصيص أوزان لكل معيار حسب أهميته. يساعد ذلك في تحديد المواقع المثلى استنادًا إلى عدة عوامل. في هذه المرحلة؛ يتم التعامل مع المخرجات التي تمت إعادة تصنيفها بعد بناء النموذج، بتطبيق الأوزان عبر الانتقال إلى Spatial Analysis واختيار Weighted Overlay بعد إتمام النموذج. كما في الشكلين (16)، (17)،



شكل (16) مساحات الملاءمة لمحطات الطاقة الشمسية.



شكل (17) أفضل المواقع لإنشاء المحطات الطاقة الشمسية.

وتبين نتائج نموذج الملاءمة النهائيان منطقة الدراسة مناسبة لمشروعات تجميع الطاقة الشمسية، وتبين نتائج الملاءمة المكانية لإنشاء محطة طاقة شمسية في منطقة الدراسة أن المساحات ذات الملاءمة العالية تشكل حوالي 60% من إجمالي المساحة المدروسة، بينما تمثل المساحات ذات الملاءمة المتوسطة نحو 22%، في حين أن المناطق ذات الملاءمة المنخفضة تبلغ 18% من المساحة الكلية، وتوضح هذه النتائج نجاح تطبيقها والاستفادة منها بوصفها طاقة بديلة متجددة، ويمكن الاعتماد عليها في نواحي الحياة كافةً – سواء الاقتصادية أو الاجتماعية أو البيئية – ومن ثم فإن استخدام مصادر الطاقة - وخاصة الشمسية - أضحت قضية على المستوى العالمي.

8. الخلاصة و التوصيات

من خلال الدراسة توصلنا لعدة نتائج يمكن ذكرها:

1- أثبتت الدراسة أن العناصر المناخية كالإشعاع الشمسي، ودرجة الحرارة، والرياح، تلعب دوراً محورياً في تقييم صلاحية المواقع لمحطات الطاقة الشمسية، إذ بلغ متوسط الإشعاع الشمسي بالمنطقة نحو 11.8 ساعة، مما يساهم في إنتاج الطاقة بشكل اقتصادي، كما تبين أن متوسط درجات الحرارة يصل إلى 13.9 درجة مئوية في شهر يناير، وهو مؤشر إيجابي على مدى ملاءمة المنطقة لإنشاء محطة للطاقة الشمسية، ساهمت الرياح بشكل فعال في تبريد الألواح الشمسية، فضلاً عن أن سرعتها المعتدلة تدعم استقرار المنشآت الهيكلية.

2- اعتمدت الدراسة على نموذج الارتفاع الرقمي(DEM) للمنطقة للتحليل المكاني باستخدام أدوات Spatial Analyst في صندوق الأدوات Toolbox Spatial Analyst في حزمة ArcGIS للحصول على اتجاه الميل ودرجة الانحدار ومظاهر التضاريس، مما ساعد على تقييم مدى الابتعاد عن المناطق ذات الانحدار وهو ما يدعم دقة عملية اختيار الموقع.

3- استندت الدراسة إلى خرائط متنوعة لتقييم الملاءمة المكانية، شملت شبكة الطرق لتسهيل الوصول ونقل المعدات، واستعمالات الأراضي لتجنب المناطق المحمية أو غير المناسبة، وكذلك خريطة شبكة الكهرباء لتحديد المواقع المتصلة بالشبكة الكهربائية بسهولة، ما يقلل من تكاليف التوصيل ويعزز كفاءة التشغيل، وقدمت هذه الخرائط معاً رؤية شاملة عن ملاءمة الموقع، مما ساهم في اختيار أنسب المواقع لإنشاء المحطة.

4- استندت عملية إنتاج خريطة الملاءمة إلى مجموعة من المعايير المتكاملة لضمان اختيار موقع لإنشاء محطة ذات مواصفات عالية وكفاءة تشغيل مثلى، تضمنت جوانب تقنية، كتعظيم الاستفادة من الإشعاع الشمسي، والانحدار المثالي، وشملت أيضاً اعتبارات اقتصادية، مثل القرب من شبكة الكهرباء والطرق، لتقليل تكاليف النقل، وتضمنت معايير بيئية لضمان حماية البيئة المحيطة، مع تجنب المناطق الحساسة أو غير الملاءمة، جاءت هذه المعايير.

5- تضم شبكة الكهرباء في المنطقة 17 محطة كهرباء فرعية، معظمها بقدرة 66 كيلو فولت، وبعضها بقدرة تصل إلى 220 كيلو فولت. ومحطة واحدة 400 كيلو فولت ولكنها لم تستكمل بعد، هذه المحطات تعتمد على ثلاث محطات رئيسية. هذا بدوره يساعد على ربط المحطة بالطاقة الشمسية، ويعمل حلاً مستدامًا يمكن أن يدعم الشبكة الكهربائية. ويمكن لمشاريع الطاقة الشمسية أن تخفف الضغط على الشبكة وتعزز مصادر الطاقة البديلة النظيفة.

