

خريطة الملائمة المكانية لمواقع محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في محافظة ذي قار باستخدام طريقة تحليل متعددة المعايير (AHP)

وسام حمود حاشوش

قسم الجغرافية، كلية التربية للعلوم الانسانية، جامعة ذي قار، ذي قار، العراق

dr.wsam.h@utq.edu.iq

الملخص

تكمن أهمية الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في كونها المصدر الأساسي والأكثر وفرة للطاقة المتجددة على كوكب الأرض، حيث توفر حلاً بيئياً واقتصادياً مستدامة للتحديات المناخية الحالية، يهدف البحث إلى استخدام تحليل ملائمة متعددة المعايير (AHP) في نظم المعلومات الجغرافية (GIS) لتحديد المواقع المكانية الأنسب لاستغلال الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في محافظة ذي قار، إذ تم الاعتماد معايير مؤثرة (بيئية، اقتصادية، تقنية)، والتي تشمل الإشعاع الشمسي، سرعة الرياح، الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض، والمسافة من خطوط نقل الطاقة، والمسافة من الطرق الرئيسية، والمسافة من المنطقة الحضرية، والكثبان الرملية، والانحدار، وتمت معالجة هذه البيانات في برنامج Arc map 10.8 لغرض استخدامها في عملية التحليل الهرمي AHP وذلك للقيام بعملية الملائمة المكانية باستخدام دالة التطابق الموزون (Weighted Overlay) تسمح هذه الدالة بترتيب عدة نقاط باستخدام مقياس مشترك، وترجيح كل نقطة وفقاً لأهميتها بالاستناد إلى آراء الخبراء، وبدأ البحث بطرح مشكلة مفادها مدى إمكانية النمذجة الخرائطية ان تولد نموذج مكاني يوضح المكان الأنسب لإنشاء محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في منطقة الدراسة بالاعتماد على عملية التحليل الهرمي (AHP) متعددة المعايير وبالاعتماد على معطيات الاستشعار عن بعد (RS) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) وبعض مصادر المعلومات ذات العلاقة، وبني البحث على المدخل الاستقرائي الذي يبدأ بالجزئيات وينتهي بالكليات ابتداءً بتحديد المعايير اللازمة لعملية الملائمة المكانية للمناطق المختلفة سواء كانت تقنية أو اقتصادية أو بيئية مروراً بتقسيم المعايير إلى درجات مع إعطائها أوزان حسب الأهمية النسبية وانتهاءً بنمذجة تلك المعايير لغرض توليد نموذج مكاني موحد يوضح الملائمة المكانية لمواقع محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في منطقة الدراسة محافظة ذي قار، وقد تم ذلك بالاعتماد على المنهج التحليلي ومنهج النمذجة والأسلوب الإحصائي. ووجد ان منطقة الدراسة بأكملها ملائمة تقريباً لحصاد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح مع مؤشر ملائمة متفاوت، إذ انها صنفّت إلى اربع فئات: فئة الملائمة بدرجة عالية شكلت نسبة 48.36% لمحطات الطاقة الشمسية و35.48% لطاقة الرياح من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وفئة الملائمة المتوسطة بلغت نسبتها 43.28% طاقة شمسية و56.1% طاقة رياح، أما فئة الملائمة العالية جداً، وعلى الرغم من أهميتها التخطيطية، فإنها تمثل مساحة محدودة نسبياً إذ جاءت بنسبة 1.93% طاقة شمسية فقط وطاقة الرياح في هذه الفئة نسبتها 1.21%، من مساحة منطقة الدراسة، في حين بلغت نسبة المناطق ذات الملائمة القليلة جداً 6.43% للطاقة الشمسية ولطاقة الرياح 7.21%. ووجد ان هذا التفاوت المكاني يرجع للنتيجة المشتركة للمعايير الداخلة في نموذج (AHP)، إذ تشير الأوزان النسبية المأخوذة بالاستناد إلى آراء الخبراء، ان سطوع الاشعاع الشمسي وسرعة الرياح يمثلان العاملين الأكثر أهمية في تحديد الملائمة المكانية لمحطات حصاد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بوزن نسبي بلغ (23.7%)، (27.5%) على التوالي، يليه الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض (23.7%) للطاقة الشمسية و(21.8%) لطاقة الرياح ثم القرب من خطوط الطاقة الكهربائية (18.0%) للطاقة الشمسية و(13.2%) لطاقة الرياح والنقل (12.5%) للطاقة الشمسية و(9.9%) لطاقة الرياح والمراكز الحضرية (12.5%) للطاقة الشمسية و(9.9%) لطاقة الرياح، والكثبان الرملية (9.4%) لطاقة الرياح، في حين جاء عامل الانحدار بالترتبة الأخيرة نسبياً (9.7%) للطاقة الشمسية و(8.2%) لطاقة الرياح.

الكلمات المفتاحية: الملائمة المكانية، عملية التحليل الهرمي (AHP)، مصفوفة المقارنة الزوجية، نسبة التناسق.

Spatial suitability map of solar and wind power plant sites in Thi Qar Governorate using the AHP multi-criteria analysis method

Wissam Hamoud Hashoush

(Department of Geography, College of Education for Humanities, Thi Qar University, Thi Qar, Iraq

dr.wsam.h@utq.edu.iq

Abstract

The importance of solar and wind energy lies in their being the primary and most abundant source of renewable energy on Earth, providing sustainable environmental and economic solutions to current climate challenges. This research aims to use AHP (Adaptive Hierarchical Analysis) in Geographic Information Systems (GIS) to identify the most suitable spatial locations for solar and wind energy utilization in Thi Qar Governorate. Influential criteria (environmental, economic, and technical) were adopted, including solar radiation, wind speed, land cover and land use, distance from power transmission lines, distance from main roads, distance from urban areas, sand dunes, and slope. This data was processed in ArcMap 10.8 software for use in the AHP process to perform spatial suitability using the Weighted Overlay function. This function allows for the overlaying of several points using a common scale, with each point weighted according to its importance based on expert opinions. The research began by posing the problem of whether cartographic modeling can generate a spatial model that identifies the most suitable location for establishing power stations. This study examines solar and wind energy in the study area using the multi-criteria Analysis Hierarchy Process (AHP), relying on remote sensing (RS) data, geographic information systems (GIS), and other relevant information sources. The research employs an inductive approach, starting with specific details and progressing to general principles. It begins by identifying the necessary criteria for spatial suitability across different regions, considering technical, economic, and environmental factors. This is followed by categorizing the criteria into levels and assigning weights based on relative importance. Finally, these criteria are modeled to generate a unified spatial model illustrating the spatial suitability of solar and wind power plant locations in the study area of Thi Qar Governorate. This process utilizes analytical, modeling, and statistical methods. The study employs analytical, modeling, and statistical techniques. It was found that the entire study area was almost entirely suitable for harvesting solar and wind energy with varying suitability indexes, as it was classified into four categories: the highly suitable category constituted 48.36% for solar power plants and 35.48% for wind power of the total area of the study area, the medium suitability category reached 43.28% for solar energy and 56.1% for wind power, while the very high suitability category, despite its planning importance, represents a relatively limited area, as it came in the form of only 1.93% for solar energy and 1.21% for wind power in this category, of the area of the study area, while the percentage of areas with very low suitability reached 6.43% for solar energy and 7.21% for wind power. It was found that this spatial variation is due to the combined result of the criteria included in the (AHP) model, as the relative weights taken based on expert opinions indicate that the brightness of solar radiation and wind speed are the two most important factors in determining the spatial suitability of solar and wind energy harvesting stations with a relative weight of (23.7%), (27.5%) respectively, followed by land cover and land uses (23.7%) for solar energy and (21.8%) for wind energy, then proximity to power lines (18.0%) for solar energy and (13.2%) for wind energy, transportation (12.5%) for solar energy and (9.9%) for wind energy, urban centers (12.5%) for solar energy and (9.9%) for wind energy, and sand dunes (9.4%) for wind energy, while the slope factor came in last place relatively (9.7%) for solar energy and (8.2%) for wind energy.

Keywords: Spatial fit, Analysis Hierarchy Process (AHP), Pairwise Comparison Matrix, Coherence Ratio.

1- المقدمة

تُعدّ الطاقة الشمسية وطاقة الرياح من أكثر مصادر الطاقة المتجددة الواعدة، إذ زادت كفاءة إنتاج الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في السنوات الأخيرة، كما أن إمكانية استخدامها في مواقع متنوعة تُعدّ ميزةً كبيرة، ويتزايد الطلب على الطاقة الشمسية عالمياً مع سعي الدول لتحقيق التنمية المستدامة وخفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، ونتيجة لتزايد النمو السكاني والصناعي العالمي أدت الحاجة إلى زيادة استخدام مصادر الطاقة، وتشير الأدلة إلى أن الطلب العالمي على الطاقة قد ارتفع بشكل كبير في السنوات الأخيرة، لا سيما من مصادر الطاقة غير المتجددة، وخاصة طاقة الرياح والطاقة الشمسية اللتان أصبحتا محط اهتمام العديد من الدول (Minelli, A., et al. 2014, 70-78).

إن استخدام الوقود الأحفوري غير المتجدد على نطاق عالمي له تأثير سلبي على البيئة، ويؤدي استهلاكه إلى مشاكل عالمية بما في ذلك تدهور البيئة وتغير المناخ، ونظراً للزيادة الكبيرة في استخدام الوقود الأحفوري غير المتجدد وتزايد الاهتمام باستخدام مصادر الطاقة المتجددة تكتسب الطاقة المتجددة أهمية متزايدة، ولكن الوقود الأحفوري يحتاج أيضاً إلى وقت ليتحلل بشكل طبيعي. ومع انخفاض الاحتياطات، ترتفع أسعار الوقود الأحفوري وتُعدّ مصادر الطاقة المتجددة بديلاً جيداً للوقود الأحفوري لأنها غير متجددة، وتُعدّ الطاقة الشمسية وطاقة الرياح أفضل مثال على الطاقة المتجددة حيث تُستخدم الشمس والرياح لتوليد الطاقة دون انبعاث ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي (Nazari, M. A., Aslani, A., and R. 2018, 12-25). العراق من بين حكومات الشرق الأوسط التي تعاني من نقص في الكهرباء، وتواجه سنوياً مشاكل تتعلق بالإنتاج والتوزيع، وهذا يُعدّ موضوعاً بالغ الأهمية إذ تدرس الحكومات والجهات المعنية حالياً لتحديد الموقع الأمثل لمحطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح استناداً إلى بعض المعايير الفنية والاقتصادية والبيئية نظراً لأهميتها (AI (Garni, H. Z. and A. Awasthi. 2018, 57-75).

