مجلة كلية الآداب بقنا (دورية أكاديمية علمية محكمة)

تقييم إمكانات طاقة الرياح البرية في محافظة مطروح باستخدام عملية التسلسل الهرمي التحليلي (AHP) ونظم المعلومات الجغرافية GIS

د. نورا رجب إبراهيم السيد
مدرس الجغرافيا الاقتصادية
كلية الآداب – جامعة كفر الشيخ
د. مروة مصطفي حسن
مدرس الجغرافيا الاقتصادية
كلية الآداب – جامعة عين شمس

DOI: 10.21608/qarts.2025.373300.2199

مجلة كلية الآداب بقنا – جامعة جنوب الوادي – المجلد (٣٤) العدد (٦٧) أبريل ٢٠٢٥
الترقيم الدولي الموحد للنسخة المطبوعة ISSN: 1110-614X
الترقيم الدولي الموحد للنسخة الإلكترونية ISSN: 1110-709X
موقع المجلة الإلكتروني: https://qarts.journals.ekb.eg

تقييم إمكانات طاقة الرياح البرية في محافظة مطروح باستخدام عملية التسلسل الهرمي التحليلي (AHP) ونظم المعلومات الجغرافية GIS

الملخص:

يلعب قطاع الطاقة دورًا أساسيًا في تحقيق التنمية الاقتصادية، حيث يُعد إحدى الركائز الرئيسة للتنمية المستدامة. وقد أدى الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية إلى زيادة الانبعاثات الضارة بالبيئة، بالتزامن مع ارتفاع الطلب العالمي على الطاقة لتلبية متطلبات التنمية. ونتيجة لذلك، أصبحت مسألة تأمين مصادر طاقة مستدامة قضية محورية ذات أهمية متزايدة. بناءً عليه، هدفت الورقة الحالية إلى دراسة الإمكانات المحتملة لتوطن مزارع الرياح البرية في محافظة مطروح، من خلال إنشاء خريطة رقمية تُوضح درجات الملاءمة المكانية لمواقع تلك المحطات. استخدمت الدراسة نهج تطبيقي اعتمد على أسلوب اتخاذ القرار المكاني متعدد المعايير Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA) في بيئة نظم المعلومات الجغرافية.

وظفت الدراسة ١٥ معياراً وقيداً في بناء نموذج الملاءمة المكانية، تم استقاؤها من الدراسات السابقة، وخبراء الطاقة في حقل البحث. وتم تطبيق التسلسل الهرمي التحليلي Analytic Hierarchy Process (AHP) للوصول إلى خريطة الملاءمة المكانية لمواقع مزارع الرياح البرية في محافظة مطروح. ووفقًا للنتائج. وبناءً على القيود، تبيّن أن٣٦,٥٩٪ من إجمالي مساحة محافظة مطروح غير ملائمًا. في المقابل، وجد أن ٦٣,٤١٪ من مساحة المحافظة يعد ملائمًا، وأن المحافظة تتمتع بإمكانات متنوعة في مجال توطن مزارع الرياح البرية فى خاصة الجزء الشمالي، وذلك بسبب الموارد المناخية المواتية والبنية التحتية المتاحة، تراوحت ما بين نسبة ملاءمة ممتازة (٢,٧٦٪)، ونسبة ملاءمة جيدة جداً (٣١,٧٤٪)، ونسبة ملاءمة جيدة (٢٨,٠٥٪)، ونسبة ملاءمة متوسطة (٠,٨٤٪).

الكلمات المفتاحية: الطاقة الجديدة والمتجددة، طاقة الرياح، نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، التسلسل الهرمي التحليلي (AHP)، محافظة مطروح.

مقدمة:

في ظل التحديات البيئية والاقتصادية المتصاعدة، أصبحت الطاقة المتجددة عنصراً أساسياً لتحقيق التنمية المستدامة، وضمان مستقبلٍ يعتمد علي مصادر طاقة نظيفة، مستدامة، وآمنة (Li et al., 2014). ومع تزايد الطلب العالمي على الكهرباء وتفاقم المخاوف بشأن تغيّر المناخ والتلوث البيئي، تبرز الطاقة المتجددة كحل رئيسي، إذ تعتمد على موارد طبيعية دائمة مثل الشمس، والرياح، والمياه، والكتلة الحيوية.

يُعد التحول من توليد الطاقة المعتمد على الوقود الأحفوري إلى الطاقة المتجددة خطوة جوهرية في التصدي لتغير المناخ. ورغم التحديات العديدة، لا سيما في مجال الطاقة المتجددة المتغيرة (Dave J. Pojadas et all, 2022)، فإن الاتجاه العالمي يعكس تزايد الاعتماد على هذه المصادر، وهو ما يظهر بوضوح في النمو المستمر للحصة العالمية من قدرات توليد الكهرباء الجديدة (Meng Shao et all, 2020)، إضافةً إلى الاستثمارات المستدامة واعتماد السياسات الداعمة.

بناءً على ذلك، أصبح التحول إلى مصادر الطاقة المتجددة ضرورة حتمية لبناء مستقبل أكثر استدامة، ولم يعد مجرد خيار مطروح. فمع التقدم السريع في التقنيات، تزداد كفاءة هذه المصادر وتنخفض تكاليفها، مما يعزز قدرتها التنافسية أمام مصادر الطاقة التقليدية. وفي الوقت الراهن، تشكل الاستثمارات في الطاقة المتجددة محورًا أساسيًا في سياسات الدول التي تسعى إلى تحقيق توازن مستدام بين النمو الاقتصادي وحماية البيئة لصالح الأجيال القادمة (Yeliz Simsek et all, 2018). ومن المتوقع أن تصبح مصادر الطاقة المتجددة جزءًا جوهريًا من إمدادات الطاقة العالمية في المستقبل (Abhishek K ,et all,2017)، ومن أبرز هذه المصادر طاقة الرياح، التي أصبحت واحدة من أسرع مصادر الطاقة المتجددة نموًا على مستوى العالم خلال

العقدين الماضيين (Adedeji PA ,et all,2020). وفي هذا السياق، تمتلك بعض الدول، ومن بينها مصر، إمكانات هائلة لاستغلال طاقة الرياح في إنتاج الكهرباء، حيث شهدت ارتفاعًا ملحوظًا في معدل إنتاج الطاقة النظيفة، مما يعكس تقدمها في هذا المجال. فقد وصلت نسبة إنتاج مصر من الطاقة النظيفة إلى حوالي ٢٠٪، بواقع ١٢٪ لطاقة الرياح، ٦٪ للطاقة الكهرومائية، و٢٪ للطاقة الشمسية ومن المنتظر أن تصل النسبة إلى ٤٢٪ حجم إنتاج الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة مقابل ٥٨٪ من المصادر التقليدية ضمن رؤية مصر ٢٠٣٥م (هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة، التقرير السنوي ٢٠٢٠). وتُعد مزارع الرياح من أبرز مشروعات الطاقة المتجددة التي شهدت نموًا ملحوظًا في مصر، حيث حققت معدلات تشغيل قياسية غير مسبوقة.

ومع ذلك، يواجه تطوير الطاقة المتجددة بعض التحديات، من أبرزها تحديد الموقع المثالي للمحطة، وسعتها الإنتاجية، وترتيب الأولويات بين الموارد، بالإضافة إلى اختيار المصادر المناسبة للطاقة (Meng Shao et all, 2020). ويُعد اختيار مواقع محطات الطاقة المتجددة المتغيرة خطوة أساسية في تخطيط وإنشاء محطات توليد الكهرباء، حيث يؤثر بشكل مباشر على كفاءتها الإنتاجية، بالإضافة إلى العوائد الاجتماعية والاقتصادية المستقبلية (Dave J. Pojadas et al., 2022).

علاوة على ذلك، قد يؤدي الاختيار غير المناسب لمواقع هذه المحطات إلى عواقب سلبية، مثل التلوث البصري، الضوضائي، والإضرار بالنظم البيئية، فضلاً عن المخاطر المحتملة التي قد تهدد الاستثمارات في قطاع الكهرباء (Elkadeem et all,2022).

يُعد التحليل المكاني متعدد المعايير واحداً من أفضل الأساليب المعروفة في عملية اتخاذ القرار المكاني (Triantaphyllou, 2000). فهو يُمثل مكوناً أساسياً من مكونات العلوم الحديثة المعنية بعملية اتخاذ القرار، حيث يتيح إمكانية نمذجة عدد

متنوع من المتغيرات "المعايير" ذات الصلة بالظاهرة (Odu, 2019). تم استخدام التقييم متعدد المعايير بنهج تحليلي لتحديد المواقع المثلى لإنشاء مزارع الرياح. ويعد التسلسل الهرمي التحليلي Analytic Hierarchy Process (AHP) أحد نماذج أو أساليب اتخاذ القرار في نظم المعلومات الجغرافية التي تم تطورها في سبعينات القرن الماضي من قبل توماس ساعاتي (saaty,1980)، وهي واحدة من أكثر أساليب تحليل القرارات المتعددة المعايير شهرةً واستخدامًا. تعتمد طريقة التحليل الهرمي على توظيف الأساليب الكمية لاختيار البديل الأمثل من بين مجموعة من البدائل وفقًا لمعايير مختلفة (saaty,1980)، وفي حالة عدم توفر التقييمات الكمية، يمكن لصناع القرار أو المقيمين تحديد ما إذا كان معيار معين أكثر أهمية من معيار آخر. لذلك، تعتمد على المقارنات الزوجية بين معايير المشكلة ، وهو ما يجعلها مفضلة لدى المستخدمين (Kasperczyk,2016) . وقد أثبتت هذه النظرية نجاحها وكفاءتها العالية في حل المشكلات المعقدة ودعم عملية اتخاذ القرارات بطريقة منهجية ودقيقة (saaty,1980). حيث توفر عملية التحليل الهرمي إطارًا عمليًا فعالًا ينظم العملية الفكرية لمتخذي القرار ويضمن الالتزام بمنهجية واضحة، كما أن تعيين قيمة رقمية لكل متغير من متغيرات المشكلة يسهم في الحفاظ على نموذج فكري متناسق، مما يساعد متخذي القرار في الوصول إلى القرار الأمثل(Rediske ,et all,2021) . بالإضافة إلى ذلك، تعزز هذه المنهجية من المصداقية، حيث تساعد في تقليل تأثير القرارات الشخصية والميول الذاتية، مما يجعل عملية اتخاذ القرار أكثر موضوعية ودقة (Yousef,et all,2022). في منهجية AHP، يتم هيكلة المشكلة في نموذج هرمي يضم أربعة مستويات: الهدف الرئيسي، المعايير، المعايير الفرعية، والخيارات النهائية (Bertolini, et all,2006).

أسباب اختيار منطقة الدراسة

يرجع اختيار محافظة مطروح مجالاً للدراسة لعدة أسباب من أهمها:

- تتطلب تطبيقات طاقة الرياح وجود مساحات مفتوحة أو سواحل متاحة لإنشاء محطات توليد الطاقة. وتتميز محافظة مطروح بامتلاكها مساحات شاسعة غير مأهولة وسواحل طويلة على البحر المتوسط، مما يجعلها بيئة مثالية لاستغلال طاقة الرياح.
- كما أن سرعة الرياح في العديد من مناطقها مرتفعة بما يكفي لتكون مشروعات طاقة الرياح خياراً اقتصاديًا ومجدياً.

الدراسات السابقة

- **الدراسات باللغة العربية**

- دراسة حافظ (٢٠٠٧): بعنوان الرياح وإنتاج الطاقة الكهربائية في صحراء مصر الشرقية. وقد تناولت إمكانات الصحراء الشرقية من طاقة الرياح، وخاصة الجزء الجنوبي لخليج السويس اعتماد على بيانات الرياح.

- دراسة عبده (٢٠١٢): عن مستقبل الطاقة المتجددة في مصر، وقد تناولت مفهوم الطاقة المتجددة، وتاريخ استخدام الطاقة المتجددة في مصر وتطورها، كما تطرقت إلى الإمكانات الحالية للطاقة المتجددة في مصر من خلال التركيز على الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، بالإضافة إلى طرح رؤية مستقبلية لمصادر الطاقة المتجددة، ودورها في تقليل الاعتماد على مصادر الوقود الأحفوري.

- دراسة عبد الموجود (٢٠١٩):عن تقييم إنتاج الطاقة الكهربائية من محطات الرياح في محافظة البحر الأحمر، وتناولت الدراسة مقومات إنشاء محطات الرياح في محافظة البحر الأحمر، تطور القدرات الاسمية المركبة بمحطات الرياح، وتأثيرها في

حجم الكهرباء المولدة من هذه المحطات، كما سلطت الضوء على التحديات التي تواجه طاقة الرياح في المحافظة.

- دراسة بدوي (٢٠٢١): تناولت الدراسة تحديد المواقع المثلى لاستغلال طاقة الرياح في مصر، حيث تم استخدام أسلوب التحليل متعدد المعايير لتحديد المناطق الأكثر ملاءمة لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح بفعالية وكفاءة.

- **الدراسات السابقة باللغة الأجنبية**

- دراسة Effat (٢٠١٤): النمذجة المكانية للمواقع المثلي لمزارع الرياح بالتطبيق على محافظة البحر الأحمر، واستخدمت الدراسة عدد من المعايير الخاصة بتقييم مزارع الرياح.
- دراسة Adedeji PA ,et all, (٢٠٢٠): التنبؤ بالموارد باستخدام الأنظمة الضبابية في تقييم ملاءمة المواقع لطاقة الرياح والطاقة الشمسية، استعرضت الدراسة تقنيات **MCDM**المختلفة لاتخاذ القرار، مع تحليل نقاط القوة والضعف لكل منها. كما تم عرض دراسات خاصة بدول معينة تطبق طرق **GIS** في تقييم ملاءمة المواقع، إلى جانب المعايير المستخدمة في هذه الدراسات. وبالمثل، تم تقديم دراسات خاصة بكل دولة تستخدم نماذج **ANFIS**في التنبؤ بموارد طاقتي الرياح والشمس.
- دراسة Rediske, et all (٢٠٢١): عن اختيار مواقع محطات الرياح، وتناولت الدراسة عدد من المعايير التي يجب أخذها فالاعتبار عن اختيار موقع محطة الرياح وأهمها سرعة وكثافة الرياح، انحدار السطح، كما تناولت عدد من القيود ومنها المحميات الطبيعية، والمجاري المائية، ومسارات هجرة الطيور.
- دراسة Elkadeem et al. (٢٠٢٢): بعنوان: تحليل متعدد المعايير لتقييم الإمكانات الجغرافية والتقنية والاقتصادية المحتملة للطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وقد اقترحت الدراسة نموذجاً جديداً لصنع القرار الجغرافي، بهدف الوصول إلى رسم خرائط

الإمكانات الجغرافية والفنية والاقتصادية، وتقييم محطات الطاقة الشمسية، وتوربينات الرياح بمستوى عال من الدقة.

