تحديد المواقع المثلي لحصاد طاقة الرياح في مصر اعتماداً علي أسلوب المعايير المتعددة ونظم المعلومات الجغرافية.

***د/ هشام داود صدقي بدوي**

Hesham-badawy@du.edu.eg

الملخص:

أضحت الطاقة المتجددة وإمكانات استغلالها مطلباً بيئياً ملحاً؛ وخاصة بعد ارتفاع معدلات التلوث وزيادة الاحترار العالمي الناجم عن حرق ملايين الأطنان من الوقود الحفري في جو الأرض؛ علاوة على أهميتها الاقتصادية في توفير الطاقة الرخيصة. وتستهدف مصر كواحدة من بلدان العالم النامي توفير نحو ٢٠٪ من احتياجاتها السنوية من الطاقة من مصادر الطاقة المتجددة بحلول العام ٢٠٢٢م. ومن الأهمية بمكان توافر دراسات علمية لتحديد المناطق المثلي لإقامة مشاريع حصاد طاقة الرياح، وتهدف هذه الدراسة بالأساس إلى الوصول لخريطة قياسية لأنسب المواقع لحصاد طاقة الرياح في مصر اعتماداً على أسلوب "التحليل متعدد المعايير" Spatial Multi-Criteria Analysis (SMCA) بواسطة نظم المعلومات الجغرافية GIS. وقد اعتمد نموذج الملائمة الذي قدمه الباحث علي برنامج ArcGIS 10.5.1؛ حيث انشئت قاعدة بيانات جغرافية؛ تضمنت مجموعة ضخمة من البيانات الشبكية Raster Dataset، تمثل المعايير والاشتراطات والمساحات المستبعدة؛ كسرعة الرياح وكثافة الهواء وكثافة طاقة الرياح عند ارتفاع ٥٠ متراً من سطح البحر، بالإضافة إلي بيانات خاصة بشبكة الطرق والمحميات الطبيعية ونطاق خط الساحل والمطارات والمدن والشبكة القومية لنقل الكهرباء، ثم إعادة تصنيف Reclassify هذه البيانات ثم دمجها بواسطة أداة التركيب الخطى الموزون Weighted Overlay Tool التابعة لمجموعة أدوات التحليل المكاني Spatial Analysis Tools؛ وإعطاء كلاً منها وزناً نسبياً يتناسب

* مدرس الجغرافية الطبيعية – قسم الجغرافية – كلية الآداب – جامعة دمياط.

مع أهميتها في اختيار الموقع المثالي لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح. وعند بناء النموذج تم مراعاة مجموعة من القيود Constrictions الاقتصادية والاجتماعية والجغرافية، فقد تم استبعاد Exclude الأراضي الزراعية القديمة والمستصلحة حديثاً والكتلة العمرانية بالوادي والدلتا وشبكة الأودية الجافة ومساحات المراعي الطبيعية، كما استبعدت الأراضي الحساسة بيئياً مثل المحميات الطبيعية والأراضي الرطبة المحيطة بالبحيرات. وتشير النتائج إلى أن التوزيع الأمثل لمواقع مشاريع حصاد طاقة الرياح في مصر يتمثل في المناطق التي تلبى جميع شروط الملائمة المكانية؛ وتتوزع جغرافياً في غرب خليج السويس والغردقة وسفاجا والأجزاء الوسطى من الساحل الشرقي لخليج السويس ومنطقة توشكي وغرب أسوان وغرب الأقصر وواحات الداخلة والخارجة بمحافظة الوادي الجديد، ولعل لهذه النتائج أهمية بالغة لمتخذي القرار بشأن التوسع في استغلال هذا النوع من مصادر الطاقة المتجددة ذات المستقبل الواعد في مصر.

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة، الرياح، نظم المعلومات الجغرافية، أسلوب المعايير المتعددة، مصر.

١ – مقدمة.

يواجه العالم اليوم طلباً متزايداً على الطاقة بمصادرها المختلفة؛ حيث تشير توقعات وكالة الطاقة الدوليـــة International Energy Agency (IEA)أن الطلب العالمي على الطاقة سيزداد بمقدار الثلث خلال الفترة ما بين ٢٠١١م إلى ٢٠٣٥م (IEA. 2013. P. 3). وتسهم مصادر الوقود الحفري بنحو ٨٠٪ من الطلب العالمي على الوقود، الأمر الذي خلف العديد من الآثار السلبية على النظم البيئية لكوكب الأرض متمثلاً في ارتفاع نسبة انبعاثات غازات الدفيئة وتغير المناخ، وانخفاض أمن الطاقة، وتلوث الهواء على المستويات

المحلية والدولية، إضافة إلى ذلك فإن الوقود الحفري بشتى مصادره في طريقه للنضوب.

وأمام تحديات النضوب الحتمي لمصادر الطاقة التقليدية Fossil energy؛ والمشكلات البيئية والاقتصادية الناجمة عنها؛ كان التفكير في إنتاج مصادر طاقة نظيفة وبديلة لها بشكل ذو جدوى اقتصادية وصديقة للبيئة؛ تعرف بالطاقة الجديدة والمتجددة Renewable energy، وتضم عدداً من المصادر، مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية وطاقة المياه وطاقة المد والجزر والطاقة المحولة من النفايات، والطاقة الجوفية الحرارية، وقد أدركت الدولة المصرية ضرورة الاستفادة من طاقة الرياح منذ العام ١٩٨٢م – قبل إنشاء هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة (NREA) عام ١٩٨٦م – حيث قامت وزارة الكهرباء والطاقة بإصدار تقرير بالتعاون مع هيئة الأرصاد الجوية المصرية؛ تناول تحليل بيانات الرياح المتاحة في مصر ونظم تحويل هذه البيانات إلي طاقة مولدة؛ بالإضافة إلي تحديد المناطق الأكثر ملائمة لإنشاء محطات لحصاد طاقة الرياح.

وتعد الطاقة المولدة من الرياح Wind energy أقل أنواع الطاقة تلويثاً للبيئة؛ ومحافظة علي سلامة النظم البيئية، حيث لا تستخدم سوى الهواء في توليد الطاقة. هذا وقد بدأ الاستخدام الحديث لطاقة الرياح في صحراء مصر الشرقية على شكل وحدات صغيرة على سواحل البحر الأحمر؛ في المنطقة الممتدة بين رأس غارب وسفاجا (محمد حافظ، ٢٠٠٤، ص ٢). وتتسم كمية الطاقة الكهربائية المتوقع الحصول عليها بواسطة طاقة الرياح بالتغير الكبير من وقت لآخر؛ ويرجع ذلك إلى أن الرياح تعد أكثر عناصر المناخ ديناميكية وسرعة

في تغيير اتجاهها وسرعتها زمانياً ومكانياً، لذا فمن الأهمية بمكان الحصول على معلومات وافية عن خصائص الرياح (سرعة؛ واتجاهاً؛ وكثافة الهواء؛ وكثافة طاقتها؛ واستمراريتها واضطرابها؛ والتيارات الهوائية والعوامل المؤثرة في حركة الهواء بشكل عام) عند البدء في إقامة محطات حصاد طاقة الرياح.

وعليه؛ فمن الأهمية بمكان تحديد المناطق المثلي Optimum localities لإقامة محطات حصاد طاقة الرياح كإجراء تخطيطي مهم قبل الشروع في إقامة هذه المشاريع، ويركز موضوع هذا البحث علي هذه النقطة تحديداً؛ في محاولة لاتخاذ قرار آلي بواسطة برنامج ArcGIS 10.5 اعتماداً علي بناء نموذج ملائمة؛ يتم فيه إدخال عدد من المعايير المناخية والبيئية والاقتصادية والاجتماعية؛ من أهمها بيانات عن سرعة الرياح وخرائط التضاريس والانحدارات والطرق والمطارات، بالإضافة إلي وضع عدد من القيود باستبعاد المناطق المنزرعة والمأهولة بالسكان والمحميات الطبيعية، ثم إعادة تصنيف هذه البيانات Reclassify، ثم دمجها ومعالجتها بواسطة أداة التركيب الخطى الموزون Weighted Overlay Tool التابعة لمجموعة التحليل المكاني Spatial Analysis.

ويتطلب اختيار أنسب المواقع بشكل عام؛ تكامل العديد من العوامل أهمها موارد الرياح من حيث السرعة والكثافة والاستمرارية والاضطراب (Patel and Rosier, 2013, p. 5). حيث تعمل محطات الرياح إذا تراوحت سرعة الرياح ما بين ٥: ٢٥ م/ ث حسب قانون بيت Betz's Law، فالمتوسط السنوي لسرعة الرياح الذي يتراوح ما بين ٦: ١٠ م/ ث، يبلغ صافي إنتاجها من الطاقة

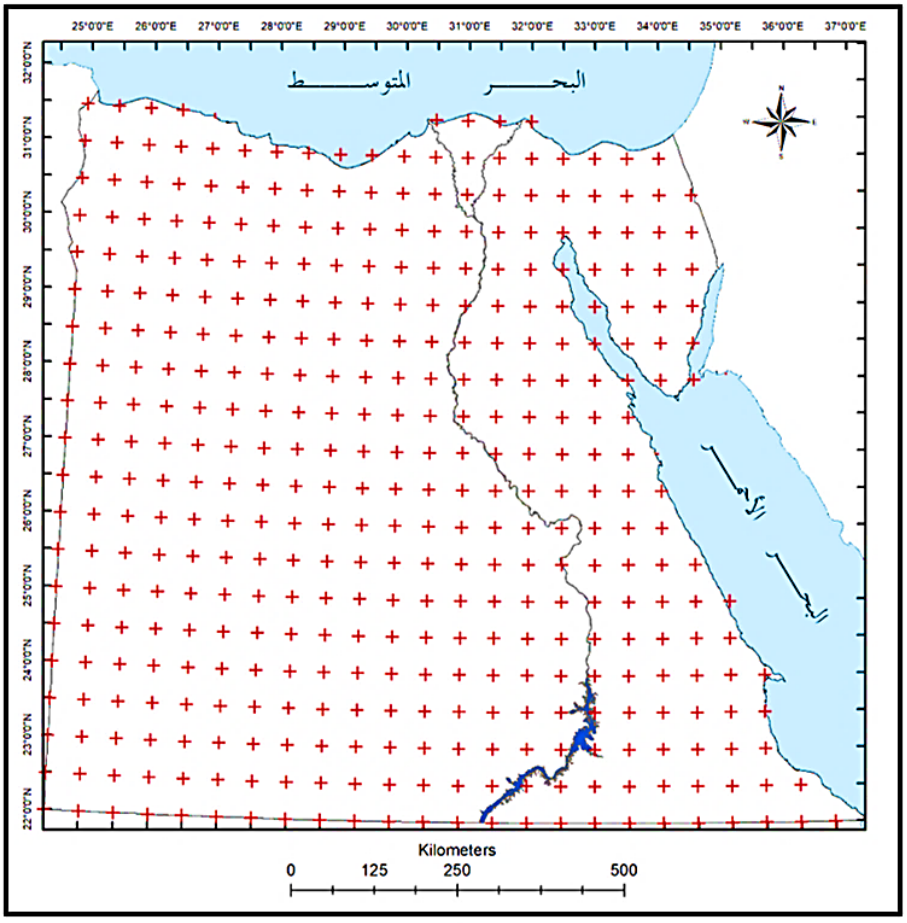
الكهربائية ما بين ٢,٤: ٦,٥ جيجا وات/ ساعة (Eliasson, 1998, p. 3). وبالإضافة إلى ذلك هناك مجموعة من الاشتراطات الفنية التي يجب الأخذ بها؛ ومنها: دقة وتناسب بيانات الرياح في مستوي ارتفاع التوربين، حيث يتم تركيب التوربينات في العادة علي ارتفاعات تتراوح بين ١٠ : ٥٠ متر، لذلك فمن المستحسن دراسة سرعة الرياح علي ارتفاعات مختلفة، هذا بالإضافة إلي رصد معامل كثافة طاقة الرياح Wind Power Densityوتتبع شدة اضطراب الرياح Wind turbulence، فكلما كانت مستويات الاضطراب عالية قلل ذلك من إنتاج الطاقة الكهربائية وتسبب في تحميل شديد علي التوربين (AL-Yahyai et al, 2010, p.1430).

ويجب أن تكون توربينات الرياح على ارتفاعات لا تزيد عن ٥٠٠ م فوق مستوي سطح البحر وذلك للحفاظ على الحياة البرية والمواقع البيئية ومسارات هجرة الطيور (Yue and Wang, 2006, P. 734). كما اشترط (Nguyen, 2007, P. 1409) بأن تكون مثل هذه المشروعات بعيدة عن التجمعات السكنية بمسافة لا تقل بحال عن ٢٠٠٠ متراً، حفاظاً على البعد الجمالي للظهير المحيط بالمدن، والتخلص من الضوضاء الناتجة عن تشغيل التوربينات، وتحقيق اشتراطات الأمن والسلامة البيئية.

٢ – حدود منطقة الدراسة والبيانات المناخية المستخدمة.

تشمل منطقة الدراسة كامل مساحة جمهورية مصر العربية؛ التي تحتل الركن الشمالي الشرقي من قارة أفريقيا، وتقع بين دائرتي عرض ٢٢°: ٣٦َ ٣١° شمالاً، وبين خطى طول ٢٥° : ٣٧° شرقاً، وتبلغ مساحتها الإجمالية

١٠١٩٦٠٠كم٢، وتمتلك مصر جبهتين طويلتين؛ إحداهما بطول ١٠٠٠كم علي البحر المتوسط، والثانية بطول ١٥٠٠كم علي البحر الأحمر، ولكون مصر تمتد فيما يقارب العشر دوائر عرضية فإن بها تنوعاً مناخياً يظهر بوضوح في تباين العناصر المناخية زمانياً ومكانياً، وخاصة الرياح التي تتسم بسرعة تغير اتجاهها وسرعتها.



المصدر: من عمل الباحث، باستخدام برنامج ArcGIS 10.5.1

شكل (١) موقع منطقة الدراسة ونقاط البيانات المناخية الشبكية Grid المستخدمة.

تم الاعتماد على البيانات السنوية لسرعة الرياح في مصر من قاعدة البيانات العالمية Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) والتي تتيحها وكالة ناسا لعلوم الفضاء مجاناً على الموقع التالي:

https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/، بدقة مكانية ٠,٥ درجة عرضية وطولية، وبدقة تحديث زمانية وصلت إلي ثلاث ساعات مع التحديث الثامن للشبكة، وقد تم استيفاء هذه البيانات المناخية من خلال الدمج بين بيانات متحصل عليها من محطات أرصاد تقليدية على مستوى العالم؛ وبيانات الأقمار الصناعية والرادار والنمذجة المناخية وبيانات توفرها الإدارة الوطنيـــــــــة الأمريكية لعلوم المحيطات والغلاف الجوي NOAA، وتم تنزيل بيانات خاصة بسرعة الرياح لمساحات أقصاها ٤,٥ دائرة عرضية × ٤,٥ خط طول؛ أي تنزيل بيانات لنحو ١٠٠ نقطة في المرة الواحدة، ويتم تنزيلها في شكل ملفات بامتدادات مختلفة؛ مثل: ASCII, CSV, GeoJson, NetCDF.

وقد مُثِلت منطقة الدراســـــة في عدد ٣٩٧ نقطة شبكية Grid تغطي كامل الأراضي المصرية في شكل مربعات بطول ضلع ٠,٥ درجة عرضية وطولية، وكل نقطة أو مربع بأكمله يمثل قراءة للمعدل السنوي لسرعة الرياح (متر / ثانية)، خلال الفترة ١٩٨٥ – ٢٠١٥م؛ كما هو مبين بالشكل رقم (١).

٣ – مشكلة البحث.

يعود اختيار الموضوع إلي ندرة مثل هذا النوع من الدراسات في المدرسة الجغرافية المصرية التي تناولت تحديد المواقع المثلي Optimum localities لإقامة مشروعات طاقة الرياح في مصر اعتماداً علي تقنيات GIS، إضافة إلي رغبة الباحث في المساهمة بإيجاد حلول لمشكلة الطاقة الكهربائية في مصر؛

وتلافي الآثار السلبية للاعتماد علي مصادر الطاقة التقليدية، كما أن الاهتمام بتنمية مصادر الطاقة النظيفة؛ وعلي رأسها موارد الرياح في مصر لما لها من دور محوري في تنمية المناطق الصحراوية التي تمثل غالبية مساحة الأراضي المصرية، كما تؤثر علي كثير من الأنشطة البشرية، إضافة إلي دورها في توجيه التخطيط العمراني الحديث.

٤ – أهداف البحث.

– إعداد خريطة قياسية لتحديد المواقع المثلي Optimum localities لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح في مصر اعتماداً على تقنيات نظم المعلومات الجغرافية GIS.

– المساهمة في إيجاد حلول لمشكلات نقص الطاقة الكهربية في مصر، من خلال استغلال مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة.

– المساهمة في نشر الوعي بأهمية استخدام الطاقــة المتجددة للحد من استخدام الطاقة الحفرية، وتقليل انبعاثات غازات الدفيئة وتلوث البيئة، وظاهرة الاحترار العالمي وتغير المناخ.

– إبراز الجانب النفعي لجغرافية المناخ من خلال تقديم الحلول لمتخذي القرار.

٥ – الدراسات السابقة.

تعددت الدراسات التي اهتمت بإنشاء نموذج ملائمة لتحديد المناطق المثلي Optimum localities لإقامة مشاريع طاقة الرياح أو مشاريع الطاقة النظيفة بوجه عام لنطاقات محلية وإقليمية وعالمية خلال العشرين سنة الماضية، ومنها على سبيل المثال: **دراسة (جمعة داود وآخرين، ٢٠١٧)** بعنوان " تحديد أفضل المواقع لتجميع الطاقة الشمسية في منطقة مكة المكرمة الإدارية – باستخدام نظم

المعلومات الجغرافية متعددة المعايير"، وقد توصل من خلال تطبيق نموذج الملائمة متعدد المعايير؛ إلي أن معظم أنحاء منطقة مكة المكرمة الإدارية مناسبة لإقامة مشروعات تجميع الطاقة الشمسية بدرجات ملائمة تتراوح ما بين ٤٧٪ : ٩٧٪. **ودراسة (Mierzwiak and Calka, 2017) بعنوان** "التحليل متعدد المعايير لاختيار المناطق الملائمة لإقامة محطات طاقة شمسية – تطبيقاً على منطقة لوجيونو (بولندا)"، وقد خلصت الدراسة من خلال بناء نموذج ملائمة متعدد المعايير بواسطة GIS إلى أن النطاقات المثلي لإقامة مزارع الطاقة الشمسية تتركز جنوب المنطقة المدروسة بعد استبعاد نحو ٦٠٪ من المساحة الإجمالية للمنطقة. **ودراسة (حسام ثابت، ٢٠١٧)** بعنوان " الإشعاع الشمسي والرياح ودورهما في إنتاج الطاقة في صحراء مصر الشرقية – دراسة في المناخ التطبيقي"، رسالة ماجستير غير منشورة قدمت لجامعة القاهرة، وجاءت الدراسة في خمس فصول؛ وقد تطرق المبحث الثاني من الفصل الخامس إلى إنشاء نموذجي ملائمة؛ الأول لتحديد أنسب المواقع لإقامة محطات الطاقة الشمسية، والثاني لتحديد أنسب المناطق لإقامة محطات طاقة الرياح في صحراء مصر الشرقية. **ودراسة (هبة محمود، ٢٠١٧)** بعنوان " الإشعاع الشمسي والرياح في شبه جزيرة سيناء – دراسة في المناخ التطبيقي"، رسالة ماجستير غير منشورة قدمت لجامعة القاهرة، وجاءت الدراسة في خمسة فصول؛ تناول المبحث الثاني من الفصل الخامس منها مناقشة لتحديد أنسب المواقع لإقامة محطات الطاقة الشمسية ومحطات طاقة الرياح في شبه جزيرة سيناء، وقد طبقت طريقة Swat Analysis: Thinking Strategically التي تقوم علي أربع محاور وهي: نقاط القوة Strength ونقاط الضعف Weaknesses والفرص Opportunities والتهديدات Threats وصولاً للتحديد أنسب المناطق لإقامة مشروعات طاقة الرياح والطاقة الشمسية.

