



المجلة الجغرافية العربية

تصدر عن الجمعية الجغرافية المصرية

تقييم أسلوب القرار متعدد المعايير في اختيار المواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح لمجموعة لشمال المملكة العربية السعودية

أ. سلوى سليم عطية المطرفي

طالبة الدراسات العليا - علم المعلومات الجغرافية - جامعة الملك سعود

د. عبير سلمان

أستاذ مشارك بقسم الجغرافيا/الجغولوجيا الإحصائية البيئية ونظم المعلومات الجغرافية

كلية العلوم الإنسانية والاجتماعية - جامعة الملك سعود



كافة حقوق النشر محفوظة للجمعية الجغرافية المصرية
وجميع الآراء الواردة في بحوث هذه السلسلة تعبر عن آراء
أصحابها ولا تعبر بالضرورة عن وجهات نظر الجمعية الجغرافية المصرية

الترقيم الدولي الموحد للطباعة: ١١١٠ - ١٩١١

الترقيم الدولي الموحد الإلكتروني: ٢٦٨٢ - ٤٧٩٥

الموقع على شبكة الانترنت: www.egyptiangs.com

All rights reserved. This book is protected by copyright. No part of it may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, or otherwise, without written permission from The Egyptian Geographical Society.

قواعد النشر

تهدف هذه السلسلة إلى نشر البحوث الجغرافية الأصلية التي يقوم بها الجغرافيون المصريون المتخصصون، بهدف تعريف المؤسسات العلمية العالمية والعربية بالنشاط العلمي الذي تتبناه وتتوفر عليه الجمعية الجغرافية المصرية.

وتقوم بحوث هذه السلسلة "على الدراسات الجغرافية الميدانية، وعلى البحوث التي تهتم بطرح رؤى جديدة في مناهج البحث الجغرافي وأساليبه، كما تعنى بالبحوث النفعية في مختلف مجالات الجغرافيا التطبيقية، وهو ما يتيح للجغرافيين العرب والأجانب الإطلاع على ما تقوم به الجمعية الجغرافية المصرية التي تعد أقدم الجمعيات الجغرافية في العالم العربي، كما تعد رائدة في إجراء البحوث والدراسات الجغرافية الجادة والأصلية.

وقد تتضمن بحوث هذه "السلسلة" ملخصات مكثفة لرسائل الماجستير والدكتوراة المجازة في الجامعات المصرية والعربية وغيرها.

ويشترط في البحوث التي تنشر ضمن هذه السلسلة مراعاة القواعد التالية:

- تقبل للنشر في هذه السلسلة البحوث التي تتسم بالأصالة وتسهم في تقدم المعرفة الجغرافية.
- يقدم مع البحوث المكتوبة باللغة العربية ملخص (Abstract) باللغة الإنجليزية. كما يقدم مع البحوث المكتوبة بلغة أجنبية ملخص باللغة العربية.
- لا يزيد البحث عن ١٥٠ صفحة، ويجوز لمجلس الإدارة استثناء البحوث الممتازة من هذا الشرط.
- يشترط ألا يكون العمل المقدم قد سبق نشره أو قدم للنشر في أية جهة أخرى.
- يقدم البحث في صورته الأخيرة المقبولة للنشر من ثلاث نسخ مرفقاً به اسطوانة ليزر (CD) مستخدماً إحدى برمجيات معالجة النصوص مع نظام ويندوز المتوافق مع IBM، على أن تكون الكتابة بينط ١٤ ومسافة ١ بين الأسطر، وتقدم الخرائط والصور والأشكال مستقلة محفوظة في صورة JPEG أو Tiff و Resolution ٢٠٠ فأكثر.
- يفضل أن تقدم الخرائط والأشكال البيانية بالألوان بحيث لا تتجاوز مساحتها (١٢ سم عرض × ١٨ سم طول)، وإن تعذر ذلك تقدم بالأبيض والأسود وفق القواعد الكارتوجرافية.
- يكتب الباحث اسمه واسم البحث في ورقة منفصلة ويكتفى بكتابة عنوان البحث فقط على رأس البحث مراعاة لسرية التحكيم.
- يعرض البحث على اثنين من المحكمين من كبار الأساتذة في مجال التخصص، وفي حالة اختلاف رأى المحكمين، يرسل البحث إلى محكم ثالث، مرجح، وبناء على تقاريرهم يمكن قبول البحث للنشر أو إعادته للباحث لإجراء التعديلات أو التصويبات الضرورية قبل نشره.
- البحوث التي تقدم للنشر لا ترد إلى مقدميها سواء نشرت أو لم تنشر.
- تحتفظ الجمعية بحقوق النشر كاملة.
- يسلم للباحث ١٠ نسخ من بحثه بعد نشره، وإذا أراد نسخاً إضافية يسدد ثمنها طبقاً