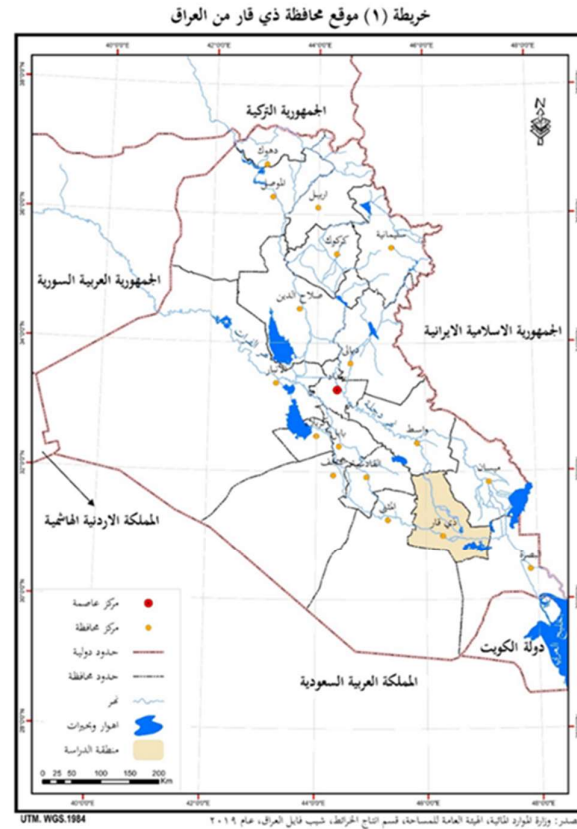
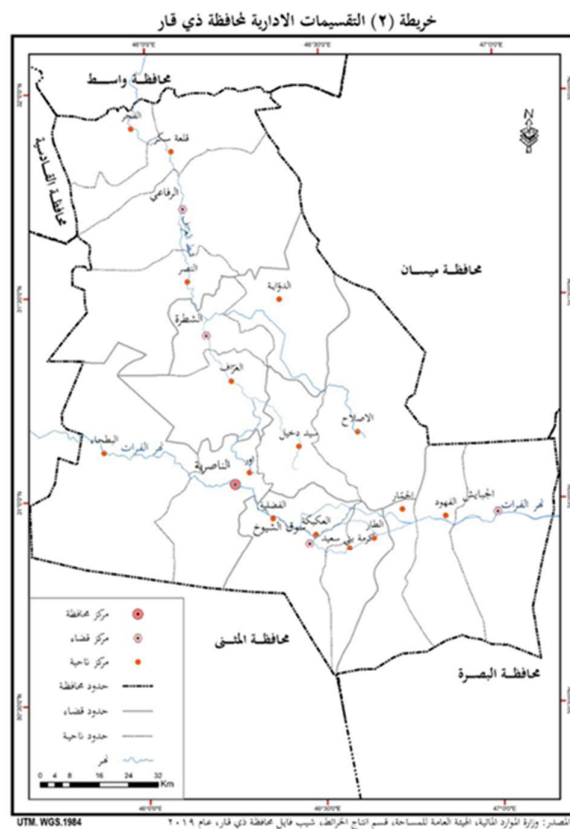
وقد هدف البحث إلى استخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS) بواسطة تحليل ملائمة متعددة المعايير (AHP) لتحديد المواقع المكانية الأنسب لاستغلال الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في محافظة ذي قار، إذ تم الاعتماد تم تحديد ستة معايير للطاقة الشمسية وسبعة معايير لطاقة الرياح، والتي تشمل الإشعاع الشمسي، سرعة الرياح، والمسافة من خطوط نقل الطاقة، والمسافة من الطرق الرئيسية، والمسافة من المنطقة السكنية، والارتفاع، والانحدار، واستخدام الأراضي والكثبان الرملية، وتتمثل مشكلة البحث بمدى إمكانية النمذجة الخرائطية أن تولد نموذجاً مكاني يوضح المكان الأنسب لإنشاء محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في منطقة الدراسة بالاعتماد على عملية التحليل الهرمي (AHP) متعددة المعايير وبالاعتماد على معطيات الاستشعار عن بعد (RS) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) وبعض مصادر المعلومات ذات العلاقة، وتطلق فرضية البحث لتعطي حلاً مقترحاً للتساؤل المنسدل في مشكلة البحث، حيث أنه بالإمكان إنتاج نموذج خرائطي يحدد المناطق الأنسب لإنشاء محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بالاعتماد على طريقة التحليل الهرمي متعدد المعايير (AHP) في ضوء التكامل تقنيات الاستشعار عن بعد (RS) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) وبعض مصادر المعلومات ذات العلاقة بالبحث، بني البحث على المدخل الاستقرائي الذي يبدأ بالجزئيات وينتهي بالكلية ابتداءً بتحديد المعايير اللازمة لعملية الملائمة المكانية للمناطق المختلفة سواء كانت تقنية أو اقتصادية أو بيئية مروراً بتقسيم المعايير إلى درجات مع إعطائها أوزان حسب الأهمية النسبية وانتهاءً بنمذجة تلك المعايير لغرض توليد نموذج مكاني موحد يوضح الملائمة المكانية لمواقع محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في منطقة الدراسة محافظة ذي قار، وقد تم ذلك بالاعتماد على المنهج التحليلي ومنهج النمذجة والأسلوب الإحصائي.

2-المواد والأساليب

1-2- منطقة الدراسة:

تقع منطقة الدراسة "محافظة ذي قار" في جنوبي جمهورية العراق، وتبلغ مساحتها الإجمالية 13463 كم²، منها مساحة اليابسة 11043 كم²، ومساحة الأراضي الرطبة والمياه 2420 كم²، لتشكل نسبة (3,1%) من مساحة العراق الكلية، يحدها من الشمال محافظة واسط، ومن الشرق والشمال الشرقي محافظة ميسان، ومن الجنوب والجنوب الشرقي محافظة البصرة، ومن الغرب والجنوب الغربي محافظة المثنى، ومن الشمال الغربي محافظة القادسية، تقع محافظة ذي قار ضمن نطاق العرض شبه الاستوائي في نصف الكرة الشمالي بين خطي طول (12° 38' 45°) و (38° 10' 47°) شرق خط غرينتش، وبين خطي عرض (33° 33' 30°) و (37° 00' 32°) شمال خط الاستواء، الخرائط (1و2). يتراوح متوسط درجات الحرارة

الشهرية بين (12.96م) في يناير و(38.41م) في يوليو، وكان متوسط سرعة الرياح السنوي حوالي 4.2 متر/ثانية، يمكن تقسيم العراق إلى مناطق مناخية وفقاً لعامل هطول الأمطار، وتقع منطقة الدراسة في المنطقة الجافة، إذ يبلغ مجموع هطول الأمطار السنوي 117.75 ملم، ويحدث معظم هطول الأمطار بين أكتوبر ومايو، وتتصف منطقة الدراسة بنسبة عالية من السطوع الشمسي (6,8 ساعة/يوم)، البيانات المناخية لمحطة الناصرية للمدة 2015_2025.



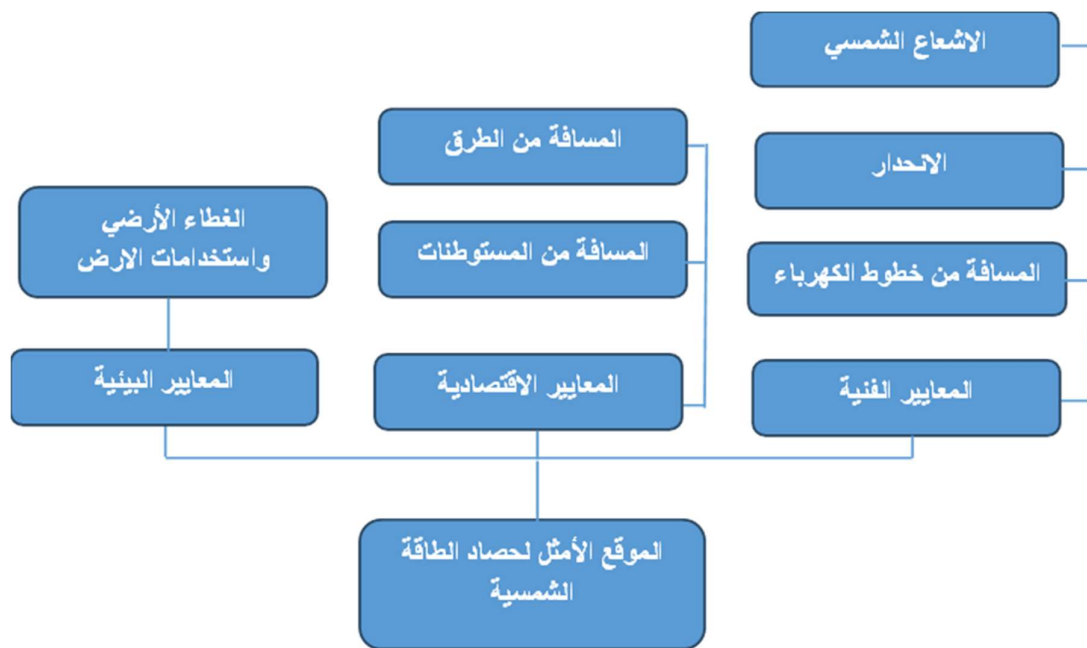
2-2 مصادر البيانات (معايير التقييم)

يستند التحليل الحالي إلى مجموعة متنوعة من المعايير والعناصر المكانية الفعالة التي تؤثر على جدوى محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وقد استخدمت تعليقات الخبراء والدراسات البحثية السابقة لتطوير معايير الدراسة، في هذه الدراسة، صُنفت المعايير والعوامل إلى ثلاث مجموعات: فنية، واقتصادية، وبيئية. تشمل المعايير والعوامل المستخدمة في هذه الدراسة ما يلي:

جدول (1) البيانات المستخدمة في الدراسة

البيانات	نوع البيانات	نوع المعالجة	القيم المستخرجة	المصدر
الإشعاع الشمسي السنوي	شبكة	استيفاء مكاني	قيم رقمية	وزارة النقل، الهيئة العامة للأنواء الجوية والرصد الزلزالي
سرعة الرياح	شبكة	استيفاء مكاني	قيم رقمية	وزارة النقل، الهيئة العامة للأنواء الجوية والرصد الزلزالي
الغطاء الأرضي واستخدامات الارض	شبكة	تصنيف	قيم رقمية	https://earthexplorer.usgs.gov/

الانحدار	شبكة	تحليل الانحدار	قيم رقمية	http://dwtkns.com/srtm30m
الكتبان الرملية	خطية	تحليل المسافة الاقليدية	المسافة عن الكتبان الرملية	التحليل البصري للمرئية الفضائية المستخدمة
المستوطنات	خطية	تحليل المسافة الاقليدية	المسافة عن المستوطنات	وزارة الموارد المائية، الهيئة العامة للمساحة
الطرق	خطية	تحليل المسافة الاقليدية	المسافة عن الطرق	وزارة الموارد المائية، الهيئة العامة للمساحة
خطوط الكهرباء	خطية	تحليل المسافة الاقليدية	المسافة عن خطوط الكهرباء	وزارة الكهرباء، الشركة العامة لنقل الطاقة الكهربائية-الجنوب



شكل (1) معايير تقييم مواقع حصاد الطاقة الشمسية

3-2 طريقة معالجة البيانات وتهيئة الطبقات

بشكل عام، تُدرس معايير اختيار الموقع عادةً في مجموعات، مثل المعايير البيئية، والاقتصادية، والهيكلية، والتقنية، وما إلى ذلك. واستناداً إلى العديد من المراجع ودراسات الحالة المتعلقة بحصاد الطاقة الشمسية، تم اختيار ستة معايير لمعالجتها. ويمكن تقسيم المعايير المستخدمة في حصاد الطاقة الشمسية بشكل عام إلى ثلاث مجموعات: المعايير التقنية (إمكانية الإشعاع الشمسي، وانحدارات التضاريس، والمسافة من خطوط توزيع الطاقة وشبكة التوزيع)؛ والمعايير الاقتصادية (المسافة من الطرق والمدن)، والمعايير البيئية (استخدام الأراضي). ولكل معيار أعيد تصنيفه لتقييم مدى ملاءمته لحصاد الطاقة الشمسية. وقد طبقت استراتيجية ترجيح محددة في معالجة المعايير المستخدمة أثناء إعداد نموذج الملاءمة النهائي شكل (1).

أجرينا جميع تحليلاتنا باستخدام برنامج ArcGIS 10.8 لإجراء تحليل ملاءمة الموقع، بعد التحقق الميداني من مجموعات البيانات، قمنا بتحويلها جميعاً إلى تنسيق نقطي باستخدام أداة المسافة الإقليدية (Euclidean Distance) لتحويل تنسيقات الطبقات إلى تنسيق نقطي وفقاً لمعايير خطوط الكهرباء والطرق والمدن. بعد ذلك، أعيد تصنيف مخرجات الخطوة السابقة إلى خمس فئات رئيسية.