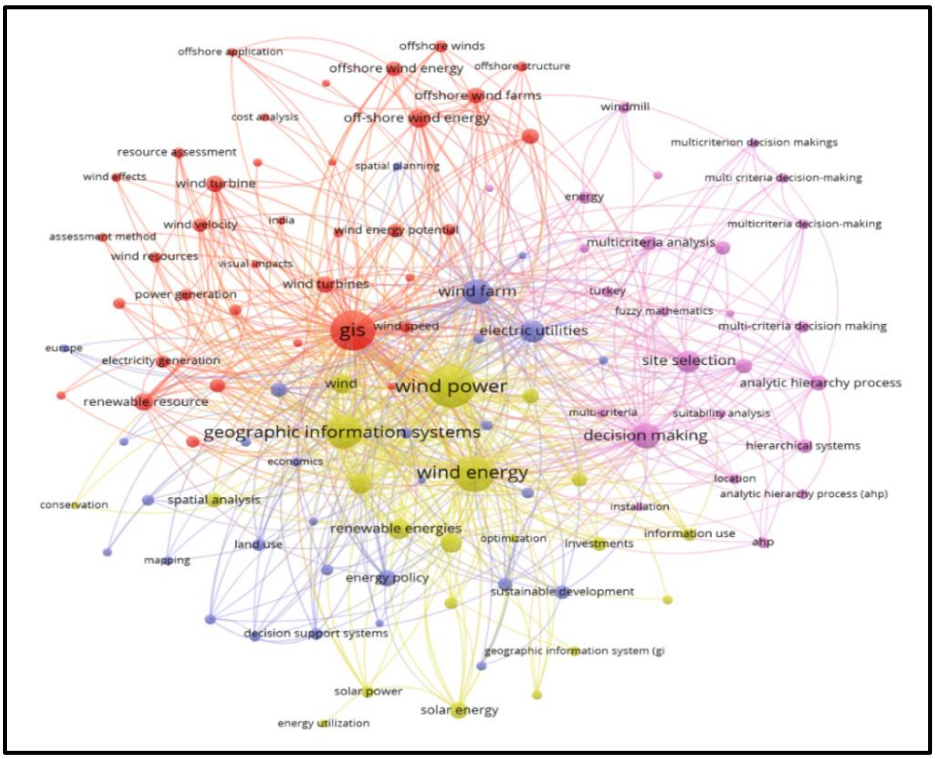
- دراسة Dave, et al (٢٠٢٢): إطار نمذجة مكاني لتحليل التكلفة والعائد والتأثيرات الخارجية في اختيار مواقع مزارع الطاقة المتجددة المتغيرة، دراسة حالة في بوهول.
- دراسة Yousef, et all (٢٠٢٢): بعنوان نظام اتخاذ القرار متعدد المعايير لاختيار موقع مزارع الرياح باستخدام نظام المعلومات الجغرافية دراسة حالة لمحافظة سمنان، إيران، اعتمدت الدراسة على مجموعة من المعايير الرئيسية لتصنيف المناطق، حيث تم إجراء مقارنات زوجية استنادًا إلى آراء الخبراء في هذا المجال. كما تم تطبيق مجموعة من القيود وفقًا للقوانين واللوائح المعمول بها، وذلك بالاستناد إلى منهجية التحليل الهرمي (AHP) لضمان دقة وموضوعية عملية الاختيار.
- دراسة .Qutaina et al (٢٠٢٣): عن منهجية اختيار المواقع القائمة على نظم المعلومات الجغرافية لأنظمة الطاقة المتجددة في الأراضي الفلسطينية، وفى هذه الدراسة تم تحديد معايير الاختيار، ووزنها النسبي وفقاً لعملية التسلسل الهرمي التحليلي "AHP".
- دراسة .Raza et al (٢٠٢٣): تناولت الدراسة الملاءمة المكانية لمواقع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في البلدان النامية، بالتطبيق على باكستان، واعتمدت على مزيج من تقنيات نظم المعلومات الجغرافية مستخدمه التسلسل الهرمي التحليلي لتحديد المواقع المثلى لاستخدام مصادر الطاقة المتجددة.

التحليل الببليومتري (Bibliometric analysis).

لتقديم منظور شامل قائم على البيانات حول كيفية عمل البحوث العلمية حول العالم في موضوع ملاءمة الموقع للطاقة المتجددة خاصة طاقة الرياح، بالإضافة إلى ملخص للدراسات السابقة أعلاه، أجرى المؤلفان تحليلًا ببليومتريًا، يساعد هذا التحليل

الباحثين على تقديم رؤية حول ما يدور من بحوث حديثة في العالم واتجاهات البحث في الموضوع قيد الدراسة، بالإضافة إلى تحديد أوجه القصور الرئيسية في الدراسات السابقة. بمساعدة أداة برنامج VOSviewer، تم اختيار قاعدة بيانات Scopus لأنها أكبر قاعدة بيانات استشهاد للبحوث العلمية التي تمت مراجعتها من قبل المراجعين حول العالم. وتم تحديد صيغة البحث مع مراعاة الهدف الرئيسي لهذه الدراسة وتتوافق مع الكلمات الرئيسية الثلاث الأولى لهذه الورقة البحثية. علاوة على ذلك، اقتصر البحث على المقالات البحثية الأصلية المكتوبة باللغة الإنجليزية والمنشورة في الفترة من ٢٠١٤ إلى ٢٠٢٤، وأسفرت نتائج البحث عن ٣٠١ ورقة بحثية، والتي تطابقت مع معايير التصفية المذكورة أعلاه. بعد تحسين قاعدة البيانات، تم تصور النتائج وتحليلها كما هو موضح في الشكل ١، والشكل ٢، والشكل ٣. وتعتبر المعلومات الجوهرية لهذا التحليل الببليومتري بمثابة مساهمة مهمة للدراسة الحالية لمعالجة تعدد التخصصات وتعقيد التحليل الجغرافي المكاني وعمليات اتخاذ القرار المكاني والتحليل الهرمي.

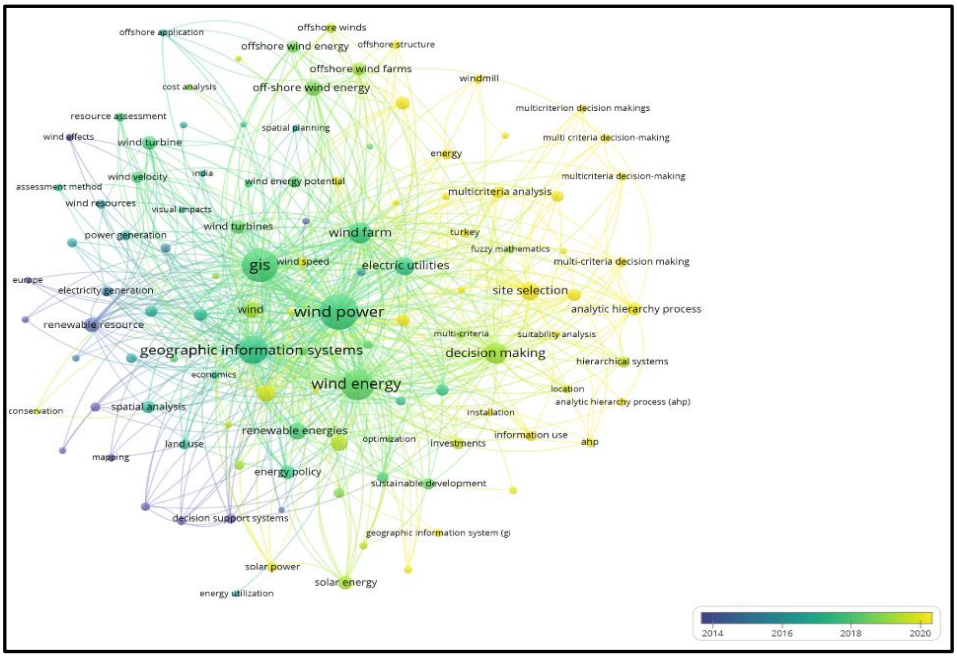
يوضح (الشكل١) أهم المواضيع وأحدثها بناءً على الكلمات المفتاحية في هذا المجال وفقًا لتكرار حدوثها، حددت المنهجية المتبعة ٤ مجموعات رئيسية بألوان مختلفة، تتميز مصطلحات طاقة الرياحwind energy ونظم المعلومات الجغرافية GIS، ومزارع الرياح wind farms، وعمليات صنع القرار Decision making بأحجام دوائر كبيرة وقوة حدوث مشتركة قصوى مع الكلمات الرئيسية الأخرى، مما يدل على أهميتها ويزيد من عدد المنشورات المتعلقة بهذه المواضيع مما يدل أن هذا الموضوع من الموضوعات الساخنة في الوقت الحاضر.



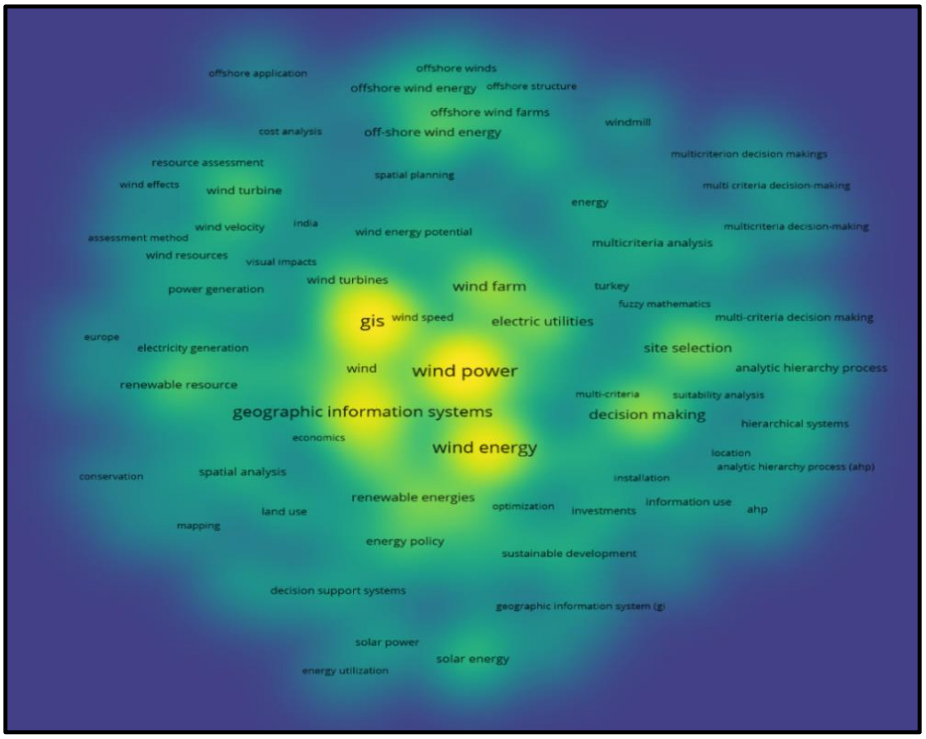
المصدر من إعداد الباحثة اعتماداً على قاعدة بيانات **scopus** باستخدام برنامج VOSviewer.

شكل (١): الكلمات المفتاحية ذات الصلة بموضوع البحث

كما يوضح الشكلين (٢، ٣) الموضوعات الأكثر نشراً في السنوات الأخيرة، حيث يلاحظ أن هذا الموضوع مرتبط ارتباطا وثيقا بنظم المعلومات الجغرافية وعمليات اتخاذ القرار عموما، لكن تقل الموضوعات المرتبطة بطاقة الرياح مع عملية التسلسل الهرمي مما يستدعي من المجتمع العلمي زيادة الأوراق في هذا الموضوع، ومما يثير الاهتمام في هذه الدراسة هو تركيز الباحثون في السنوات الأخيرة (بعد عام ٢٠٢٠) على عمليات التسلسل الهرمي مع مزارع الرياح مما يجعله موضوعا حيويا من أجل الدراسة.

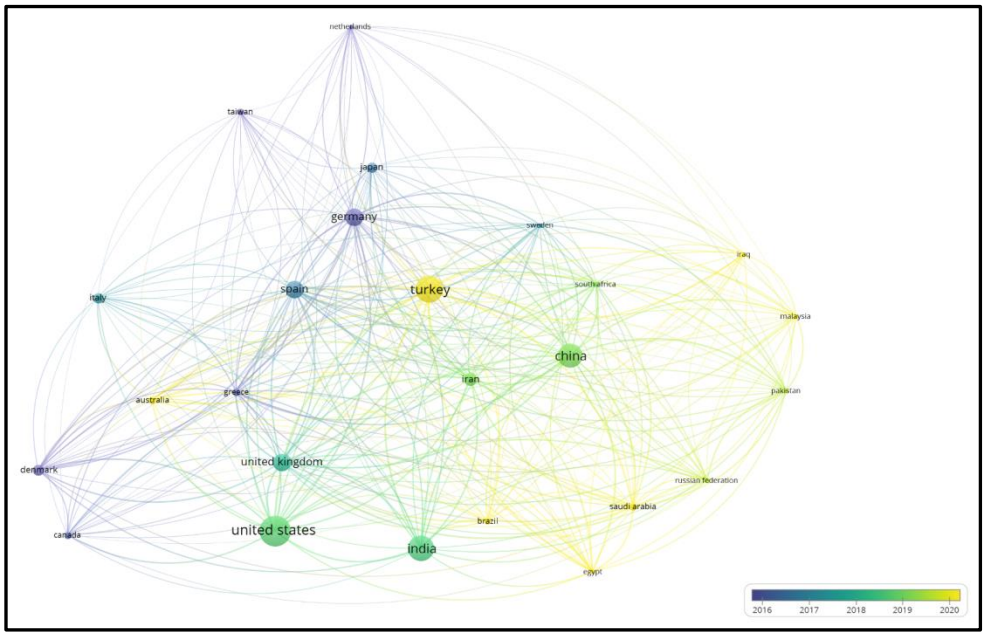


شكل (٢) الخريطة الزمنية لاهتمامات الباحثين خلال الفترة من ٢٠١٤-٢٠٢٤م



شكل (٣): كثافة شبكة التواجد المشترك للكلمات الرئيسية المتعلقة بموضوع البحث الرئيسي.