ودراسة (Dawod and Mandor, 2016) بعنوان "المواقع المثلي لإقامة مزارع الطاقة الشمسية في مصر اعتماداً على نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير"، وقد ارتكز الباحث علي عشرة معايير فنية واقتصادية ومناخية، ووجد أن جميع الأراضي المصرية تقريباً واعدة بالطاقة الشمسية، وقد قدر المناطق المثلي بنحو ٢٥ ألف كم٢، وأن أفضل المحافظات المصرية هي الوادي الجديد والسويس وأسوان. **ودراسة (Effat, 2014)** بعنوان "النمذجة المكانية لاختيار المناطق الملائمة لإقامة مزارع الرياح باستخدام الاستشعار عن بعد ونظم المعلومات الجغرافية – تطبيقاً علي ساحل البحر الأحمر (مصر)، وقد خلصت الدراسة إلى إنتاج خريطة آلية قسمت المنطقة المدروسة إلى نطاقات حسب أمثليتها لإقامة محطات طاقة الرياح؛ اعتماداً على نموذج ملائمة معد مسبقاً اعتماداً على بعض المعايير، وقد جمعت الدراسة بين AHP وأدوات GIS للوصول إلى المواقع المثالية لإقامة مشروعات طاقة الرياح. **ودراسة (Uyan, 2013)** بعنوان " اختيار مواقع المزارع الشمسية القائمة على نظم المعلومات الجغرافية باستخدام عملية التحليل الهرمي (AHP) في منطقة كارابينار، (قونيا – تركيا)" وقد جمع الباحث بين AHP و GISللعثور على الموقع المنطقي لموقع مزارع الطاقة الشمسية في منطقة كارابينار، قونية – تركيا من أجل الحصول على خريطة آلية بناء على اختيار باستخدام ٥ معايير ملاءمة التقييم وفقا لخصائص منطقة الدراسة. وقد أظهر النموذج المقدم للجمع بين AHP وأدوات GIS، كما أظهرت كيف تتكامل منهجيةAHP مع نظم المعلومات الجغرافية للتقييم الفعال والسريع لاختيار مواقع إقامة المزارع الشمسية.

ودراسة (Effat, 2013) بعنوان "اختيـــار المواقـــع المحتملة لمزارع الطاقة الشمسية بالإسماعيلية (مصر) – باستخدام SRTM والتحليل متعدد المعايير" وقد انتهت الدراسة إلى تصميم نموذج تقييم مكاني وتحقيق الهدف منها؛ بإنتاج

خريطة للتوزيع الجغرافي لدرجات ملائمة نطاقات منطقة الدراسة لإقامة مشاريع مزارع الطاقة الشمسية في محافظة الإسماعيلية. **ودراسة (Al-Yahyai et al., 2010)** بعنوان "تقييم المواقع المحتملة لإقامة مزارع طاقة الرياح في عمان اعتماداً على البيانات الموجودة في محطات الطقس" وقد حللت الدراسة بيانات ٢٩ محطة رصد أرضية في عمان للتعرف على خصائص الرياح مثل السرعة والكثافة وطاقة الرياح ومعامل الاضطراب والاستمرارية، وقد انتهت الدراسة بخريطة قياسية توضح مدى الملائمة المكانية لإقامة مشاريع طاقة الرياح في أقاليم سلطنة عمان المختلفة.

دراسة (حسن يونس، ٢٠٠٩) بعنوان " الإشعاع الشمسي والرياح كمصادر للطاقة الجديدة والمتجددة في مصر – دراسة في المناخ التطبيقي " رسالة ماجستير غير منشورة قدمت لجامعة طنطا، وجاءت الدراسة في خمسة فصول تناولت العوامل الطبيعية المؤثرة في الإشعاع الشمسي والرياح في مصر، ثم دراسة الإشعاع الشمسي وكمية الطاقة المتوقعة منه في مصر، ثم دراسة سرعة الرياح والطاقة المتوقعة منها في مصر، ثم دراسة الاستخدام الحالي والمستقبلي لطاقة الإشعاع الشمسي والرياح في مصر. **ودراسة (محمد حافظ، ٢٠٠٧م)**، بعنوان "الرياح وإنتاج الطاقة الكهربائية في صحراء مصر الشرقية – محطة الزعفرانة نموذجاً"، وقد توصل إلى أن الصحراء الشرقية غنية بطاقة الرياح؛ وخاصة الجزء الجنوبي لخليج السويس وشمال ساحل البحر الأحمر اعتماداً على دراسة بيانات الرياح فقط؛ دونما التطرق لبناء نموذج ملائمة متعدد المعايير أو غيره من طرائق النمذجة المختلفة في هذا الصدد.

ودراسة (أحمد الفقي، ١٩٩٩) بعنوان "الرياح في مصر"، رسالة غير منشورة قدمت لجامعة عين شمس لنيل درجة الماجستير في الجغرافيا، وتعد الدراسة

رائدة في المناخ الأصولي؛ حيث جاءت الرسالة في ستة فصول تناولت العوامل المؤثرة في الرياح في مصر، والرياح العامة في مصر، والرياح السائدة في مصر، والرياح اليومية في مصر، وهبات الرياح القوية، ثم الفصل السادس عن اتجاهات التغير في الرياح في مصر، ولم تتطرق الدراسة لأية جوانب تطبيقية لطاقة الرياح. **ودراسة (Harb, 1974)** بعنوان " الخصائص المميزة لأقاليم الرياح السطحية في مصر"، حيث تعرض لتحليل المتوسطات السنوية للرياح في مصر وتوصل إلى وجود إقليمين ريحيين؛ الأول في شمال غرب مصر حول مرسى مطروح، والثاني علي ساحل البحر الأحمر حول الغردقة، وقد تناول المتوسطات الساعية للسرعة اليومية في تلك المناطق وإمكانية استغلالها في توليد الطاقة الكهربية.

٦ – تساؤلات البحث.

– هل تمتلك مصر مقومات إنتاج الطاقة الكهربائية من موارد الرياح المتاحة بها.

– ما هي معايير تفضيل المواقع على بعضها البعض.

– ما هي المواقع المثلي لإقامة مشروعات طاقة الرياح في مصر.

٧ – منهجية الدراسة وأساليبها وأدواتها.

اعتُمد في هذه الدراسة على المنهج التطبيقي، حيث يتخذ من دراسة السبب والنتيجة وسيلة لتحقيق الغرض منه؛ إذ ينصب موضوع البحث على كيفية تعظيم الاستفادة بموارد الرياح في توليد طاقة الكهربائية في مصر، كما استخدم المنهج الإقليمي، حيث يرتكز البحث على إقليم جغرافي معروف الحدود وهو جمهورية مصر العربية.

وقد اعتمدت الدراسة على مجموعة من الأساليب والأدوات، وهي:

أ – الأسلوب الإحصائي: حيث تم الاعتماد على برنامج Excel 365 اعتماداً كاملاً لإخراج الأشكال والرسوم البيانية في هذا البحث.

ب – نظم المعلومات الجغرافية GIS: إذ تعد الأداة الأكثر اكتمالاً وتكاملاً بين أدوات البحث الجغرافي، حيث استخدمت في رسم الخرائط وإخراجها وإجراء بعض المعاملات الإحصائية التي يتطلبها البحث، كما تم الاعتماد عليها في إجراء العملية الأساسية التي تستهدفها هذه الدراسة، وهي أسلوب المعايير المتعددة Spatial Multi–Criteria Analysis (SMCA). يهدف هذا الأسلوب إلى دراسة مدى توافر مجموعة من المعايير في مكان محدد؛ وتوفير عدة بدائل أمام متخذي القرار (جمعة داود وآخرون، ٢٠١٧، ص ٣).

وقد اعتمد أسلوب المعايير المتعددة (SMCA) على مبدأ حساب المتوسط الموزون لمجموعة من المعايير في كل خلية بالخرائط الشبكية للوصول إلى نموذج الملائمة؛ لتحديد المناطق المثالية لإقامة مشروعات توليد الطاقة من الرياح، وهناك ثلاث مراحل رئيسية يجب الأخذ بها لبناء النموذج كالتالي:

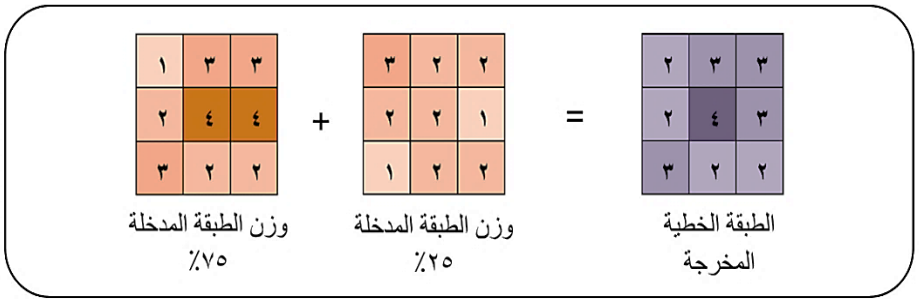
١ – تجهيز البيانات الخاصة بالمعايير المختلفة والمناسبة لطبيعة الموضوع المدروس، ثم التعامل معها بواسطة برنامج ArcGIS 10.5.1.

٢ – إعادة تصنيف البيانات Reclassify Dataset إلى مقياس بسيط متعارف عليه يتسلسل من ١: ٥ مع مراعاة أن تكون الأرقام الأقل للقيم الأعلى ملائمة، أما المناطق غير المناسبة فتعطى القيمة (صفر).

٣ – دمج البيانات المعاد تصنيفها باستخدام أداة التركيب الخطي الموزون Weighted Overlay Tool التابعة لمجموعة التحليل المكاني Spatial Analysis Tools في بيئة برنامج ArcGIS 10.5.1.

وقد أجري التحليل متعدد المعايير (SMCA) في هذه الدراسة من أجل وزن مجموعات البيانات الممثلة للمعايير المختلفة باستخدام ArcGIS 10.5.1 للوصول إلى نتيجة مفادها؛ أي منها أكثر تأثيراً في نموذج الملائمة المعد؟، ثم تم دمجها لإنتاج خريطة قياسية Standard Map تصنف المواقع من حيث درجة ملاءمتها لإقامة مشروعات طاقة الرياح في مصر.

يوجد ثلاثة طرق لتطبيق أسلوب المعايير المتعددة (SMCA) وهي: التراكب Overlay وطريقة التحليل التسلسلي الهرمي Analytic hierarchy process (AHP) method، وطريقة التركيب الخطى الموزون Weighted Overlay Tool (Castillo et al, 2016, p. 88)، وجدير بالإشارة أن طريقة التركيب الخطي الموزون هي أكثر الأساليب الثلاثة المستخدمة في التحليل متعدد المعايير للوصول إلي الملائمة المكانية؛ وتقوم طريقة التركيب الخطى الموزون بالأساس علي قياس البيانات المكانية المدخلة بمقياس افتراضي يتراوح بين ١ : ٥، فيما يعرف بإعادة التصنيف، ثم توزن البيانات الشبكية Raster dataset حسب أهميتها ويتم دمجها معاً؛ بحيث تساوي جميع أوزان البيانات المدخلة ١٠٠٪.



شكل (٢) عملية إعادة تصنيف البيانات الشبكية Raster Data بمقياس موحد.

ويبين الشكل (٢) كيف تتم عملية إعادة تصنيف Reclassify البيانات الشبكية المدخلة بمقياس موحد يتراوح بين ١: ٥، ويتم تعيين تأثير كل طبقة شبكية Raster Layer، ثم ضرب قيمة كل خلية في التأثير المحدد لها، ثم يتم دمج جميع البيانات للحصول على الخريطة القياسية النهائية التي تصنف نطاقات المنطقة المدروسة حسب درجة وملاءمتها لإقامة مشروعات إنتاج طاقة الرياح في مصر. فالقيمة ١ في الطبقة الأولي وزنها النسبي = ١ × ٠,٧٥ = ٠,٧٥ والقيمة ٣ في الطبقة الثانية وزنها النسبي = ٣ × ٠,٢٥ = ٠,٧٥، وبالتالي يكون المجموع بعد دمجهما = ٠,٧٥ + ٠,٧٥ = ١,٥؛ ولأنه لا توجد كسور في عملية التركيب الخطي الموزون Weighted Overlay ويجب أن تكون في شكل عدد صحيح؛ فيتم تقريبها إلى العدد ٢.

ويمكن القول إجمالاً أن منهجية هذا البحث، تقوم على تقنية التركيب الخطى الموزون Weighted Overlay Tool، وهي عملية تتم بواسطة برنامج ArcGIS 10.5.1، وتتمثل في دمج المعايير المتعددة Merge Multi-Criteria بطريقة رياضية وإخراجها في خريطة واحدة وفق الخطوات التالية:

١ – تحديد المشكلة (النطاقات المثلي لإقامة مشروعات طاقة الرياح في مصر).

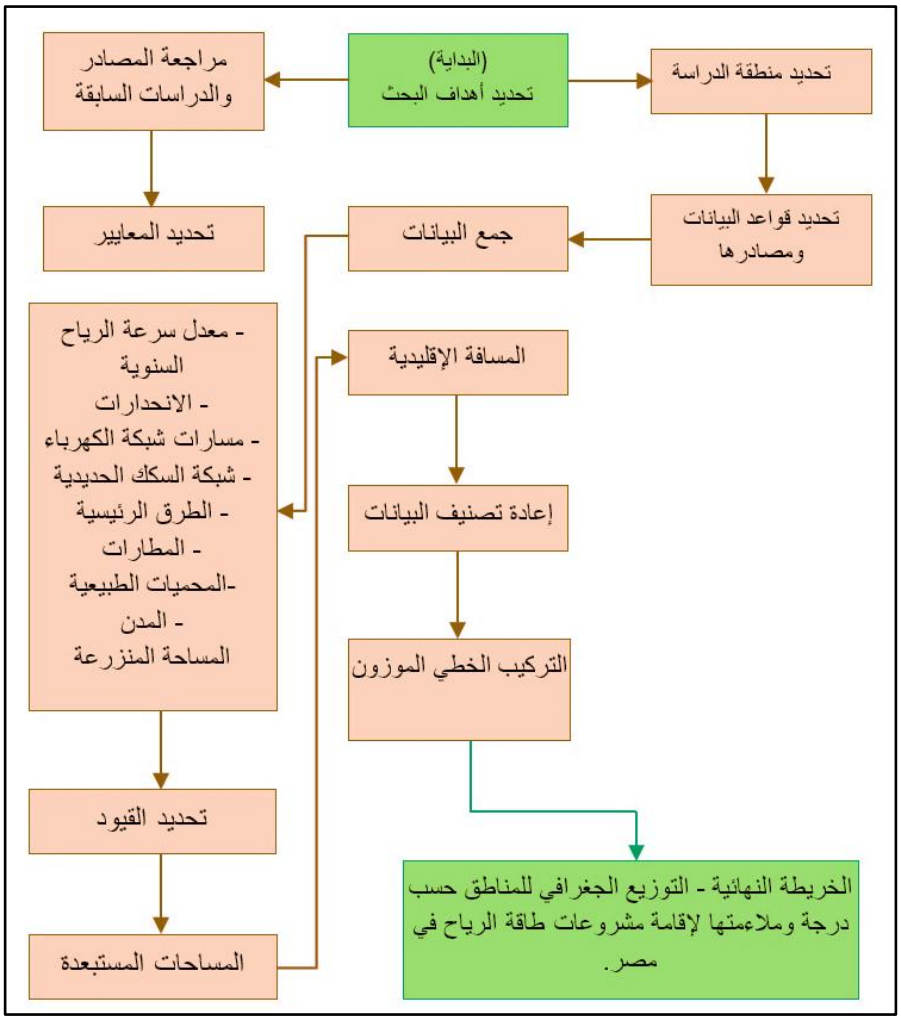
٢ – تقسيم المشكلة إلى نماذج ثانوية (سرعة الرياح – الانحدارات – الطرق الرئيسية.. إلخ).

٣ – الاستقرار على اختيار المعايير المؤثرة في الوصول لحل للمشكلة.

٤ – إعادة تصنيف Reclassify الطبقات التي تم اختيارها، وتحويل الطبقات الخطية منها إلى طبقات شبكية.

٥ – وزن الطبقات المعاد تصنيفها، وفق دراسات الخبراء والدراسات السابقة.

٦ – دمج الطبقات بواسطة أداه التركيب الخطى الموزون Weighted Overlay



شكل (٣) رسم تخطيطي للمنهجية والأساليب والأدوات المستخدمة لتحديد المواقع المثلي لإقامة مشروعات طاقة الرياح في مصر.

Tool التابعة لمجموعة أدوات Spatial Analysis Tools في برنامج ArcGIS 10.5.1

٧ – التحليل النهائي وإنتاج الخريطة القياسية، ويتم فيها اتخاذ قرار آلي بالتوزيع

الجغرافي للمناطق من حيث درجة أمثليتها في إقامة مشروعات طاقة الرياح في مصر. وتظهر هذه الخطوات في الشكل (٣) المبين أدناه.

وعند بناء النموذج؛ تم استبعاد بعض المناطق التي لا تصلح لإقامة مشروعات طاقة الرياح في مصر، مثل مساحات الأراضي الزراعية القديمة والحديثة، والتجمعات الحضرية، ومواقع المحميات الطبيعية ومواقع المطارات، وأراضي الرعي، وشبكة الأودية الجافة والأراضي الهشة والحساسة بيئياً. وتم استبعاد هذه المناطق باستخدام أداة Erase في برنامج ArcGIS 10.5.1، بحيث يمكن أن تكون المنطقة المستبعدة معياراً أو قيداً في نفس الوقت؛ فعلي سبيل المثال فإن الاقتراب من طريق رئيسي يمثل عاملاً اقتصادياً يقلل من تكاليف نقل الطاقة، ومع ذلك فإن الاقتراب من هذا الطريق قد يكون أمراً غير ممكن من الناحية النظرية بسبب الحوادث والضوضاء والتنافس مع الاستخدامات الأرض الأخرى (Effat, 2014, P. 364). بينما تم إدخال تسعة معايير ذات تأثير في اتخاذ القرار وذلك بعد تحويل الطبقات الخطية منها إلى طبقات شبكية Raster Dataset وإعادة تصنيفها، ومن أهم هذه المعايير: المعدل السنوي لسرعة الرياح عند ارتفاع ٥٠ متر، ودرجات انحدار السطح، والمسافة من شبكة لنقل الكهرباء والمسافة من المدن والمسافة من الطرق البرية والحديدية والمطارات والمسافة من النطاق الساحلي والمسافة من المحميات الطبيعية.

٨ – النتائج والمناقشة.

٨ – ١ – نبذة تاريخية عن طاقة الرياح في مصر.

يرجع استخدام طاقة الريـــاح Wind Energy في مصر إلى زمـــن بعيد، فقد استخدمها المصري القديم في ري الأراضي الزراعية، ورفع المياه من المناطق

المنخفضة إلى المناطق الأعلى منسوباً، واستخراج المياه من الآبار، وطحن الحبوب وتسيير السفن الشراعية في نهر النيل لأغراض النقل والتجارة والأغراض العسكرية (الراوي والسامرائي، ١٩٩٠، ص ٢٩٢). وقد بدأ الاهتمام الفعلي للاستفادة من طاقة الرياح كأحد مصادر الطاقة النظيفة في مصر عام ١٩٨٦م، حيث أنشأت هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة New and Renewable Energy Authority (NREA) كهيئة تابعة لوزارة الكهرباء والطاقة المصرية عام ١٩٨٦م لتتولي مسئولية إقامة وتطوير قطاع الطاقة المتجددة وفقاً للظروف المحلية؛ ووضع خطة طموحة للحد من استهلاك الوقود التقليدي وآثاره السيئة علي البيئة، وتستهدف الهيئة الوصول بإنتاج مصادر الطاقة المتجددة نحو ٢٠٪ من إجمالي حجم الطاقة المستهلكة سنوياً في مصر بحلول عام ٢٠٢٢م ومضاعفة هذه النسبة في أفق عام ٢٠٣٥م (هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة، ٢٠١٨، ص ٥)

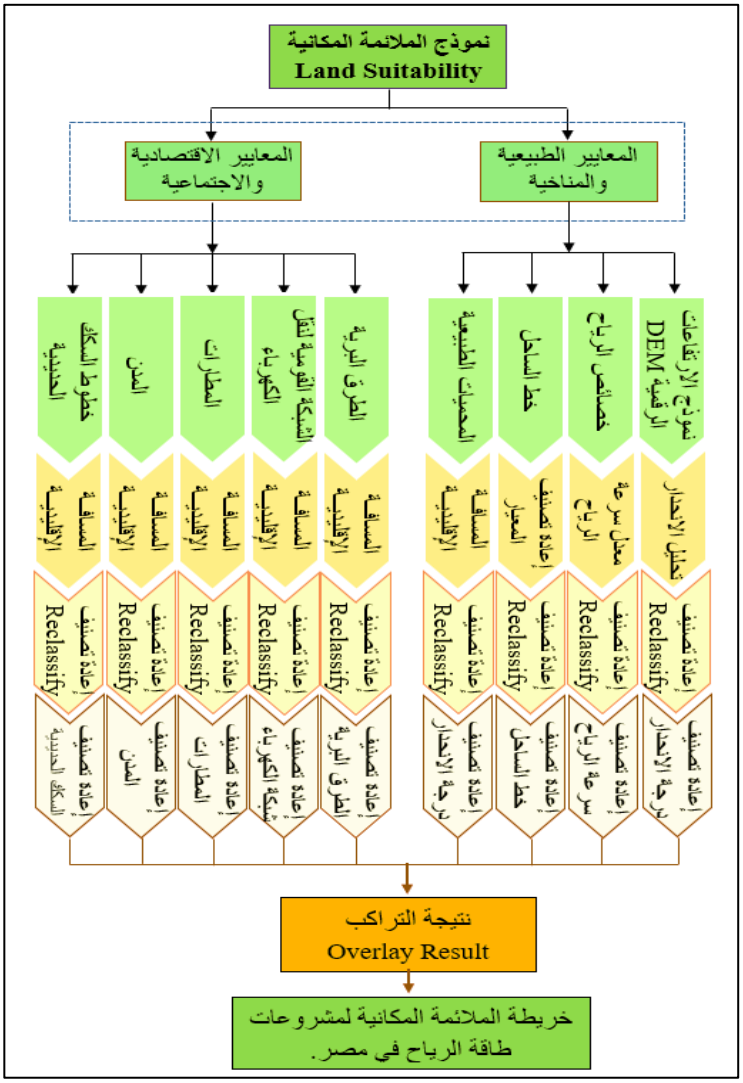
تصل الطاقة الإنتاجية للمشروعات الحكومية القائمة حالياً نحو ٧٥٠ ميجاوات (خريطة الطاقة المتجددة في مصر، ٢٠١٦، ص ٦). ففي بداية الثمانينات من القرن ٢٠ تم تركيب وحدة بقدرة ١٥ ك/ وات لأغراض ضخ المياه في شرق العوينات بالصحراء الغربية، وفي منتصف الثمانينات من القرن ٢٠ تم تركيب محطة تحلية بواسطة الرياح بقدرة ٥٥ ك/ وات في موقع أبو الغصون علي ساحل البحر الأحمر، وفي عام ١٩٨٨م تم تركيب ٤ توربينات في مدينة رأس غارب بقدرة إنتاجية ١١٠ ك/ وات، وفي ذات العام تم تركيب خمس توربينات في سيدي براني علي الساحل الشمالي بقدرة ٢٠٠ ك/ وات، وفي عام ١٩٨٩م تم تركيب محطة بها أربع توربينات في شرق العوينات بقدرة إنتاجية ١٠٠ ك/ وات، وفي عام ١٩٩١م تم تركيب محطة بها أربع توربينات

بقدرة ١٠٠ ك/ وات في مدينة الغردقة (ليلي جورجي، ٢٠١٢، ص ١٤).