2-3-1 سطوع الاشعاع الشمسي

يُعد الإشعاع الشمسي الواصل الى الأرض المعيار الأول في استغلال الطاقة الشمسية، وهو أحد أهم العوامل في تحديد ما إذا كانت المناطق المختارة ستتلقى ما يكفي من ضوء الشمس على مدار السنة، وتوضح خريطة (3) نتيجة استيفاء سطوع الإشعاع الشمسي في منطقة الدراسة، حيث يُلاحظ أن معدل سطوع الإشعاع الشمسي السنوي يتراوح بين (7.9_8.7) ساعة/يوم، كما تم إعادة تصنيف خريطة سطوع الإشعاع الشمسي الى خمس مستويات بناءً على مقدار تعرضها للشمس لتكون من (7.9 - 8.053 ساعة/يوم) ذات أهمية قليلة، ومن (8.054 - 8.206 ساعة/يوم) مناطق ذات أهمية متوسطة، ومن (8.207 - 8.358 ساعة/يوم) أهمية كبيرة، ومن (8.359 - 8.511 ساعة/يوم) أهمية كبيرة جداً، ومن (8.512 - 8.664 ساعة/يوم) أهمية مطلقة، خريطة (4) جدول (2).

2-3-2 الانحدار

تم تنفيذ عدد من إجراءات المعالجة نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) للحصول على خريطة الانحدار، ويُعد الانحدار أحد أهم الاعتبارات في اختيار مواقع الطاقة الشمسية، حيث وُجد أنه يتراوح بين (0 و 7.64 درجة) (خريطة 5)، ويُلاحظ من خريطة (6) و جدول (2) أن معظم أجزاء منطقة الدراسة تتمتع بدرجات ملائمة جيدة باستثناء بعض أجزاء المنطقتين الغربية والجنوبية، اللتين تتميزان بانحدارات أكبر نسبياً من باقي أجزاء منطقة الدراسة، وقد صُنفت الى خمس مستويات من الأهمية حسب الانحدار لتكون من (0 - 0.270 درجة) ذات أهمية مطلقة، ومن (0.271 - 0.539 درجة) أهمية كبيرة جداً، ومن (0.540 - 0.929 درجة) أخذت أهمية كبيرة، ومن (0.930 - 1.648 درجة) أهمية متوسطة، ومن (1.649 - 7.639 درجة) أهمية قليلة.

2-3-3 الغطاء الأرضي

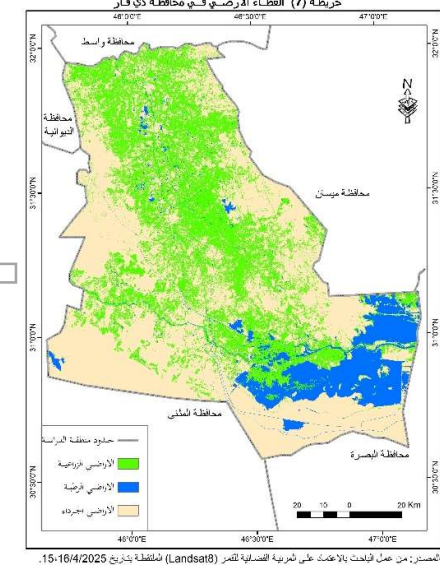
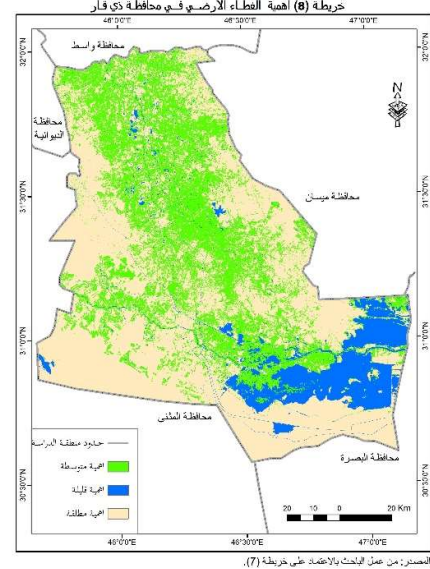
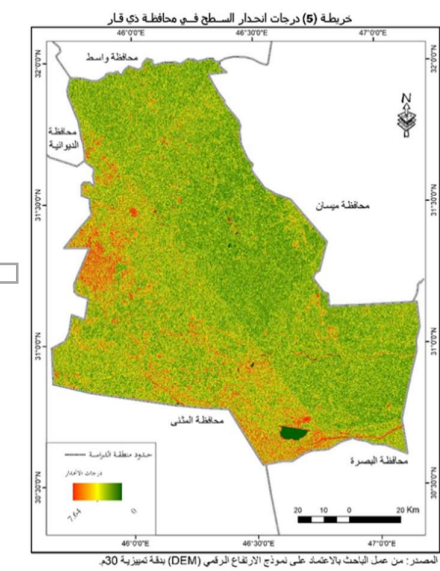
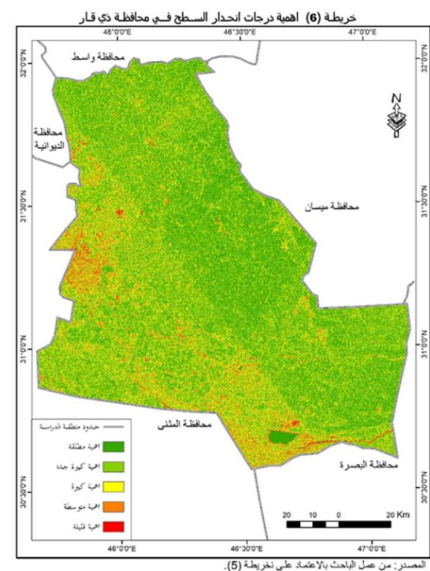
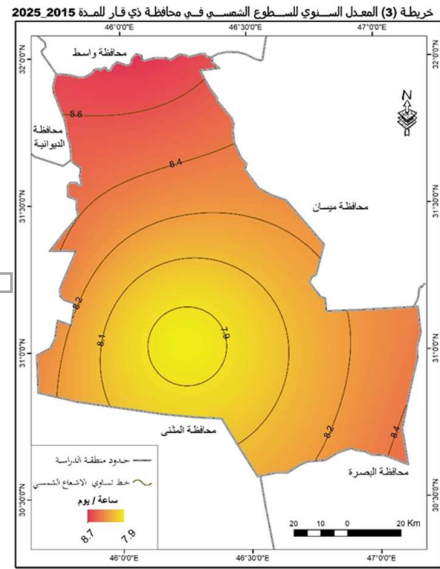
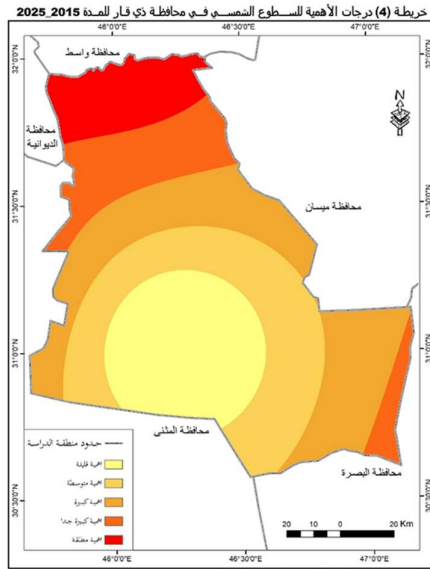
من وجهة نظر بيئية، إحدى القضايا البيئية الرئيسية في اختيار الموقع الملائم هي نوع الغطاء الأرضي، تم تصنيف الغطاء الأرضي لثلاثة أصناف رئيسية: الأراضي الزراعية، الأراضي الرطبة، الأراضي الجرداء، خريطة (7)، واعتُبرت المناطق الجرداء أفضل المناطق بدرجة أهمية مطلقة، والأراضي الرطبة اعتُبرت أراضي متوسطة الأهمية، بينما حظيت المناطق الزراعية بأقل أولوية لاستغلال الطاقة الشمسية لتجميع الطاقة الشمسية بدرجة أهمية قليلة، خريطة (8) جدول (2).

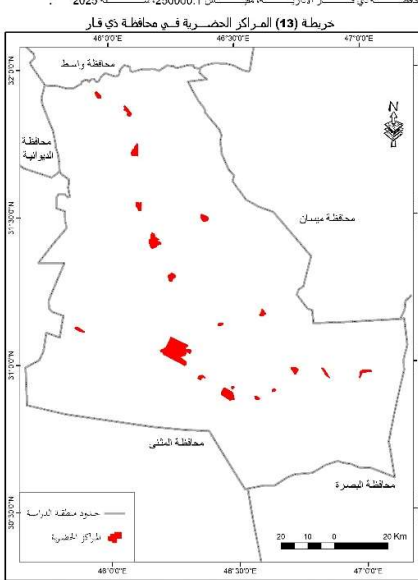
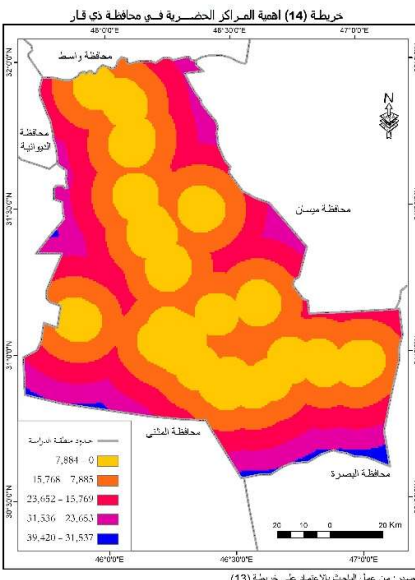
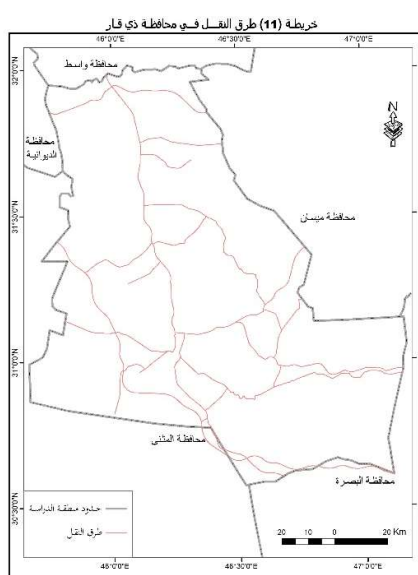
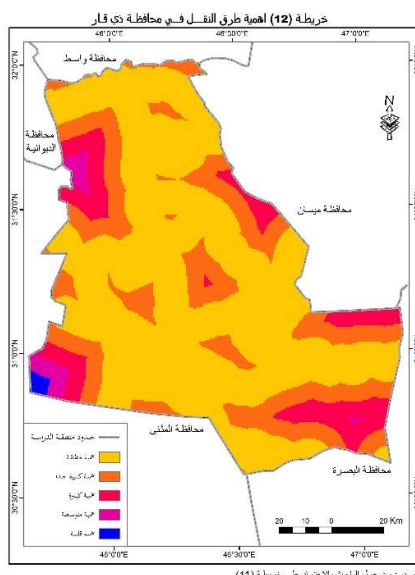
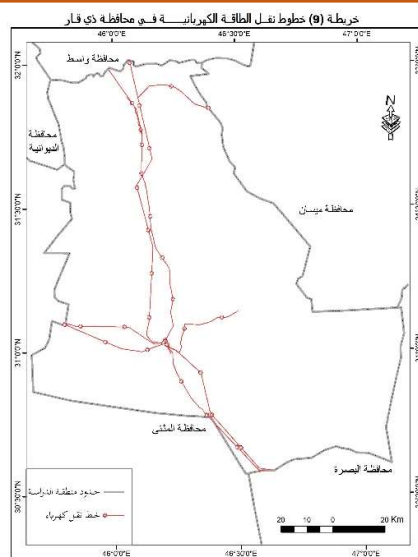
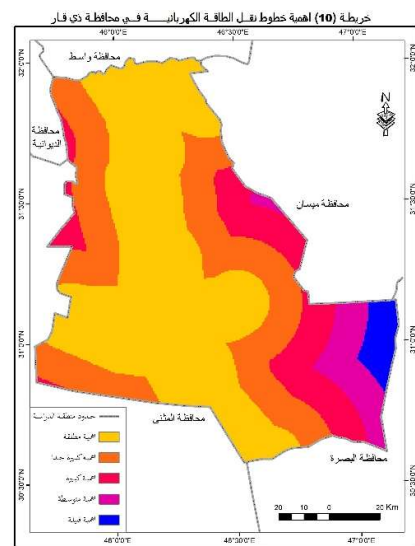
2-3-4 خطوط نقل الطاقة الكهربائية