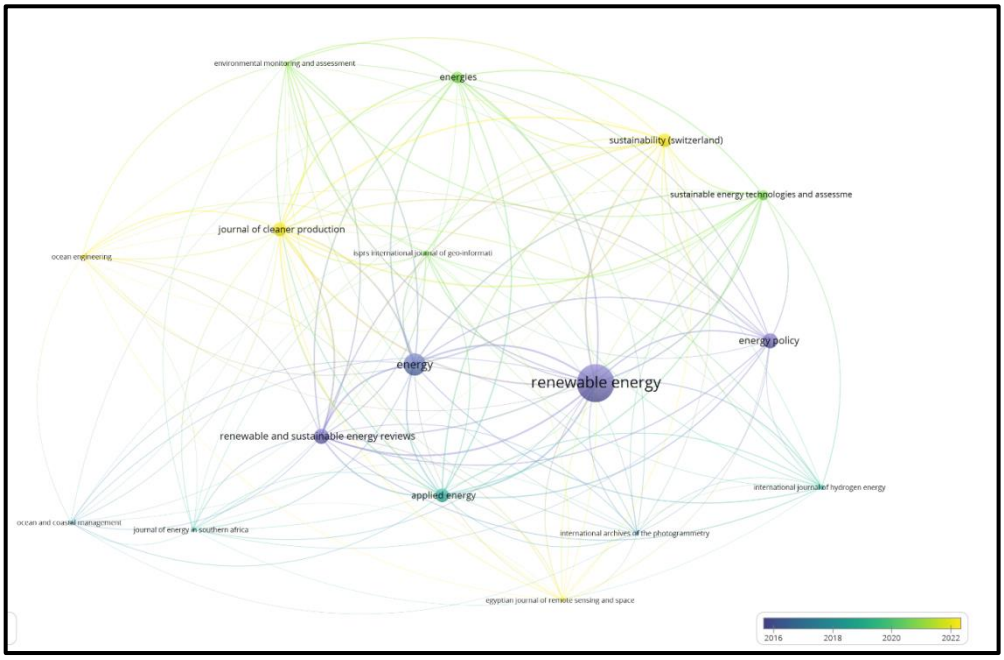
تم الحصول على معلومات أخرى مثيرة للاهتمام تتعلق بتحليل التأليف المشترك بين البلدان وعرضها في (الشكل ٤). تُظهر قاعدة البيانات ما مجموعه ٤٤ دولة ساهمت في البحوث من هذا النوع. الدولة البارزة التي لديها عدد أكبر من المنشورات والتعاون مع دول أخرى هي الولايات المتحدة الأمريكية بـ ٣٣ ورقة بحثية، تليها تركيا (٢٩) والهند (٢٧) والصين (٢٦). كذلك، تعاونت الدول الأعضاء في الأمم المتحدة (مثل إيطاليا وإسبانيا وألمانيا) في الغالب فيما بينها، ولكن، بالإضافة إلى ذلك، تربطها صلات بدول مثل الصين والولايات المتحدة الأمريكية. وحتى في غياب عدد كبير من البحوث شاركت الدول النامية بعدد من البحوث مثل إيران وجنوب أفريقيا والعراق والبرازيل ومصر.



شكل (٤) الدول الأكثر اسهاماً في نشر أوراق بحثية في موضوعات ذات صلة بموضوع الدراسة

يوضح (الشكل ٥) تصورًا قائمًا على البيانات لأهم المجلات العلمية المتعلقة بالموضوع قيد الدراسة، يمكن لهذه البيانات أن تُرشد الباحثين في تحديد فرص نشر أعمالهم المستقبلي عند تحليل الخريطة، يُلاحظ وجود زيادة في عدد البحوث في

المجلات التالية: الطاقة المتجددة Renewable Energy، والطاقة Energy، والطاقة التطبيقية Applied Energy، والطاقاتEnergies ، وتحويل وإدارة الطاقة Energy Conversion and Management. وقد سجّلت هذه المجلات عددًا أكبر من المنشورات، حيث بلغ ٣٣، ٣٠، ٢٥، ١٨، ١٧ على التوالي.



شكل (٥) المجلات الدولية ذات الأواق البحثية المتعلقة بموضوع البحث

الفجوة البحثية، وأهداف الدراسة

يتبين مما سبق، تنوع الدراسات الدولية حول تحديد المواقع المثلى لمزارع الرياح، وفقًا لتقنيات مختلفة ووجهات نظر متعددة، تشمل مجالات علوم الطاقة، والهندسة، والبيئة، والجغرافيا، وغيرها. ومع ذلك، يختلف الوضع في مصر، حيث إن الدراسات الجغرافية التي تناولت هذا الموضوع لا تزال محدودة للغاية. وقد ركزت جميعها تقريبًا على الساحل الشرقي لمصر، دون التطرق إلى تقييم إمكانات الساحل الشمالي في إنتاج طاقة الرياح. ومن الجدير بالذكر أن الباحثة لم تصادف أي دراسة تناولت اختيار

المواقع المثلى لإنشاء مزارع الرياح في محافظة مطروح تحديدًا. **من هنا جاءت الدراسة الحالية لتحقيق الأهداف التالية:**

١- إلقاء الضوء على إمكانات محافظة مطروح في طاقة الرياح.

٢- إنشاء خريطة رقمية تُوضح درجات الملاءمة المكانية لإنشاء مزارع الرياح في محافظة مطروح. باستخدام تقنيات النمذجة متعددة المعايير في بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS).

مناهج الدراسة، ومداخلها

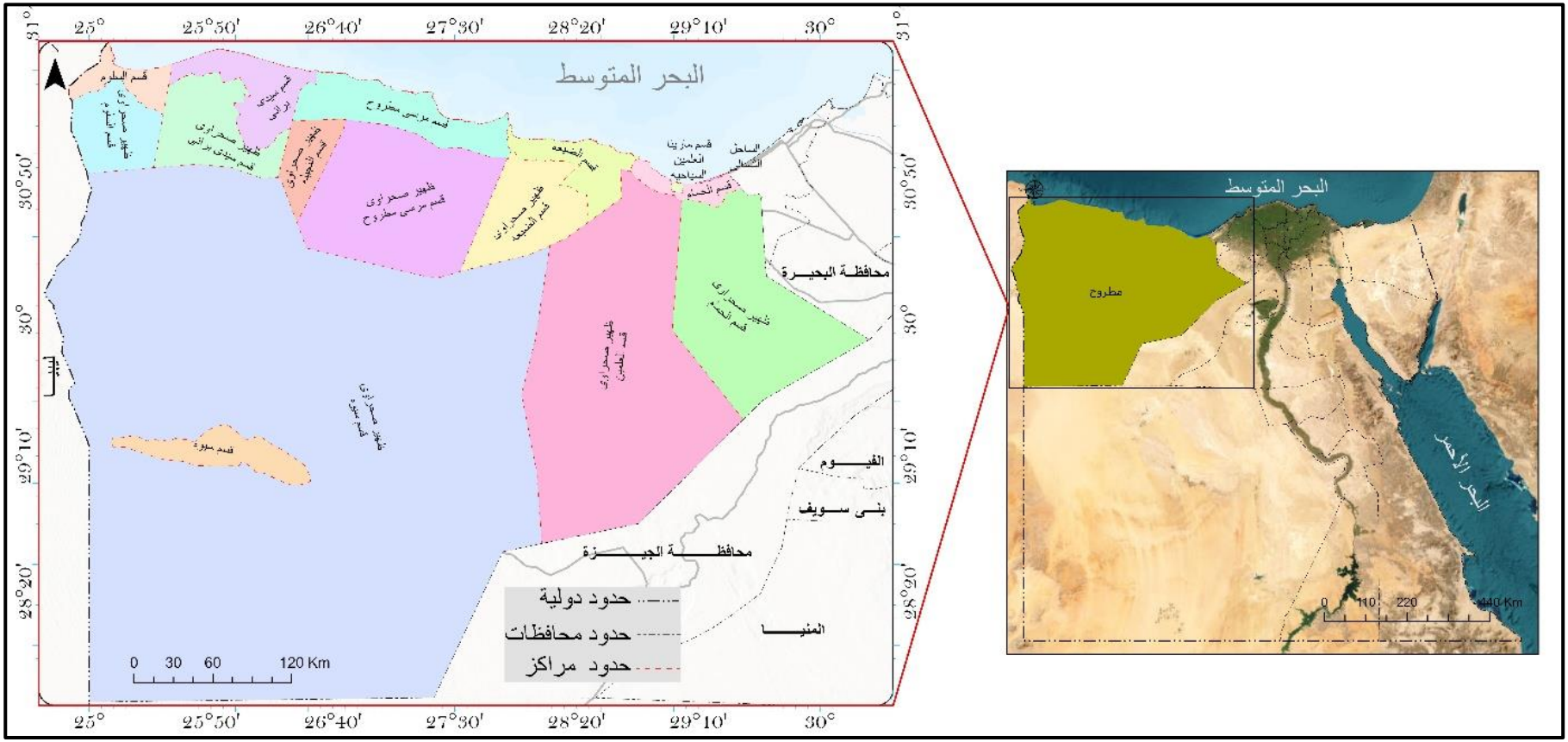
اقتضت طبيعة الدراسة، الاعتماد على المنهج الوصفي التحليلي، والذي يُعنى برصد الحقائق المتعلقة بموضوع الدراسة. وذلك بجمع البيانات المكانية ومعالجتها في بيئة نظم المعلومات الجغرافية، وتحليلها، وتفسيرها، وإصدار تعميمات بشأنها (توفيق، ٢٠٠٧). كما أن الطبيعة التقنية للعمل البحثي الحالي، قد اقتضت أيضاً استخدام المنهج التجريبي، في إطار العمل التجريبي في بيئة نظم المعلومات الجغرافية، حيث حتمت الضرورة البحثية، اجراء تجارب متعددة باستخدام أدوات تحليلية مختلفة، وصولاً إلى أنسب طريقة عمل لإنجاز الأهداف المطلوبة ضمن نطاق العمل البحثي الحالي. كما اعتمد البحث على عدد من المداخل أهمها، المدخل الإقليمي، اذ ينحصر المجال المكاني للعمل الحالي ضمن النطاق الإداري لمحافظة مطروح.

منطقة الدراسة

تقع محافظة مطروح بين دائرتي عرض ٣٠َ ٢٧ْ ، ٣٠َ ٣١ْ وبين خطي طول ٢٥ْ، ٢٢َ ٣٠ْ ، في الركن الشمالي الغربي من جمهورية مصر العربية، حيث تمتد من الكيلو ٦١ غرب محافظة الإسكندرية حتى الحدود المصرية الليبية، بمسافة تبلغ حوالي ٤٥٠كم على ساحل البحر المتوسط. كما تمتد جنوبًا بعمق يصل إلى حوالي ٤٠٠ كم

جنوب واحة سيوة. وتعد محافظة مطروح ثالث أكبر محافظات مصر مساحة بعد محافظتى الوادي الجديد والبحر الأحمر، يحدها شرقاً محافظات: الإسكندرية، والبحيرة، والجيزة، ومن الجنوب محافظة الوادى الجديد، وشمالاً البحر المتوسط، بينما تحدها ليبيا من الغرب (شكل ٦)، وهي بذلك تمثل بوابة مصر الغربية، فموقعها المتميز شمال غرب مصر جعلها منفذ مصر على شمال افريقيا ، وبذلك تتميز بعلاقات ترابطية وتبادلية على المستويات الدولية والاقليمية. تبلغ مساحة محافظة مطروح حوالي ١٥٨,٤٩٨ كم^{٢}، ما يعادل تقريبًا ٣٩,٣ مليون فدان، مما يمثل حوالي ١٦,٥٪ من إجمالي مساحة جمهورية مصر العربية. في حين تبلغ المساحة المأهولة بالسكان ١٪ من مساحة المحافظة، وتقسم مطروح إدارياً إلى ثمانية مراكز هما: الحمام، العلمين، الضبعة، مرسي مطروح، النجيلة، براني، السلوم، سيوة.

يبلغ عدد سكان محافظة مطروح ٤٨١,٧١٨نسمة، وهو ما نسبته ٠,٥٪ من إجمالي سكان جمهورية مصر العربية، طبقاً لتعداد الجهاز المركزي للتعبئة العامة والاحصاء ٢٠١٧م. وتعد محافظة مطروح واحدة من أقل محافظات الجمهورية كثافة للسكان، وذلك لوقوعها ضمن المحافظات الحدودية الصحراوية، حيث يقل بها تركز السكان.