في عام ١٩٩٤م وضعت هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة (NREA) دراسات علمية لإنشاء مزارع رياح علي خليج السويس، حيث رشحت إقامة مزرعة رياح كبري على هيئة مثلث قاعدته في الزعفرانة وقمته عند رأس أبو درج على بعد ٣٣ كم شمال الزعفرانة، وقد حققت وزارة الكهرباء والطاقة أهداف استراتيجية لخطة توليد الطاقة النظيفة من الرياح خلال الفترة ١٩٩٢م إلى ٢٠٠٥م؛ تشمل على توليد ٣٥٠ ميجاوات من طاقة الرياح بحلول العام ٢٠٠٥م واتصالها بالشبكة القومية للكهرباء، ومن أهم المشروعات المقامة حالياً محطة الزعفرانة؛ حيث تم توسعة المشروع على ثمانية مراحل، فالمرحلة الأولي أو ما يسمي (الزعفرانة ١) بها خمسين توربين قدرة كلاً منها ٦٠٠ ك / ت / يوم، وقد أتمت هيئة الطاقة الجديدة والمتجددة (NREA) حالياً المرحلة الثامنة أو (الزعفرانة ٨) (خلود حسام، ٢٠٠٤، ص ١٥٤). وقد أنشأت محطة جبل الزيت، علي ثلاث مراحل حتي الآن علي طريق (الزعفرانة – الغردقة)؛ وتعد هذه المحطة أكبر مشروع لإنتاج الطاقة الكهربائية من الرياح، كم تعد معملاً لتجربة التوربينات التي تصنعها الدول المختلفة، بسبب سرعة وانتظام الرياح بها طوال العام، حيث يلامس معدلها السنوي ١٠ م/ث ، بالإضافة إلي محطات أخري لتوليد طاقة الرياح مثل محطة رأس غارب، بطاقة متوقعة ٤٧١ ميجاوات/ ساعة، ومحطة رأس البحار بطاقة متوقعة ٥٨٥ ميجاوات/ ساعة، ومحطة الغردقة بطاقة متوقعة ٤٣١ ميجاوات / ساعة، (هبه محمود، ٢٠١٧، ص ص ١٢٨-١٣٢).

٨ – ٢ – معايير التقييم.

يمر بناء نموذج المعايير المتعددة Spatial Multi–Criteria Analysis (SMCA) بعدد من الخطوات التي يتم تنفيذهـــا تباعاً في بيئة نظـــم المعلومات



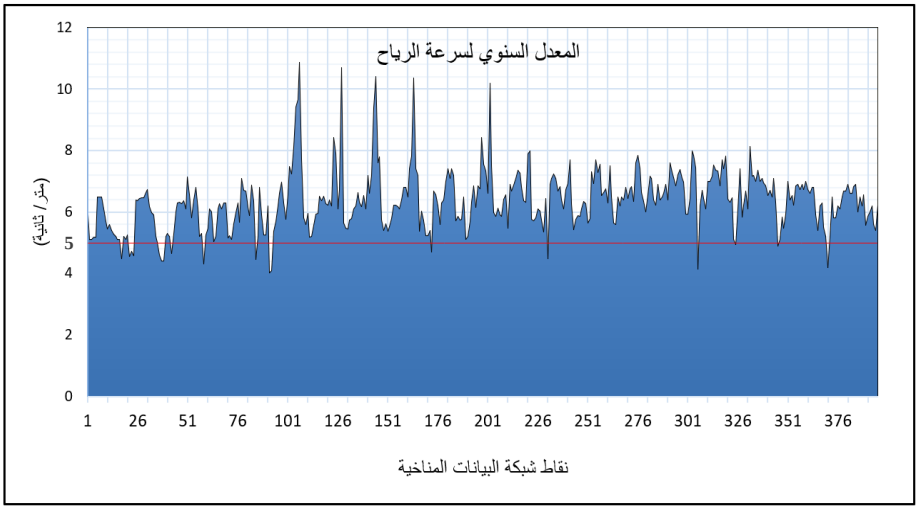
المصدر: من عمل الباحث.

شكل (٤) تخطيط لمراحل معالجة المعايير المختارة.

الجغرافيةGIS، حيث تم تحديد تسعة معايير وإعطاء كلاً منها وزناً نسبياً حسب أهميتها في التأثير على اختيار مواقع مشروعات طاقة الرياح في مصر. ولعل أهم المعايير؛ هو المعيار المناخي (المعدل السنوي لسرعة الرياح) فالمناطق التي تقل سرعة الرياح بها عن ٥ م/ ث لا تصلح لإقامة مزارع لحصاد طاقة الرياح، كما أن هناك معايير أخري مثل نسبة انحدار السطح، والمسافة من الطرق الرئيسية، والقرب من الشبكة القومية للكهرباء.. إلخ، كما هو موضح بالشكل أدناه.

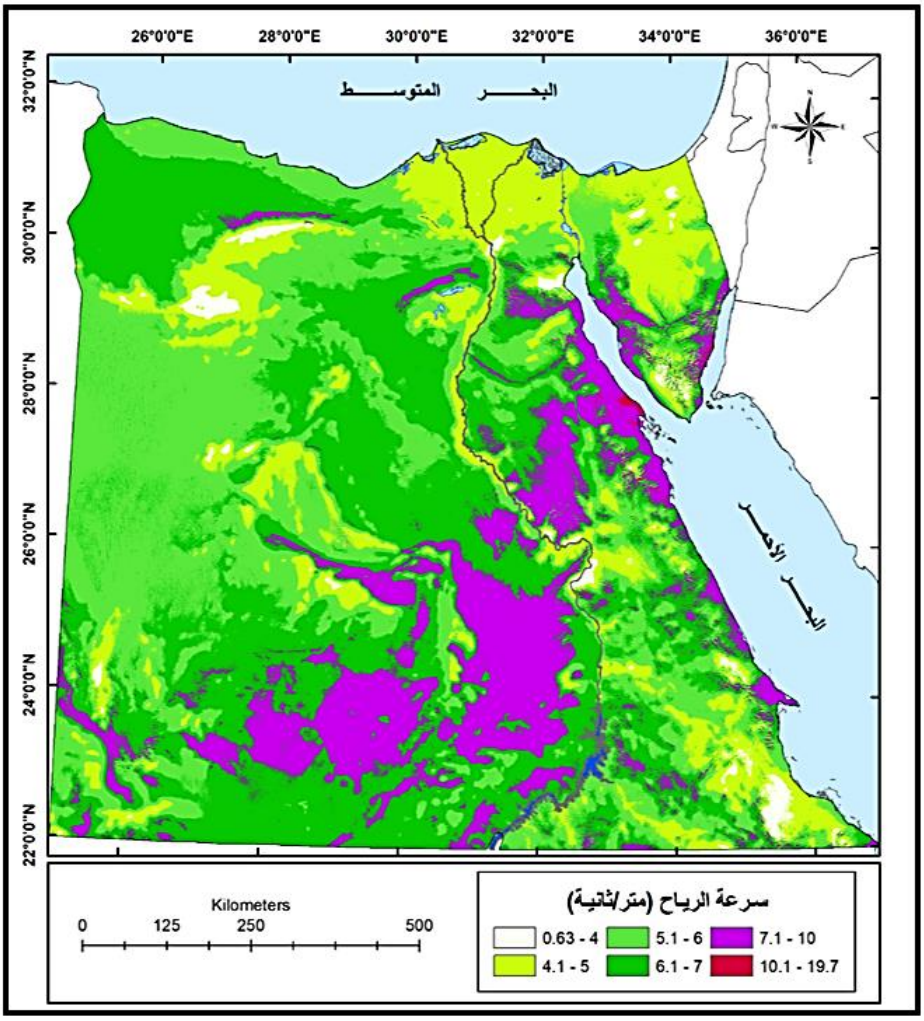
٨ – ٢ – ١ – تحليل الملاءمة المكانية لمعدلات سرعة الرياح.

يعد هذا المعيار أهم المعايير The most important criterion في اختيار مواقع مشروعات طاقة الرياح؛ فإذا قلت سرعة الرياح في المكان عن المعدل ات المتفق عليها علمياً؛ فلا جدوى اقتصادية لقيام المشروع. وتتسم



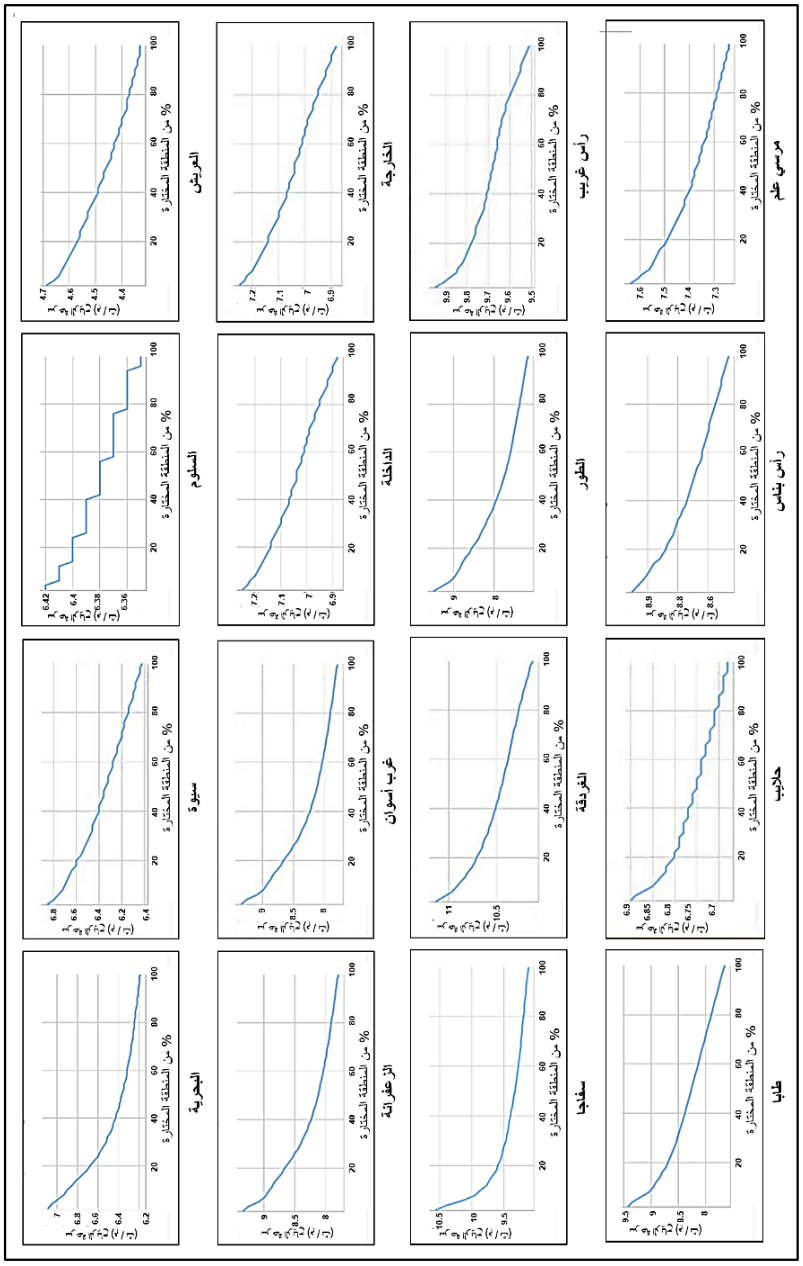
المصدر: من عمل الباحث؛ اعتماداً على المعدلات السنوية لسرعة الرياح بقاعدة البيانات POWER

شكل (٥) منحني بياني بسيط للمعدلات السنوية لسرعة الرياح في ٣٩٧ نقطة بقاعدة POWER تغطي كل مساحة مصر خلال الفترة (١٩٨٥–٢٠١٥م).



المصدر: من عمل الباحث اعتماداً على المعدلات السنوية لسرعة الرياح في ٣٩٧ نقطة بقاعدة POWER.

شكل (٦) المعدلات السنوية لسرعة الرياح (م/ث) في مصر خلال الفترة (١٩٨٥–٢٠١٥م).



شكل (٧) المعدلات السنوية لسرعة الرياح (متر/ث) في مناطق مختارة في مصر، عند ارتفاع ٥٠ متر.

المصدر: من عمل الباحث اعتماداً على بيانات سرعة الرياح.

الرياح بأنها أكثر عناصر المناخ ديناميكية وسرعة في تغير خصائصها الزمكانية؛ مما يعني أن كمية الطاقة المتوقع الحصول عليها ستتغير بشكل كبير من وقت لآخر، لذا يجب الاعتماد على القياسات الدقيقة لتتبع خصائص الرياح من حيث السرعة والاتجاه والاستمرارية والكثافة قبل البدء في المشروع.

وقد تم الحصول على البيانات السنوية لسرعة الرياح في مصر من قاعدة البيانات الشبكية العالمية Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) والتي تتيحها وكالة ناسا لعلوم الفضاء، بدقة مكانية ٠,٥ درجة عرضية وطولية، وبدقة تحديث زمانية وصلت إلى ثلاث ساعات مع التحديث الثامن للشبكة. ويتضح من البيانات المتحصل عليها والأشكال (٥)، (٦)، (٧) أن المعدل السنوي لسرعة الرياح على ارتفاع ٥٠ متر فوق مستوي سطح البحر في غالبية مساحة الأراضي المصرية يزيد عن أو يساوي (٥ متر/ ثانية)، وهذا يعني أن مصر من البلدان الواعدة في مستقبل استغلال طاقة الرياح، وأن مناطق خليج السويس وساحل البحر الأحمر من أعلي المناطق في معدل سرعة الرياح؛ فقد بلغت في بعض المناطق إلى نحو ١٠ متر / ثانية. ويتفق هذا مع ما نُشر في "أطلس الرياح في مصر عام ٢٠٠٥م الذي أكد على أن منطقة الزعفرانة على خليج السويس هي الأعلى في معدل سرعة الرياح السنوية؛ إذ تبلغ ٩ متر/ ثانية (أطلس الرياح في مصر، ٢٠٠٥).

ويظهر الشكلين (٦)، (٧) بوضوح أن المناطق الواقعة على خليج السويس وساحل البحر الأحمر وخليج العقبة وجنوبي مصر؛ ترتفع بها المعدلات السنوية لسرعة الرياح (م/ث)، فقد وصل معدل سرعة الرياح في الغردقة ١٠,٥م/ ث، وفي منطقة الزعفرانة ورأس غريب الواقعتين غرب خليج السويس ٩,٧م/ ث لكل منهما، وقد سجلت في غرب أسوان ٨,٥م/ ث، ووصلت سرعة الرياح في

الواحتين الخارجة والداخلة ٧م/ ث، وعلي ساحل البحر الأحمر وصل معدل السنوي لسرعة الرياح في رأس بناس ٨,٨م/ ث، وفي سفاجا ٩,٢/ ث وفي حلايب ٦,٨م/ ث.

وهناك خصائص أخري للرياح بخلاف سرعتها Wind Speed؛ لابد من تحليلها، مثل كثافة طاقة الرياح Wind Power Density، إذ تعد أحد خصائص الرياح المهمة، حيث أنها توفر معلومات عن المناطق الأكثر جدوي وربحية في المنطقة لاختيار موقع مزارع طاقة الرياح، حيث تتغير الطاقة المنتجة بتغير كثافة طاقة الرياح، إذ أن زيادتها تؤدي لزيادة كمية الطاقة التي تنتجها المحطة (Baban and Perry, 2001)، ويمكن حساب كثافة طاقة الرياح من خلال حساب سرعة الرياح في المكان وحساب كثافة الهواء Air Density التي تتباين باختلاف التضاريس، وذلك من خلال المعادلة التالية: $wpd = 1/2 \rho V^3$

حيث إن: wpd = كثافة طاقة الرياح (وات / متر٢).

ρ = كثافة الهواء (كجم/متر٣).