هيئة تحرير المجلة

أ.د. محمد زكي السديمي	رئيس مجلس إدارة المجلة
أ.د. إسماعيل يوسف إسماعيل	نائب رئيس مجلس إدارة المجلة ورئيس التحرير
أ.د. مصطفى محمد البغدادى	مدير التحرير
أ.م. د. محمد إبراهيم خطاب	محرر تنفيذي
أ.م. د. كامل مصطفى كامل	محرر تنفيذي
د. محمد ربيع عبد الظاهر	محرر تنفيذي
د. رشا حسين رمضان	محرر تنفيذي
د. بشير الشوربجي	مدقق لغوي

مجلس إدارة الجمعية الجغرافية المصرية

أ.د. محمد زكي السديمي	رئيس مجلس إدارة الجمعية
أ.د. عبد الله علام عبده علام	نائب رئيس مجلس إدارة الجمعية
أ.د. إسماعيل يوسف إسماعيل	أمين عام الجمعية
أ.د. مسعد السيد أحمد بحري	أمين صندوق الجمعية
أ.د. فتحي محمد أبو عيانة	عضو مجلس إدارة الجمعية
أ.د. أحمد حسن إبراهيم	عضو مجلس إدارة الجمعية
أ.د. أحمد السيد الزامل	عضو مجلس إدارة الجمعية
أ.د. شحاتة سيد أحمد طلبة	عضو مجلس إدارة الجمعية
أ.د. مصطفى محمد البغدادى	عضو مجلس إدارة الجمعية
أ.د. عبد العظيم أحمد عبد العظيم	عضو مجلس إدارة الجمعية
أ.د. عمر محمد علي محمد	عضو مجلس إدارة الجمعية
أ.د. سامح إبراهيم عبد الوهاب	عضو مجلس إدارة الجمعية
أ.د. عادل عبد المنعم السعدني	عضو مجلس إدارة الجمعية
أ.د. عطية محمود الطنطاوي	عضو مجلس إدارة الجمعية
أ.د. عيبر إبراهيم عبد الله	عضو مجلس إدارة الجمعية

الهيئة الاستشارية

- أ.د. عبد الله يوسف الغنيم
أ.د. نبيل سيد امباي
أ.د. فتحي عبد العزيز أبو راضي
أ.د. فاروق كامل عز الدين
أ.د. سعيد محمد عبده
أ.د. محمد عبد الرحمن الشرنوبي
أ.د. السعيد إبراهيم البدوي
أ.د. جودة فتحي التركماني
أ.د. كريم مصلح صالح
أ.د. محمد نور الدين السبعوي
أ.د. عزة أحمد عبد الله
أ.د. مسعد سلامة مندور
أ.د. إبراهيم محمد علي بدوي
أ.د. إبراهيم علي عبد الهادي غانم
أ.د. محمد فوزي عطا
أ.د. ايملي محمد حلمي حمادة
أ.م. د. علي الدوسري
- أستاذ الجغرافيا الطبيعية بمركز البحوث والدراسات الكويتية
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الآداب جامعة عين شمس
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الآداب جامعة الاسكندرية
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الآداب جامعة الزقازيق
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية البنات جامعة عين شمس
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الآداب جامعة الفيوم
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الدراسات الأفريقية العليا جامعة القاهرة
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الآداب جامعة القاهرة
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الآداب جامعة سوهاج
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الآداب جامعة المنيا
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الآداب جامعة بنها
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الآداب جامعة المنصورة
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الآداب جامعة دمياط
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الآداب جامعة طنطا
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الآداب جامعة بني سويف
أستاذ بقسم الجغرافيا كلية الآداب جامعة المنوفية
أستاذ مساعد بقسم الجغرافيا - جامعة الملك سعود - السعودية
National & Kapodistrian University of Athens Faculty
of Geology and Geoenvironment, Greece
- Dr. Niki Evelpidou