شكل (٦) الموقع الفلكي والجغرافي لمحافظة مطروح وتقسيمها الإداري عام ٢٠٢٤م اعتماداً على الخرائط الطبوغرافية ١/٥٠٠٠٠، والجهاز المركزى للتعبئة العامة والاحصاء

١. مصادر البيانات، ومعالجتها

تم تحديد عوامل الملاءمة أو المعايير المؤثرة في تقييم المواقع المثلي لمزارع الرياح من خلال مراجعة مكثفة للأدبيات ذات الصلة، حيث أمكن الوقوف على بعض المعايير مثل: متوسط سرعة الرياح، وشبكة الكهرباء، والمطارات، وشبكة النقل، البعض الآخر من المعايير تم اشتقاقه من خلال أدوات التحليل المكاني في بيئة نظم المعلومات الجغرافية مثل: انحدار الأرض، ومنسوب الأرض. إجمالاً أمكن تحديد ١٥ معياراً وقيداً، وتم الحصول على البيانات اللازمة من عدة مصادر مختلفة داخل بيئة نظم المعلومات الجغرافية يوضح (جدول١) أنواعها ومصادر الحصول عليها، يُعتقد أنها تُسهم في تحديد اتجاهات صانعي القرار فيما يختص بعملية تحديد مواقع مزارع توربينات الرياح البرية.

جدول (١) مصادر البيانات للمعايير والقيود المستخدمة في اتخاذ القرار المكاني متعدد المعايير

القيود والمعايير	مصادر البيانات	الدقة المكانية (م٢×م٢)	نوع الطبقة
سرعة الرياح	Global wind atlas. https://globalwindatlas.info	٢٧٢×٢٧٢	Raster
المحميات الطبيعية	https://www.protectedplanet.net/en	-	Vector
خط الساحل والأراضي الرطبة والسبخات	GEOFABRIK // Maps & Data	-	Vector
الفوالق الأرضية	Geodynamics - Resources: 2019 The Release of the GEM Global Active Faults Database and Global Seismic Hazard Map: About	-	Vector
المناطق الاثرية	الجهاز المركزي للتعبئة العامة والإحصاء	-	Vector

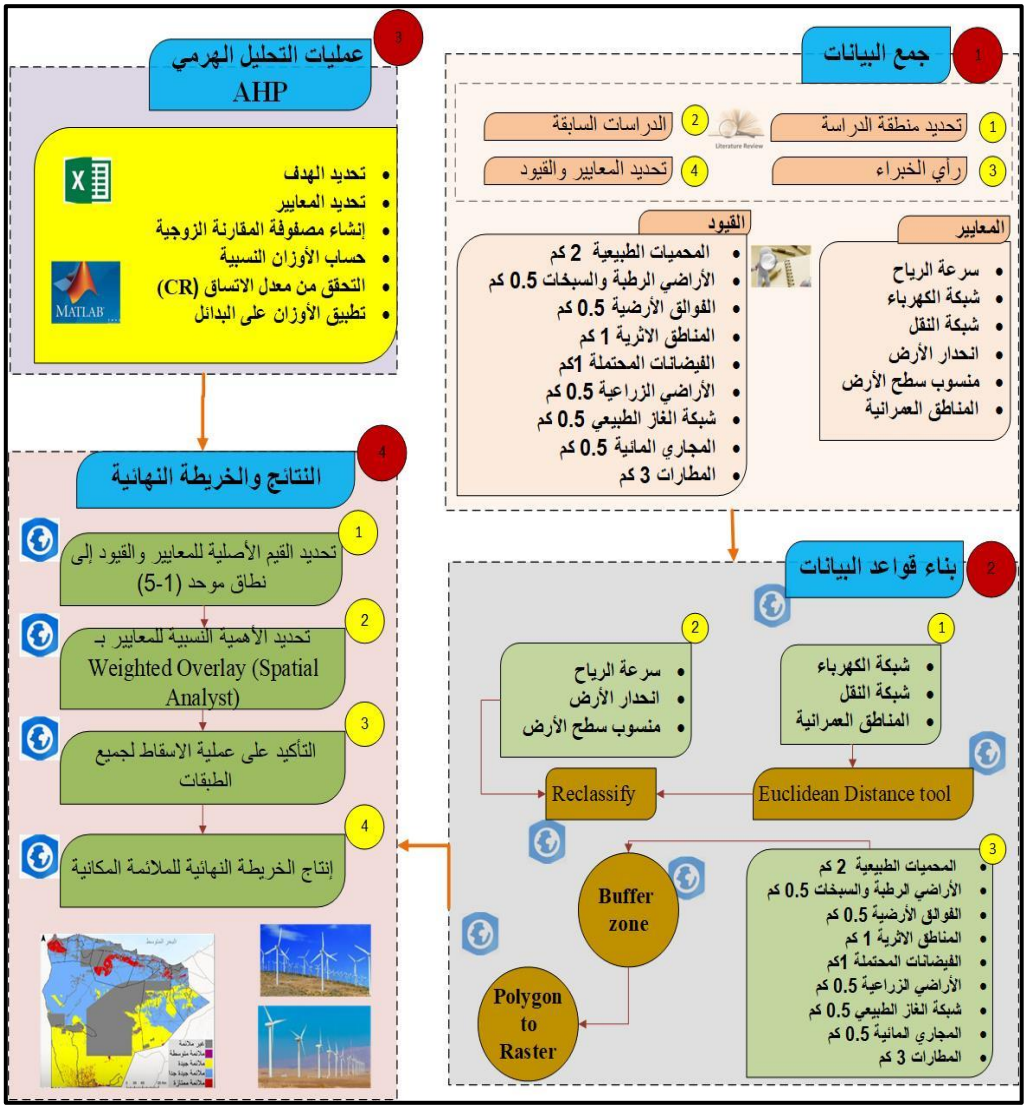
القيود والمعايير	مصادر البيانات	الدقة المكانية (م٢×م٢)	نوع الطبقة
الفيضانات المحتملة	https://www.floodsmart.gov/understanding-my-flood-zone	-	Vector
شبكة الكهرباء	GEOFABRIK // Maps & Data	-	Vector
شبكة النقل	GEOFABRIK // Maps & Data	-	Vector
انحدار الأرض	Gis interpolation	٣٠×٣٠	Raster
الأراضي الزراعية	Esri | Sentinel-2 Land Cover Explorer (arcgis.com)	١٠×١٠	Raster
شبكة الغاز الطبيعي	OpenStreetMap (OSM). https://www.openstreetmap.org	-	Vector
منسوب سطح الأرض	Gis interpolation	٣٠×٣٠	Raster
المجاري المائية	GEOFABRIK // Maps & Data	-	Vector
المناطق العمرانية	Esri | Sentinel-2 Land Cover Explorer (arcgis.com)	١٠×١٠	Raster
المطارات	https://overpass-turbo.eu/	-	Vector

قبل البدء في بناء نموذج الملاءمة المكانية لإجراء التحليل المكاني متعدد المعايير، كان من الضروري تنفيذ معالجة أولية للبيانات السابقة (شكل٧)، وذلك لضمان دقة وموثوقية النتائج. شملت هذه المعالجة التعامل مع البيانات الخام، مثل نموذج الارتفاع الرقم(DEM) ، الذي مر بعدد من الإجراءات قبل اشتقاق بعض المعايير المهمة من خلاله، ولعل أولها عملية تغيير المسقط المرجعي من

GCS_WGS_1984.prj إلى WGS_1984_UTM_ZONE_36N.prj، حيث استخدمت دالة Project Raster في بيئة نظم المعلومات الجغرافية. كما تضمنت تلك المرحلة أيضاً تحويل بعض البيانات المكانية من Vector model إلى Raster model. ومن ثمَّ توحيد حجم الخلية الشبكية لكل معيار "Raster cell" إلى ٢٠م×٢٠م٢، حتى يُمكن دمج تلك الطبقات أو المعايير في عملية النمذجة والتحليل المكاني. وفيما يلي بعض أهم أدوات التحليل المكاني التي تم استخدامها في تلك المرحلة:

- GIS Surface tool: استخدمت بعض الدوال في تلك المجموعة مثل: Slope، لاشتقاق بعض المعايير المهمة من خلال بيانات نموذج الارتفاع الرقمي الخاص بمنطقة الدراسة مثل: انحدار الأرض، ومنسوب سطح الأرض.
- GIS Conversion too: تم توظيف بعض أدوات هذه المجموعة مثل: الدالة To raster، بغرض تحويل بعض الطبقات من Vector model مثل: المحميات الطبيعية، والفوالق الأرضية، والأراضي الرطبة والسبخات إلى Raster model.
- GIS Euclidean distance: تم استخدام هذه الدالة لحساب المسافات الاقليدية لبعض معايير النمذجة مثل: شبكة الطرق، وشبكة الكهرباء، والمطارات.
- بعد الانتهاء من المرحلة السابقة، ولكي يُمكن اكمال عملية النمذجة المكانية للمعايير المختلفة، وكذلك اجراء عملية التحليل الطبقي "Overlay analysis" في بيئة نظم المعلومات الجغرافية، كان لابد من اتخاذ اجراء لتحويل قيم المعايير المختلفة "Raster maps" إلى وحدات متشابهة في القياس (Moeinaddini et al., 2010). تُعرف هذه العملية بالتقييس أو Standardization. ولإنجاز تلك العملية، تم عمل إعادة تصنيف "Reclassify" لجميع طبقات المعايير المستخدمة إلى درجات تتراوح بين ١، ٥. وتُشير الدرجة ١ إلى فئة ملاءمة منخفضة، بينما تُشير الدرجة ٥ إلى فئة ملاءمة ممتازة. بعد الانتهاء من الخطوات السابقة، أصبحت جميع طبقات

المعايير جاهزة للاستخدام في بيئة نظم المعلومات الجغرافية عن طريق توظيف منهجية التحليل الهرمي (AHP)، وبعد التأكيد على الاسقاط لجميع الطبقات تم استخراج خريطة الملاءمة المكانية.



شكل (٧): مخطط انسيابي، يوضح مراحل عمل الدراسة لنموذج الاختيار متعدد المعايير لمواقع مزارع الرياح

٢- بناء نموذج القيود المكانية وتحليلها

عند تخطيط وتحليل جدوى إنشاء مزارع الرياح، لابد من مراعاة بعض القيود الفنية، والاقتصادية، والبيئية (Sassi et all, 2023). حيث تكون المواقع التي تشملها تلك القيود بمثابة حواجز مكانية لا يُمكن أن تشملها عملية التحليل المكاني. إجمالاً أمكن تحديد ١٥ معياراً وقيداً، يُعتقد أنها تُسهم في تحديد اتجاهات صانعي القرار فيما يختص بعملية تحديد مواقع مزارع توربينات الرياح البرية. وكما يتبين من جدول (٢) تم تصنيفها إلى ٤ مجموعات فرعية.

وفيما يلي عرض لخصائص تلك القيود على النحو التالي:

القيود البيئة التي يحذر استخدامها لأسباب بيئية أو قانونية وتشمل بين طياتها ٦ عوامل هما: المحميات الطبيعية، الأراضي الرطبة والسبخات، الفوالق الأرضية، المناطق الأثرية، ومناطق الفيضانات شكل (٨،٩) وتكمن الأهمية الاعتبارية لهذه العوامل في كونها إحدى متطلبات التنمية المستدامة لمشروعات الطاقة، وبدونها تكون التنمية غير مكتملة الأركان (Noorollahi Y,et all,2016)، بناءً عليه، ونظراً للقيمة الحيوية والبيئية للمحميات الطبيعية، فقد تم استبعاد المناطق التي تقع في نطاق يصل إلى ٥٠٠متر من أي محمية طبيعية توجد في نطاق محافظة مطروح (Elkadeem et al,2022) لحماية الطيور المهاجرة والبيئة الساحلية. علاوة على ذلك تم استبعاد مناطق الأراضي الرطبة والسبخات والمناطق التي تقع في حدود ٥٠٠متر من الفوالق الأرضية؛ لتجنب المخاطر الجيولوجية المحتملة، والمناطق التي تقع في حدود ١كم من المناطق الأثرية ومناطق الفيضانات المحتملة.

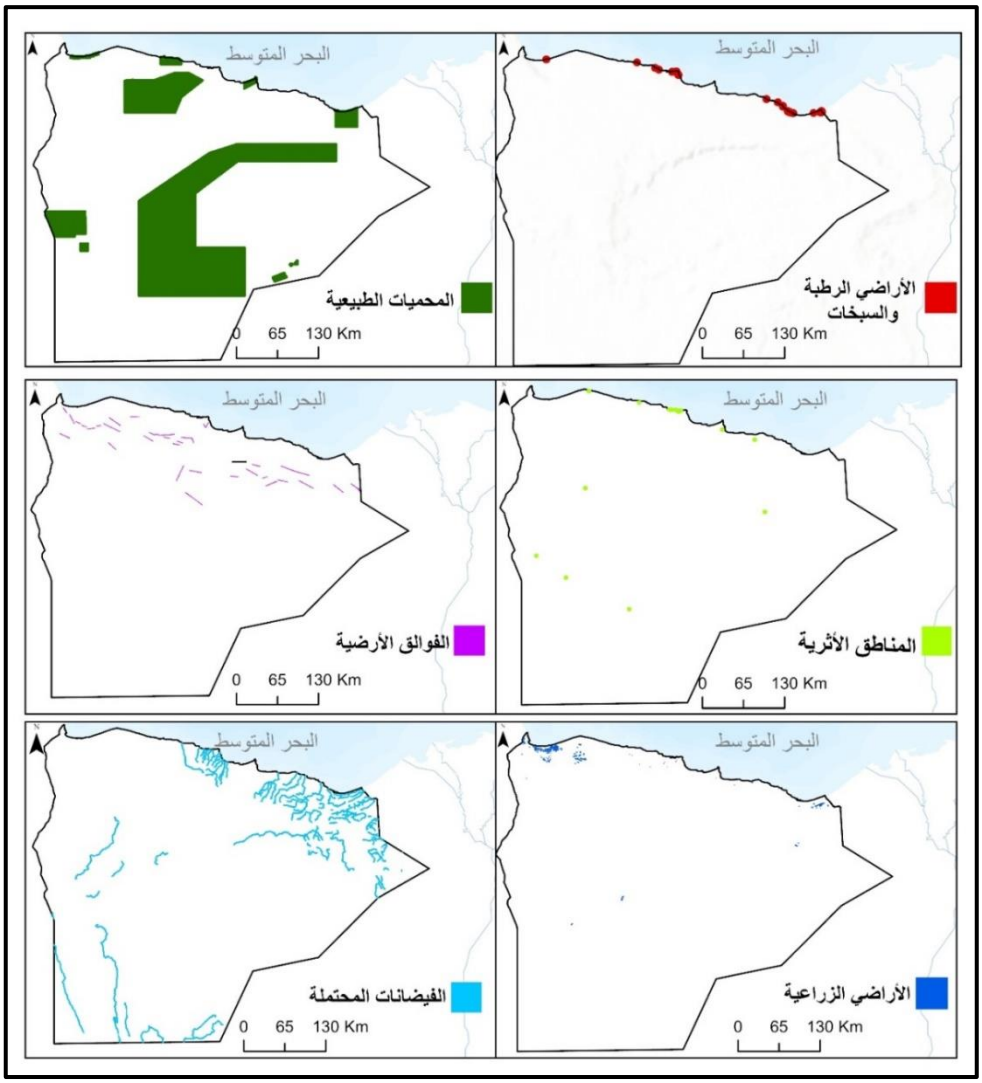
تتضمن القيود الاقتصادية: شبكة الغاز الطبيعي، والأراضي الزراعية، وقد تم استبعاد المناطق التي تقع في حدود ٥٠٠متر من كل منهما، في حين تم استبعاد عدد من القيود البيئية الاقتصادية مثل المناطق العمرانية ، فعلى الرغم من أن القرب من