6- من خلال تطبيق Spatial Analysis Overlay باستخدام برنامج ArcGIS والاعتماد على المعايير التقنية، والاقتصادية، والبيئية، عبر دمج الطبقات المكانية، مثل مستويات الإشعاع الشمسي، والمناطق العمرانية، وشبكات الطرق والكهرباء، تم إنتاج خريطة تحدد المواقع الأنسب لإنشاء محطة الطاقة الشمسية، فكانت نتائج الملاءمة المكانية لإنشاء محطة طاقة شمسية في منطقة الدراسة أن المساحات ذات الملاءمة العالية تشكل حوالي 60% من إجمالي المساحة المدروسة. بينما تمثل المساحات ذات الملاءمة المتوسطة نحو 22%، في حين أن المناطق ذات الملاءمة القليلة تبلغ 18% من المساحة الكلية. ما يساعد في توجيه صناع القرارات الإستراتيجية لمشاريع الطاقة الشمسية.

توصي الدراسة بضرورة استخدام التقنيات المكانية المتمثلة في نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد في دراسة المشاريع التخطيطية لمساعدة متخذي القرار في مجال الطاقات المتجددة.

Author Contributions: All authors have made a substantial, direct, and intellectual contribution to the work and approved it for publication.
Funding: There is no funding for the article.
Data Availability: The data are available at request.
Conflicts of Interest: The authors declare that they have no conflict of interest.

9. المراجع

1- الحلفي، عبدالجبار عبود علي، تطورات الطاقة المتجددة في دولة الإمارات العربية المتحدة مع الإشارة خاصة بالطاقة الشمسية، مجلة الخليج العربي، المجلد (40) العدد (3-4) سنة 2012.ص 3-6

2- داود، جمعة محمد وآخرون، تحديد أفضل المواقع لتجميع الطاقة الشمسية في منطقة مكة المكرمة الإدارية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير، الملتقى الوطني الحادي عشر لتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في المملكة العربية السعودية، جامعة الإمام الملك فيصل 11-13 أبريل 2017 م ، ص 7.

3- طه، دلير عزيز، وآخرون ، المقومات الجغرافية لإنشاء محطات توليد الطاقة الكهربائية من الإشعاع الشمسي، المجلة الأكاديمية لجامعة نوروز، العراق، 2017.ص 12.

4- قلية، منصور علي، إمكانيات استخدام الطاقة الشمسية في ليبيا دراسة في جغرافية الخدمات، مجلة كليات التربية، 2017 ص 4-7

5- الطائي، عباس فاضل، تقييم الملاءمة المكانية لمحطات توليد الطاقة الكهربائية في محافظة القادسية باستعمال GIS ، مجلة القادسية للعلوم الإنسانية ، المجلد (21) العدد 91، 2018. ص6

6- الزردومي، وآخرون، تقدير الإشعاع الشمسي واختيار أنسب المواضع لمحطات الطاقة الشمسية ، منشورات جامعة طبرق، المجلد الثاني، الطبعة الأولي، 2022. ص4.

7- *Zulkifly, M. I. D., Said, M. S. M. (2022). Determining Optimal Solar Power Plant Location in Melaka, Malaysia: A GIS-Based Solutions, IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, pp. 1-16*

8- آل مشيط، أمل بنت حسين، الملاءمة المكانية لتحديد أنسب المواقع الطاقة الشمسية في منطقة عسير، المجلة الجغرافية العربية، المجلد (55) العدد(83) يونيو،2024. ص ص 189-204

9- هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية www.USGS.com -

10- ألحلفي، عبدالجبار عبود علي، مرجع سابق ص 13

11- داود، جمعة محمد وآخرون، مرجع سابق ص 3

12- كمال، محمد ، وآخرون، واقع وأفاق الطاقة المتجددة في الدول العربية، الطاقة الشمسية وسبل تشجيعها، المؤتمر العلمي الدولي للتنمية المستدامة والكفاءة الاستخدامية للمواد المتاحة، سيطيف، الجزائر، أبريل، 2008،ص4 .

13- *Dawod , G, and Mandoer, M.(2016), Optimum sites for solar energy harvesting in Egypt based on multi-criteria GIS, The first Future University international,P13*

14- زرزار العياشي، وآخرون، الاستثمار في الطاقات المتجددة وآلية لرفع معدلات النمو الاقتصادي للدول العربية، مجلة الطاقة الشمسية والتنمية المستدامة، مجلة علمية محكمة تصدر عن مركز بحوث الطاقة الشمسية المجلد(5) العدد (1)2016.

15- عبد العزيز طريح شرف، (1996)، جغرافيا ليبيا، الطبعة الثالثة، مركز الإسكندرية للكتاب، الإسكندرية.، ص ص 285- 314.