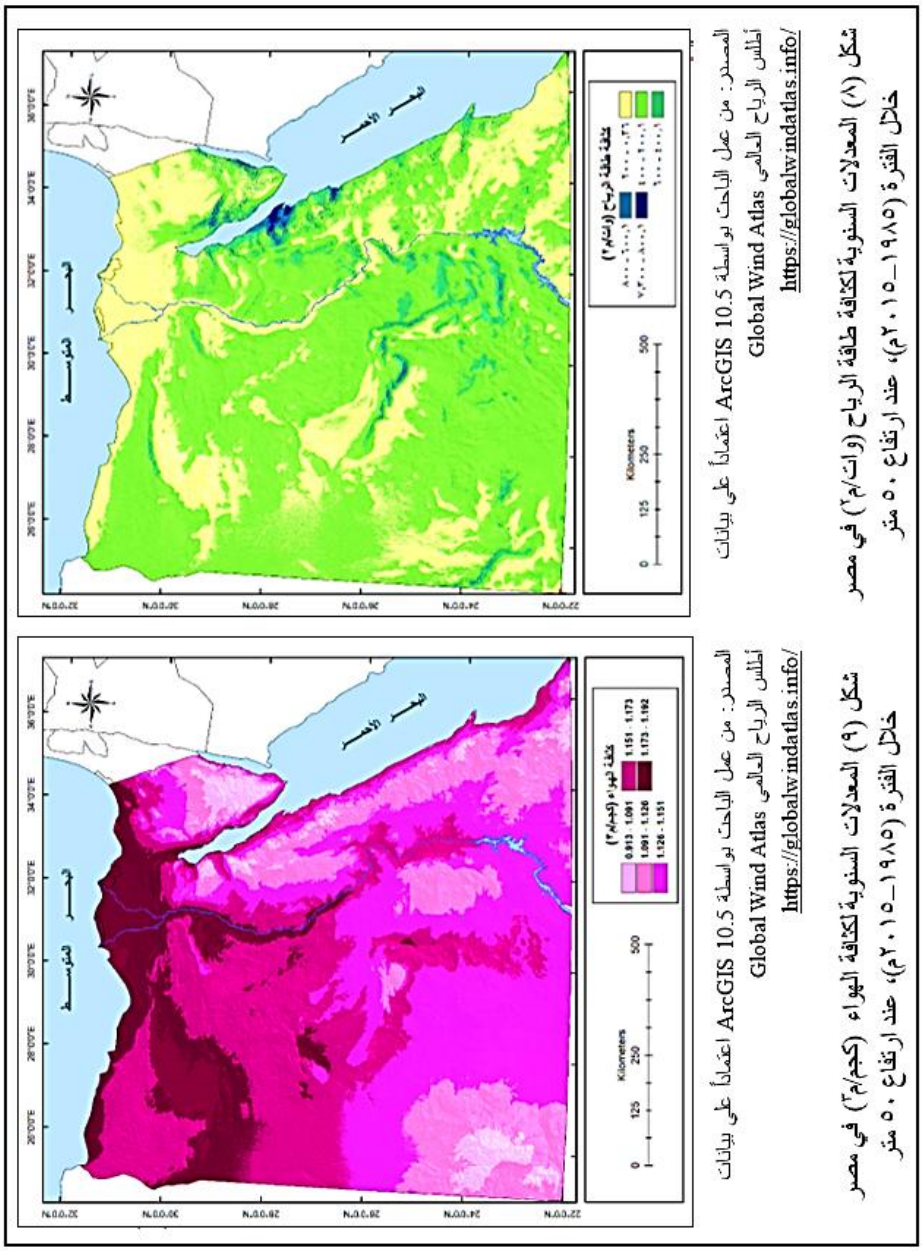
V = متوسط سرعة الرياح (متر/ثانية)

(Effat, 2014, P. 364) عن (Hughes, 2000)

ومن الشكلين (٨)، (١٠) نستنتج أن كثافة طاقة الرياح Wind Power Density تعد مثالية لإقامة مشروعات طاقة الرياح في مناطق متعددة من مصر؛ ومن أمثلتها (جانبي خليج السويس وساحل البحر الأحمر وجنوبي مصر). وقد بلغ المعدل الإجمالي السنوي لكثافة طاقة الرياح في مصر (٤٥٦ وات/م^{٢})، وبلغ المعدل الإجمالي السنوي لسرعة الرياح Wind Speedفي مصر (٧,٦٦م/ث)، أما عن اتجاهات الرياح Wind Directionفي مصر إجمالاً؛ فتتفاوت بين

شمالية بنسبة ٢٥٪، وشمالية شرقية بنسبة ٢٥٪ وشمالية غربية بنسبة ١٧٪، وتمثل الاتجاهات الأخرى النسبة الضئيلة المتبقية، مما يعني ان اتجاهات هبوب الرياح في مصر يغلب عليها الثبات؛ وتلك ميزة مهمة في إقامة مشروعات طاقة الرياح. ويلاحظ وجود علاقة طردية بين كثافة طاقة الرياح (وات / م^{٢}) وسرعتها (م / ث) في المكان، فكلما زادت سرعة الرياح زادت كثافة طاقتها والعكس صحيح. ومن الشكل (١٠) نلاحظ ضعف كثافة طاقة الرياح في سواحل مصر الشمالية والدلتا المصرية؛ فقد بلغ المعدل السنوي لكثافة طاقة الرياح في رفح ١٢٠ وات/ م^{٢}، وفي بورسعيد ١٥٠ وات/ م^{٢}، وفي الإسكندرية ١٥٠ وات/ م^{٢}، وتزداد كثافة طاقة الرياح نسبياً في مرسي مطروح والسلوم ٢٧٥ وات/ م^{٢}، ٤١٠ وات/ م^{٢} لكل منهما على التوالي.

وسجلت النقاط المختارة على خليج السويس وساحل البحر الأحمر وجنوبي مصر وساحل خليج العقبة معدلات مرتفعة لكثافة طاقة الرياح تتناسب طردياً مع معدلات سرعة الرياح المرتفعة في هذه المناطق؛ فعلي جانبي خليج السويس سجلت كل المواقع معدلات سنوية مرتفعة من كثافة طاقة الرياح، فقد بلغ المعدل السنوي في منطقة الزعفرانة ٤٩٠ وات/ م^{٢}، والطور ٥٠٠ وات/ م^{٢}، ورأس غريب ٧٧٠ وات/ م^{٢}. أما ساحل البحر الأحمر فقد سجلت أغلب المواقع المختارة معدلات مرتفعة لكثافة طاقة الرياح؛ حيث بلغت في الغردقة ١١٠٠ وات/ م^{٢}، وفي سفاجا ٨٢٠ وات/ م^{٢}، ومرسي علم ٤٠٠ وات/ م^{٢}، وحلايب ٣٠٠ وات/ م^{٢}. أما جنوبي مصر وواحات جنوبي الصحراء الغربية، فقد بلغ المعدل السنوي لكثافة طاقة الرياح في غرب أسوان ٥٧٠ وات/ م^{٢}، وتوشكي ٤٠٠ وات/ م^{٢}، وشرق العوينات ٣٥٠ وات/ م^{٢} وواحتي الخارجة والداخلة ٤٠٠ وات/ م^{٢}، وتنبئ هذه البيانات بملائمة مساحات كبيرة من الأراضي

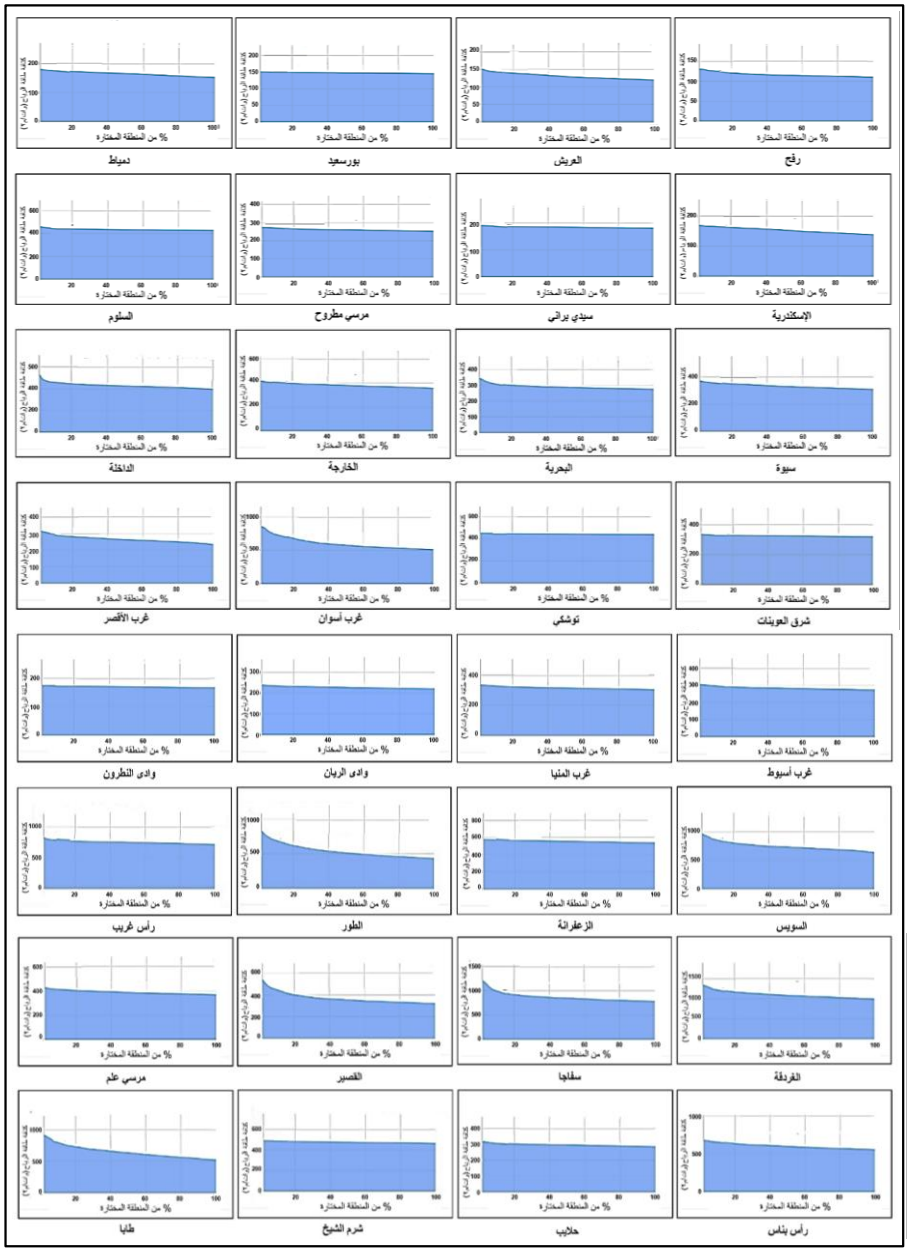


المصدر: من عمل الباحث بواسطة ArcGIS 10.5 اعتماداً على بيانات أطلس الرياح العالمي Global Wind Atlas
https://globalwindatlas.info/

شكل (٨) المعدلات السنوية لكثافة طاقة الرياح (وات/م٢) في مصر خلال الفترة (١٩٨٥_٢٠١٥م)، عند ارتفاع ٥٠ متر

المصدر: من عمل الباحث بواسطة ArcGIS 10.5 اعتماداً على بيانات أطلس الرياح العالمي Global Wind Atlas
https://globalwindatlas.info/

شكل (٩) المعدلات السنوية لكثافة الهواء (كجم/م٣) في مصر خلال الفترة (١٩٨٥_٢٠١٥م)، عند ارتفاع ٥٠ متر



المصدر: من عمل الباحث اعتماداً على بيانات كثافة طاقة الرياح في أطلس الرياح العالمي.

شكل (١٠) المعدلات السنوية لكثافة طاقة الرياح (وات/م^{٢}) في مناطق مختارة في مصر، عند ارتفاع ٥٠ متر فوق مستوي سطح البحر.

المصرية لإنشاء مزارع حصاد طاقة الرياح.

وتعد كثافة الهواء Air Density، من خصائص الرياح الهامة أيضاً؛ وتعرف علمياً بأنها "الكتلة لكل وحدة حجم من الغلاف الجوي. وتتناقص بالارتفاع"، كما أن كثافة الهواء تتناسب عكسياً مع درجة حرارة الهواء فكلما زادت درجة حرارة الهواء قلت كثافته، لذلك فكثافة الهواء شتاءً أعلي من كثافة الهواء صيفاً. وتحسب كثافة الهواء Air Density وفقاً للمعادلة التالية:

$$\rho = 1.225 - \left[\left(1.194 \times 10^{-4}\right) \times \text{elevation}\,(\text{m})\right]$$

حيث إن: Elevation هي ارتفاع المنقطة عن مستوي سطح البحر (Baban and Perry, 2001, P. 65)

ومن فحص الخريطة (٩) نلاحظ أن كثافة الهواء في مصر (كجم/م٣) ترتفع في المناطق السهلية والمنخفضة وتقل في المناطق المرتفعة والجبلية، فقد سجلت كثافة الهواء في منطقة الدلتا وسواحل شمالي مصر أعلي القيم؛ حيث تتراوح ما بين (١,١٩٢: ١,١٧٣كجم/ م٣)، بينما بلغت أدناها في مناطق سلاسل جبال البحر الأحمر والمثلث الجبلي بجنوب سيناء وجبل عوينات، حيث سجلت كثافة الهواء بهم ما بين (١,٠٩١: ٠,٩١٣كجم/ م٣).

٨ – ٢ – ٢ – إعادة تصنيف معدل سرعة الرياح في مصر.

تم إعادة تصنيف Reclassify الطبقة الشبكية Raster Datasetالخاصة بالمعدل السنوي لسرعة الرياح في مصر، والذي يعد المعيار الأهم على الإطلاق في هذه الدراسة؛ لذا سنعطي له وزناً نسبياً أعلي من أي معيار آخر من المعايير المدخلة إلى النموذج، حيث أعطيت قيم جديدة لتوزيع المعدل السنوي لسرعة

الرياح في مصر على ارتفاع ٥٠ متر فوق مستوي سطح البحر كما هو مبين بالجدول (١) والشكل (١١) التاليين:

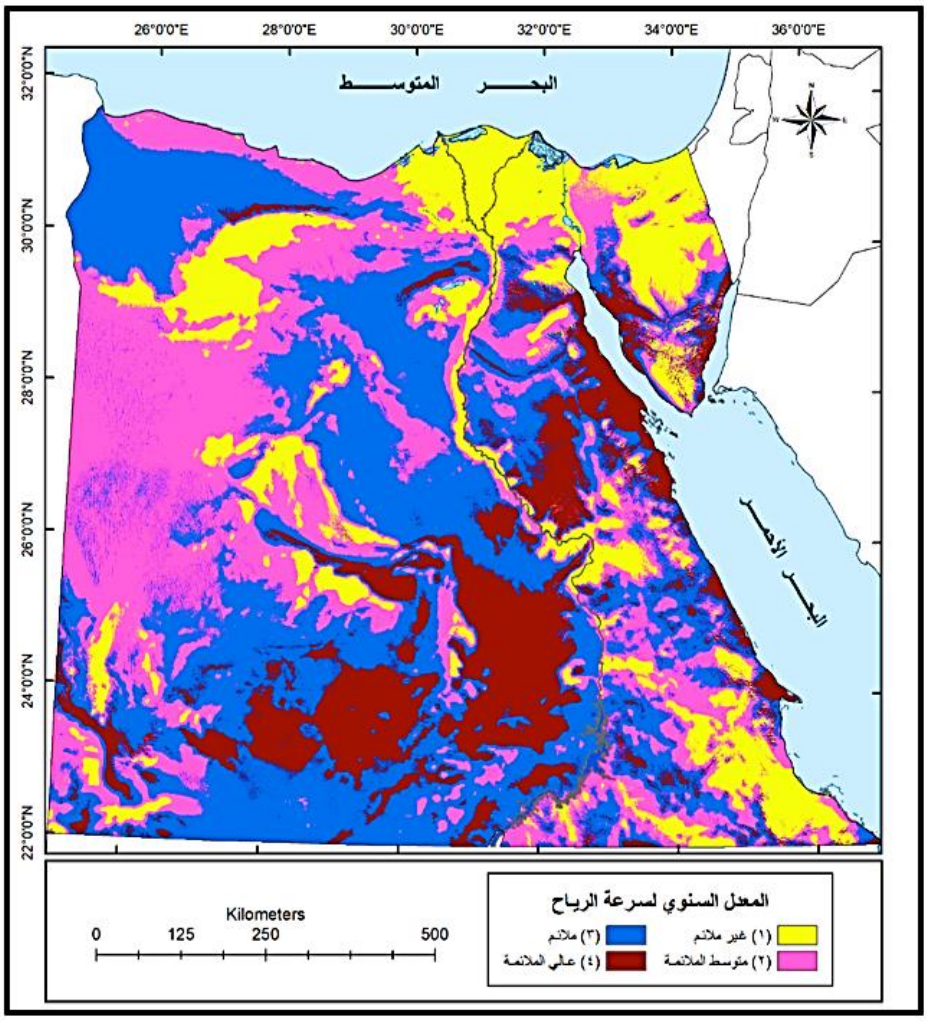
جدول (١) إعادة تصنيف المعدل السنوي لسرعة الرياح (م/ ث) على ارتفاع ٥٠ م.

اسم الطبقة	القيم القديمة	القيم الجديدة	الوصف
المعدل السنوي لسرعة الرياح (م/ ث) على ارتفاع ٥٠ متر.	٠,٦٣: ٥ (م/ ث)	١	غير ملائم
	٥: ٦ (م/ ث)	٢	متوسط الملائمة
	٦: ٧ (م/ ث)	٣	ملائم
	٧: ١٩,٧ (م/ ث)	٤	عالي الملائمة

٨ – ٢ – ٣ – إعادة تصنيف درجات انحدار السطح في مصر.

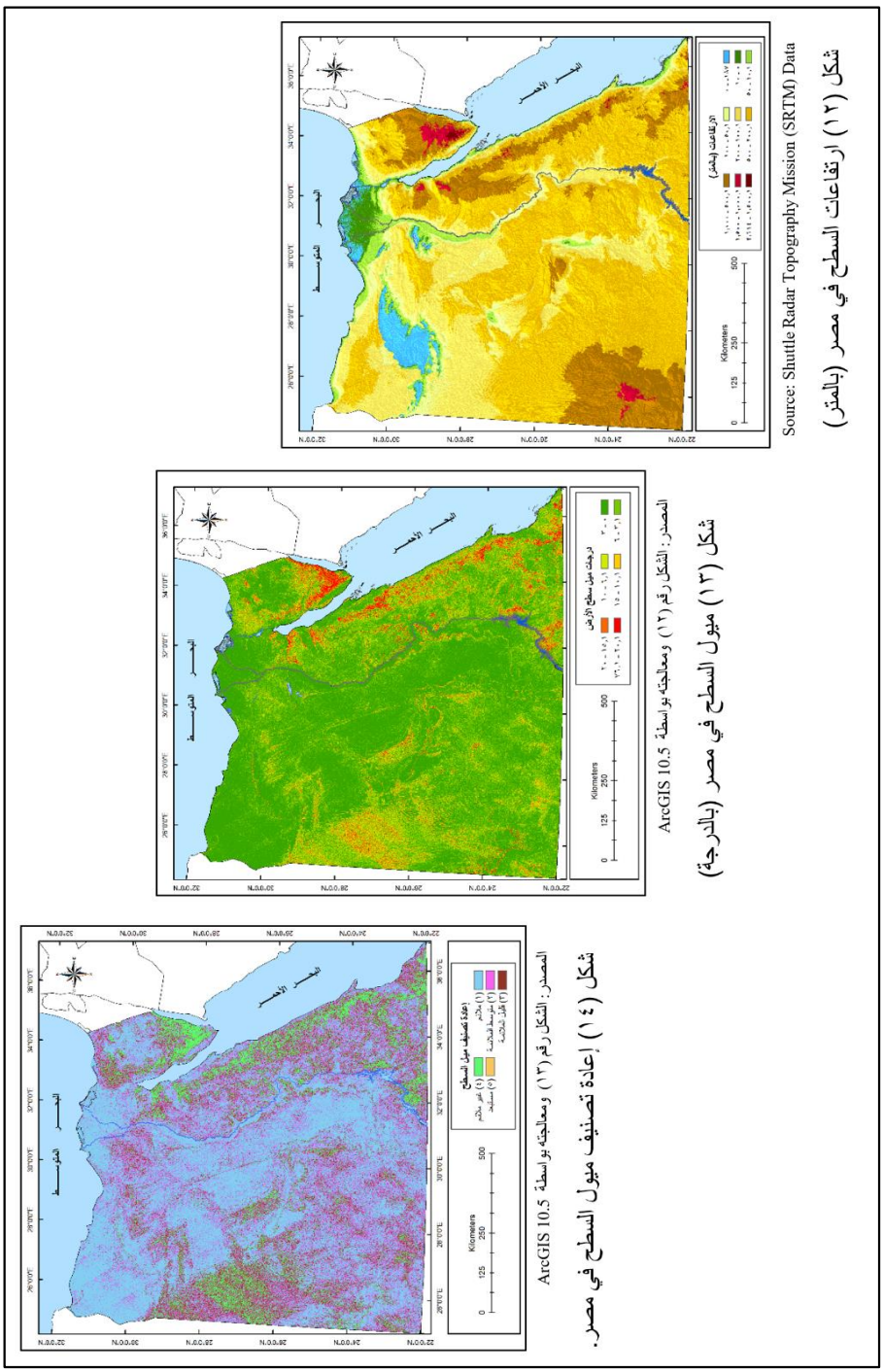
باستخدام نموذج الارتفاعات الرقمية DEM من نوع SRTM 3 والذي تم إنتاجه بالتعاون بين الوكالة القومية لعلوم الجو والفضاء NASA ووكالة الاستخبارات القومية الأمريكية، ومن الشكل (١٢) يتبين أن مناسيب السطح في مصر تتراوح بين (– ١٨٧ حتى ٢٦١٤ متراً)، وتتركز الأجزاء المرتفعة بمحاذاة البحر الأحمر وجنوب سيناء وأقصي جنوب غرب مصر، وقد تم التعامل مع هذه البيانات من خلال برنامج ArcGIS 10.5 وبتطبيق أداة حساب الانحدار Slope للحصول على درجات الانحدار في الأراضي المصرية؛ ثم إعادة تصنيفها حسب درجة وملاءمتها لقيام مشروعات استغلال طاقة الرياح، ومن الجدول (٢) والشكل (١٣) يتبين أن درجات الانحدار تتراوح في مصر بين (صفر: ٧٦,١ درجة).

وتتسبب زيادة انحدار سطح الأرض عن خمس درجات في زيادة اضطراب الرياح؛ وعدم استقرار واضطراب عمل العنفات الخاصة بالتوربينات في منطقة



المصدر: من عمل الباحث اعتماداً على الشكل (٥) لسرعة الرياح في مصر على ارتفاع ٥٠م.

شكل (١١) إعادة تصنيف Reclassify المعدل السنوي لسرعة الرياح (م/ ث) في مصر على ارتفاع ٥٠ م.