توضح الخريطة (9) خطوط الطاقة الكهربائية في منطقة الدراسة، وتوضح الخريطة (10) معيار المسافة من شبكة توزيع الكهرباء، حيث يُلاحظ أن المواقع الأنسب هي تلك التي لا تبعد أكثر من (13 كم) عن خطوط توزيع هذه الشبكة، والمناطق التي تقع بين (13_26 كم) جاءت بأهمية كبيرة جداً، واحتلت المناطق التي تقع بين (26_39 كم) أهمية كبيرة، والأهمية المتوسطة من (39_52 كم)، في حين المناطق التي تعتبر غير مناسبة في اختيار المواقع الملائمة لاستغلال الطاقة الشمسية فهي المناطق التي تبعد من (52_65 كم) عن شبكة توزيع الكهرباء في منطقة الدراسة، إذ تعد المسافة من شبكة خطوط الكهرباء عاملاً هاماً، فكلما زادت هذه المسافة، زادت كمية الطاقة المفقودة أثناء عملية النقل، وارتفعت أيضاً تكلفة نقل الطاقة.

2-3-5 المراكز الحضرية وطرق النقل

تُعد المسافة من المدن الرئيسية والطرق من العوامل المهمة أيضاً في اختيار المواقع الأنسب لتجميع الطاقة الشمسية، وتوضح الخريطة (11) ان منطقة الدراسة تتميز بشبكة طرق تغطي اغلب مساحة منطقة الدراسة وترتبطها مع بعض ومع المناطق المجاورة، وترجع أهمية الطرق في إقامة محطات الطاقة الشمسية في سهولة الوصول الى المحطات لنقل المعدات الميكانيكية والهندسية الخاصة بالمحطة والعاملين فيها، وتم تحديد المسافة من شبكة الطرق في خريطة (12) التي توضح ان المسافة التي تقل عن (6.403 كم) هي المسافة الأمثل التي تحظى بأهمية مطلقة لإقامة المحطات. وتشكل المراكز الحضرية عائقاً امام انشاء مشاريع الطاقة الكهربائية التي تحتاج الى مساحات كبيرة حيث يمكن ان تواجه مشاكل في تملك الأرض التي تكون مملوكة للأفراد وأيضاً هذه الأرض تكون بالعادة مستغلة من قبل السكان في مشاريع عدة (الحسيني وآخرون، 2025)، وتوضح خريطة (13) التوزيع المكاني للمراكز الحضرية الرئيسية في منطقة الدراسة، وتبين خريطة (14) و جدول (2) أهمية هذه المراكز بالنسبة لتحديد المناطق الأنسب للاستثمار في توليد الطاقة الكهربائية من طاقة الشمس، إذ تبين ان المناطق الأنسب هي المناطق التي تبعد بين (31.537 - 39.420 كم) عن المراكز الحضرية الرئيسية في منطقة الدراسة.





المعيار	وحدة القياس	الفئة	الاهمية	درجة الملائمة
سطوع الاشعاع الشمسي	ساعة / يوم	7.9 - 8.053	قليلة	1
		8.054 - 8.206	متوسطة	2
		8.207 - 8.358	كبيرة	3
		8.359 - 8.511	كبيرة جدا	4
		8.512 - 8.664	مطلقة	5
انحدار السطح	درجة الانحدار	0 - 0.270	مطلقة	5
		0.271 - 0.539	كبيرة جدا	4
		0.540 - 0.929	كبيرة	3
		0.930 - 1.648	متوسطة	2
		1.649 - 7.639	قليلة	1
الغطاء الارضي	الاصناف	الأراضي الزراعية	قليلة	1
		الأراضي الرطبة	متوسطة	2
		الأراضي الجرداء	مطلقة	5
خطوط نقل الطاقة الكهربائية	متر	0 - 13,051	مطلقة	5
		13,052 - 26,103	كبيرة جدا	4
		26,104 - 39,154	كبيرة	3
		39,155 - 52,206	متوسطة	2
		52,207 - 65,257	قليلة	1
طرق النقل	متر	0 - 6,403	مطلقة	5
		6,404 - 12,806	كبيرة جدا	4
		12,807 - 19,209	كبيرة	3
		19,210 - 25,612	متوسطة	2
		25,613 - 32,015	قليلة	1
المناطق الحضرية	متر	0 - 7,884	قليلة	1
		7,885 - 15,768	متوسطة	2
		15,769 - 23,652	كبيرة	3
		23,653 - 31,536	كبيرة جدا	4
		31,537 - 39,420	مطلقة	5

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على الخرائط (3_14).

جدول (2) المعيار ووحدة القياس والفئة والاهمية ودرجاتها للتبقيات الداخلة في تحديد الملائمة المكانية لمحطات الطاقة الشمسية في منطقة الدراسة

4-2 عملية التسلسل الهرمي التحليلي (AHP)

تعتمد عمليات التحليل الهرمية لنمذجة المعايير على تحديد التسلسل الهرمي للمشكلات وتقييم العناصر على المستويات الهرمية حتى يتم تحديد عوامل الوزن لجميع العناصر في النموذج النهائي (Iva and Mateo, 2019)، وهي أداة لحل مشاكل صنع القرار في تخطيط الطاقة للوصول الى تنمية حقيقية في اختيار الموقع الأنسب باستخدام هيكل هرمي متعدد المعايير بالتكامل التقني مع نظم المعلومات الجغرافية. ويتطلب تطبيق هذا الأسلوب العلمي مجموعة من الخطوات الأساسية:

1-4-2 تحديد الهدف من بناء المعيار: ان الهدف الأساسي من بناء المعايير هو المساعدة على اتخاذ قرار دقيق مبني على مجموعة متنوعة من المعايير المؤثرة في اختيار انسب المواقع من حيث الأهمية لإنتاج خريطة الملائمة المكانية لمواقع محطات الطاقة الشمسية في منطقة الدراسة، وذلك من خلال الابتعاد عن الحكم الشخصي حول تحديد الأهمية النسبية للمعايير الداخلة في بناء الانموذج الخرائطي.

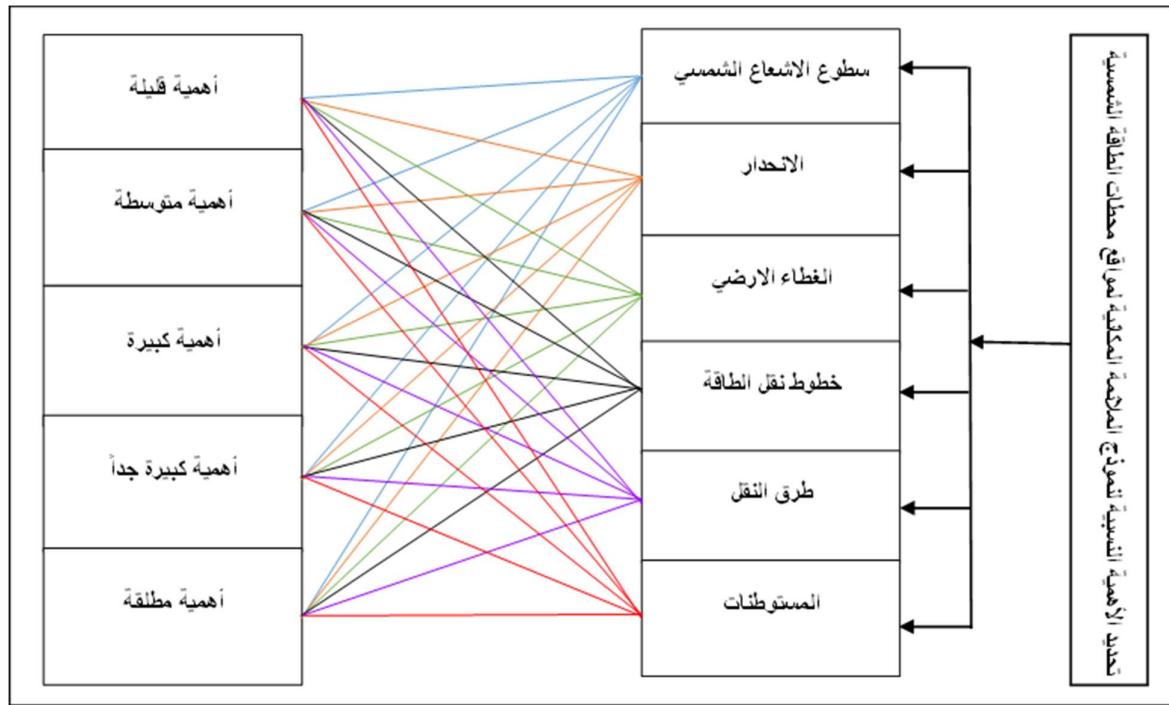
2-4-2 تجهيز المعايير: تعتبر هذه العملية هي عملية معالجة البيانات والتي هي عبارة عن المعايير التي تم تحديدها بالتشاور مع السادة الخبراء والمتخصصين، على شكل نماذج خرائطية يتم تقييمها جميعا بمقياس نسبي، وهو ما تم العمل عليه سابقا ضمن موضوع معالجة البيانات وتهيئة الطبقات.