المناطق الحضرية، يضمن إمداد تلك المناطق بمصادر الطاقة، ويقلل من التكلفة الاقتصادية لنقل وتوزيع الطاقة إلى مسافات طويلة، إلا أن قرب تلك المزارع من المناطق الحضرية قد يشكل عائقا في التنمية العمرانية المستقبلية (Hossein et al, 2018)، لذلك فإن المسافة من المناطق السكنية ضرورية للغاية لتجنب المضايقات التي تسببها للسكان من التلوث الضوضائي والتدخلات البصرية (Ali et all,2019,) ، من ثم تم استبعاد المناطق التي تقع في حدود ٢كم من المناطق السكنية، إضافة إلى ذلك تم استبعاد المناطق التي تقع في نطاق ٥٠٠مترا من المجاري المائية؛ لتجنب تلوث المياه وتوفير الحماية من الكوارث الطبيعية (fida et all,2022)، كما تم استبعاد المناطق التي تقع في حدود ٣كم من المطارات؛ منعاً لحدوث تداخل كهرومغناطيسي بين أجهزة التوربينات وأجهزة الرادار بالمطارات، مما يشكل خطورة على مسارات الطائرات وعمليات الهبوط والإقلاع (بدوي،٢٠٢١).

جدول (٢) المعايير والقيود المكانية المستخدمة في عملية اتخاذ القرار المكاني متعدد المعايير لتحديد مزارع الرياح بمحافظة مطروح

م	المعايير والقيود		قيود	معايير	القيمة	المرجع
١	المناخية	سرعة الرياح (م/ث)	✔	✔	>٤م /ثانية	Taweekun et al,2019 & Doorga et all,2022
٢	البيئية	المحميات الطبيعية	✔	×	>٢كم	Uyan,2013 & Elkadeem et al,2022& Fida et al2022
٣		خط الساحل والأراضي الرطبة والسبخات	✔	×	> ٠,٥كم	Noorollahi & Y,et all,2016 Mohamed A Abdulrazak ,2017
٤		الفوالق الأرضية	✔	×	> ٠,٥كم	Moradi S,et all,2020 & Noorollahi Y,et all,2016
٥		المناطق الاثرية	✔	×	> ١كم	خبير طاقة

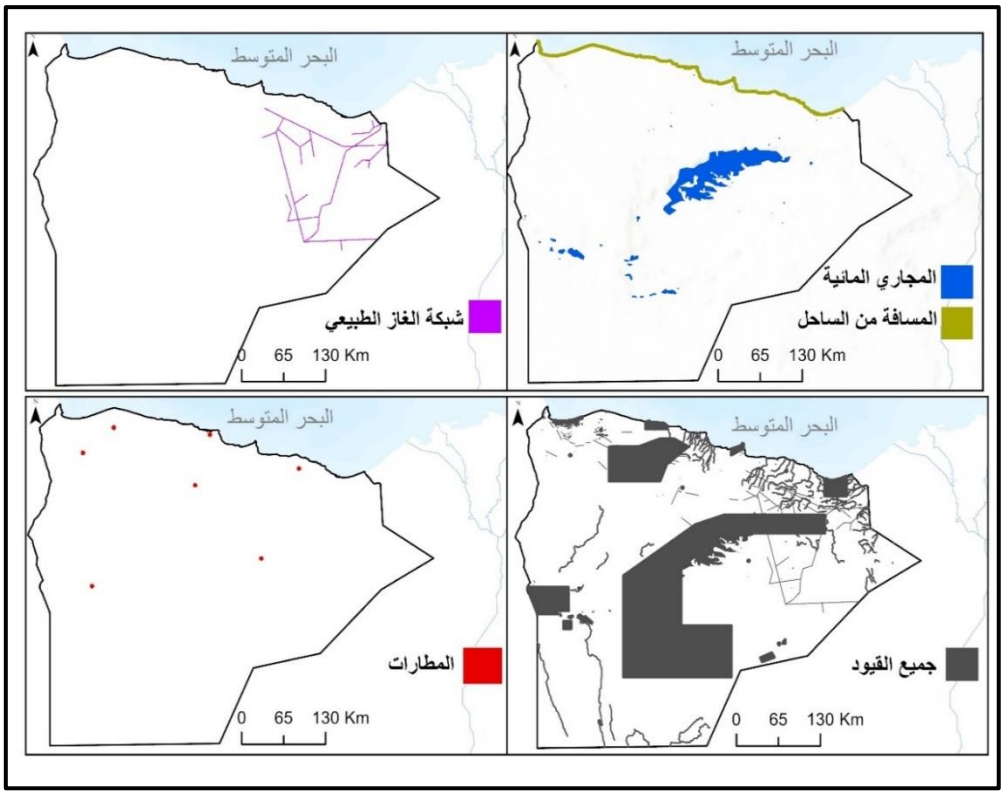
م	المعايير والقيود		قيود	معايير	القيمة	المرجع
٦		الفيضانات المحتملة	✔	×	< ١كم	Asakereh et al,2017& Al Garni HZ.et al,2017
٧	الاقتصادية	شبكة الكهرباء (كم)	✔	✔	< ٠,٥كم	Soha et al,2020& Han et al,2020& Al Garni et al,2017
٨		شبكة النقل (كم)-	✔	✔	< ٠,٥كم	Al Garni et al,2017& Tim Höfer et all,2016& Zoghi et al,2017
٩		انحدار الأرض %	✔	✔	< ١٥٪	Hossein et al 2018 & Zoghi, et al,2017& Yousefi et al,2018
١٠		الأراضي الزراعية	✔	×	< ٠,٥كم	Saraswat et al,2021& Al Garni et al,2017 & Uyan,2013
١١		شبكة الغاز الطبيعي	✔	×	< ٠,٥كم	Nadizadeh et al,2021& Al Garni et al,2017& Elkadeem et al,2022
١٢		منسوب سطح الأرض (م)	✔	✔	< صفر	Hossein et al 2018 & Mensour et al 2019
١٣	البيئية الاقتصادية	المجاري المائية	✔	×	< ٠,٥كم	Hossein et al 2018&Aydin et al,2013& Elkadeem et al,2022
١٤		المناطق العمرانية (كم)	✔	✔	< ٢كم	Hossein et al 2018&Aydin et al,2013& Elkadeem et al,2022
١٥		المطارات	✔	×	< ٣كم	Elkadeem et al,2022



المصدر: من إعداد الباحثان ببرنامج ARC PRO اعتماداً على جدول ٢.

شكل (٨) القيود المكانية في عملية اتخاذ القرار المكاني متعدد المعايير لمواقع مزارع الرياح البرية

ويوضح الشكل (٩) إجمالي مساحة الأماكن غير الملاءمة لإقامة مزارع الرياح في محافظة مطروح، وبلغ مجموع مساحتها ٥٨٠٠٣,٨٢كم٢، وهو ما يمثل ٣٦,٥٩٪ من إجمالي مساحة محافظة مطروح، في حين أن ٦٣,٤١٪ من مساحة المحافظة يعد ملائماً من الناحية النظرية بدرجات متفاوتة، ما يدل على وفرة إمكانات طاقة الرياح في غالبية أنحاء المحافظة.



المصدر: من إعداد الباحثان ببرنامج ARC PRO اعتماداً على جدول٢.

شكل (٩) تابع القيود المكانية في عملية اتخاذ القرار المكاني متعدد المعايير لمواقع مزارع الرياح البرية

٣- تحليل معايير الملائمة المكانية

جدول (٣) درجات وفئات الملاءمة للمعايير المستخدمة في التحليل المكاني متعدد المعايير

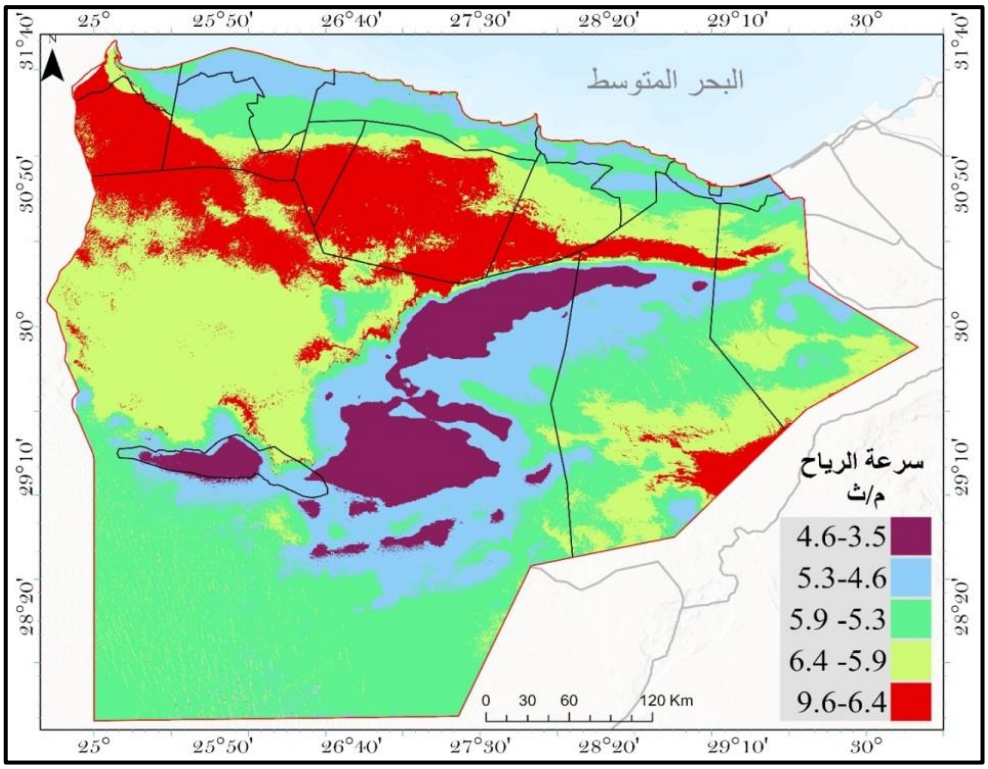
المعايير	ملائمة منخفضة	متوسطة	جيدة	ملائمة جيد جدا	ملائمة ممتازة
سرعة الرياح (م/ث)	٤- ٤,٥	٤,٥ - ٥	٥ - ٥,٥	٥,٥ - ٦	٦ <
شبكة الكهرباء (كم)	١٥٠<	١٥٠ - ٥٠	٥٠ - ٣٠	٣٠ - ١٠	١٠ - ٠,٥
شبكة النقل (كم)-	١٠٠<	١٠٠ - ٥٠	٥٠ - ٣٠	٣٠ - ١٠	١٠ - ٠,٥
انحدار الأرض %	١٥ - ٨	٨ - ٦	٦ - ٤	٤-٢	٢ - صفر
منسوب سطح الأرض (م)	١١٠<	١١٠ - ٩٠	٩٠ - ٦٠	٦٠ - ٣٠	٣٠ - صفر
المناطق العمرانية (كم)	١١٠<	١١٠-٩٠	٩٠-٦٠	٦٠- ٣٠	٣٠- ٢

المصدر: من إعداد الباحثان ببرنامج ARC GIS اعتماداً على راي الخبراء.

يتناول هذا الجزء أهم خصائص معايير الملاءمة التي استخدمت في عمل التحليل المكاني متعدد المعايير كما يوضحه جدول (٣) بغرض إنشاء خريطة الملاءمة المكانية لمواقع مزارع طاقة الرياح في محافظة مطروح على النحو التالي:

❖ **المعايير المناخية:**

تُعتبر سرعة الرياح من أهم المعايير التي يتم التركيز عليها في معظم الدراسات. فهي العامل الأبرز في تحديد الطاقة المحتملة لموارد الرياح، ووفقاً لدراسة (Taweekun et all,2019) فإنه يُنصح بإنشاء توربينات الرياح البرية في المناطق التي تبلغ سرعة الرياح بها < م/ ث، وذلك لضمان الجدوى الفنية والاقتصادية من المشروع. بناءً عليه سوف يتم استبعاد المناطق التي يقل بها متوسط سرعة الرياح عن الرقم المذكور أعلاه. ويظهر الشكل (١٠) أن محافظة مطروح تتمتع بقدر عال من الرياح، حيث تتراوح سرعة الرياح بين (٣,٥م/ ث)، (٩,٦ م/ ث) ومتوسط يبلغ حوالي ٦,٥م/ ث. وكما يتبين من الشكل (١١) تعد المناطق الشمالية الغربية والغربية منها الأكثر ملاءمة، في حين تقل درجات الملاءمة بالمناطق الوسطي التى تبلغ سرعات الرياح بها ما بين ٣,٥– ٤,٦م/ ث.