Source: Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Data

شكل (١٢) ارتفاعات السطح في مصر (بالمتر)

المصدر: الشكل رقم (١٢) ومعالجته بواسطة ArcGIS 10.5

شكل (١٣) ميول السطح في مصر (بالدرجة)

المصدر: الشكل رقم (١٣) ومعالجته بواسطة ArcGIS 10.5

شكل (١٤) إعادة تصنيف ميول السطح في مصر.

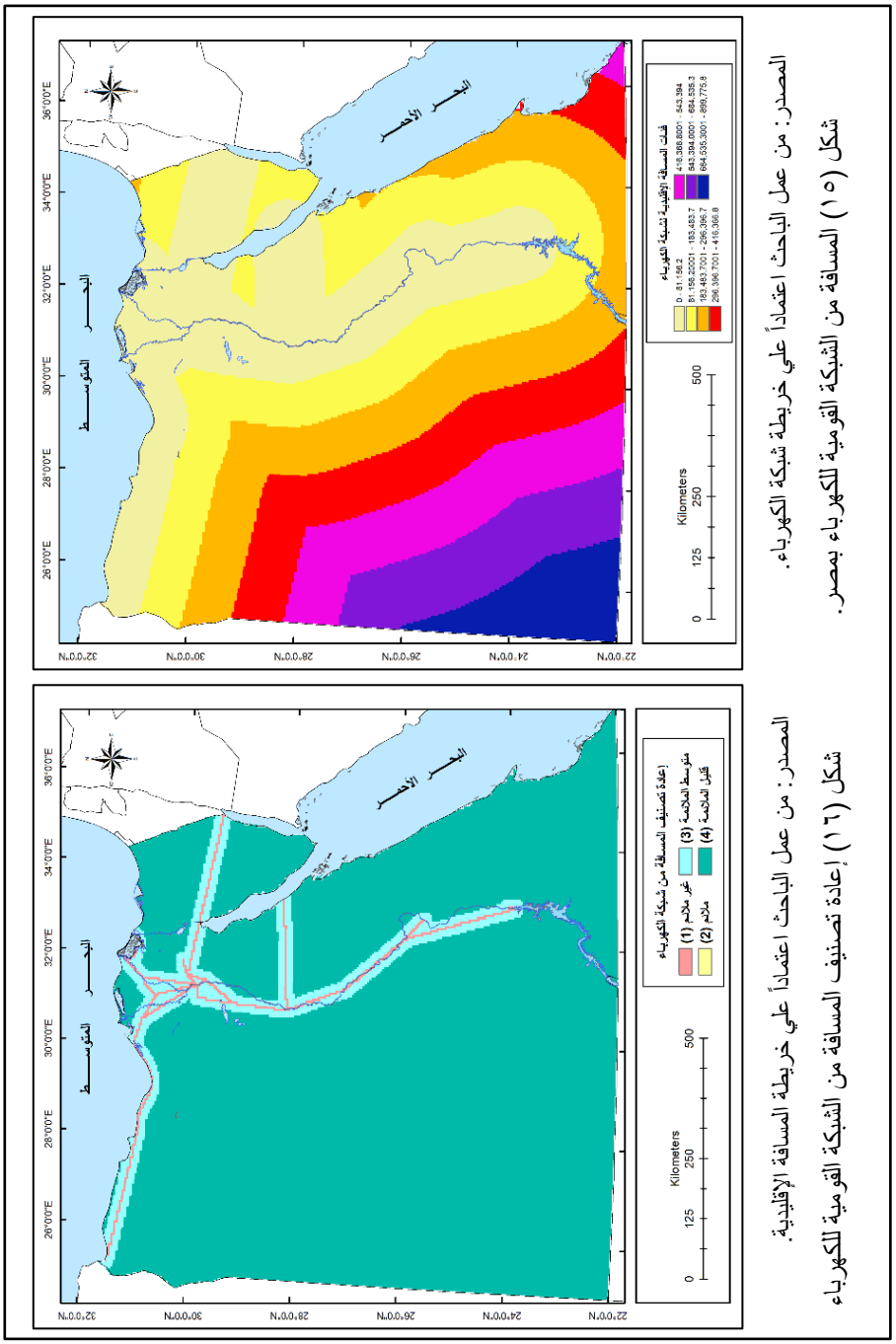
جدول (٢) إعادة تصنيف درجات انحدار سطح الأرض (بالدرجات) في مصر.

اسم الطبقة	القيم القديمة	القيم الجديدة	الوصف
درجات انحدار سطح الأرض في مصر.	صفر: ٣°	١	عالي الملائمة
	٣,١: ٥°	٢	متوسط الملائمة
	٥,١: ١٠°	٣	قليل الملائمة
	١٠,١: ٧٦,١°	٤	غير ملائم

المشروع، كما أن زيادة درجة انحدار السطح عن ٩ درجات يزيد من احتمالية فشل التوربين في تحقيق مهمته بنجاح (Effat, 2014, P.364). وقد تم إعادة تصنيف درجات الانحدار Reclassify Slope إلى أربع قيم جديدة؛ كما هو مبين بالشكل (١٤) والجدول (٢) تتراوح بين القيمة ١ إلي القيمة ٤، بحيث تكون القيم الصغيرة هي الأكثر ملائمة والقيم الكبيرة هي الأقل ملائمة، ويظهر في الشكل (١٤) أن الدلتا والساحل الشمالي الغربي لمصر والقطاع الطولي غرب النيل ووسط سيناء تأخذ أعلي فئات الملائمة حيث استواء السطح، بينما تأخذ جبال جنوب سيناء وجبال البحر الأحمر أدني قيم الملائمة المكانية بسبب التضرس الشديد، ويبين الجدول رقم (٢) القيم المعطاة لدرجات الانحدار عند إعادة تصنيف هذه الطبقة.

٨ – ٢ – ٤ – المسافة من الشبكة القومية للكهرباء.

يمثل هذا المعيار أحد المعايير الاقتصادية Economic Criteriaالمهمة، ومن الأهمية بمكان أن يوضع محل نظر المخطط لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح، وتبرز أهمية هذا المعيار في أن وجوده يقلل من تكاليف نقل الطاقة الكهربائية المولدة من المشروع، كما أنه يقلل من فاقد الطاقة الناتج عن بعد



المصدر: من عمل الباحث اعتماداً علي خريطة شبكة الكهرباء.

شكل (١٥) المسافة من الشبكة القومية للكهرباء بمصر.

المصدر: من عمل الباحث اعتماداً علي خريطة المسافة الإقليدية.

شكل (١٦) إعادة تصنيف المسافة من الشبكة القومية للكهرباء

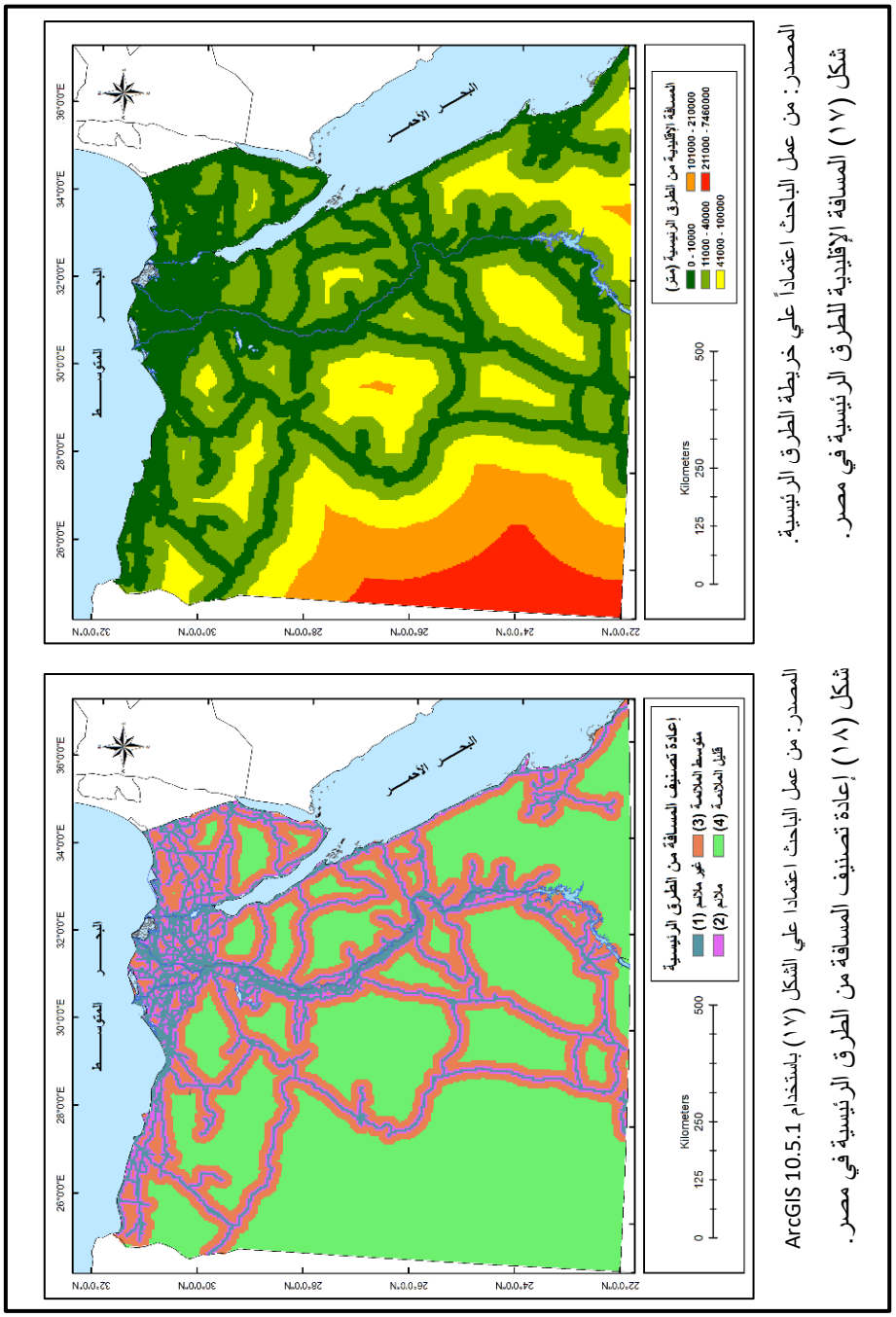
المسافة، فكلما اقترب موقع المشروع من الشبكة القومية لنقل الكهرباء في مصر؛ كان ذلك أكثر ملائمة من البعد عنها. وقد تم تحديد هذا المعيار لمسافات بعد تتراوح بين (٥٠٠ متر: ٢٠٠٠٠ متر) باستخدام أداة المسافة الإقليدية Euclidian Distance، ضمن مجموعة أدوات التحليل المكاني Euclidean Distance/Distance/ ثم إعادة تصنيف المسافة من الشبكة القومية للكهرباء؛ ويوضح الشكل (١٦) والجدول (٣) عملية إعادة التصنيف التي تم إجراؤها على هذا المعيار؛ وإعطاء المسافات قيم لها دلالة للملائمة المكانية، حيث تعد المنطقة ملائمة وفق هذا المعيار ما لم تزد عن ٥٠٠٠م؛ وتقل الملائمة المكانية بزيادة المسافة. ويقترح آخرين بأنه يجب الاحتفاظ بمسافة ٢٥٠ متراً على الأقل من خطوط الضغط العالي (Effat, 2014, P.365).

جدول (٣) إعادة تصنيف المسافة من الشبكة القومية للكهرباء في مصر (م).

اسم الطبقة	القيم القديمة	القيم الجديدة	الوصف
المسافة من الشبكة القومية لنقل الكهرباء	صفر: ٥٠٠ م	١	غير ملائم
	٥٠٠: ٥٠٠٠ م	٢	ملائم
	٥٠٠٠: ٢٠٠٠٠ م	٣	متوسط الملائمة
	٢٠٠٠٠< م	٤	قليل الملائمة

٨ – ٢ – ٥ – المسافة من شبكة الطرق (البرية – السكك الحديدية).

يعد هذا المعيار من المعايير المهمة للغاية في اختيار مواقع مشروعات طاقة الرياح، حيث تعد سهولة الوصول إلى مشروعات الطاقة المتجددة ونقل المعدات ولوازم إقامة المشروع وصيانته اشتراطات مهمة للغاية في إقامة المشروع، ثم تحديد المسافات من الطرق البرية الرئيسية باستخدام أداة المسافة الإقليدية Euclidian Distance، ثم أعادة تصنيف فئات المسافة وفق الجدولين (٤)

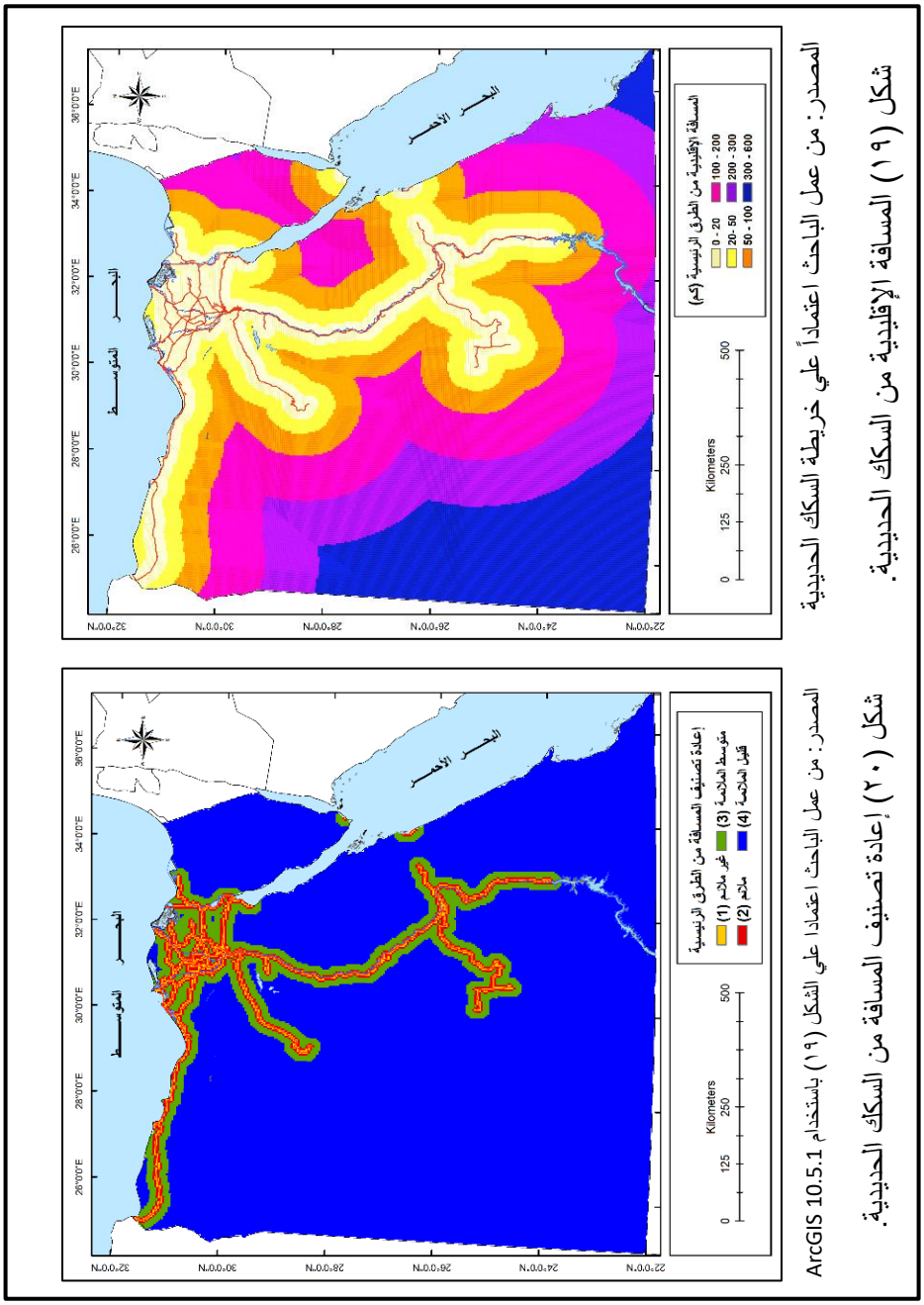


المصدر: من عمل الباحث اعتماداً علي خريطة الطرق الرئيسية.

شكل (١٧) المسافة الإقليدية للطرق الرئيسية في مصر.

المصدر: من عمل الباحث اعتمادا علي الشكل (١٧) باستخدام ArcGIS 10.5.1

شكل (١٨) إعادة تصنيف المسافة من الطرق الرئيسية في مصر.



المصدر: من عمل الباحث اعتماداً على خريطة السكك الحديدية

شكل (١٩) المسافة الإقليمية من السكك الحديدية.

المصدر: من عمل الباحث اعتمادا على الشكل (١٩) باستخدام ArcGIS 10.5.1

شكل (٢٠) إعادة تصنيف المسافة من السكك الحديدية.

جدول (٤) إعادة تصنيف المسافة من شبكة الطرق في مصر.

اسم الطبقة	القيم القديمة	القيم الجديدة	الوصف
الطرق الرئيسية في مصر	صفر: ٥٠٠ متر	١	غير ملائم
	٥٠٠: ٥٠٠٠ متر	٢	ملائم
	٥٠٠٠: ٢٠٠٠٠ متر	٣	متوسط الملائمة
	أكثر من ٢٠٠٠٠ متر	٤	قليل الملائمة

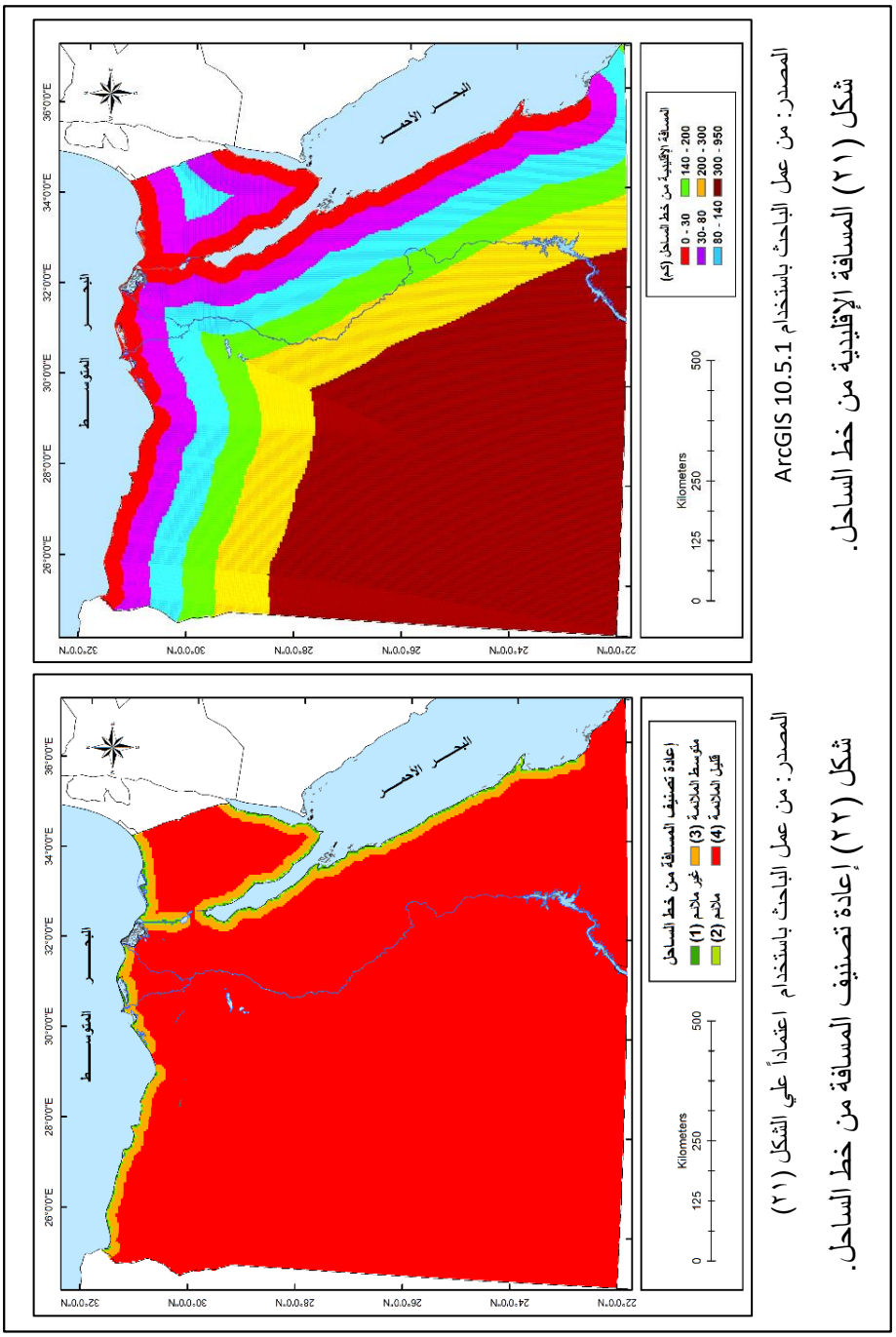
جدول (٥) إعادة تصنيف المسافة من السكك الحديدية في مصر.