16- *Y. Nassar, Solar energy engineering – active applications, Sebha University, Sebha, Libya, 2006*

17- *Zulkifly, M. I. D., Said, M. S. Mthe previous reference,p,3*

18- المركز الوطني للأرصاد الجوية،(2023)، إدارة الخدمات، قسم العمليات المناخية، بيانات غير منشورة، طرابلس

19- *Hosseini, A. A., & Hosseini, S. H. (2012). Utilizing solar energy instead of fossil fuels as domestic energy (case study Dehloran city, Ilam province, Iran). Energy exploration & exploitation, 30(3), 389-401.*

20- *Taher, M. A., & Fares, M. N. (2017). Experimental investigation of solar energy storage using paraffin wax as thermal mass. International Journal of Renewable Energy*

21- آل مشيط، أمل بنت حسين، مرجع سابق ص 198

22- *Sassi Rekik, Souheil El Alimi. Optimal wind-solar site selection using a GIS-AHP based approach: A case of Tunisia. Energy Conversion and Management: X. volume 18 april2023,100355.*

23- كمال، محمد ، وآخرون،مرجع سابق ص 11.

24- آل مشيط، أمل بنت حسين، مرجع سابق ص 203

25- مصلحة التخطيط العمراني، فرع المنطقة الجنوبية.

26- *Fan,B,(2009), A hybrid spatial data clustering method for site selection : the data driven approach of GIS mining , volume : 36 , lssue : 2,pudlisher : Elsvier Ltd*

27- *Al Garni, H.Z.; Awasthi, A. Solar PV power plant siteselection using a GIS-AHP based approach with application inSaudi Arabia. Appl. Energy 2017, 206, 1225–1240.*

28- داود، جمعة محمد وآخرون، مرجع سابق ص 7.

الملاحق

ملحق (1) المتوسطات الشهرية والمعدل السنوي لعدد ساعات سطوع الشمس (ساعة/اليوم) بمنطقة الدراسة خلال الفترة 1990 م -2023 م.

المحطة	فصل الشتاء			فصل الربيع			فصل الصيف			فصل الخريف			المعدل السنوي
	ديسمبر	يناير	فبراير	مارس	أبريل	مايو	يونيه	يوليو	أغسطس	سبتمبر	أكتوبر	نوفمبر	
سبها	9,3	8,8	9,6	9,7	9,8	10,5	11,3	11,8	11,6	10,4	9,7	9,8	10,2

ملحق (2) متوسط درجات الحرارة (مْ) بمنطقة الدراسة للفترة ما بين 0991 – 3202 م

المحطة		ديسمبر	يناير	فبراير	مارس	أبريل	مايو	يونيو	يوليو	أغسطس	سبتمبر	أكتوبر	نوفمبر	المتوسط
سبها	ص	6,3	5,3	6,4	9,7	16,8	20	23,2	23,6	23,4	21,4	16,9	10,6	15,3
	ع	23,9	22,1	26,7	33	37,1	39,5	42	41,3	41,4	39,9	36,2	29,4	34,3
	ط	15,1	13,7	16,5	21,3	26,9	29,7	32,6	32,4	32,4	30,6	26,5	20	24,8
	م	17,6	16,8	20,3	23,3	20,3	19,5	18,8	17,7	18	18,5	19,3	18,8	19
ص(صغرى) ، ع (عظمى)، ط (متوسط) ، م (المدى الحراري).														

ملحق (3) النسب المئوية لاتجاهات الرياح بمنطقة سبها ما بين 0991م إلى 3202م

المحطة	النسبة المئوية لاتجاهات الرياح								
	شمالية ٪	شمالية شرقية٪	شرقية٪	جنوبية شرقية٪	جنوبية٪	جنوبية غربية٪	غربية٪	شمالية غربية٪	سكون٪
سبها	11	13,7	12,4	25,7	9,3	7,3	5,4	8,6	6,5

ملحق (4) متوسط سرعة الرياح بالعقدة بمنطقة الدراسة في الفترة 0991م إلى 3202 م

المحطة	فصل الشتاء			فصل الربيع			فصل الصيف			فصل الخريف			المعدل السنوي
	ديسمبر	يناير	فبراير	مارس	أبريل	مايو	يونيه	يوليه	أغسطس	سبتمبر	أكتوبر	نوفمبر	
سبها	7,0	7,5	8,5	10,0	11,1	11,4	10,8	9,9	9,6	9,5	8,6	7,8	9,3

ملحق (5) معايير الملاءمة لإنشاء محطات تجميع الطاقة الشمسية [28].

المعايير الأساسية	المعايير الثانوية	الفئات	الملاءمة	الوزن ٪
تقني	الإشعاع الشمسي (كيلو وات متر مربع / يوم)	8 < 8- 6 6- 4,5 4,5 >	عالية متوسطة قليلة غير ملائمة	30
	ميل سطح الأرض (الانحدار)	3- 0 5-3 10-5 10<	عالية متوسطة قليلة غير ملائمة	15
	البعد عن شبكة توزيع الكهرباء (كم)	5-0 10-5 20-10 10 <	عالية متوسطة قليلة غير ملائمة	15
اقتصادي بيئي	البعد عن شبكة الطرق (كم)	5> 5<	ملائم غير ملائم	10
	البعد عن المدن (كم)	5> 5<	ملائم غير ملائم	15
	البعد عن المطارات (كم)	3> 3<	ملائم غير ملائم	15
قيود	حدود التجمعات العمرانية	–	أماكن القيود لا يجب أن يُقام عندها مشروعات تجميع الطاقة الشمسية	
	الأراضي الزراعية	–		–
المجموع				100