المصدر: من إعداد الباحثان اعتماداً على Global wind atlas. https://globalwindatlas.info

شكل (١٠) المعدلات السنوية لسرعة الرياح (م/ ث) في محافظة مطروح

❖ المعايير الاقتصادية

عند تحديد المواقع المناسبة لإنشاء مزارع الرياح، تُعتبر التكلفة من أهم المعايير التي يجب مراعاتها. ولتحقيق جدوى اقتصادية أكبر، يتم التركيز على تقليل تكاليف الإنشاء وربط المحطات بشبكة الكهرباء. فيما يلي استعراض للمعايير المستخدمة:

أ- المسافة من شبكة الطرق:

يُفضل إنشاء توربينات الرياح بالقرب من الطرق الموجودة لتقليل تكاليف البناء والنقل. وفقًا لدراسة (Tegou et,all,2010)، تم تحديد الحد الأقصى للمسافة المقبولة من الطرق الرئيسية بـ ٢٥٠٠ متر. تم تصنيف منطقة الدراسة إلى خمس فئات بحيث تكون

المواقع الأقرب إلى الطرق أكثر ملاءمة. وتم استبعاد نطاق بعمق ٥٠٠ متر حول الطرق بناءً على القيود التشريعية. وكما يتبين من الشكل(١١) يلاحظ وجود مناطق كبيرة ملاءمة بدرجة ممتازة وجيده جداً في المناطق الشمالية، والشرقية، والمناطق الوسطي حيث تتمتع المحافظة بشبكة جيدة من الطرق البرية.

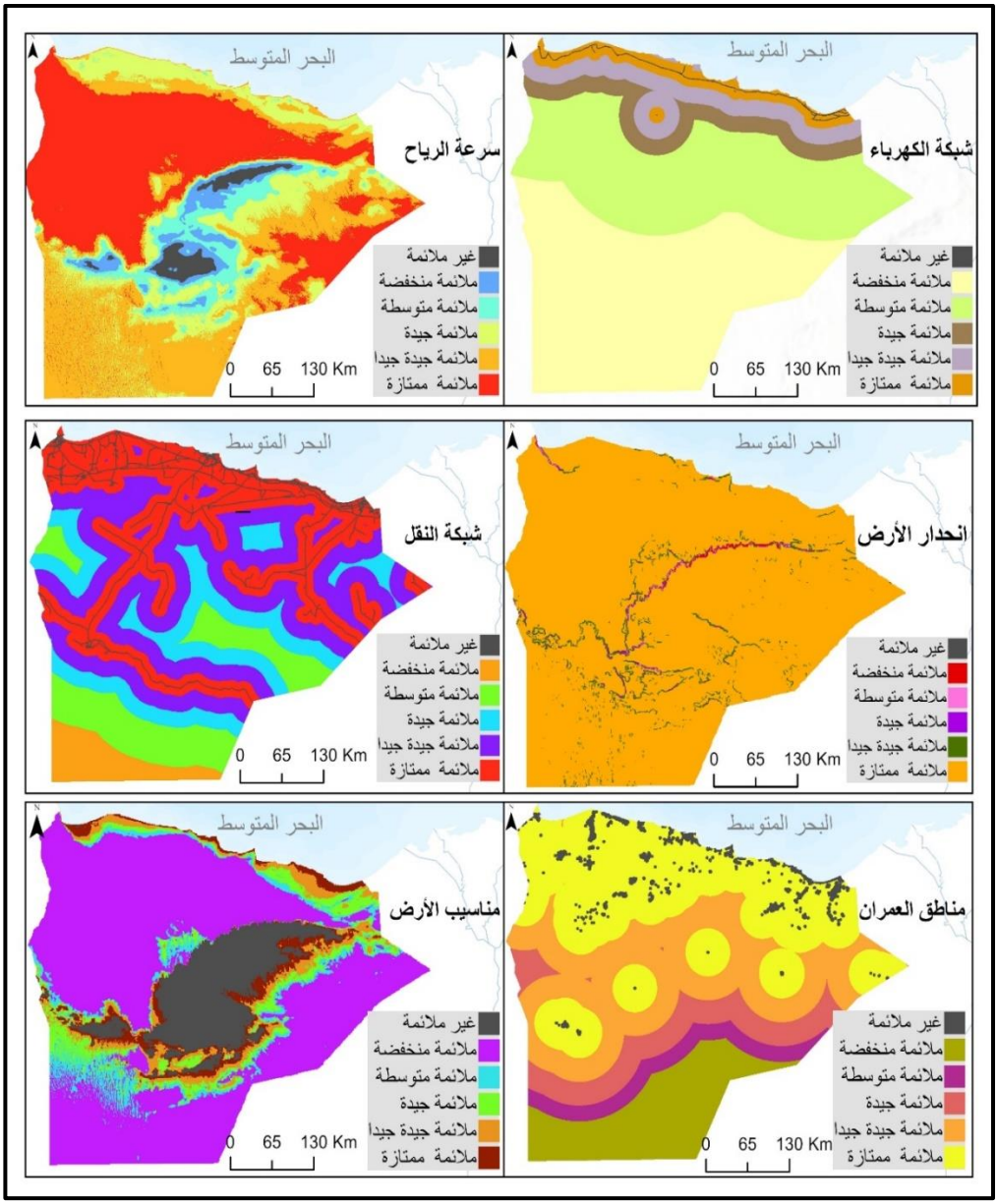
ب – المسافة من الشبكة القومية للكهرباء:

لخفض تكاليف تمديد الكابلات وتقليل الفقدان الكهربائي الناتج عن النقل لمسافات طويلة، يُنصح ببناء مزارع الرياح بالقرب من شبكة الكهرباء. حددت دراسة (Tegou et,all,2010) الحد الأقصى المقبول للمسافة من شبكة الكهرباء بـ ٢٠٠٠ متر. تم تصنيف منطقة الدراسة إلى خمس فئات، بحيث تحصل المواقع الأقرب إلى شبكة الكهرباء على درجات ملاءمة أعلى. وتم استبعاد نطاق بعرض ٥٠٠ متر حول شبكة الكهرباء كإجراء وقائي وفقاً لدراسة لعدد من الدراسات. وكما يتبين من الشكل (١١) يلاحظ أن المناطق ذات درجات الملاءمة الممتازة تتركز في الجزء الشمالي من المحافظة، في حين تقل درجات الملائمة كلما اتجهنا ناحية الجنوب.

ج . انحدار التضاريس

وفقًا لدراسة (Williamson 2012 & Bartnicki)، فإن التوربينات التي تُوضع على قمم المنحدرات الشديدة قد لا تتعرض للرياح بزاوية عمودية، مما يؤدي إلى زيادة مستوى الإجهاد والتآكل في التوربينات. بالإضافة إلى ذلك، فإن الزوايا التي تتجاوز ٥ درجات قد تؤدي إلى زيادة في اضطراب الرياح، مما يؤثر على عدم استقرار واضطراب عمل العنفات الخاصة بالتوربينات، كما أن البناء على المنحدرات المرتفعة يزيد من تكاليف المشروع. ويتراوح معدل انحدار السطح في محافظة مطروح من صفر إلى ١٥,٤٪، وقد تم إعادة تصنيف درجات الانحدار إلى خمسة قيم تتراوح من صفر إلى أقل من ١٥٪، بحيث تكون القيم الصغيرة هي لأكثر ملاءمة والقيم الكبيرة أقل ملاءمة، في حين تم استبعاد الأراضي التى تزيد درجة انحدارها عن ١٥٪. ويظهر

الشكل (١١) أن أغلب الأراضي داخل محافظة مطروح يتراوح انحدارها من صفر إلى أقل من ٤٪، وبذلك فهي مناسبة جداً لإقامة توربينات الرياح البرية.



المصدر: من إعداد الباحثان ببرنامج ARC PRO،اعتماداً على جدول ٣.

شكل (١١) درجات وفئات الملاءمة للمعايير

❖ **المعايير الاقتصادية البيئية**

المسافة من المناطق الحضرية

تعد المسافة من المناطق الحضرية أحد المعايير الاقتصادية البيئية المهمة التى يجب أخذها في الاعتبار عن اختيار مواضع مزارع الرياح البرية، حيث يسبب اقتراب التوربينات من المناطق السكنية الضوضاء والإزعاج للسكان، لما يصدر من صوتا مرتفعا عند تشغيلها، إضافة إلى التلوث البصري وتشوه المنظر الجمالي، علاوة على ما سبق، فإن وجود مسافة آمنة من المناطق الحضرية، يقلل من الاثار السلبية التى من الممكن أن تسببها تلك المحطات للسكان (السيد وأخرون،٢٠٢٤)، كذلك للسماح بالتوسع العمراني المستقبلي وإنشاء الأحزمة الخضراء، لذا فقد استبعدت المناطق التى تقع في حدود ٢كم من المناطق السكنية. ويوضح الشكل (١١) درجات الملائمة المكانية لمزارع الرياح البرية بناءً على هذا المعيار حيث يتبين وجود مساحات تمتاز بدرجة ملائمة عالية، وتشغل المناطق التى تقع فى حدود تتراوح من ٢كم إلى ٣٠كم من الكتلة السكنية وتشمل المناطق الشمالية، والشمالية الشرقية، والشمالية الغربية، والنطاقات الوسطى التى توجد بها تجمعات عمرانية ، في حين تنخفض درجات الملاءمة وفقاً لها المعيار في الأجزاء الجنوبية من محافظة مطروح التى تبتعد عن الكتلة السكنية مسافة تزيد عن ١١٠كم.

٤ – توحيد المعايير وتحديد الأوزان (Criteria Standardization and Weighting)

يُعد توحيد المعايير وتحديد الأوزان خطوة حاسمة في عملية التحليل المكاني متعدد المعايير (MCDE) لتقييم ملاءمة المواقع لمزارع الرياح البرية. وتهدف هذه الخطوة إلى تحويل المعايير المختلفة إلى مقياس مشترك ومنح كل معيار وزنًا يعكس أهميته النسبية في عملية اتخاذ القرار، وبالاعتماد على الدراسات السابقة مع أخذ رأي الخبراء تم استخلاص الأوزان بطريقة AHP، وهو ما يوضحه جدول (٤) فيأتي

المعدل السنوي لسرعة الرياح (م/ ث) في المرتبة الأولي بوزن نسبي ٤٠,١٪، يلي ذلك المسافة من الشبكة القومية للكهرباء بوزن نسبي ٢١,٨٪،وذلك لأولويتها في اتخاذ القرار بشأن اختيار مواقع مزارع الرياح البرية، وجاء انحدار الارض بـــــوزن ١٣,١٪، حيث يتطلب إقامة توربينات الرياح أراضي تقل درجة انحدارها عن ١٥٪، ثم شبكة النقل بوزن ١١,٨٪، ومنسوب الارض بوزن ٧,٥٪، ثم جاء في المرتبة الأخيرة البعد من المناطق السكنية، حيث تتمتع المحافظة بمساحات واسعه خارج نطاق الكتل العمرانية.

جدول (٤) الوزن النسبي للمعايير التي تم الاعتماد عليها عن طريق التحليل الهرمي AHP

مسلسل	المعيار	الوزن النسبي (%)
١	سرعة الرياح	٤٠,١
٢	شبكة الكهرباء	٢١,٨
٣	شبكة النقل	١١,٨
٤	انحدار الأرض	١٣,١
٥	منسوب سطح الأرض	٧,٥
٦	المناطق العمرانية	٥,٧
مجموع الاوزان		١٠٠٪

المصدر: من إعداد الباحثان اعتماداً على راي الخبراء وطريقة AHP.

٥ – نتائج الدراسة والمناقشة

يكشف تحليل بيانات الجدول (٥) لتوزيع المساحات الملاءمة وغير الملاءمة لإنشاء مزارع الرياح البرية في محافظة مطروح، على مستوى وحداتها الإدارية، عن امتلاك المحافظة موارد وفيرة من طاقة الرياح، مما يجعلها منطقة مثالية لاستغلال هذه الطاقة المتجددة، وتتفاوت هذه الموارد في توزيعها عبر الوحدات الإدارية للمحافظة على النحو التالي:

- تتركز معظم المساحات غير الملائمة لإقامة مزارع الرياح البرية في مركز سيوة، حيث تشكل ٦٢,٣١٪ من إجمالي هذه المساحات. ويستحوذ الظهير الصحراوي على ٥٨,٩٦٪ منها، بينما تؤول النسبة المتبقية، والتي تبلغ ٣,٣٥٪، إلى قسم سيوة . كما أن الساحل الشمالي وقسم مارينا العلمين السياحية غير ملائمين تمامًا لإنشاء مزارع طاقة الرياح؛ تجنباً لمسارات هجرة الطيور والأنشطة البحرية والسياحية المختلفة.
- بلغت المساحات ذات الملاءمة المتوسطة لإنشاء مزارع الرياح البرية في محافظة مطروح ١٣٣٤,٨٠ كم٢، ما يعادل ١,٣٪ من إجمالي المساحات الملائمة بالمحافظة. وقد تركز توزيعها في الظهير الصحراوي لقسم سيوة، الذي استحوذ بمفرده على ١٢٨٥,٦٠ كم٢، أي ما نسبته ٩٦.٣٢٪ من إجمالي هذه المساحات، بينما توزعت النسبة المتبقية بواقع ٢,٦٦٪ في الظهير الصحراوي لقسم العلمين، و١,٠٢٪ داخل قسم سيوة.
- تخلو الأقسام الإدارية في محافظة مطروح من أى مواقع ملائمة لإنشاء مزارع الرياح ذات الملاءمة الجيدة، باستثناء قسم سيوة، حيث وُجدت بعض المواقع المناسبة، لكنها محدودة المساحة، إذ بلغت ٣٩٠,٨٩ كم٢. في المقابل، استحوذ الظهير الصحراوي للأقسام الإدارية على ٩٩,١٩٪ من إجمالي المساحات ذات الملاءمة الجيدة، حيث استأثر الظهير الصحراوي لقسم مطروح بالحصة الأكبر، بمساحة ٣٢,٨٨٩.٨٧ كم٢، ما يعادل ٧٠,٥٪ من إجمالي هذه المساحات. وجاء بعده الظهير الصحراوي لقسم العلمين بنسبة ١٩,٥٢٪، بينما توزعت النسبة المتبقية بين الظهير الصحراوي لقسم النجيلة بنسبة ٥,٦٠٪، وأخيرًا الظهير الصحراوي لسيدي براني بنسبة ٠.٠١٪.