3-4-2 تحديد البدائل: يعتمد تنفيذ AHP على ثلاث مستويات مترابطة: (1) تحديد المشكلة كتسلسل هرمي للأهداف والمعايير والبدائل (2) تنفيذ مصفوفة تفصيلية لاتخاذ القرار للمعايير والبدائل في كل مستوى من مستويات التسلسل الهرمي (تجميع احكام الخبراء في مصفوفة مقارنة زوجية) (3) تحديد اوزان العوامل وتحليل النتائج (Tafula., et al., 2023, 8)، تم تحديد البدائل وفق المقياس الذي وضعه (Thomas L.Saaty) باعتماد أسلوب تحليل القرار متعدد المعايير (MCDM) Multi-Criteria Decision Making الذي يتضمن العلاقة بين مجموعة من المعايير مع مجموعة من البدائل في شكل هرمي، وهنا يكون لكل معيار داخل في بناء الانموذج الخرائطي (سطوح الاشعاع الشمسي، الانحدار، الغطاء الأرضي، المسافة من الطرق والمستوطنات، المسافة من خطوط نقل الطاقة) له مجموعة من البدائل القابلة للمقارنة الزوجية بينه وبين المعايير الأخرى، وتقاس هذه البدائل بالمقياس الذي وضعه العالم (Saaty) والذي يتراوح بين (1_9) يتم من خلاله تحديد درجة الأفضلية او الأهمية النسبية لكل معيار مقارنة بالمعايير الأخرى، إذ تعكس القيم مستويات متفاوتة من الأهمية بداءً من أهمية قليلة (1) وصولاً الى أهمية مطلقة (9) (Saaty, 2008, 85) وبناءً على ذلك تم تحديد خمس بدائل من المقياس المذكور لكل معيار من المعايير المذكورة الداخلة في بناء الانموذج الخرائطي لتحديد الملائمة المكانية لمواقع محطات الطاقة الشمسية، جدول (3)، الشكل (2)

4-4-2 وزن معايير النموذج المقترح: يعتمد AHP على تحديد التسلسل الهرمي للمشكلات وتقييم المعايير على المستويات الهرمية ليتم تحديد اوزان جميع المعايير في المطابقة الخرائطية النهائية، وهذه الطريقة تعد من انجح الطرق للتعامل مع القرارات في تحديد الملائمة المكانية، والتي يتم تنفيذها باستخدام منصات وبرمجيات اتخاذ القرار المختصة (MCDM)، والتي تعتبر فيها (AHP) أداة فعالة تتميز بالمرونة للوصول الى الترتيب النهائي والذي يعتمد على التقييمات المزدوجة لكل معيار من المعايير التي يوفرها المستخدمون حيث يتم إعطاء اوزان لجميع المعايير وتزداد أهمية كل معيار بزيادة وزنه ثم تجمع الاوزان لتحديد النتيجة والترتيب النهائي (khazil., 2021, 49-50)، وتتضمن هذه العملية ثلاثة مراحل رئيسة هي اعداد استمارة استبيان لاستبانة المحكمين حول أهمية كل معيار، وبناء مصفوفة المقارنة الزوجية للبدائل، واخيراً قياس مستوى ثبات احكام المحكمين.

درجة الأهمية	البدائل	درجة الأهمية	البدائل
1	أهمية قليلة	7	أهمية كبيرة جداً
3	أهمية متوسطة	9	أهمية مطلقة
5	أهمية كبيرة	الدرجات 2,4,6,8	درجات بينية بين الاحكام

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على (Saaty, 2008)
جدول (3) مقياس المقارنة الترتيبي الذي جاء به العالم (Saaty) للأهمية بطريقة (AHP)



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول (3)

شكل (2) الهيكل الهرمي للمعايير الداخلية في عملية الملائمة المكانية لمواقع محطات الطاقة الشمسية في منطقة الدراسة وفق طريقة (AHP)

2-4-4-1 استمارة الاستبيان: تم اعداد الاستبانة (ملحق 1) عبر الانترنت نماذج (Google Forms) لتقييم وتحديد أهمية المعايير المستخدمة في اختيار مواقع الملائمة المكانية لمزارع الطاقة الشمسية في منطقة الدراسة من خلال اختيار البدائل المناسبة لكل معيار، تم تقديم الاستطلاع الى عينة قصدية مكونة من (25) خبير ممن لديهم الخبرة في مجال الطاقة الشمسية ونظم المعلومات الجغرافية ممن يحملون شهادة الدكتوراه وبلقب علمي أستاذ، وطلب منهم اختيار البدائل المناسبة للمعايير المشار اليها في الاستمارة إذ تستخدم طريقة AHP للمقارنة الزوجية بين معايير متعددة لإنشاء المصفوفة يمثل كل مقياس في مصفوفة المقارنة، وجاءت النتائج متمثلة فيما يخص تحديد المعايير الأكثر تأثير على تحديد مناطق الملائمة المكانية لمزارع الطاقة الشمسية، إذ يتبين من جدول (4) ان 16 خبير اتفقوا على ان سطوع الاشعاع الشمسي له الأهمية الكبيرة جداً في تحديد مواقع الملائمة المكانية، و12 منهم اختار خطوط الطاقة الكهربائية على انها لها الدور الكبير جدا في تحديد هذه المواقع، في حين 10 من الخبراء المستبنيين اعطوا صوتهم على ان المراكز الحضرية لها أهمية كبيرة في تحديد المواقع الأنسب في الملائمة المكانية، بينما 9 من الخبراء كان رأيهم ان للغطاء الأرضي واستخدامات الأرض أهمية كبيرة في توجيه الملائمة المكانية لحصاد الطاقة الشمسية، وأخيرا كان لمعيار طرق النقل أهمية كبيرة بحسب رأي 8 من السادة الخبراء. ولحساب المتوسط الموزون لاستجابات العينة على قيمة الأهمية تم استخدام المعادلة الآتية (العنبي والطائي، 2012، 93):

$$x^- = \frac{\sum X_i W_i}{\sum W_i}$$

حيث ان: x^- المتوسط الموزون لاستجابات العينة على قيمة الأهمية، X_i عدد الإجابات الخاصة بالمعيار، W_i قيمة البديل، $\sum W_i$ حجم العينة.

جدول (4) نتائج الاستبيان حول أهمية المعايير الداخلة في تحديد مناطق الملائمة المكانية لمزارع الطاقة الشمسية

مقياس الأهمية	قيمة AHP	سطوع الاشعاع الشمسي	الانحدار	الغطاء الأرضي	خطوط الطاقة	طرق النقل	المستوطنات البشرية
قليلة	1	0	5	0	0	2	2
متوسطة	3	1	7	3	3	5	4
كبيرة	5	4	8	6	7	8	10
كبيرة جدا	7	16	5	9	12	7	8
مطلقة	9	4	0	7	3	3	1
المجموع	25	25	25	25	25	25	25
المتوسط الموزون لاستجابات العينة على قيمة الأهمية	6.84	4.04	6.60	6.20	5.32	5.16	

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول (3) واستمارة الاستبيان (ملحق 1).

ولابد من تعديل المتوسط الموزون لاستجابات العينة مقسوم على قيمة الأهمية النسبية لكل معيار بهدف اعداد مصفوفة المقارنة الزوجية، والهدف من استخدام المتوسط الموزون هو ادخال جميع البدائل التي حصلنا عليها بدلالة قيمة البديل المعدة وفق مقياس (AHP)، وتضمنت عملية التعديل تصحيح او تقريب القيم الحقيقية للمتوسط الموزون لاستجابات العينة على قيمة الأهمية الى أقرب قيمة صحيحة من مقياس (AHP)، وذلك لتسهيل عملية المقارنة الزوجية في المصفوفة (القصاب، 2021، 192) جدول (5).

جدول (5) تقريب المتوسط الموزون لاستجابات الخبراء الى أقرب قيمة في (AHP)

ت	المعيار	المتوسط الموزون	التصحيح الى مقياس AHP
1	سطوع الاشعاع الشمسي	6.84	7
2	الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض	6.60	7
3	خطوط نقل الطاقة الكهربائية	6.20	6
4	خطوط النقل	5.32	5
5	المراكز الحضرية	5.16	5
6	درجة الانحدار	4.04	4

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول (4).

2-4-4-2 أعداد مصفوفة المقارنة الزوجية: في هذه المرحلة تتحول الاحكام التي أطلقها الخبراء الى اوزان ثم بنيت مصفوفة زوجية مشتقة من الاوزان تستخدم في عملية الجبر الخرائطي من خلال اجراء مقارنة والتي هي عبارة عن الفرق بين معيارين بدلالة بديليهما، ولأجراء هذه المقارنات تم الاعتماد على (AHP Online System – AHP-OS) على الرابط: (<https://bpmmsg.com/ahp>)

AHP نموذج رياضي طوره في الأصل البروفيسور توماس ل. ساعاتي. تستخلص AHP مقاييس نسبية من المقارنات الثنائية للمعايير، وتسمح ببعض التباينات الطفيفة في الأحكام. يمكن أن تكون المدخلات قياسات فعلية، أو آراء شخصية. ونتيجة لذلك، يتم حساب الأولويات (الأوزان) ونسبة الاتساق. تُستخدم AHP دوليًا على نطاق واسع من التطبيقات، على سبيل المثال لتقييم الموردين، وإدارة المشاريع، وعملية التوظيف، أو تقييم أداء الشركة، تعتمد هذه الطريقة رياضياً لحل مسألة القيم الذاتية، ترتب نتائج المقارنات الثنائية في مصفوفة، يُعطي متجه القيمة الذاتية الأيمن المتغير الأول (المهيمن) في المصفوفة مقياس النسبة (الترجيح)، بينما تُحدد القيمة الذاتية نسبة الاتساق (Goepel, 2018, 469). شكل (3) و (4).

A - wrt AHP priorities - or B?		Equal	How much more?
1	سقوط الاشعاع الشمسي	☒ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
2	سقوط الاشعاع الشمسي	☐ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
3	سقوط الاشعاع الشمسي	☐ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
4	سقوط الاشعاع الشمسي	☐ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
5	سقوط الاشعاع الشمسي	☐ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
6	الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض	☒ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
7	الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض	☐ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
8	الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض	☐ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
9	الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض	☐ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
10	خطوط نقل الطاقة الكهربائية	☒ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
11	خطوط نقل الطاقة الكهربائية	☐ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
12	خطوط نقل الطاقة الكهربائية	☐ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
13	خطوط النقل	☒ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
14	خطوط النقل	☐ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
15	المراكز الحضرية	☒ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9
	درجة الانحدار	☐ 1	0 2 3 4 5 6 7 8 9

CR = 1.7% OK

AHP Scale: 1- Equal importance, 3- Moderate importance, 5- Strong importance, 7- Very strong importance, 9- Extreme importance (2,4,6,8 values in-between).

شكل (4) مصفوفة المقارنة الزوجية لمعايير عملية الملائمة المكانية

AHP Criteria Names

Please fill out

AHP priorities

Name of Criteria

1 سقوط الاشعاع الشمسي

2 الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض

3 خطوط نقل الطاقة الكهربائية

4 خطوط النقل

5 المراكز الحضرية

6 درجة الانحدار

max. 45 character ea.

شكل (3) معايير بناء المصفوفة في AHP-OS

Priorities

These are the resulting weights for the criteria based on your pairwise comparisons:

Cat	Priority	Rank	(+)	(-)
1 سقوط الاشعاع الشمسي	23.7%	1	3.6%	3.6%
2 الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض	23.7%	1	3.6%	3.6%
3 خطوط نقل الطاقة الكهربائية	18.0%	3	4.9%	4.9%
4 خطوط النقل	12.5%	4	2.7%	2.7%
5 المراكز الحضرية	12.5%	4	2.7%	2.7%
6 درجة الانحدار	9.7%	6	2.1%	2.1%

Number of comparisons = 15
Consistency Ratio CR = 1.7%

Decision Matrix

The resulting weights are based on the principal eigenvector of the decision matrix:

	1	2	3	4	5	6
1	1	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00
2	1.00	1	1.00	2.00	2.00	3.00
3	1.00	1.00	1	1.00	1.00	2.00
4	0.50	0.50	1.00	1	1.00	1.00
5	0.50	0.50	1.00	1.00	1	1.00
6	0.33	0.33	0.50	1.00	1.00	1