اسم الطبقة	القيم القديمة	القيم الجديدة	الوصف
المسافة من السكك الحديدية في مصر	صفر: ٥٠٠ متر	١	غير ملائم
	٥٠٠: ٥٠٠٠ متر	٢	ملائم
	٥٠٠٠: ٢٠٠٠٠ متر	٣	متوسط الملائمة
	أكثر من ٢٠٠٠٠ متر	٤	قليل ملائم

و (٥) والشكلين (١٨) و (٢٠) تم إعطاءها قيم جديدة، حيث تعد المنطقة (٥٠٠ متر : ٥٠٠٠ متر) الأعلى ملائمة وفق هذا المعيار، والمنطقة أكثر من (٢٠٠٠٠ متر) الأقل ملائمة (جمعة داود ومسعد سلامة، ٢٠١٦، ص ٤٥٤).

٨ – ٢ – ٦ – المسافة من خط الساحل وإعادة تصنيفها.

اقترحت (Moiloa, 2009, P. 52) أن تستبعد المسافة الملاصقة لخط الساحل بمقدار ٤ كم، إلا أن بعض الدراسات مثل Mohamed Attia, 2017. P. (53) قد استبعد المسافة الملاصقة لخط الساحل بمقدار ٥٠٠ متر فقط، تجنبا لمسارات هجرة الطيور والأنشطة البحرية والسياحية المختلفة، وسوف نعتمد الرأي الثاني في هذه الدراسة، حيث تعد هذه المناطق غير مناسبة لأولويات استخدام الأرض الأخرى كمناطق الاستجمام والمدن السياحية ووحدات الصيد



المصدر: من عمل الباحث باستخدام ArcGIS 10.5.1

شكل (٢١) المسافة الإقليدية من خط الساحل.

المصدر: من عمل الباحث باستخدام اعتماداً على الشكل (٢١)

شكل (٢٢) إعادة تصنيف المسافة من خط الساحل.

البحري وغيرها. حيث تم تقسيم فئات المسافة من الشاطئ باستخدام أداة Euclidian Distance، ثم تم إعادة تصنيف المسافة باستخدام أداة Reclassify كما هو مبين بالجدول (٥)، والشكل (٢٢) حيث إن المناطق التي تتراوح بين ٥٠٠: ٥٠٠٠ متر من خط الساحل أقل ملائمة، أما المناطق التي تبتعد عن خط الساحل بما يزيد عن ٢٠٠٠٠ متر فقد تم تصنيفها على أنها مثالية.

جدول (٦) إعادة تصنيف المسافة من خط الساحل في مصر.

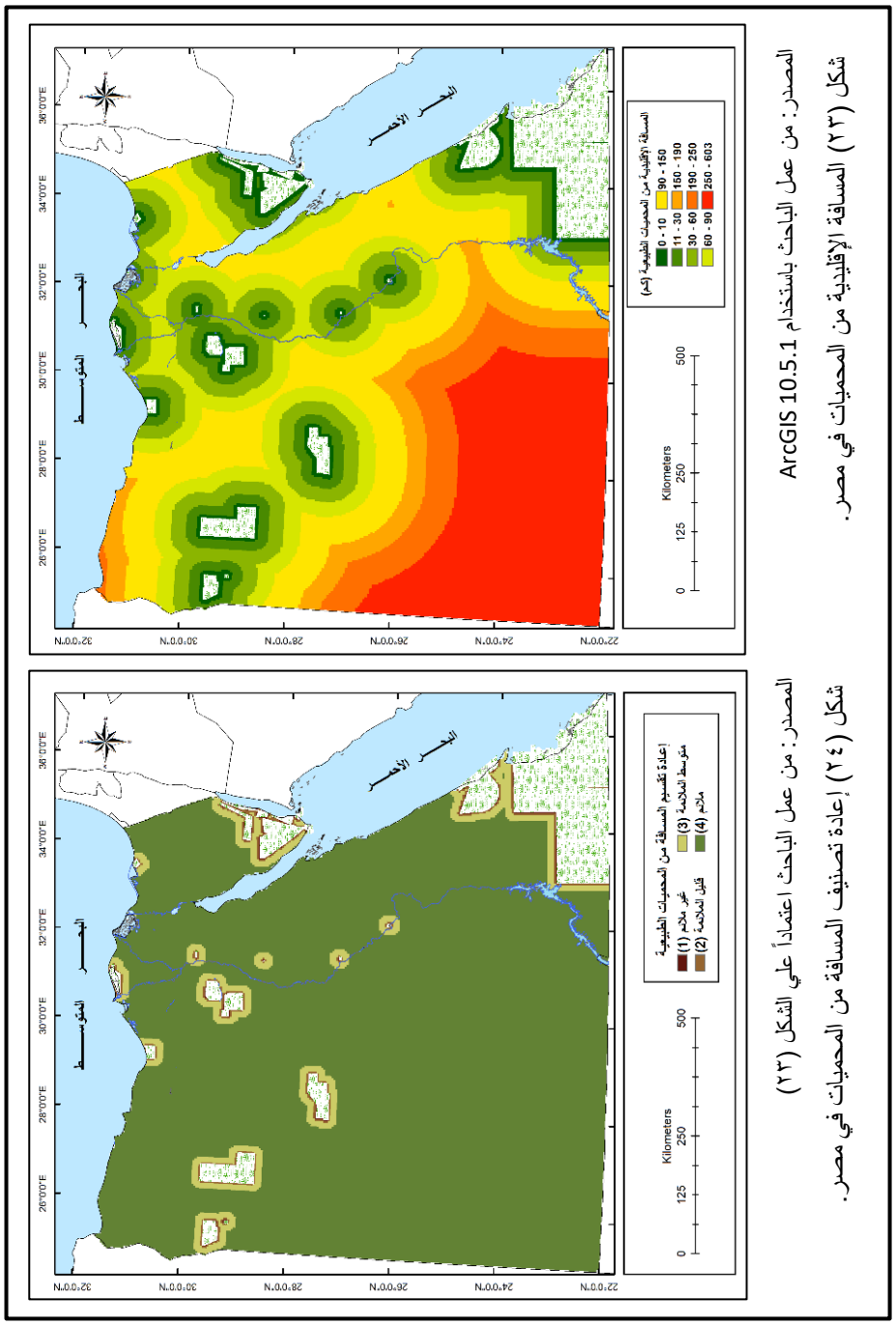
اسم الطبقة	القيم القديمة	القيم الجديدة	الوصف
إعادة تصنيف المسافة من خط الساحل في مصر	صفر: ٥٠٠ متر	١	غير ملائم
	٥٠٠: ٥٠٠٠ متر	٢	قليل الملائمة
	٥٠٠٠: ٢٠٠٠٠ متر	٣	متوسط الملائمة
	أكثر من ٢٠٠٠٠ متر	٤	ملائم

٨ – ٢ – ٧ – المسافة من المحميات الطبيعية وإعادة تصنيفها.

تم عزل مناطق المحميات الطبيعية عن جملة الأراضي المرشحة لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح باستخدام أداة Erase في برنامج ArcGIS

جدول (٧) إعادة تصنيف المسافة من المحميات الطبيعية في مصر.

اسم الطبقة	القيم القديمة	القيم الجديدة	الوصف
إعادة تصنيف المسافة من المحميات الطبيعية	صفر: ٥٠٠ م	١	غير ملائم
	٥٠٠: ٥٠٠٠ م	٢	قليل الملائمة
	٥٠٠٠: ١٠٠٠٠ م	٣	متوسط الملائمة
	أكثر من ١٠٠٠٠ متر	٤	ملائم



المصدر: من عمل الباحث باستخدام ArcGIS 10.5.1

شكل (٢٣) المسافة الإقليمية من المحميات في مصر.

المصدر: من عمل الباحث اعتماداً على الشكل (٢٣)

شكل (٢٤) إعادة تصنيف المسافة من المحميات في مصر.

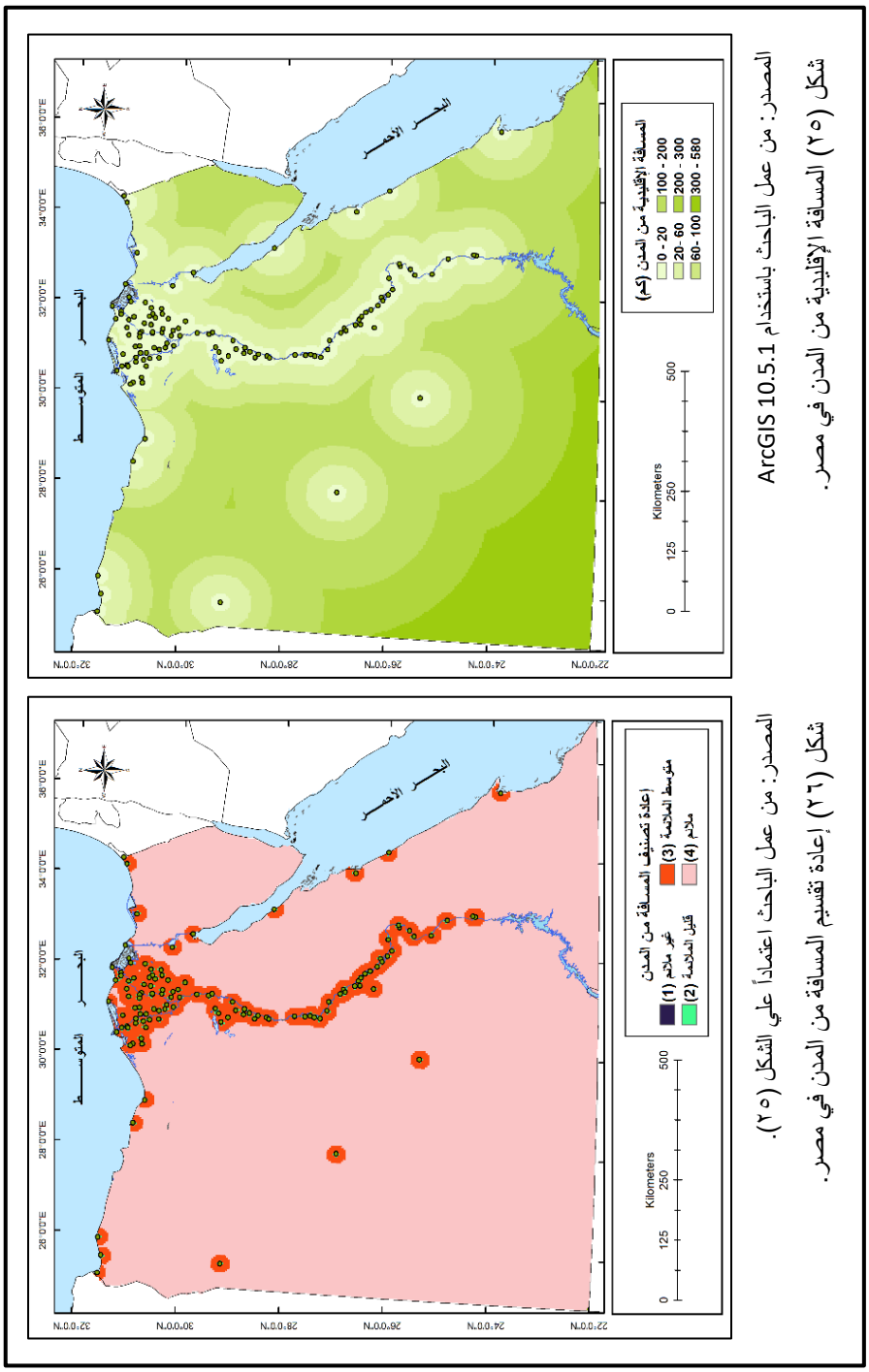
10.5.1؛ على أساس أن هذه الأراضي تخضع لاشتراطات قانونية وتشريعات بيئية وضعتها الدولة المصرية من أجل الحفاظ على الحياة البرية والتنوع البيئي بتلك المحميات. كما تم إعادة تصنيف فئات المسافة من المحميات؛ كما هو مبين بالشكل (٢٤) والجدول (٧)، حيث إن المناطق التي يتراوح بعدها عن المحميات بين ٥٠٠: ٥٠٠٠ متر تصنف بأنها قليلة الملائمة، أما المناطق التي تبتعد عن حدود المحميات بما يزيد عن ١٠٠٠٠ متر فقد صنفت على أنها ملائمة.

٨ – ٢ – ٨ – المسافة من المدن وإعادة تصنيفها.

يسبب اقتراب التوربينات من المناطق السكنية الضوضاء والإزعاج للسكان، حيث يحدث تشغيلها صوتاً عالياً نسبياً، كما أنها تشوه المنظر الجمالي للمناطق المفتوحة الملاصقة للمدن، لذلك تعد المسافة من المدن واحدة من المعايير الهامة في اختيار مواضع مشاريع حصاد طاقة الرياح. وقد تم إعادة تصنيف هذه الطبقة كما هو مبين بالشكل (٢٦) والجدول (٨)، حيث إن المناطق التي تتراوح بين صفر: ٢٠٠٠ متر تصنف بأنها غير ملائمة، أما المناطق التي تبتعد عن حدود المدن بما يزيد عن ٢٠٠٠٠ متر فقد صنفت على أنها ملائمة.

جدول (٨) إعادة تصنيف المسافة من المدن في مصر.

اسم الطبقة	القيم القديمة	القيم الجديدة	الوصف
إعادة تصنيف المسافة من المدن.	صفر: ٢٠٠٠ م	١	غير ملائم
	٢٠٠٠: ٥٠٠٠ م	٢	قليل الملائمة
	٥٠٠٠: ٢٠٠٠٠ م	٣	متوسط الملائمة
	أكثر من ٢٠٠٠٠ م	٤	ملائم



المصدر: من عمل الباحث باستخدام ArcGIS 10.5.1

شكل (٢٥) المسافة الإقليدية من المدن في مصر.

المصدر: من عمل الباحث اعتماداً على الشكل (٢٥).

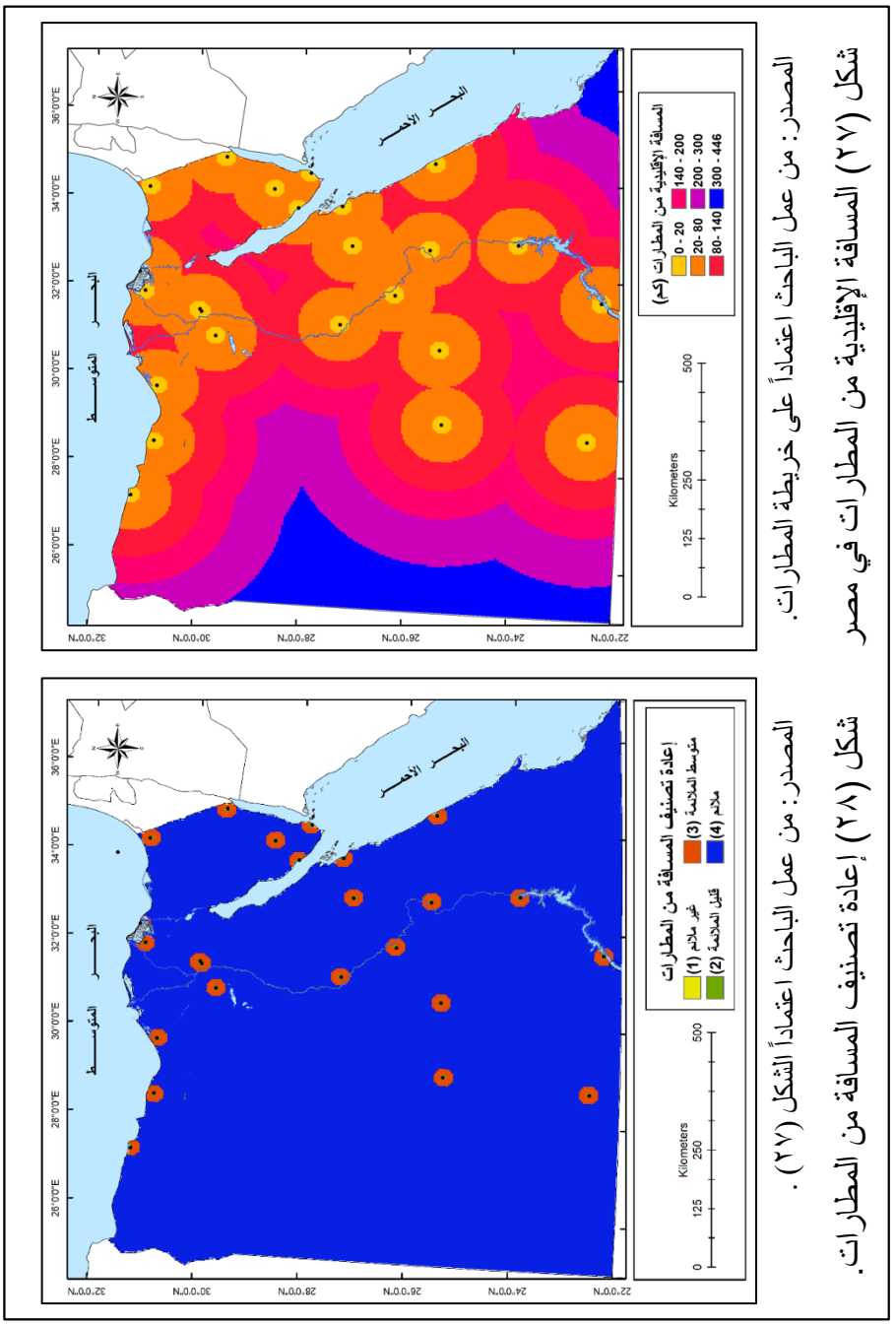
شكل (٢٦) إعادة تقسيم المسافة من المدن في مصر.

٨ – ٢ – ٩ – المسافة من المطارات وإعادة تصنيفها.

تعد المسافة من مواقع المطارات معياراً هاماً يجب مراعاته عند اختيار مواقع مشروعات حصاد طاقة الرياح، حيث يجب أن تكون بعيدة بقدر مناسب، منعاً لحدوث تداخل كهرومغناطيسي بين أجهزة التوربينات وأجهزة الرادار بالمطارات؛ مما يشكل خطورة على مسارات الطائرات وعمليات الهبوط والإقلاع. وقد تم إعادة تصنيف هذه الطبقة كما هو مبين بالشكل (٢٨) والجدول (٩)، حيث إن المناطق التي تتراوح بين صفر: ٣٠٠٠ متر تصنف بأنها غير ملائمة، أما المناطق التي تبتعد عن حدود المدن بما يزيد عن ٢٠٠٠٠ متر فقد صنفت على أنها ملائمة (Gomaa, Mosaad, 2016, P. 453).

جدول (٩) إعادة تصنيف المسافة من المطارات في مصر.

اسم الطبقة	القيم القديمة	القيم الجديدة	الوصف
إعادة تصنيف المسافة من المطارات.	صفر: ٣٠٠٠ متر	١	غير ملائم
	٣٠٠٠: ٥٠٠٠ متر	٢	قليل الملائمة
	٥٠٠٠: ٢٠٠٠٠ متر	٣	متوسط الملائمة
	أكثر من ٢٠٠٠٠ متر	٤	ملائم



شكل (٢٧) المسافة الإقليدية من المطارات في مصر

المصدر: من عمل الباحث اعتماداً على خريطة المطارات.

شكل (٢٨) إعادة تصنيف المسافة من المطارات.