- تتميز جميع الوحدات الإدارية بوجود مساحات ملائمة "جيدة جدًا" لإقامة مزارع الرياح، مع تفاوتها من وحدة إدارية إلى أخرى. حيث يستحوذ الظهير الصحراوي لقسم سيوة على المساحة الأكبر، وتبلغ ٢٢٨٧٨,٦٧كم٢ ما يعادل ٤٥,٤٩٪ من إجمالي هذه الفئة. يليه الظهير الصحراوي لقسم العلمين بنسبة ١٤,٧٥٪، بينما يحتل الظهير الصحراوي لقسم مطروح المرتبة الثالثة بمساحة ٥٢٦٤,٨١كم٢ أي ١٠,٤٧٪ من إجمالي المساحات المصنفة كملائمة جدًا. يليه بفارق بسيط الظهير الصحراوي لقسم الحمام ٥٠٩٠كم٢.
- يتصدر مركز مطروح مراكز المحافظة من حيث توافر المساحات المثلى (ذات الملاءمة الممتازة) لإنشاء مزارع الرياح البرية، حيث تبلغ مساحتها ٢٢٥٥,٥٤ كم٢، أي ما يعادل ٥١,٥٣٪ من إجمالي المساحات الملائمة. وتتوزع هذه النسبة بواقع ٥٠,٠١٪ في الظهير الصحراوي لقسم مطروح، و١,٥٪ داخل قسم مطروح نفسه. في حين جاء مركز السلوم في المرتبة الثانية للمساحات الممتازة الملاءمة بنسبة بلغت ٢٨,٥١٪، يقع معظمها ٢٢,١٧٪ بمنطقة الظهير الصحراوي، والنسبة المتبقية ٦,٣٤٪ بقسم السلوم، وبالتالي يستأثر مركزى مطروح والسلوم على ٨٠,٠٤٪ من المساحات الممتازة الملاءمة. ما يشير أن السلوم ومرسى مطروح يمكن أن يكونا مواقع واعدة لمشاريع طاقة الرياح عالية الكفاءة. إضافة إلى ذلك توجد عدة مواقع ذات ملائمة ممتازة تبلغ نسبتها ١٩,٩٦٪ من إجمالي هذه المساحات تتوزع على باقي مراكز المحافظة، أغلبها بالظهير الصحراوي لقسمي العلمين والحمام.

جدول (٥) التوزيع النسبي لمساحات الأراضي الملاءمة وغير الملاءمة على مستوي الوحدات الإدارية بمحافظة مطروح

الوحدة الإدارية	غير ملائمة	%	ملائمة منخفضة	%	ملائمة متوسطة	%	ملائمة جيدة	%	ملائمة جيدة جدا	%	ملائمة ممتازة	%
الساحل الشمالى	١٢,٤٨	٠,٠٢	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠
ظهير صحراوى قسم الحمام	٢٦٠٠,١٧	٤,٤٨	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٢٤٨٧,٢٩	٥,٦٠	٥٠٩٠,٠٤	١٠,١٢	١١٨,٥٩	٢,٧٠
ظهير صحراوى قسم النجيله	١٥٠١,٢٤	٢,٥٩	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	١٢٧,٩٥	٠,٢٥	٧٤,٩٠	١,٧١
ظهير صحراوى قسم السلوم	٤٨٩,٩٧	٠,٨٤	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	١٢٦٠,٨١	٢,٥١	٩٧٠,٥٧	٢٢,١٧
ظهير صحراوى قسم الضبعه	١٢١٠,٨٧	٢,٠٩	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٣,١٢	٠,٠١	٢٣٩٠,٥٤	٤,٧٥	٢٠٩,٠٩	٤,٧٧
ظهير صحراوى قسم العلمين	٥٧٣٣,٢٠	٩,٨٨	٠,٠٠	٠,٠٠	٣٥,٥٧	٢,٦٦	٨٦٨٥,٨٠	١٩,٥٢	٧٤٢١,٢٩	١٤,٧٥	٣٠٥,٨٤	٦,٩٨
ظهير صحراوى قسم سيدى برانى	١٩٧٥,٤١	٣,٤١	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٦,٨٠	٠,٠١	٢٠٥٣,٤٩	٤,٠٨	٩,٣٦	٠,٢١
ظهير صحراوى قسم سيوه	٣٤١٩٨,٨٥	٥٨,٩٦	٠,٠٠	٠,٠٠	١٢٨٥,٦٠	٩٦,٣٢	٣٢٨٨٩,٨٧	٧٤,٠٦	٢٢٨٧٨,٦٧	٤٥,٤٩	٠,٠٠	٠,٠٠
ظهير صحراوى قسم مرسى مطروح	٢٤٨٤,٤٣	٤,٢٨	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٥٢٦٤,٨١	١٠,٤٧	٢١٩٠	٥٠,٠٣
قسم الحمام	٧١٤,٦٧	١,٢٣	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٧١,٧٨	٠,١٤	٢٥,٩٥	٠,٥٩
قسم السلوم	٥٦٤,٨٧	٠,٩٧	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٢٦٨,٣٩	٠,٥٣	٢٧٧,٧٥	٦,٣٤
قسم الضبعه	٩٩٠,٤٩	١,٧١	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٨٨٣,٤٦	١,٧٥	٩٩,٨٧	٢,٢٨
قسم سيدى برانى	١٣٣٨,٨٣	٢,٣١	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	١٣٠٣,٨٢	٢,٥٨	٢٨,٨٥	٠,٦٦
قسم سيوه	١٩٤٤,٤٠	٣,٣٥	٠,٠٠	٠,٠٠	١٣,٦٣	١,٠٢	٣٩٠,٨٩	٠,٨١	٤٥,٥٩	٠,٠٩	٠,٠٠	٠,٠٠
قسم مارينا العلمين السياحيه	٤٣,٦٩	٠,٠٨	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠
قسم مرسى مطروح	٢٢٠٠,٢٧	٣,٧٩	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	١٢٥١,٤٥	٢,٤٩	٦٥,٥٤	١,٥٠
مجموعة	٥٨٠٠٣,٨٤	١٠٠	٠,٠٠	٠,٠٠	١٣٣٤,٨٠	١٠٠	٤٤٤٦٣,٧٧	١٠٠	٥٠٣١١,٥٦	١٠٠	٤٣٧٧,١٢	١٠٠

المصدر: من إعداد الباحثان اعتماداًعلى نتائج الخريطة النهائية للملائمة المكانية.

- **تحليل خريطة الملاءمة المكانية**

من قراءة وتحليل أرقام جدول (٦) للتوزيع النسبي لدرجات وفئات الملاءمة المكانية لمواقع مزارع الرياح البرية بمحافظة مطروح والشكل (١٢) يتبين الآتي:

جدول (٦) التوزيع النسبي لدرجات وفئات الملاءمة المكانية لمواقع مزارع الرياح البرية بمحافظة مطروح

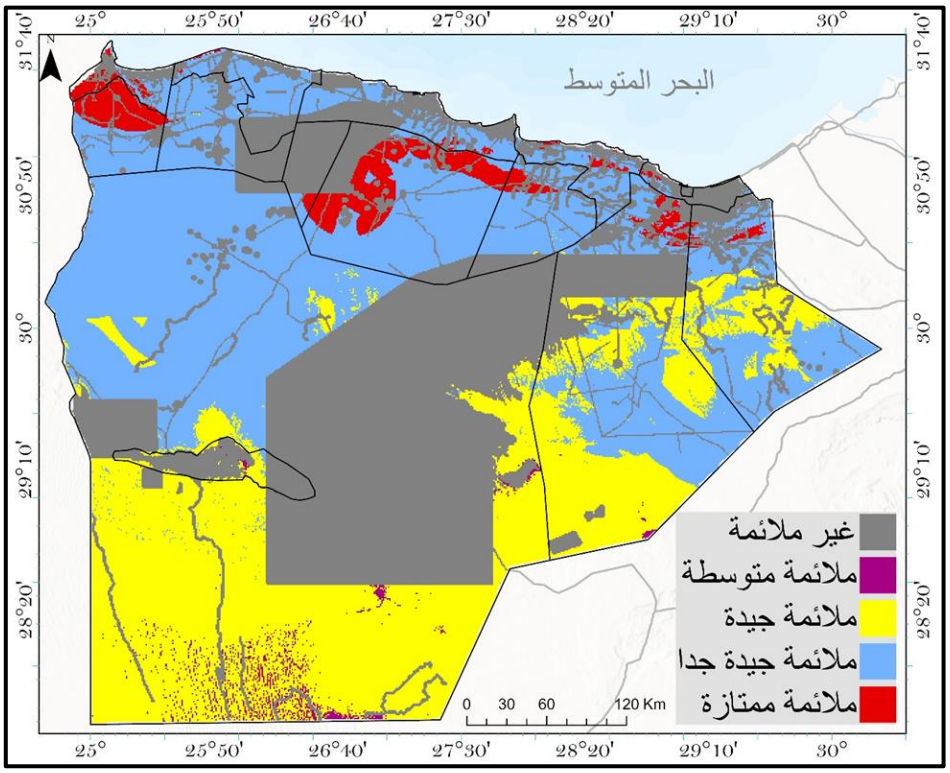
درجة الملائمة	فئة الملائمة	المساحة كم ٢	%
0	غير ملائمة	٥٨٠٠٣,٨٢	٣٦,٥٩
١	ملائمة منخفضة	صفر	صفر
٢	ملائمة متوسطة	١٣٣٤,٨	٠,٨٤
٣	ملائمة جيدة	٤٤٤٦٣,٧٩	٢٨,٠٥
٤	ملائمة جيدة جدا	٥٠٣١١,٦٦	٣١,٧٤
٥	ملائمة ممتازة	٤٣٧٧,٠٣	٢,٧٦
مجموع	–	١٥٨٤٩١,١٢	١٠٠

المصدر: من إعداد الباحثان على نتائج الخريطة النهائية للملائمة المكانية.

- بلغ إجمالي المساحات غير الملائمة لإنشاء مزارع الرياح البرية في محافظة مطروح ٥٨,٠٠٣.٨٤ كم٢، ما يمثل ٣٦,٥٩٪ من إجمالي مساحة المحافظة. ويعني ذلك أن المساحة المتبقية، والتي تبلغ ١٠٠,٤٨٧.٤ كم٢ بنسبة ٦٣,٤١٪، تُعد ملائمة نظريًا بدرجات متفاوتة. تصدّرت الفئة ذات الملاءمة بدرجة "جيد جدًا" المرتبة الأولى، حيث بلغت مساحتها ٥٠,٣١١.٦٦ كم٢، ما يعادل ٣١,٧٤٪ من إجمالي مساحة المحافظة، ونحو ٥٠,١٪ من إجمالي المساحات الملائمة لإنشاء مزارع الرياح. وتتركز هذه المساحات بشكل رئيسي في النصف الشمالي من المحافظة.
- احتلت الفئة ذات الملاءمة بدرجة "جيدة" المرتبة الثانية، بمساحة بلغت ٤٤,٤٦٣.٧٩ كم٢، أي ما يعادل ٢٨,٠٥٪ من إجمالي مساحة المحافظة، ونحو ٤٤,٢٪ من إجمالي المساحات الملائمة لإنشاء مزارع الرياح. وتتوزع هذه المساحات

في الأجزاء الجنوبية والشرقية، بالإضافة إلى بعض المناطق المتفرقة في وسط المحافظة.

- استحوذت الفئة ذات الملاءمة بدرجة "ممتازة" على مساحة قدرها ٤,٣٧٧.٠٣ كم٢، ما يمثل ٢.٧٦٪ من إجمالي مساحة المحافظة، ونحو ٤.٤٪ من إجمالي المساحات الملائمة لإنشاء مزارع الرياح في مطروح. وتتوزع هذه المساحات في مناطق متفرقة بالأجزاء الشمالية الغربية، والشمالية الشرقية، والشمالية من المحافظة.
- أما الفئة ذات الملاءمة بدرجة "متوسطة"، فقد بلغت مساحتها ١,٣٣٤.٨ كم٢، أي ما يعادل ٠.٨٤٪ من إجمالي مساحة المحافظة، ونحو ١.٣٪ من إجمالي المساحات الملائمة لمزارع الرياح البرية. في المقابل، لم تُسجل أي مساحات تُصنف ضمن فئة الملاءمة بدرجة "منخفضة" داخل المحافظة.



المصدر: من عمل الباحثان اعتماداً على نموذج الملائمة النهائية وطريقة AHP.

شكل (١٢) خريطة الملاءمة المكانية النهائية المقترحة لإقامة مزارع الرياح البرية بمحافظة مطروح

٧- الخاتمة

تُعتبر الطاقة المحرك الأساسي للتنمية الاقتصادية والصناعية على مستوى العالم. ولعقود طويلة، اعتمدت الدول بشكل رئيسي على الوقود الأحفوري كمصدر تقليدي للطاقة. ووفقًا لتقرير الوكالة الدولية للطاقة (IEA) لعام ٢٠١٥م، يُسهم الوقود الأحفوري في تلبية حوالي ٨٠٪ من إجمالي الطلب العالمي على الطاقة، كما أنه مسؤول عن ٩٠٪ من الانبعاثات الكربونية المرتبطة بالطاقة على هيئة غاز ثاني أكسيد الكربون (CO2). ومع تصاعد المخاوف البيئية واستمرار نضوب احتياطيات الوقود الأحفوري، إلى جانب الارتفاع المستمر في أسعار الطاقة، أصبح البحث عن مصادر طاقة متجددة وبديلة ضرورة ملحّة لتحقيق الاستدامة البيئية والاقتصادية. وفي هذا السياق، برزت طاقة الرياح كأحد أهم مصادر الطاقة المتجددة، بفضل نضج تقنياتها وتزايد كفاءتها وانخفاض تكلفتها، مما أدى إلى توسّع استخدامها على مستوى العالم. وقد هدفت الدراسة الحالية إلى تقييم الملاءمة المكانية لمواقع مزارع الرياح في محافظة مطروح من خلال توظيف نظم المعلومات الجغرافية.