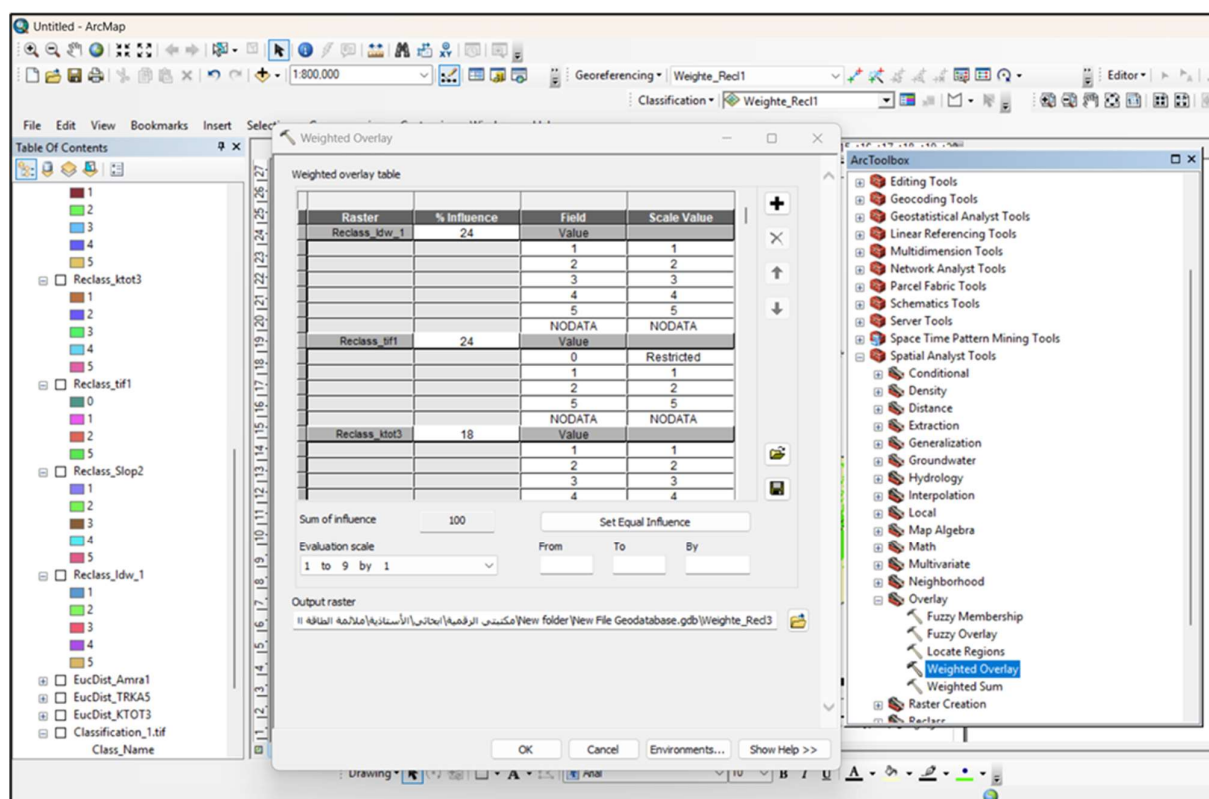
Principal eigen value = 6.109
Eigenvector solution: 4 iterations, delta = 1.9E-8

شكل (5) مصفوفة المقارنة الزوجية والاهمية النسبية للمعايير

2-4-3 نسبة التناسق: وضع Thomas L. Saaty معياراً لنسبة التناسق قيمته 10% (0.1) لتقييم ثبات الأحكام في مصفوفة المقارنة الزوجية، أي ان الاحكام التي قيمتها اقل من 10% هي الاحكام التي تقترب قيمها من الثبات وبعيدة عن التناقض، وفي المقابل الاحكام التي تزيد عن 10% فإنها متناقضة ويفترض رفضها واعادتها من جديد في مرحلة الاستبيان من خلال إحلال محكمين آخرين والأخذ برأيهم (Wind and Saaty, 1980). يتبين من شكل (5) ان نسبة تناسق الاحكام في مصفوفة المقارنة الزوجية (CR) بلغت (1.7%) وهي قيمة جيدة جداً ومتوافقة مع حدود التحليل الهرمي AHP.

2-5 جبر الخرائط وبناء نموذج الملائمة المكانية

طور عالم الرياضيات Boole المنطق البولوني Boolean Logic عام 1854 الذي يستند اليه جبر الخرائط للتعامل مع التعبيرات الرياضية (not or and or) هذه التعبيرات الأساسية لها نتائج ثنائية حتمية تتمثل بـ (0) الذي يعني عدم تحقق شروط التعبير الرياضي وتسمى (False Valued) والـ (1) الذي يعني تحقق شروط التعبير الرياضي ويسمى (Truth Valued) (الجلبي، 2023، 142)، ويعرف جبر الخرائط بأنه مجموعة من العمليات الرياضية لغرض معالجة البيانات الشبكية المكانية. البيانات المستخدمة في أداة الجبر الخرائطي Map Algebra هي البيانات الشبكية للمعايير المعتمدة في الملائمة المكانية لمزارع الطاقة الشمسية في منطقة الدراسة، بعد إعادة تصنيفها من خلال الأداة (Reclassify) الى مقياس مشترك ويتم انشاء طبقات نقطية بضرب القيمة الملائمة لكل خلية نقطية بوزن طبقته ومجموع القيم يطبق تحليل التراكب الموزون لتقدير المقياس المشترك على طبقات مختلفة لإنتاج نتيجة نهائية كطبقة مخرجات (الطائي والسبعواوي، 2025، 317). تعتبر هذه المرحلة هي المرحلة الأخيرة من مراحل تصميم نموذج كارتوگرافي (خريطة الملائمة المكانية لمزارع الطاقة الشمسية في منطقة الدراسة) والتي سوف يتم فيها الاعتماد على الاوزان النسبية للعوامل المؤثرة في النموذج، والتي تم الحصول عليها من نتائج التحليل الهرمي AHP وذلك للقيام بعملية الملائمة المكانية باستخدام دالة التظايق الموزون (Weighted Overlay) تسمح هذه الدالة بتراكب عدة نقاط باستخدام مقياس مشترك، وترجيح كل نقطة وفقاً لأهميتها. شكل (6).

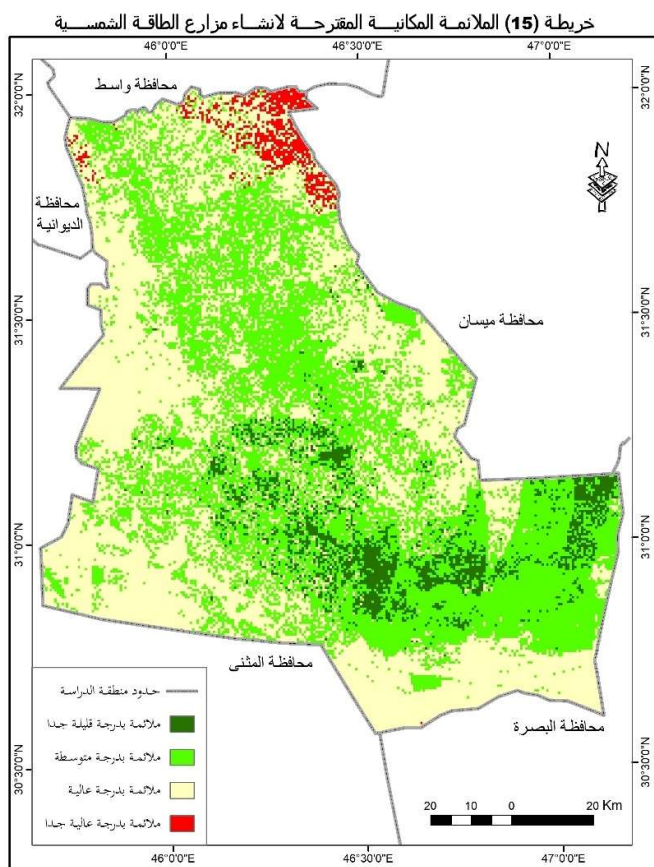


شكل (16) عملية التظايق الموزون (Weighted Overlay) للمعايير او العوامل المؤثرة في الملائمة المكانية

3- تقييم درجة الملائمة المكانية لمحطات الطاقة الشمسية

يتضح من خريطة (15) وجدول (6) وجود تباين مكاني واضح في درجات الملاءمة داخل منطقة الدراسة، إذ صنفّت المنطقة الى اربع فئات: فئة الملائمة بدرجة عالية تستحوذ على أكبر مساحة في منطقة الدراسة، إذ بلغت 6511.39 كم²، ونسبة 48.36% من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وتأتي بعدها فئة الملاءمة المتوسطة بمساحة 5826.47 كم² ونسبة 43.28%، أما فئة الملاءمة العالية جداً، وعلى الرغم من أهميتها التخطيطية، فإنها تمثل مساحة محدودة نسبياً بلغت 260.34 كم² فقط، أي 1.93% من مساحة منطقة الدراسة، في حين بلغت مساحة المناطق ذات الملاءمة القليلة جداً 865.13 كم²، ونسبة 6.43%. وإذا جمعت فئتا الملاءمة العالية والعالية جداً، فإن المساحة المناسبة بدرجة مرتفعة لإنشاء مزارع الطاقة الشمسية تبلغ 6771.73 كم² وهذا يعني أن أكثر من نصف منطقة الدراسة (50.29%) تقع ضمن فئتي الملاءمة العالية والعالية جداً، وهي تتركز بصورة أكبر في الأجزاء الشرقية والشمالية الشرقية والأجزاء الغربية والجنوبية من منطقة الدراسة، يقابلها 6691.60 كم² مساحة فئتي الملائمة المتوسطة والقليلة جداً ونسبة (49.71%) اللتان تظهران بصورة أوضح في الأجزاء الوسطى والجنوبية الشرقية والوسطى الشمالية من منطقة الدراسة.

يعكس هذا التباين المكاني النتيجة المشتركة للمعايير الداخلة في نموذج (AHP)، إذ تشير الأوزان النسبية شكل (5) الى ان سطوع الاشعاع الشمسي يمثل العامل الأكثر أهمية في تحديد الملائمة المكانية بوزن نسبي بلغ (23.7%)، يليه الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض (23.7%) ثم القرب من خطوط الطاقة الكهربائية (18.0%) والنقل (12.5%) والمراكز الحضرية (12.5%) في حين جاء عامل الانحدار بالمرتبة الأخيرة نسبياً (9.7%)، وتشير هذه النتائج الى ان التوزيع المكاني للملائمة النهائية خريطة (15) تمثل نتاجاً متكاملًا لتأثير هذه المعايير وأوزانها النسبية، وليس تأثير عامل منفرد، مما يعزز أهمية توظيف AHP مع GIS في تحديد المواقع المثلى لمشاريع حصاد الطاقة الشمسية.



المصدر: من عمل الباحث بالأبعاد على الخرائط (4, 6, 8, 10, 12, 14) وبرامج Arc Map10.8_Weighted Overlay

جدول (6) المساحة والنسبة المئوية لأصناف الملائمة المكانية

أصناف الملائمة المكانية	المساحة كم ²	النسبة المئوية %
ملائمة بدرجة قليلة جداً	865.13	6.43
ملائمة بدرجة متوسطة	5826.47	43.28
ملائمة بدرجة عالية	6511.39	48.36
ملائمة بدرجة عالية جداً	260.34	1.93
المجموع	13463.32	100

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على خريطة (15).

4- الرياح وإنتاج الطاقة المتجددة

الرياح من الإمكانيات الطبيعية المهمة التي تتمتع بها منطقة الدراسة، والتي يمكن استغلال طاقة الرياح في توليد الطاقة الكهربائية بكميات كبيرة جداً، ويمكن حساب الطاقة الكهربائية التي يمكن الحصول عليها من طاقة الرياح من العلاقة الرياضية (Verma., et al, 2015):

$$P = 0.5 * D * V^3 * Cp$$

حيث ان: (P) قدرة التوربين الكهربائية، (D) وحدة حجم كثافة الهواء وتساوي (1.23 كغم/م³)، (A) مساحة الدائرة التي تولدها التوربينات عند دورانها، (V) سرعة الرياح عند الارتفاع المطلوب (50 متر)، (Cp) ثابت Betz يحسب (0.4) لتحقيق أقصى استفادة من طاقة التوربينات.