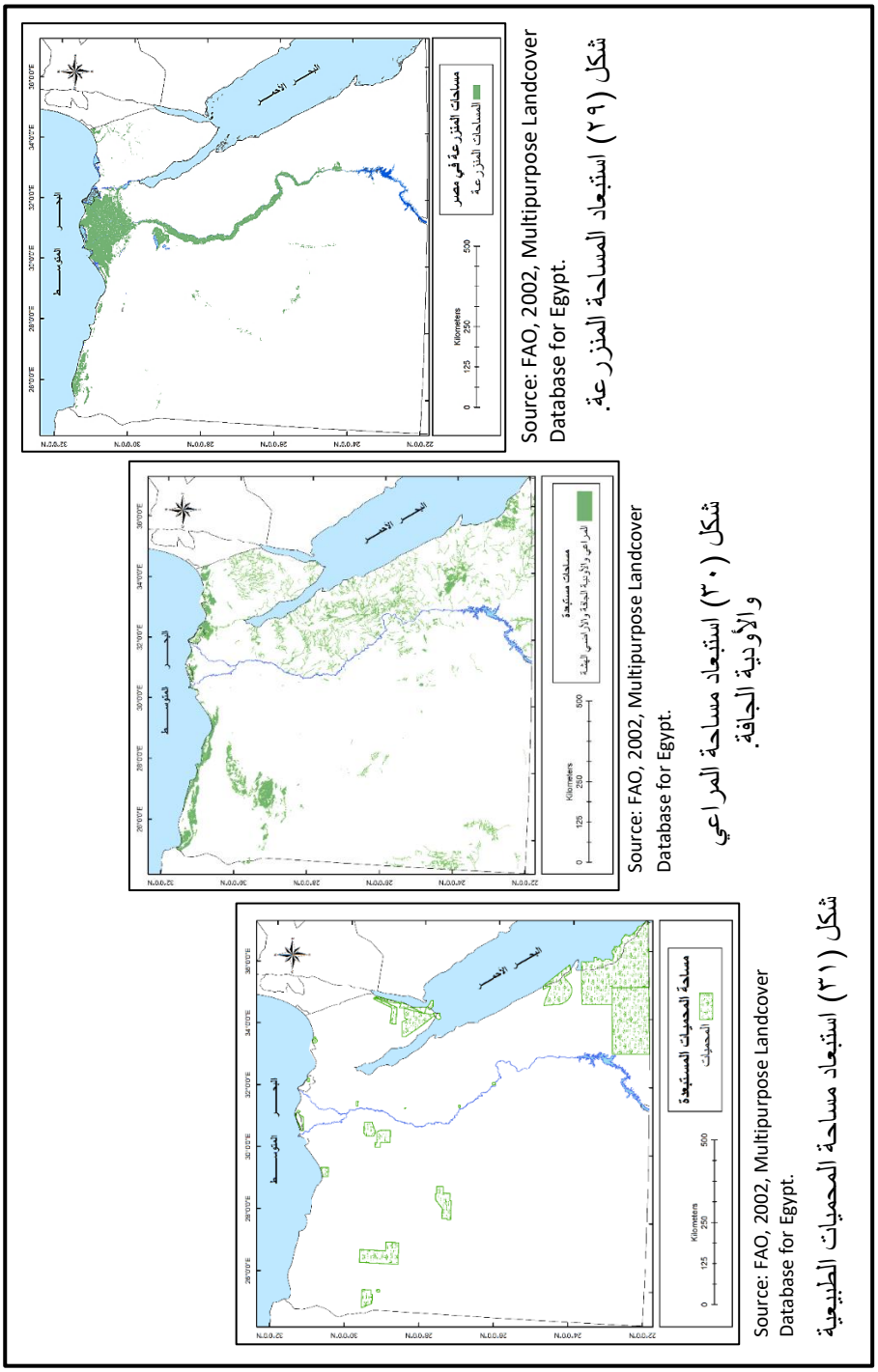
المصدر: من عمل الباحث اعتماداً الشكل (٢٧).

٨ – ٢ – ١٠ – المساحات المستبعدة Excluded Areas.

من المسلم به أن الأراضي الخالية من الاستخدامات والمناطق الصحراوية الرخيصة الثمن؛ هي المساحات المستهدفة لإقامة مشروعات طاقة الرياح، ففي هذه الدراسة سوف يتم استبعاد الأراضي المنزرعة سواء القديمة منها في الوادي والدلتا أو المستصلحة حديثاً أو الزراعات المطرية في شمالي مصر أو القائمة علي المياه الجوفية في الواحات بصحراء مصر الغربية، كما تم استبعاد الأودية الجافة ومناطق البحيرات الشمالية والأراضي الهشة المحيطة بها ومناطق الرعي ومجري نهر النيل، والمحميات الطبيعية، حيث استخدمت أداة Erase؛ ضمن مجموعة أدوات التحليل Erase / Overlay / analyst Tools، ووفق الأشكال (٢٩) و (٣٠) و (٣١) حيث تعتبر هذه النطاقات غير ملائمة ويتم استبعادها من حسابات النموذج.

٨ – ٣ – تحديد أوزان المعايير.

تم إدخال عدد من المعايير Criteria لاختيار أفضل المواقع لإقامة مشروعات طاقة الرياح في مصر؛ من خلال أداة التراكب Overlay في بيئة نظم المعلومات الجغرافية، أنظر الجدول (١٠)؛ حيث أن هذه المعايير المختارة لا تتماثل من حيث أهميتها في الوصول للقرار المناسب، فهناك معايير أكثر أهمية؛ مثل المعدل السنوي لسرعة الرياح (متر/ثانية) الذي أعطي وزناً نسبياً (٣٠٪)، وهناك معايير أقل منه في أهميتها مثل القرب من المحميات أو الشواطئ (٥٪)، وجاءت معايير انحدار سطح الأرض، والمسافة من المدن والمسافة من الشبكة القومية لنقل الكهرباء في مرتبة واحدة، حيث أعطيت جميعها وزناً نسبياً (١٥٪)، وذلك لأولويتها النسبية في اتخاذ القرار بشأن اختيار مواقع مشاريع طاقة الرياح،



شكل (٢٩) استبعاد المساحة المنزرعة.

Source: FAO, 2002, Multipurpose Landcover Database for Egypt.

شكل (٣٠) استبعاد مساحة المراعي والأودية الجافة.

Source: FAO, 2002, Multipurpose Landcover Database for Egypt.

شكل (٣١) استبعاد مساحة المحميات الطبيعية

Source: FAO, 2002, Multipurpose Landcover Database for Egypt.

جدول (١٠) الوزن النسبي للمعايير المستخدمة في النموذج لاختيار أنسب المواقع لإقامة مشروعات طاقة الرياح في مصر.

م	نوع المعيار	المعيار	الوزن النسبي (%)	وصف المعيار
١	مناخي وطبيعي	**المعدل السنوي لسرعة الرياح (ارتفاع٥٠م)**	٣٠	مدمج
٢		درجات انحدار السطح	١٥	مدمج
٣	اقتصادي	المسافة من المدن والمناطق السكنية	١٥	مدمج
٤		المسافة من شبكة نقل الكهرباء	١٠	مدمج
٥		المسافة من الموانئ الجوية	٧,٥	مدمج
٦		المسافة من الطرق الرئيسية	٧,٥	مدمج
٧		المسافة من خطوط السكك الحديدية	٥	مدمج
٨		المسافة من خط الساحل	٥	مدمج
٩	بيئي	المسافة من المحميات الطبيعية	٥	مدمج
١٠	قيود واشتراطات	الأراضي الزراعية القديمة والحديثة	(صفر)	استبعاد
١١		المراعي والأراضي الهشة حول البحيرات	(صفر)	استبعاد
١٢		المحميات الطبيعية	(صفر)	استبعاد

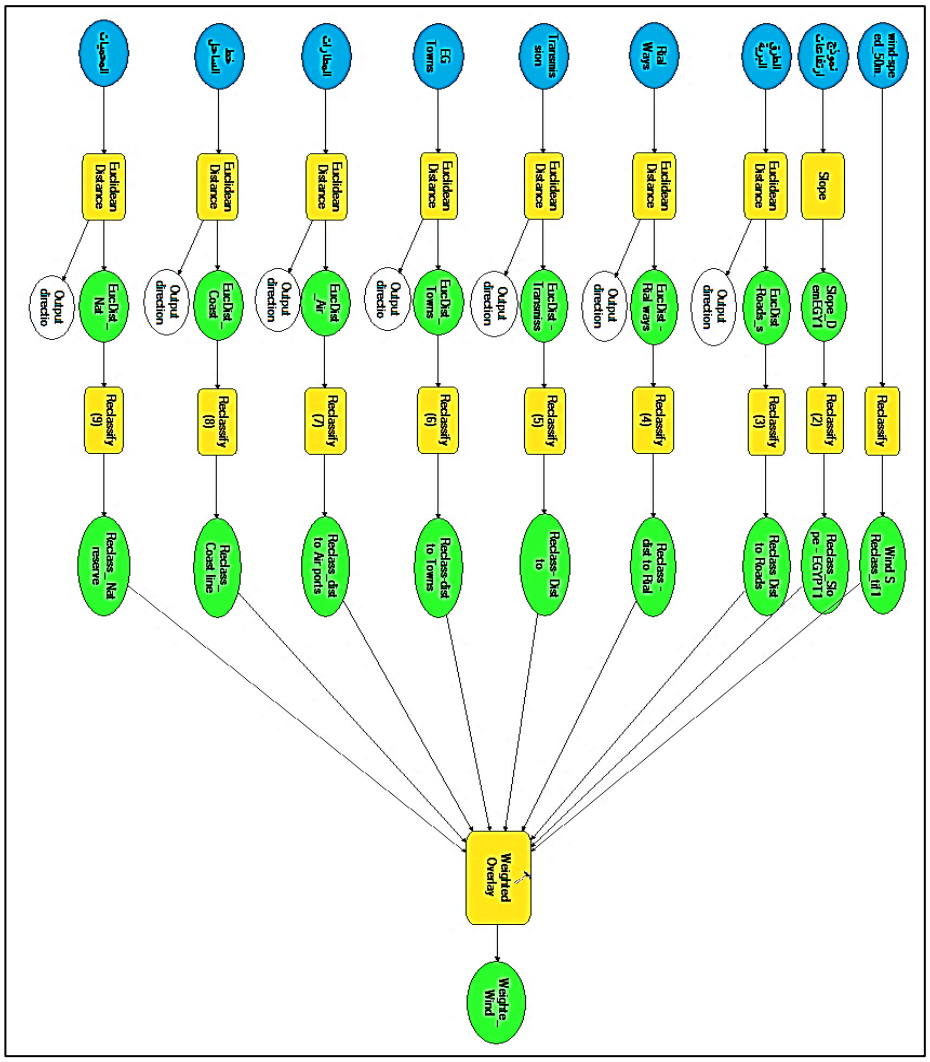
المصدر: من عمل الباحث.

حيث يحتاج زرع التوربينات إلى أرض مستوية أو شبه مستوية لا تتخطى درجة الانحدار بها عن ١٠٪، كما أن البعد عن المناطق السكنية مهم لوقايتها من الضوضاء الناجمة عن تشغيل التوربينات تشويه المنظر الجمالي للبيئة علي

أطراف المدن، كما أن القرب من أسلاك الضغط العالي والشبكة القومية لنقل الكهرباء أمر مهم في تسهيل نقل الطاقة الكهربية المولدة بواسطة المشروع؛ حيث إن البعد عنها يزيد من التكلفة وفقد الطاقة، كما أن هناك قيود واشتراطات وضعت على مناطق الرعي والمساحات المنزرعة والمحميات حيث استبعدت وأخذت القيمة صفر.

٨ – ٤ – الجمع بين المعايير

يجب التحقق أولاً من أن جميع الطبقات التي تمثل معايير النموذج تأخذ شكل بيانات شبكية Raster Dataset، ويتم بعدها إجراء عملية التطابق Overlay والجمع بين المعايير بواسطة آداه التركيب الخطى الموزون Weighted Overlay Tool، كما هو موضح بالشكل (٣٢)، وتتمثل مهمة هذه الأداة في الدمج بين المعايير التسعة المختارة بأوزان مختلفة بعد إعادة تصنيفها، وذلك لإخراج الخريطة النهائية لتصنيف نطاقات منطقة الدراسة حسب درجة ملائمتها مكانياً لإقامة مشروعات طاقة الرياح، وكما هو مبين بالشكل (٣٣) والجدول (١١) فإن المناطق الملائمة مكانياً (الفئة ٤) لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح في مصر تبلغ مساحتها ١٨٥٤٤,٩٤ كم٢ بما يمثل ١,٨٢٪ من مساحة مصر؛ وتتوزع هذه الفئة جغرافياً بشكل أساسي على الساحل الغربي لخليج السويس، حيث منطقة الزعفرانة وجنوب غرب العين السخنة وغرب منطقة جبل الزيت؛ والظهير الغربي لمدينتي الغردقة وسفاجا، بالإضافة إلى بعض المناطق علي الساحل الشرقي لخليج السويس؛ كما هو الحال في نطاق شريطي يمتد طولياً من رأس سدر حتى أبو رديس. بالإضافة إلى نطاقات محدودة جداً علي ساحل خليج العقبة؛ وترجع محدوديتها إلى عدم توافر العديد من المعايير على الرغم من سرعة الرياح في هذه المنطقة، حيث إن المنطقة شديدة التضرس



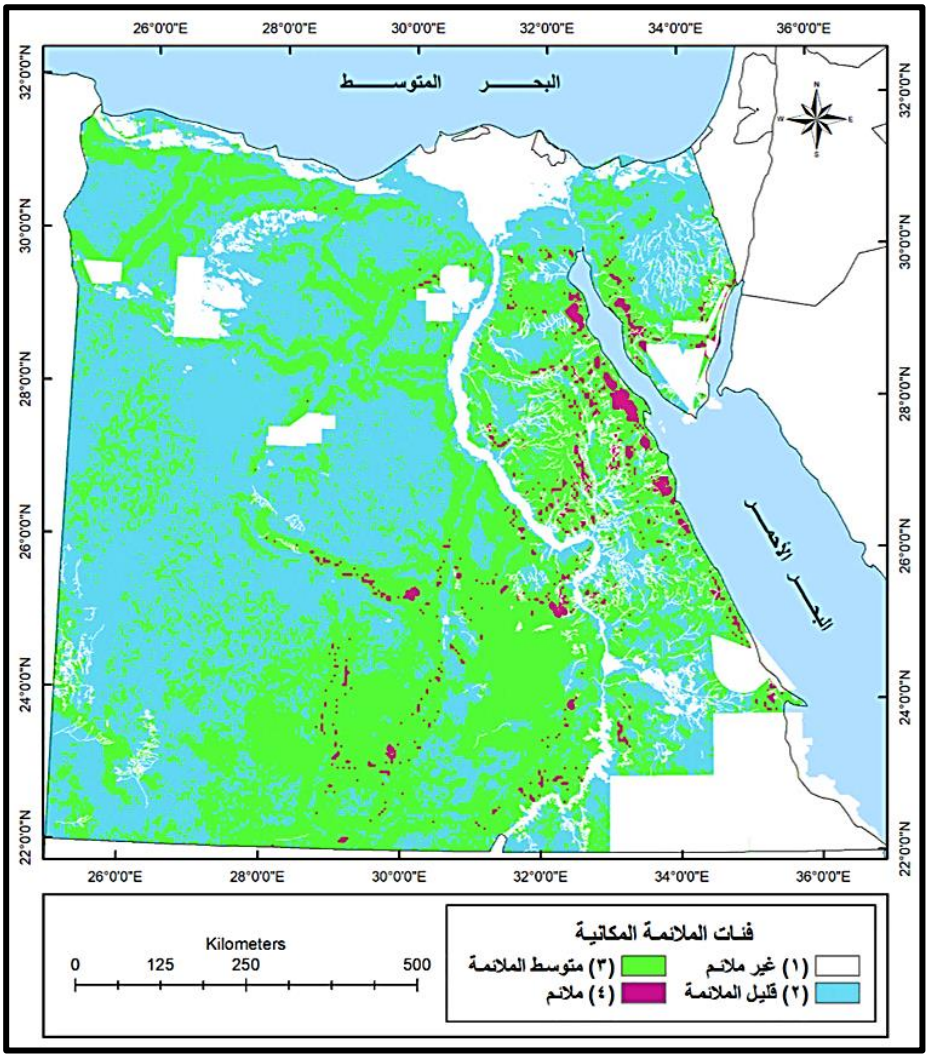
المصدر: من عمل الباحث، اعتماداً على أداة Model Builder في برنامج ArcGIS 10.5.1

شكل (٣٢) مراحل بناء النموذج لإخراج خريطة فئات الملائمة المكانية لإقامة مشروعات طاقة الرياح في مصر.

بسبب الإشراف المباشر للجبال على خليج العقبة مما سبب ضيق السهل الساحلي، إضافة إلى تبني الدولة حماية الحياة البرية بهذه المنطقة بإنشاء أكثر من محمية طبيعية مثل أبو جالوم ونبق ورأس محمد وقيام نشاط سياحي مكثف في معظم مدن ساحل خليج العقبة مثل مدن شرم الشيخ ودهب وطابا.

كما تُمثل هذه الفئة جغرافياً في مساحات محدود جداً بكلاً من غرب أسوان وغرب إسنا وتوشكي وشرق العوينات والداخلة والخارجة، وتفسر محدودية مساحة هذه الفئة على الرغم من ارتفاع معدلات سرعة الرياح بأكثر من ٧٠٪ من مساحة مصر عن ٥,٢ م/ث إلى أن الملائمة الكاملة تتطلب توافر جميع المعايير المختارة والمدخلة إلى النموذج، وهذا أمر نادراً ما يتحقق لذلك تمثل هذه الفئة نحو ١,٨٢٪ من مساحة مصر.

تبلغ مساحة المناطق متوسطة الملائمة (الفئة ٣) لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح ٣٨٨٣٩٢كم٢ وهو يمثل ما نسبته ٣٨,١٥٪ من مساحة مصر؛ وجدير بالذكر أن هذه المناطق صالحة لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح طبقاً للمعايير القياسية العالمية، حيث تتراوح حدود الملائمة بها ما بين ٥٠: ٨٠٪؛ كما ترتفع بها المعدلات السنوية لسرعة الرياح عن ٦ م/ث، وتتوزع جغرافياً في نطاق شريطي يمتد طولياً بمحاذاة شرق قناة السويس حتي مدينة الطور علي خليج السويس، وفي غرب خليج السويس وساحل البحر الأحمر من مدينة السويس حتي رأس بناس، إلا أن الأمر يحتاج إلي مزيد من الدراسة وخاصة الأخذ بالحسبان لمواقع التجمعات العسكرية، والمنتجعات السياحية في هذه المنطقة، وفي منطقة غرب النيل الممتدة بمحاذاة السهل الفيضي من غـــرب المنيا شمالاً حتي حدود مصر الجنوبية مع السودان جنوباً وتـــزداد اتساعً في



المصدر: من عمل الباحث، اعتمادا على أداة التركيب الخطي الموزون في برنامج ArcGIS 10.5.1

شكل (٣٣) تصنيف نطاقات منطقة الدراسة حسب درجة وملاءمتها لإقامة مشروعات طاقة الرياح.

جدول (١١) المساحات الأرضية لفئات الملائمة المكانية لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح في مصر.

الفئة	وصف الفئة	حدود الملائمة (%)	المساحة (كم٢)	(%) من مساحة مصر
١	غير ملائمة	مستبعد (صفر)	١٦١٤٣٢,٣	١٥,٨٣
٢	قليل الملائمة	٣١: ٤٩	٤٥١٢٣٠,٥	٤٤,٢
٣	متوسط الملائمة	٥٠: ٨٠	٣٨٨٣٩٢	٣٨,١٥
٤	ملائم	٨١: ١٠٠	١٨٥٤٤,٩٤	١,٨٢

المصدر: من عمل الباحث، اعتماداً على الشكل (٣٣) وبرنامج ArcGIS 10.5.1

الجنوب لتشمل معظم منخفض توشكي ومعظم منطقة شرق العوينات ومنخفضي الخارجة والداخلة.

– منطقة شريطية تمتد بمحاذاة الساحل الشمالي الغربي من جنوب مدينة السلوم غرباً حتى الحدود الغربية لمحافظة البحيرة؛ إلا أنه يجب دراسة ملائمة هذا القطاع جيداً في الميدان، بسبب التوسعات في النشاط السياحي، والوحدات العسكرية التابعة لقيادة المنطقة العسكرية التابعة للقوات المسلحة المصرية، بالإضافة إلى مشكلة الألغام التي تعد عقبة تحول دون التنمية في هذه المناطق.

– قطاع طولي يمتد في المنطقة الواصلة بين مرسي مطروح وسيوة.

– قطاع ممتد من شمال محافظة الفيوم إلى شمال محمية الواحات البحرية؛ وتعد هذه المنطقة واعدة لقيام مشروعات طاقة الرياح لتوفير الطاقة الكهربائية اللازمة لمشروعات تنمية وتعمير الصحاري والتوسعات الزراعية في منخفضي الفرافرة

والبحرية.

تبلغ مساحة المناطق قليلة الملائمة (الفئة ٢) نحو ٤٥١٢٣٠,٥كم٢؛ بما يمثل ٤٤,٢٪ من مساحة مصر، وتتراوح حدود ملائمة هذه المناطق بين ما بين ٣٠: ٥٠٪، وهي قليلة الجدوى من الناحية الاقتصادية لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح، ومن المناطق التابعة لهذه الفئة، الهوامش الشرقية والغربية لدلتا النيل، ومنطقة وسط وشمال سيناء، والنطاق الغربي من الصحراء الغربية، والمنطقة الممتدة من الواحة البحرية إلى أسيوط؛ حيث الامتداد الجغرافي لغرد أبي محرق وزحف الكثبان الرملية.