انتهجت الدراسة أسلوب اتخاذ القرار المكاني متعدد المعايير، من خلال توظيف ١٥ معياراً وقيداً مكانياً، تُمثل تلك المعايير آراء الخبراء والعاملين في هذا الحقل. وقد تم استنباط تلك المعايير من خلال مراجعة دقيقة وشاملة للأدبيات السابقة ذات الصلة. مرت عملية معالجة تلك البيانات بمراحل متعددة من المعالجة والتصحيح، حتى يمكن توظيفها في تقنيات نظم المعلومات الجغرافية، وتحقيق أعلى مستوى من الدقة والموثوقية في التحليل.

من خلال تطبيق التسلسل الهرمي التحليلي Analytic Hierarchy Process (AHP) أمكن الوصول إلى خريطة الملاءمة المكانية لمواقع مزارع الرياح

البرية في محافظة مطروح. أظهرت نتائج الخريطة، أن المحافظة تتمتع بإمكانات متنوعة في مجال توطن مزارع الرياح البرية، تراوحت ما بين نسبة ملاءمة ممتازة (٢,٧٦٪)، ونسبة ملاءمة جيدة جداً (٣١,٧٤٪)، ونسبة ملاءمة جيدة (٢٨,٠٥٪)، ونسبة ملاءمة متـوسطة (٠,٨٤٪).

وأخيرًا، يمكن زيادة دقة وكفاءة خريطة الملاءمة المكانية لمزارع الرياح في محافظة مطروح من خلال إدخال عوامل ومعايير إضافية، مثل كثافة الهواء، وتحديد مسارات هجرة الطيور، وتحديد مواقع أبراج الهواتف المحمولة، وذلك بعد الحصول على البيانات اللازمة لهذه العوامل.

المصادر، والمراجع باللغة العربية

١- الديب، محمد محمود إبراهيم (٢٠٠٩). قضايا الطاقة في مصر، سلسلة بحوث جغرافية، ع،٢٥ ١ - ٩٠.

٢- السيد، نورا رجب ابراهيم، الصباغ، تامر على عبد المجيد، الشناوي محمد أحمد (٢٠٢٤)، خريطة الملائمة المكانية لمواقع محطات الطاقة الشمسية في محافظة المنيا- نهج تطبيقي لاتخاذ القرار المكاني متعدد المعايير في بيئة نظم المعلومات الجغرافية، المجلة الجغرافية العربية ، المجلد (٥٤) العدد (١٨٥) عدد خاص.

٣- الصباغ، عبد الحميد إبراهيم (١٩٩٦)، الامكانات الاقتصادية لمحافظة مطروح ووسائل تنميتها، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب، جامعة طنطا.

٤- الفقي، أحمد عبد الحميد (١٩٩٩)، الرياح في مصر – رسالة ماجستير غير منشورة، قسم الجغرافيا، كلية الآداب ، جامعة عين شمس.

٥- بدوي، هشام داود صدقي (٢٠٢١)، تحديد المواقع المثلي لحصاد طاقة الرياح في مصر اعتماداً على أسلوب المعايير المتعددة ونظم المعلومات الجغرافية، مجلة كلية الآداب ، جامعة الفيوم، عدد يناير.

٦- توفيق، محمود (٢٠٠٧)، منهجية البحث العلمي مع التطبيق على البحث الجغرافي، مكتبة الأنجلو المصرية، القاهرة.

٧- حافظ، محمد السيد (٢٠٠٧) الرياح وإنتاج الطاقة الكهربائية في صحراء مصر الشرقية- محطة الزعفرانة نموذجاً، الندوة التاسعة – قسم الجغرافيا ونظم المعلومات الجغرافية "صحاري مصر أمل المستقبل"، كلية الآداب ، جامعة الاسكندرية.

٨- حسن، ياسر محمد عبد الموجود، وفرج، محمد ربيع (٢٠٢١). إنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية في محافظة أسوان مع التطبيق على محطة بنبان: دراسة في جغرافية

الطاقة باستخدام نظم المعلومات الجغرافية. المجلة الجغرافية العربية، س,٥٢ ع،٧٧ ٢١٥.

٩- شعبان، غادة سيد عبد الله سيد، والفالوجي، أحمد محمد (٢٠٢٢). دور الطاقة المتجددة في تحقيق التنمية الاقتصادية "في إطار رؤية مصر ٢٠٣٠". مجلة البحوث التجارية، مج,٤٤ ع،٢ ٤٢٥.

١٠-صدقي، حسام ثابت (٢٠١٧)، الاشعاع الشمسي والرياح ودورهما في إنتاج الطاقة في صحراء مصر الشرقية- دراسة في المناخ التطبيقي، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب ، جامعة القاهرة.

١١-عبده، سعيد أحمد (٢٠١٢)، مستقبل الطاقة المتجددة في مصر، مجلة المجمع العلمي المصري، المجلد ٨٧.

١٢-عبد الموجود، ياسر محمد (٢٠١٩)، تقييم إنتاج الطاقة الكهربائية من محطات الرياح في محافظة البحر الأحمر، المجلة الجغرافية العربية، العدد الرابع والسبعون.

١٣-وزارة الكهرباء والطاقة المتجددة (٢٠٢٠)، هيئة الطاقة الجديدة المتجددة، التقرير السنوي.

١٤-وزارة الكهرباء والطاقة المتجددة (٢٠٢١- ٢٠٢٢). الشركة القابضة لكهرباء مصر، التقرير الإحصائي السنوي.

المراجع باللغة الأجنبية .

1- Adedeji PA, Akinlabi SA, Madushele N, Olatunji OO. Neuro-fuzzy resource forecast in site suitability assessment for wind and solar energy: a mini review. J Clean Prod 2020;269:122104. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122104.

2- Ali S, Taweekun J, Techato K, Waewsak J, Gyawali S.(2019) GIS based site suitability assessment for wind and solar farms

in Songkhla. Thailand Renew Energy; 132:1360–72. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.035 .

3- Al Garni H, Kassem A, Awasthi A, Komljenovic D, Al-Haddad k(2016) A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia, Volume 16, Pages 137-150, https://doi.org/10.1016/j.seta.2016.05.006.

4- Aydin NY, Kentel E, Duzgun HS. GIS-based site selection methodology for hybrid renewable energy systems: A case study from western Turkey. Energy Conver Manage 2013;1(70):90–106. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.02.004.

5- Bertolini, M.; Braglia, M.; Carmignani, G (2006). Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract. Int. J. Proj. Manag., 24, 422–430.

6- Abhishek Kumar, Arvind R. Singh, Yan Deng Xiangning He, R.C. Bansal (2017) A review of multi criteria decision making (MCDM) towards sustainable renewable energy development, Volume 69, Pages 596-609. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.191.

7- Elkadeem, M. R., Younes, A., Mazzeo, D., Jurasz, J., Campana, P. E., Sharshir, S. W., & Alaam, M. A. (2022). Geospatial-assisted multi-criterion analysis of solar and wind power geographical-technical-economic potential assessment. Applied Energy, 322, 119532

8- Dave J. Pojadas , Michael Lochinvar S. Abundo (2022) A spatial cost-benefit-externality modelling framework for siting of variable renewable energy farms: A case in Bohol, Philippines, Volume 181, January 2022, Pages 1177-1187. https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.114

9- Doorga JRS, Hall JW, Eyre N.(2022) Geospatial multi-criteria analysis for identifying optimum wind and solar sites in Africa: towards effective power sector decarbonization. Renew Sust Energ Rev 2022;158:112107. https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112107.

10- Gao J, Wang Y, Huang N, Wei L, Zhang Z. Optimal site selection study of windphotovoltaic-shared energy storage power stations based on GIS and multicriteria decision making: a two-stage framework. Renew Energy 2022;201: 1139–62. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.11.012.

11- Hossein Yousefi, Saheb Ghanbari Motlagh and Mohammad Montazeri,(2022), Multi-Criteria Decision-Making System for Wind Farm Site-Selection Using Geographic Information System (GIS): Case Study of Semnan Province, Iran, Sustainability , 14, 7640. https://doi.org/10.3390/su14137640.

12- Habibi, K., Lotfi, S., & Koohsari, M. J. (2008). Spatial analysis of urban fire station locations by integrating AHP model and IO logic using GIS (a case study of zone 6 of Tehran). Journal of Applied Sciences, 8(19), 3302-3315.

13- Han Z, Sun J, Xiao C, Zhang S, Zhao Y. A review of multi-criteria decision-making applications for renewable energy site selection. Renewable Energy 2020;157: 377–403. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.137.

14- Huang X, Hayashi K, Fujii M. Resources time footprint analysis of onshore wind turbines combined with GIS-based site selection: a case study in Fujian Province. China Energy Sustain Dev 2023;74:102–14. https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.03.012

15- John K. Kaldellis, D. Zafirakis (2011) The wind energy (r)evolution: A short review of a long history. Volume 36, Issue 7, Pages 1887-1901.
16- Li, D. H., Chong, B. L., Chan, W. W., & Lam, J. C. (2014). An analysis of potential applications of wide-scale solar energy in Hong Kong. Building Services Engineering Research and Technology, 35(5), 516-528
17- Meng Shao a, Zhixin Han a, Jinwei Sun a b, Chengsi Xiao a, S hulei Zhang a, Yuanxu Zhao a A review of multi-criteria decision making applications for renewable energy site selection. Renewable Energy . Volume 157, September 2020, Pages 377-403. https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.04.137.
18- Marina Giamalaki, Theocharis Tsoutsos.(2019) Sustainable siting of solar power installations in Mediterranean using a GIS/AHP approach. Renewable Energy, Volume 141, Pages 64-75. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.100.
19- Mohamed A Abdulrazak, (2017), GIS Approach to find Suitable locations for Installing renewable Energy Production units in Sinai Peninsula, EGYPT, Master thesis, University of Salzburg. Austria
20- Murray, A. T. (2010). Advances in location modeling: GIS linkages and contributions. Journal of Geographical Systems, 12, 335–354
21- MdRuhul Kabir, Braden Rooke, G.D. Malinga Dassanayake, Brian A. Fleck (2012), Comparative life cycle energy, emission, and economic analysis of 100 kW nameplate wind power generation, Volume 37, Issue 1, Pages 133-141.
22- Moradi S, Yousefi H, Noorollahi Y, Rosso D.(2020) Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: case study of Alborz Province, Iran. Energy Strateg Rev 2020;29:100478. https://doi.org/10.1016/j

23- Noorollahi Y, Yousefi H, Mohammadi M. Multi-criteria decision support system for wind farm site selection using GIS. Sustain Energy Technol Assess 2016;13: 38–50. https://doi.org/10.1016/j.seta.2015.11.007

24- Odu, G. O. "Weighting methods for multi-criteria decision-making technique." Journal of Applied Sciences and Environmental Management 23.8 (2019): 1449-1457.

25- 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 april 2023,100355. https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100355 .

26- Triantaphyllou, Evangelos. "Multi-criteria decision-making methods." Multi-criteria decision-making methods: A comparative study. Springer, Boston, MA, 2000. 5-21.

27- Tim Höfer , Yasin Sunak , Hafiz Siddique (2016),Wind farm siting using a spatial Analytic Hierarchy Process approach: A case study of the Städteregion Aachen ,Volume 163, Pages 222-243. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.138.

28- T. Saaty, The Analytic Hierarchy Process Mcgraw Hill, New York vol. 70, Agricultural Economics Review, 1980.

29- Rediske a, H.P. Burin a, P.D. Rigo a, C.B. Rosa a, L. Michels b, J.C.M. Siluk(2021), Wind power plant site selection: A systematic review, Volume 148, https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111293.

30- Sakuru SKVS, Ramana MV. Wind power potential over India using the ERA5 reanalysis. Sustain Energy Technol Assess 2023;56:103038. https://doi.org/ 10.1016/j.seta.2023.103038.

31- Yeliz Simsek a, David Watts a b, Rodrigo Escobar,(2018) Sustainability evaluation of Concentrated Solar Power (CSP) projects under Clean Development Mechanism (CDM) by using Multi Criteria Decision Method (MCDM), Volume 93, Pages 421-438, https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.090.

Assessment of Onshore Wind Energy Potential in Matrouh Governorate – using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Geographic Information System (GIS)

Abstract

The energy sector plays a fundamental role in achieving economic development, as it is one of the main pillars of sustainable development. The reliance on conventional energy sources has led to an increase in environmentally harmful emissions, alongside the rising global demand for energy to meet development needs. Consequently, securing sustainable energy sources has become a crucial and increasingly important issue. Accordingly, this paper aimed to study the potential for the localization of onshore wind farms in Matrouh Governorate by creating a digital map that illustrates the spatial suitability of these farm locations. The study employed an applied approach based on the Multiple Criteria Decision Analysis (MCDA) method within a Geographic Information System (GIS) environment .The present study used 15 criteria and constraints from previous studies and energy research specialists to develop the spatial adaptation model. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied to generate a spatial suitability map for onshore wind farm locations in Matrouh Governorate. According to the results and based on the constraints, it was found that 36.59% of the total area of Matrouh Governorate is unsuitable. Conversely, 63.41% of the governorate's area is deemed suitable, with the northern part showing particularly favorable potential due to its advantageous climatic conditions and available infrastructure. The suitability levels ranged from excellent suitability (2.76%), very good suitability (31.74%), good suitability (28.05%), and moderate suitability (0.84%).

Keywords: Renewable Energy -Wind Energy - Geographic Information System (GIS) -Analytic Hierarchy Process (AHP) - Matrouh Governorate.