وباستخدام أسلوب الملائمة المكانية متعددة المعايير (AHP) تم عمل خريطة لأنسب المواقع لإنشاء محطات الطاقة الكهربائية من طاقة الرياح بالاعتماد على عدة معايير وهي كالآتي:

1-4 سرعة الرياح

تعتبر سرعة الرياح من أهم العوامل المؤثر في اختيار المكان الأنسب لإنشاء محطات طاقة الرياح لإنتاج الطاقة الكهربائية، إذ ان سرعة الرياح هي التي تتحكم في دوران التوربينات التي تولد الطاقة الكهربائية بالاعتماد على طاقة الرياح، وبزيادة سرعة الرياح هذا يعني زيادة إنتاج الطاقة.

2-4 البعد عن الكثبان الرملية

تؤثر الكثبان الرملية على محطات طاقة الرياح من خلال تراكم الرمال على ريش التوربينات وبالتالي انخفاض كفاءتها في توليد الطاقة الكهربائية، بالإضافة وبسبب الرمال التي تتراكم على الأجزاء الداخلية للتوربينات مما يتطلب صيانة وتنظيم مستمرين (عبد الموجود، 2016، 47).

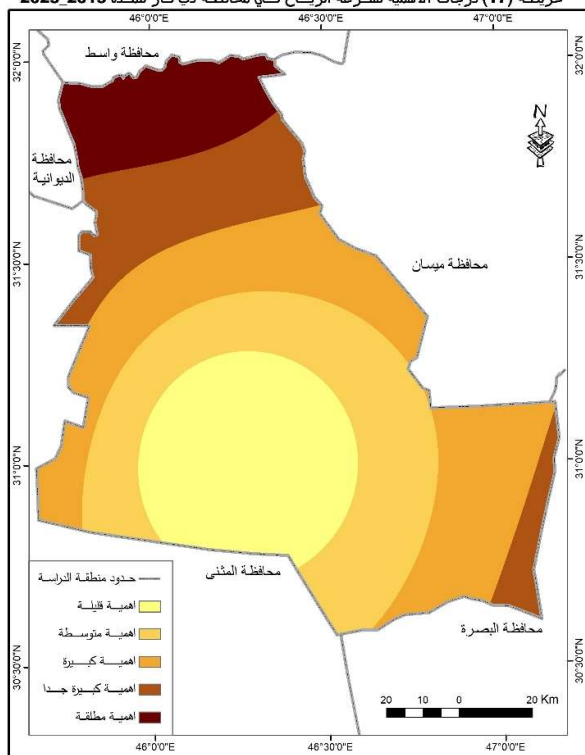
بالإضافة الى عوامل القرب من شبكة نقل الطاقة والقرب من طرق النقل والمسافة من المناطق الحضرية، والغطاء الأرضي واستخدامات الأرض إذ تعتبر مناطق الاوار مناطق نشاط سياحي بالإضافة الى كونها محطة ومسار للطيور المهاجرة التي من الممكن ان تصطدم بريش التوربينات مما يؤدي الى هلاكها.

مقياس الأهمية	قيمة AHP	سرعة الرياح	الانحدار	الغطاء الأرضي	خطوط الطاقة	طرق النقل	المستوطنات البشرية	الكثبان الرملية
قليلة	1	0	5	0	0	2	2	3
متوسطة	3	0	7	3	3	5	4	7
كبيرة	5	3	8	6	7	8	10	8
كبيرة جداً	7	12	5	9	12	7	8	5
مطلقة	9	10	0	7	3	3	1	2
المجموع		25	25	25	25	25	25	25
المتوسط الموزون لاستجابات العينة على قيمة الأهمية		7.56	4.04	6.60	6.20	5.32	5.16	4.68

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على جدول (3) واستمارة الاستبيان (ملحق 1).

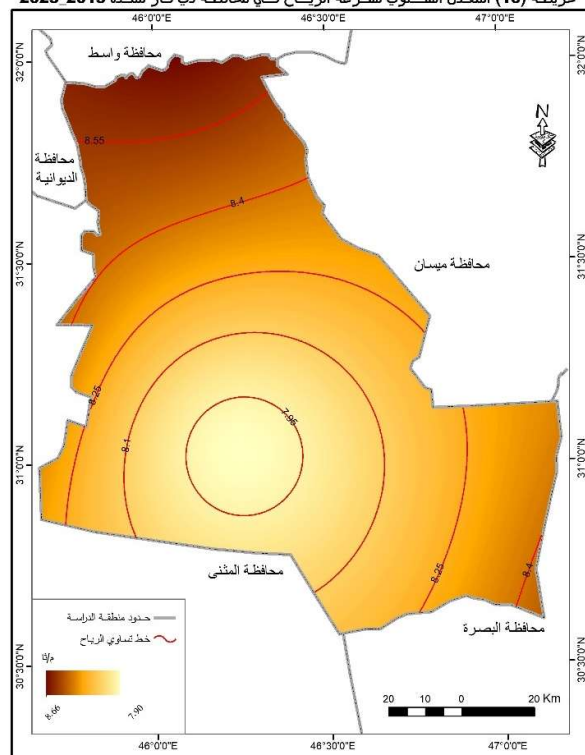
جدول (4) نتائج الاستبيان حول أهمية المعايير الداخلة في تحديد مناطق الملائمة المكانية لمحطات طاقة الرياح

خريطة (17) درجات الاهمية لسرعة الرياح في محافظة ذي قار للمدة 2015-2025



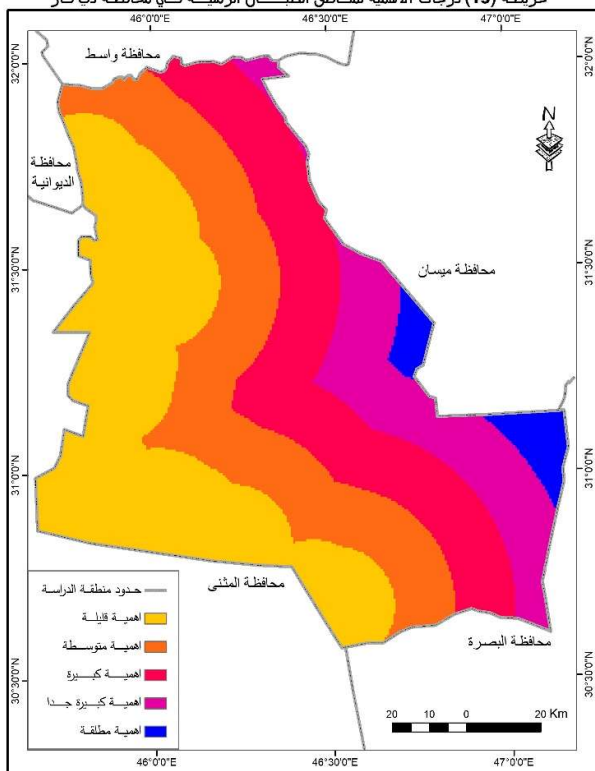
المصدر: من عمل الباحث بالأعداد على خريطة (16).

خريطة (16) المعدل السنوي لسرعة الرياح في محافظة ذي قار للمدة 2015-2025



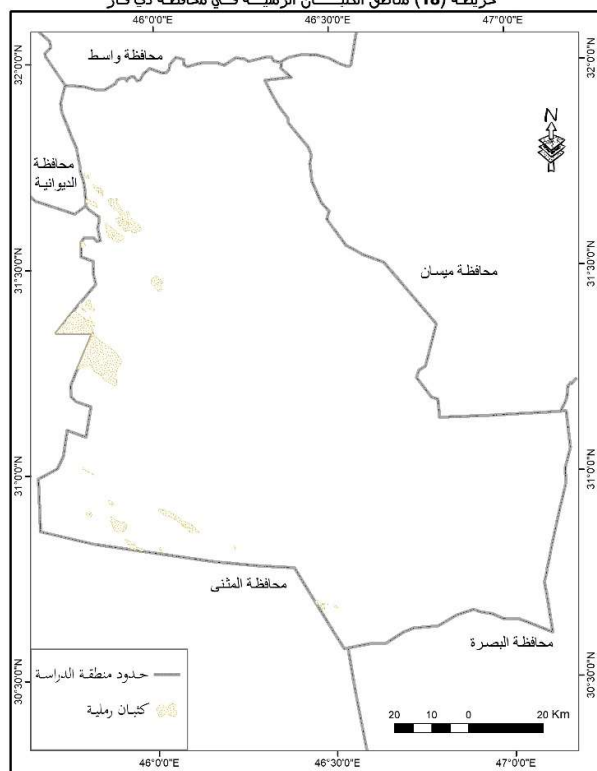
المصدر: من عمل الباحث بالأعداد على الهيئة العامة للأرصاد الجوية، بيانات غير منشورة، 2025.

خريطة (19) درجات الاهمية لمناطق الكثبان الرملية في محافظة ذي قار



المصدر: من عمل الباحث بالأعداد على خريطة (18).

خريطة (18) مناطق الكثبان الرملية في محافظة ذي قار



المصدر: من عمل الباحث بالأعداد على التفسير البصري للارتبة الفضائية المستخدمة في الدراسة Landsat8.

A - wrt AHP priorities - or B?		Equal	How much more?
1	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
2	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
3	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
4	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
5	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
6	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
7	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
8	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
9	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
10	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
11	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
12	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
13	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
14	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
15	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
16	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
17	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
18	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
19	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
20	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9
21	سرعة الرياح	○	1 2 3 4 5 6 7 8 9

CR = 1.6% OK

Calculate Download (.csv) dec comma

AHP Criteria Names

Please fill out

AHP priorities

Name of Criteria

1 سرعة الرياح

2 الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض

3 خطوط نقل الطاقة الكهربائية

4 الكثبان الرملية

5 خطوط النقل

6 المراكز الحضرية

7 درجة الانحدار

max. 45 character ea.

OK

Priorities

These are the resulting weights for the criteria based on your pairwise comparisons:

Cat	Priority	Rank	(+)	(-)
1 سرعة الرياح	27.5%	1	3.3%	3.3%
2 الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض	21.8%	2	5.1%	5.1%
3 خطوط نقل الطاقة الكهربائية	13.2%	3	4.4%	4.4%
4 الكثبان الرملية	9.4%	6	1.8%	1.8%
5 خطوط النقل	9.9%	4	1.6%	1.6%
6 المراكز الحضرية	9.9%	4	1.6%	1.6%
7 درجة الانحدار	8.2%	7	1.4%	1.4%

Decision Matrix

The resulting weights are based on the principal eigenvector of the decision matrix:

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1.00	2.00	3.00	3.00	3.00	4.00
2	1.00	1	1.00	3.00	2.00	2.00	3.00
3	0.50	1.00	1	1.00	1.00	1.00	2.00
4	0.33	0.33	1.00	1	1.00	1.00	1.00
5	0.33	0.50	1.00	1.00	1	1.00	1.00
6	0.33	0.50	1.00	1.00	1.00	1	1.00
7	0.25	0.33	0.50	1.00	1.00	1.00	1

Number of comparisons = 21

Consistency Ratio CR = 1.6%

Principal eigen value = 7.126

Eigenvector solution: 4 iterations, delta = 5.5E-9

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على AHP-OS – AHP Online System