وتبلغ مساحة المناطق غير الملائمة (الفئة ١) نحو ١٦١٤٣٢,٢كم٢؛ بما يمثل ١٥,٨٣٪ من إجمالي مساحة مصر، وهي مناطق لا تصلح في المجمل لإنشاء مشروعات طاقة الرياح، لأسباب منها؛ أن بعض هذه المناطق مشغولة بأنشطة اقتصادية أخري كالزراعة أو السكن. ومن هذه المناطق غير الملائمة؛ الأراضي الزراعية القديمة والمستصلحة حديثاً في الوادي والدلتا ومنخفض الفيوم والساحل الشمالي الغربي وشمال سيناء وواحات الصحراء الغربية، بالإضافة إلى المحميات الطبيعية التي أنشأتها الدولة المصرية منذ العام ١٩٨٥م للحفاظ على الحياة البرية والتراث البيئي، بالإضافة إلى مناطق المراعي والأراض الهشة على أطراف البحيرات والأودية الجافة؛ حيث خطورتها الشديدة بسبب السيول وشدة انحدارها، ومجري نهر النيل والترع والمجاري المائية في الوادي والدلتا.

٩ – الخاتمة.

– ركز هذا البحث علي تطبيق أسلوب المعايير المتعددة Spatial Multi-Criteria Analysis (SMCA)؛ باستخدام نظم المعلومات الجغرافية GIS في تحديد المواقع المثلي لإقامة مشروعات طاقة الرياح في مصر، اعتماداً علي عدد من المعايير المتنوعة (مناخية واقتصادية وبيئية واجتماعية)؛ تم اختيارها بعناية، ثم إعادة تصنيفها Reclassify؛ ثم الدمج بينها بواسطة أداة التطابق الخطي الموزونWeighted Overlay Tool بعد إعطاء كلاً منها وزناً نسبياً يتناسب مع أهميتها في تحديد المواقع المثالية The best localities، حيث تم الحصول علي الخريطة القياسية النهائية The final standard map لتصنيف نطاقات منطقة الدراسة حسب درجة ملائمتها لإقامة مشروعات طاقة الرياح في مصر.

– توصلت الدراسة إلي أن مصر تعد من البلدان الغنية في موارد طاقة الرياح، حيث تسجل كلاً من سرعة الرياح Wind Speed، وكثافة طاقة الرياح Wind Power Density، وكثافة الهواء Air Density، معدلات عالية في أكثر من ٧٠٪ من مساحتها، فمن خلال دراسة وتحليل المعدل السنوي لسرعة الرياح (م/ث) في مصر اعتماداً علي بيانات ٣٩٧ نقطة شبكية مستمدة من قاعدة البيانات المناخية العالمية POWER، تبين أن غالبية مساحة الأراضي المصرية يزيد بها هذا المعدل عن ٥ متر/ ثانية، وهذا يتوافق مع النتائج التي توصل إليها أطلس الرياح في مصر عام ٢٠٠٥م.

– بناءً على المنهج المتبع في هذه الدراسة فإن النتيجة الرئيسة؛ هي الحصول على خريطة قياسية Standard Map لتصنيف المواقع في جمهورية مصر العربية حسب درجة وملاءمتها لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح؛ بالإضافة إلى بناء قاعدة بيانات جغرافية ضخمة تتضمن بيانات عن السطح والانحدارات والغطاء الأرضي وشبكة الطرق وخطوط السكك الحديدية والمطارات والمحميات الطبيعية والأراضي الزراعية والمراعي الطبيعية والشبكة الأودية الجافة والمجاري المائية، يمكن توظيفها في أغراض علمية أخري.

– توصلت الدراسة إلى أن المناطق الواقعة على جانبي خليج السويس؛ وغرب أسوان وتوشكي وشرق العوينات؛ هي الأعلى في المعدل السنوي لسرعة الرياح (متر/ ثانية)، وأن بعض المواقع تخطت ٩ متر/ثانية؛ كما هو الحال في منطقتي الزعفرانة وجبل الزيت على الساحل الغربي لخليج السويس.

– توصلت الدراسة إلى أن المناطق الملائمة (الفئة ٤) لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح في مصر تبلغ مساحتها ١٨٥٤٤,٩٤كم٢؛ بما يمثل ١,٨٢٪ من مساحة مصر، وتتوزع هذه الفئة جغرافياً بشكل أساسي على الساحل الغربي لخليج السويس، حيث منطقة الزعفرانة وجنوب غرب العين السخنة وغرب منطقة جبل الزيت؛ والظهير الغربي لمدينتي الغردقة وسفاجا، بالإضافة إلى بعض المناطق على الساحل الشرقي لخليج السويس كما توجد في مساحات محدود جداً بكلاً من غرب أسوان وغرب إسنا وتوشكي وشرق العوينات والداخلة والخارجة.

– توصلت الدراسة إلى أن مساحة المناطق متوسطة الملائمة (الفئة ٣) لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح تبلغ نحو ٣٨٨٣٩٢كم٢؛ بما يمثل نحو ٣٨,١٥٪ من مساحة مصر، وأن هذه المناطق صالحة لاستهدافها لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح، حيث تعد مجدية اقتصادياً، ولا تقل معدلات سرعة الرياح بها عن ٥ متر/ ثانية، وتتوزع جغرافياً في مساحات واسعة منها، نطاق شريطي يمتد طولياً بمحاذاة شرق قناة السويس حتي مدينة الطور علي خليج السويس، وفي غرب خليج السويس وساحل البحر الأحمر من مدينة السويس حتى رأس بناس، وفي منطقة غرب النيل، ومنطقة شريطية تمتد بمحاذاة الساحل الشمالي الغربي من جنوب مدينة السلوم غرباً حتى الحدود الغربية لمحافظة البحيرة، وقطاع طولي يمتد في المنطقة الواصلة بين مرسي مطروح وسيوة، وقطاع ممتد من شمال محافظة الفيوم إلى شمال محمية الواحات البحرية.

– توصلت الدراسة أن المناطق قليلة الملائمة (الفئة ٢) تقترب من نصف ماحة مصر الإجمالية؛ حيث بلغت ٤٥١٢٣٠,٥كم٢، وهو ما يعادل ٤٤,٢٪ من مساحة مصر، وهي في المجمل مناطق قليلة الجدوى من الناحية الاقتصادية كمواقع لإقامة مزارع طاقة الرياح، حيث أن نحو ٥٠ % أو أكثر من المعايير ممثلة فيها بنسب أقل من الحد الأدنى المطلوب توافره طبقاً للنموذج المطبق في هذه الدراسة، وتتوزع هذه الفئة جغرافيا في الهوامش الشرقية والغربية لدلتا النيل، ومنطقة وسط وشمال سيناء، والنطاق الغربي من الصحراء الغربية، والمنطقة الممتدة من الواحة البحرية إلي أسيوط.

– وتوصلت الدراسة أن مساحة المناطق غير الملائمة لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح في مصر تبلغ نحو ١٦١٤٣٢,٢كم٢؛ بما يمثل ١٥,٨٣٪ من إجمالي مساحتها، وهي مناطق لا تصلح لإنشاء مثل هذه المشروعات، حيث أن بعضها مشغول بأنشطة اقتصادية أخري؛ ومن هذه المناطق غير الملائمة: الأراضي الزراعية القديمة والمستصلحة حديثاً في الوادي والدلتا ومنخفض الفيوم والساحل الشمالي الغربي وشمال سيناء وواحات الصحراء الغربية، بالإضافة إلي المحميات الطبيعية المنشرة في مصر للحفاظ علي الحياة البرية، ومناطق المراعي والأراضي الهشة علي أطراف البحيرات والأودية الجافة لخطورتها في حالة حدوث السيول، ومجري نهر النيل والترع والمجاري المائية في الوادي والدلتا.

١٠ – التوصيات.

– ضرورة التوسع في مشروعات حصاد طاقة الرياح تحقيقاً للخطة الاستراتيجية لهيئة الطاقة الجديدة والمتجددة لسنة ٢٠٢٢م؛ بتحقيق مستهدفاتها بوصول انتاج مصر من مصادر الطاقة المتجددة ما يمثل ٢٠٪ من جملة احتياجاتها السنوية من الطاقة الكهربية، حيث إن مصر من البلدان الغنية في موارد طاقة الرياح من حيث السرعة والاستمرار والكثافة.

– وضع نموذج الملائمة المكانية، الذي تم تنفيذه في هذه الدراسة "أسلوب المعايير المتعددة" Spatial Multi–Criteria Analysis (SMCA) أمام متخذي القرار في وزارة الكهرباء والطاقة وهيئة الطاقة الجديدة والمتجددة (NREA) New

and Renewable Energy Authority، لأخذه في الاعتبار مع مزيد من التحقق الميداني عند وضع خطط التوسع المستقبلي في إقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح في مصر.

- استخدام الخريطة القياسية Standard Map للملائمة؛ التي انتهت إليها هذه الدراسة كوسيلة لتضييق نطاق البحث عن المواقع المثالية لإقامة مشروعات حصاد طاقة الرياح في منطقة واسعة للغاية ١٠١٩٦٠٠كم٢، فمن الضروري عمل المسوح والدراسات الميدانية المكثفة والدقيقة للمواقع المرشحة في الخريطة - كأولوية أولي – حيث أن تطبيق ما توصلت إليه الخريطة؛ ما يزال بحاجة إلي التحقق منه في الميدان والوقوف علي مدي دقته، حيث أغفلت هذه الدراسة بعض المعايير الهامة كان يجب مراعاتها عند بناء النموذج موضوع هذا البحث لم يتمكن الباحث من الحصول عليها، ومن هذه البيانات: التوزيع الجغرافي للمواقع العسكرية في مصر، والبيانات الخاصة بتوزيع المناطق والأنشطة السياحية بأنواعها المختلفة، كما أن النموذج لم يدخل في حساباته تفادي مسارات الطيور المهاجرة، لذا ينبغي تفسير نموذج الملائمة الذي انتهينا من خلاله بخريطة قياسية لتصنيف أمثليه المواقع على أنه "احتمال" Probable لنجاح مشروع طاقة الرياح في الموقع المختار.

- نشر الوعي بأهمية إحلال الطاقة المتجددة Renewable energy محل الطاقة الحفرية Fossil energy، حيث إن الأخيرة ستنضب عاجلاً أو آجلاً؛ علاوة على الآثار البيئية السلبية التي تخلفها، مثل رفع معدلات التلوث والاحترار العالمي وتغير المناخ.

– ضرورة الأخذ بأسلوب المعايير المتعددة (SMCA) باستخدام نظم المعلومات الجغرافية GIS في اتخاذ القرارات بشأن كافة مشاريع وخطط التنمية في قطاع الطاقة النظيفة وغيره من القطاعات في مصر.

– تقديم الدعم الحكومي للتوسع في مشروعات الطاقة النظيفة، والاستثمار فيها من قبل القطاعين العام والخاص، ورفع الجمارك عن المعدات والأجهزة المستوردة من الخارج لإقامة هذه المشاريع.

– ضرورة مواكبة التعليم والبحث العلمي لهذا النوع الجديد من الأعمال في السوق المصرية والعالمية، من خلال إنشاء أقسام متخصصة بكليات الهندسة في مجال تقنيات الطاقة المتجددة عامة Renewable energy Technics وطاقة الرياح وتقنية صناعة التوربينات خاصة.

– تبادل الخبرات العلمية والمشورة الفنية مع الدول ذات الخبرة في مجال تقنيات استخدام مصادر الطاقة الجديدة والمتجددة Renewable energy.

المراجع والمصادر باللغة العربية:

- أحمد عبد الحميد الفقي، (١٩٩٩)، الرياح في مصر – رسالة ماجستير غير منشورة، قسم الجغرافيا، كلية الآداب، جامعة عين شمس، القاهرة، مصر.
- حسن يونس حسن، (٢٠٠٩)، الإشعاع الشمسي والرياح كمصادر للطاقة الجديدة والمتجددة في مصر – دراسة في المناخ التطبيقي، رسالة ماجستير غير منشورة، قسم الجغرافيا، كلية الآداب، جامعة طنطا، مصر.
- جمعة محمد داود ومسعد سلامة مندور وخالد بن عبد الرحمن الغامدي، (٢٠١٧)، تحديد أفضل المواقع لتجميع الطاقة الشمسية في منطقة مكة المكرمة الإدارية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير، بدون ناشر.
- حسام ثابت صدقي، (٢٠١٧)، الإشعاع الشمسي والرياح ودورهما في إنتاج الطاقة في صحراء مصر الشرقية – دراسة في المناخ التطبيقي، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب، جامعة القاهرة.
- خلود حسام حسنين، (٢٠٠٤)، اقتصاديات الطاقة الجديدة والمتجددة وإمكانية استثمارها في مصر، رسالة ماجستير غير منشورة، قسم الاقتصاد، كلية التجارة، جامعة عين شمس، القاهرة، مصر.
- عادل سعيد الراوي وقصي عبد المجيد السامرائي، (١٩٩٠)، المناخ التطبيقي، دار الحكمة للطباعة والنشر، بعداد، العراق.
- ليلي جورجي يوسف، (٢٠١٢)، التقرير السنوي لوزارة الكهرباء المصرية وهيئة الطاقة الجديدة والمتجددة، القاهرة.

- محمد علي محمد عويضة، (٢٠١٧)، التحليل المكاني للإشعاع الشمسي وإمكانات توليد الطاقة في محافظة الوادي الجديد – دراسة في المناخ التطبيقي، رسالة ماجستير غير منشورة، قسم الجغرافيا، كلية الآداب، جامعة حلوان، القاهرة، مصر.
- محمد السيد حافظ، (يوليو ٢٠٠٧)، الرياح وإنتاج الطاقة الكهربائية في صحراء مصر الشرقية – محطة الزعفرانة نموذجاً، الندوة التاسعة لقسم الجغرافية ونظم المعلومات الجغرافية "صحاري مصر أمل المستقبل"، كلية الآدب، جامعة الإسكندرية، مصر.
- وزارة الكهرباء والطاقة المصرية (٢٠١٨)، التقرير السنوي لهيئة الطاقة الجديدة والمتجددة، القاهرة، مصر.
- هبة محمود عبد الرازق، (٢٠١٧)، الإشعاع الشمسي والرياح في شبه جزيرة سيناء – دراسة في المناخ التطبيقي"، رسالة ماجستير غير منشورة، قسم الجغرافيا، كلية الآداب، جامعة القاهرة، مصر.

المراجع والمصادر باللغة الإنجليزية:

- Al-Yahyai, Yassine Charabi b , Adel Gastli a , Saleh Al-Alawi, (2010) Assessment of wind energy potential locations in Oman using data from existing weather stations, 1428–1436, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, www.elsevier.com/locate/rser
- Atlas of Wind in Egypt, (2005), New and Renewable Energy Authority, Ministry of Electricity and Energy, Cairo, Egypt. http://www.nrea.gov.eg/Technology/WindAtlas
- Baban, S.M.J. and Parry, T. (2001) Developing and Applying a GIS-Assisted Approach to Locating Wind Farms in the UK. Renewable Energy, 24, 59-71 http://dx.doi.org/10.1016/S0960-1481(00)00169-5.
- Bennui, A., Rattanamanee, P., Puetpaiboon, U., Phukpattaranont, P. and Chetpattananondh, K. (2007) Site Selection for Large Wind Turbines Using GIS. PSU-UNS International Conference on Engineering and Environment-ICEE2007, Phuket, May 10-11, 2007, 90112.
- Castillo, C., Silva, F., and LaValle, C. (2016) Assessment of the regional potential for solar power generation in EU-28, Energy policy, No. 88, pp. 86-99.
- Effat, H.A. (2014) Spatial Modeling of Optimum Zones for Wind Farms Using Remote Sensing and Geographic Information System, Application in the Red Sea, Egypt. Journal of Geographic Information System, 6, 358-374.

http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2014.64032

- Eliasson, B. (1998) Energy and Global Changes. ABB Corporate Research.
- Effat, H.A. (2013), Selection of Potential Sites for Solar Energy Farms in Ismailia Governorate, Egypt using SRTM and Multicriteria Analysis, Cloud Publications International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS 2013, Volume 2, Issue 1, pp. 205-220, Article ID Tech-125 ISSN 2320 - 0243
- FAO, 2002, Multipurpose Landcover Database for Egypt – AFRICOVER, http://www.fao.org/geonetwork/srv/en/main.home?uuid=a7fd1a64-475f-4e34-a3b3-c79e014311ec
- Fernandez, L.M., Saenz, J.R. and Jurado, F. (2006) Dynamic Models of Wind Farms with Fixed Speed Wind Turbines. Renewable Energy, 31, 1203-1230 http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2005.06.011.
- Gomaa, M. D & Mosaad, S. M., (2016), Optimum Sites for solar Energy Harvesting in Egypt Based on Multi-Criteria GIS, The First Future University International Conference on New Energy and Environmental Engineering Cairo, Egypt, April 11- 14
- Harb, M.S. (1974), Characteristic features of wind fields in windy region in Egypt "Met. Res. Bull. Vol. 6 No. 2.
- Hughes, T. (2000) Calculation of Wind Energy and Power. Lesson Number 1 in an Oklahoma Wind Power Tutorial Series.

- International Energy Agency. (2013). World Solar (PV and CSP). INTERN-ATIONAL ENERGY AGENCY Retrieved from, http://www.iea.org/topics/ solarpvandcsp/
- Mierzwiak, M., Calka, B., (2017), Multi-criteria analysis for solar farm location suitability, Reports on Geodesy and Geoinformatics vol. 104/2017; pp. 20-32 DOI: 10.1515/rgg-2017-0012
- Moiloa, B. H. E, (2009) Geographical Information Systems for wind energy strategic location selection. master thesis, faculty of earth and life sciences, frije University, Amsterdam.
- Mevlut Uyan., (2013), GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 28, DOI: 10.1016/j.rser.2013.07.042
- 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.
- Niles G. Mortensen, others, (2003). Wind Atlas for the Gulf of Suez. Measurements and Modeling 1991-2001. New and Renewable Energy Authority, Cairo.
- K.Q. Nguyen, (2007) Wind Energy in Vietnam: Resource Assessment, Development Status and Future Implications. Energy Policy, 35, 1405-1413. http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2006.04.011

- Patel, B. and Rosier, A. (2013) Basic Criteria for Wind Project Site Selection and Optimization. ECOWAS Regional Workshop on Wind Energy. Pria, Cape Verde.
- Ramirez-Rosado, I.J.R., Garrido, E.G., Jimerenz, L.A.F., Zorzano - Santa mar, P.J., Monteiro, C. and Miranda, V. (2008) Promotion of New Wind Farms Based on a Decision Support System. Renewable Energy, 33, 558-566. http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2007.03.028.
- Tester, J.W., Drake, E.M., Driscoll, M.J., Golay, M.W. and Peters, W.A. (2005) Sustainable Energy; Choosing among Options. The MIT Press, Cambridge.
- Yue, C.D. and Wang, S.S. (2006) GIS-Based Evaluation of Multifarious Local Renewable Energy Sources: A Case H. A. Effat 373 Study of the Chigu Area of Southwestern Taiwan. Energy Policy, 34, 730-742. http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2004.07.003

A spatial assessment of the best localities for wind energy generation in Egypt using Multi-Criteria Analysis and GIS techniques.

Abstract

Renewable energy has become an emerging environmental theme over the past few decades, given the high pollution rates induced by conventional fossil fuel and their drastic impacts on the global warming and climate change. Importantly, renewable energy has a more economical value, as opposed to non-renewable sources, recalling that it is a cheap, clean, and sustainable resource of energy. As a developing country with increasing demand for energy due to the ongoing increase of population, urbanization, and industrialization, Egypt intends to maximize its energy supply from renewable energy in 2022 by 20%. This highlights the need to provide a comprehensive spatial assessment of the best localities to generate wind energy, which is one of the most important renewable energies, in Egypt. With the advancements of geospatial techniques (e.g., Geographical Information Systems (GIS), remote sensing, spatial statistics), it has been feasible to account for the role of a wide spectrum of environmental, demographic, and socioeconomic determinants in the exploitation of wind energy. This study employed the weighted multi-variable spatial regression analysis and Spatial Multi-Criteria Analysis (SMCA) within a GIS environment to define the best sites for wind generation in Egypt. This study accounted for the role of several variables (e.g., wind speed, air density, density of wind energy at a height of 50 meter from sea level, accessibility to transportation network, distance to coasts and neighboring settlements). The possible role of some geog-

raphical and socioeconomic constraints (e.g., distance from environmentally sensitive areas such as protected natural parks) was also assessed. Overall, results demonstrate that the best localities for wind energy generation are mainly located west and southeastern portions of Suez Bay, Hurghada, Safaga, besides Toushka, Luxor, Aswan, and the Dakhla and Kharga depressions. These results provide a solid base for decision-makers and stakeholders to make a potential use of energy resource in Egypt, contributing to a more sustainable development of renewable energy.

Keywords: Renewable energy, wind, GIS, Spatial Multi-Criteria Analysis, Egypt.