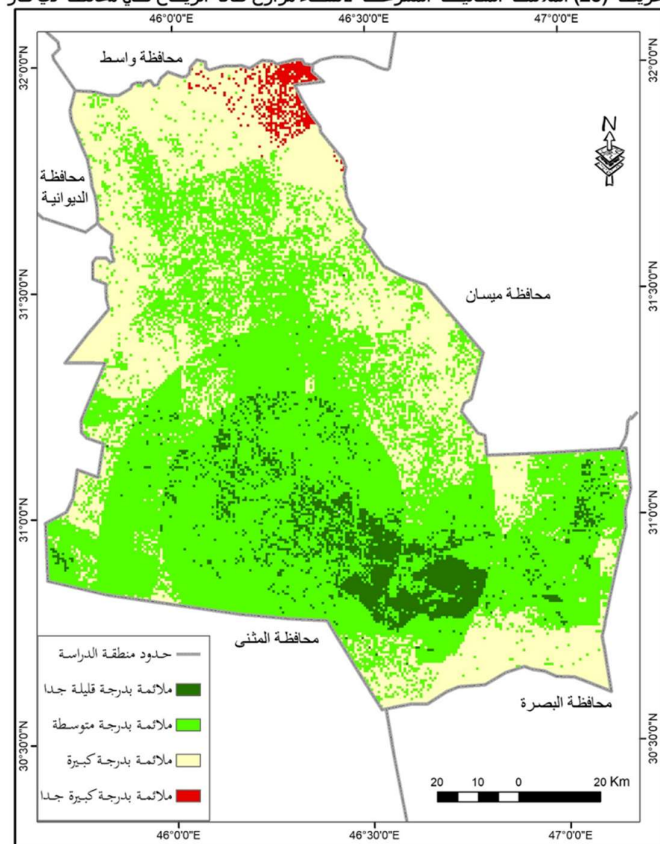
شكل (17) معايير بناء المصفوفة في AHP-OS ومصفوفة المقارنة الزوجية والاهمية النسبية للمعايير

5- تقييم درجة الملائمة المكانية لمحطات طاقة الرياح

يتضح من خريطة (20) وجدول (7) وجود تباين مكاني واضح في درجات الملاءمة داخل منطقة الدراسة، إذ صنفّت المنطقة الى اربع فئات: فئة الملائمة بدرجة متوسطة تستحوذ على أكبر مساحة في منطقة الدراسة، إذ بلغت 7553.01 كم²، ونسبة 56.1% من إجمالي مساحة منطقة الدراسة، وتأتي بعدها فئة الملاءمة العالية بمساحة 4777.45 كم² ونسبة 35.48%، أما فئة الملاءمة العالية جداً، وعلى الرغم من أهميتها التخطيطية، فإنها تمثل مساحة محدودة نسبياً بلغت 162.55 كم² فقط، أي 1.21% من مساحة منطقة الدراسة، في حين بلغت مساحة المناطق ذات الملاءمة القليلة جداً 970.32 كم²، ونسبة 7.21%. وإذا جمعت فئتا الملاءمة العالية والعالية جداً، فإن المساحة المناسبة بدرجة مرتفعة لإنشاء مزارع الطاقة الشمسية تبلغ 4940 كم² وهذا يعني أن (36.69%) تقع ضمن فئتي الملاءمة العالية والعالية جداً، وهي تتركز بصورة أكبر في الأجزاء الشمالية والجزء الجنوبية من منطقة الدراسة، يقابلها 8523.33 كم² مساحة فئتي الملائمة المتوسطة والقليلة جداً ونسبة (63.31%) اللتان تظهران بصورة أوضح في الأجزاء الوسطى والجنوبية الشرقية والوسطى الشمالية من منطقة الدراسة.

يعكس هذا التباين المكاني النتيجة المشتركة للمعايير الداخلة في نموذج (AHP)، إذ تشير الأوزان النسبية شكل (17) الى ان سرعة الرياح يمثل العامل الأكثر أهمية في تحديد الملائمة المكانية بوزن نسبي بلغ (27.5%)، يليه الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض (21.8%) ثم القرب من خطوط الطاقة الكهربائية (13.2%) والنقل (9.9%) والمراكز الحضرية (9.9%)، والكثبان الرملية (9.4%) في حين جاء عامل الانحدار بالترتبة الأخيرة نسبياً (8.2%)، وتشير هذه النتائج الى ان التوزيع المكاني للملائمة النهائية خريطة (20) تمثل نتاجاً متكاملًا لتأثير هذه المعايير ووزانها النسبية، وليس تأثير عامل منفرد، مما يعزز أهمية توظيف AHP مع GIS في تحديد المواقع المثلى لمشاريع حصاد طاقة الرياح.

خريطة (20) الملائمة المكانية المقترحة لإنشاء مزارع طاقة الرياح في محافظة ذي قار



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على الخرائط (6, 8, 10, 12, 14, 17, 19)، وبرنامج Arc Map 10.8_Weighted Overlay

جدول (7) المساحة والنسبة لأصناف الملائمة المكانية

أصناف الملائمة المكانية	المساحة كم ²	النسبة المئوية %
ملائمة بدرجة قليلة جداً	970.32	7.21
ملائمة بدرجة متوسطة	7553.01	56.1
ملائمة بدرجة عالية	4777.45	35.48
ملائمة بدرجة عالية جداً	162.55	1.21
المجموع	13463.32	100

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على خريطة (20).

6- الاستنتاجات:

1. يمكن أن يُسهم اعتماد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بشكل فعال في حل مشكلة ندرة إمدادات الطاقة في منطقة الدراسة، وذلك بفضل موقعها الذي يسمح بتلقي كميات كبيرة من سطوع الإشعاع الشمسي السنوي وسرع الرياح، كما أن التحول إلى الطاقة الشمسية وطاقة الرياح سيؤدي إلى تنويع مزيج الطاقة، واستثمار موارد الطاقة المحلية، والحد من الآثار البيئية، وتعزيز النمو طويل الأجل.
2. ركز البحث على استخدام منهجية نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير (AHP) لتحديد المواقع المثلى لحصاد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في منطقة الدراسة.
3. كشفت نتائج استمارة الاستبيان أهمية المعايير أن الإشعاع الشمسي وسرع الرياح، الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض، والمسافة إلى خطوط الكهرباء، والمسافة من طرق النقل والتجمعات الحضرية، والكثبان الرملية، والانحدار جميعها لها تأثير كبير بنسب متفاوتة على قرارات اختيار مواقع محطات حصاد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح.
4. أشارت النتائج إلى أن 1.93% من إجمالي أراضي منطقة الدراسة تتمتع بملاءمة عالية جداً، و48.36% بملاءمة عالية، و43.28% بملاءمة متوسطة، و6.43% من الأراضي غير ملائمة لإنشاء مواقع الطاقة الشمسية أو التي هي تتمتع بدرجة ملائمة بدرجة قليلة جداً.
5. تركزت المناطق ذات درجة الملاءمة العالية والعالية جداً بصورة أكبر في الأجزاء الشرقية والشمالية الشرقية والأجزاء الغربية والجنوبية من منطقة الدراسة، أما فنتي الملائمة المتوسطة والقليلة جداً تظهران بصورة أوضح في الأجزاء الوسطى والجنوبية الشرقية والوسطى الشمالية من منطقة الدراسة لانشاع مواقع الطاقة الشمسية.
6. بلغت المساحة التي هي بدرجة ملائمة عالية وعالية جداً (4940 كم²) ونسبة (36.69%) من إجمالي منطقة الدراسة لإنشاء مواقع طاقة الرياح.

المصادر:

- 1- بيداء عبد الحسين الحسيني وآخرون. (2025). استخدام نظم المعلومات المكانية GIS لتحديد الملائمة المكانية لمزارع الطاقة الشمسية لتوليد الطاقة الكهربائية في النجف الاشرف، مجلة آداب البصرة، العدد 111، آذار 2025.
- 2- سحر سعيد قاسم الطائي ووليد وعد عبد السبعوي، (2025)، التحليل المكاني لإمكانية انتخاب مواقع مزارع الطاقة الشمسية في محافظة نينوى باستخدام GIS&RS، مجلة آداب البصرة، العدد 111.
- 3- عماد احمد محمد الجلي. (2023). النمذجة الجيومورفية لتقييم المظهر الأرضي في منطقة تكليف باستخدام التقنيات المكانية، أطروحة دكتوراه، جامعة تكريت، كلية التربية للعلوم الإنسانية.
- 4- عمر عبد الله إسماعيل القصاب، (2021). تكامل نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد في النمذجة الخرائطية لاستعمالات الأرض، قضاء سهل أربيل انموذجاً، أطروحة دكتوراه، كلية التربية للعلوم الإنسانية، جامعة الموصل.
- 5- ياسر محمد عبد الموجود، (2019)، تقييم انتاج الطاقة الكهربائية من الرياح في محافظة البحر الأحمر، المجلة الجغرافية العربية، المجلد 50، الجزء 2.
- 6- Al Garni, H. Z. and A. Awasthi. 2018. Solar PV Power Plants Site Selection: a Review. Advances in Renewable Energies and Power Technologies, 57-75
- 7- Goepel, K.D. (2018). Implementation of an Online Software Tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). International Journal of the Analytic Hierarchy Process, Vol. 10 Issue 3 2018.
- 8- Iva Gasparovic, Mateo Gasparovic. (2019). Determining Optimal Solar Power Plant Locations Based on Remote Sensing and GIS Methods – A Case Study from Croatia, journal remote sensing, vol;11.
- 9- Jose Eduardo Tafula, and others, (2023). Multicriteria Decisions – Making Approach for Optimum Site Selection for Off-Grid Solar Photovoltaic Micro grids in Mozambique, journal energies, vol 16.
- 10- Minelli, A., et al. (2014). An open-source GIS tool to quantify the visual impact of wind turbines and photovoltaic panels. Environmental Impact Assessment Review, 49.

- 10- Nazari, M. A., Aslani, A., and R. Ghasempour, 2018. Analysis of solar farm site selection based on TOPSIS approach. International Journal of Social Ecology and Sustainable Development (IJSESD), 9(1).
- 11- Saaty, T.L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. Int. J. Services Sciences, 1.
- 12- Sajaa Mouhsen khazil, (2021) the optimum site selection for solar energy farms using AHP in GIS environment – A case study of Iraq, Master Thesis, university of Baghdad, college of engineering.
- 13- Shivendra Verma, Ramsingh Meena, Anurag Mudgal., (2015). A Cost-Effective Wind Power-Driven RO Plant for Treatment of Brackish Water, Journal of Geoscience and Environment Protection, Vol.3, No. 10.
- 14- Yoram Wind, and Thomas L. Saaty, (1980). Marketing application of the analytic hierarchy process, Management science, Vol. 26, No. 7.

ملحق (1) الاستبانة المعتمدة في البحث

م / استبانة

المحكم الكريم ...

الاستبانة التي بين يديك هي لأغراض علمية بحتة تخص البحث الموسوم (خريطة الملائمة المكانية لمواقع محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في محافظة ذي قار)

لتجنب الحكم الشخصي حول تحديد أهمية النسبية لكل معيار، عمد الباحث اللجوء الى اسلوب صناعة القرار متعدد المعايير، لذا يرجى من جنابكم الكريم ابداء الرأي حول الاستبانة المصممة بما ترونه مناسباً وفق خبرتكم العلمية. مع الشكر والتقدير...

المطلوب: تحديد أهمية المتغيرات الواردة ادناه.

اولاً: محطات الطاقة الشمسية

ت	المعايير	الاهمية النسبية			
		قليلة	متوسطة	كبيرة	كبيرة جدا
1	سطوع الاشعاع الشمسي				
2	الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض				
3	خطوط نقل الطاقة الكهربائية				
4	خطوط النقل				
5	المراكز الحضرية				
6	درجة الانحدار				

ثانياً: طاقة الرياح

ت	المعايير	الاهمية النسبية			
		قليلة	متوسطة	كبيرة	كبيرة جدا
1	سرعة الرياح				
2	الغطاء الأرضي واستخدامات الأرض				
3	خطوط نقل الطاقة الكهربائية				
4	خطوط النقل				
5	المراكز الحضرية				
6	درجة الانحدار				
7	الكتبان الرملية				