فهرس المحتويات

م		
١	المُلخص	
٢	المقدمة	
٣	١. مشكلة الدراسة	
٤	٢. أهداف الدراسة	
٤	٣. تساؤلات الدراسة	
٥	٤. منطقة الدراسة	
٦	٥. الدراسات السابقة	
٩	٦. منهجية الدراسة	
١٠	أهم المراحل المستخدمة في النموذج التحليل الهرمي (AHP)	
١٠	▪ المرحلة الأولى: تحديد المعايير المستخدمة	
١٢	▪ المرحلة الثانية: جمع البيانات	
١٢	▪ المرحلة الثالثة: تحليل البيانات ومعالجتها	
٢٦	▪ المرحلة الرابعة: تحديد المواقع المثلى بالملاءمة المكانية	
٢٧	التحليل والمناقشة	
٢٧	- النتائج	
٣٣	الخاتمة	
٣٤	➤ أبرز النتائج	
٣٥	➤ المقترحات للدراسات المستقبلية	
٣٥	قائمة المراجع	
٤٣	المُلخص باللغة الإنجليزية	

فهرس الأشكال

م	العنوان	ص
١	منطقة الدراسة	٦
٢	معايير البيانات المناخية	١٨
٣	معايير البيانات الطبوغرافية	٢١
٤	معايير البيانات البيئية	٢٤

٢٦	معايير البيانات الاقتصادية	٥
٢٧	الملاءمة المكانية بطريقة التحليل الهرمي للمواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمعة للمنطقة الشمالية	٦
٣١	مواقع محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح القائمة والمواقع المحتملة للمنطقة الشمالية	٧

فهرس الجداول

م	العنوان	ص
١	معايير الدراسة ومصادرها	١١
٢	محتويات قاعدة البيانات الجغرافية ومصادرها	١٢
٣	المصفوفة النهائية للمقارنة الزوجية بين المعايير الرئيسية	١٣
٤	المصفوفة الثنائية للمعايير المناخية	١٤
٥	المصفوفة الثنائية للمعايير الطبوغرافية	١٤
٦	المصفوفة الثنائية للمعايير البيئية	١٤
٧	المصفوفة الثنائية للمعايير الاقتصادية	١٤
٨	مؤشرات الاتساق للمعايير المستخدمة في التحليل الهرمي (AHP)	١٥
٩	إجمالي المساحات الملائمة لإقامة مشروعات الطاقة الشمسية والرياح المجمعة للمناطق الشمالية	٢٨
١٠	المساحة الملائمة والمساحة غير الملائمة للمعايير المستخدمة في المنطقة الشمالية	٢٩

المُلخَص:

يحتلّ تحديد الموقع الأمثل الصدارة مع تسارع النمو العالمي في مشاريع الطاقة المتجددة نتيجة النمو السكاني وتوسع الاقتصاد العالمي، ليمثل التحدي الرئيس أمام صناع القرار هو تقليل الآثار البيئية الناجمة عن الوقود الأحفوري. وعالمياً، تعد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح من أسرع تقنيات توليد الطاقة الكهربائية نموًا وتقدمًا؛ وفي هذه الدراسة تم تقييم أسلوب اتخاذ القرار متعدد المعايير في اختيار المواقع المثلى في شمال المملكة العربية السعودية بطريقة التحليل الهرمي (AHP) لملاءمتها تطوير مشاريع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمع، واعتمدت الدراسة على عدة معايير، هي: معايير مناخية، ومعايير طبوغرافية، ومعايير بيئية، ومعايير اقتصادية. نتيجة لذلك أظهرت النتائج تفوق منطقة تبوك على غالبية درجة الملاءمة المرتفعة جدًا بمساحة تصل إلى ١٩٩٦٨ كم^٢، وشملت المناطق الجنوبية الغربية لمنطقة تبوك باتجاه الوجه وأملج وأقصى الشمال الغربي عند نيوم، تليها المنطقة الجنوبية من منطقة حائل بمساحة ٢٣٧٧ كم^٢ والمنطقة الجنوبية للحدود الشمالية بمساحة ١٢٩٠ كم^٢؛ وشغلت المناطق الواقعة في منطقة الجوف أقل درجة في فئة الملاءمة المرتفعة جدًا بمساحة تصل إلى ٨٩٥ كم^٢، ماعدا منطقة طبرجل في أقصى الشمال على الحدود الأردنية؛ ويرجع ذلك إلى حرمانها من شبكة خطوط الطاقة والطرق الرئيسية؛ مما يؤثر سلبيًا على المنطقة وامتداد المحميات الطبيعية. كما حققت المعايير المناخية مساحة ملاءمة مرتفعة، فبلغت مساحة الملاءمة المكانية لأقصى إشعاع شمسي ٩٢٥٤٦٨,٣ كم^٢، بينما بلغ الإشعاع الأفقي الكلي ٢٤٩٦٧٢,٨ كم^٢، في حين بلغت مساحة الملاءمة لسرعة الرياح ٦٨٠٣٣٥,٩ كم^٢ ومساحة الملاءمة لكثافة الرياح ٨١٦٣٩٥,٧ كم^٢. وهذا، ما أكدت عليه الدراسات الأدبية في أن المملكة العربية السعودية لديها إمكانات واعدة في الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح.

الكلمات المفتاحية:

نظم المعلومات الجغرافية-اتخاذ القرار متعدد المعايير-طريقة التحليل الهرمي (AHP)-طاقة الشمسية-طاقة الرياح.

المقدمة:

تُمثل الطاقة الدور الحيوي والبارز في التطور الاقتصادي والاجتماعي؛ كونها من أبرز احتياجات عديد من القطاعات الاقتصادية، وأساس من أسس التطور الاجتماعي والارتقاء بالحياة، لذا فعلاقة الطاقة المتجددة سواء الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح بالقطاعات الاقتصادية والحياة العامة هي علاقة ترابطية وتكاملية، فهي تتأثر بشكل كبير بالتطورات والتغيرات المحيطة بها. علمًا بأن العالم في الوقت الحالي أصبح يواجه ارتفاعًا مُتزايدًا على طلب الطاقة بجميع مصادرها؛ فقد أكدت وكالة الطاقة الدولية (IEA) أنَّ الطلب على الطاقة سيكون بنمو مطرد في السنوات القادمة، وأن مصادر الوقود الأحفوري قد تسهم فيما يقارب (٨٠٪) من الطلب العالمي على الوقود، مما ينتج عن ذلك الكثير من التداعيات السلبية في زيادة نسبة انبعاثات الغاز وتغيرات المناخ، وتدني أمن الطاقة (بدوي، ٢٠٢١)؛ وبما أنه من المتوقع زيادة حصة الطاقة المتجددة في توليد الطاقة الكهرباء عالميًا بحسب التقديرات الحالية البالغة (٢٩٪) لعام ٢٠٢٠م إلى أكثر من (٦٠٪) في عام ٢٠٣٠م، وفي مجال الطاقة تستهدف المملكة العربية السعودية تخفيض الانبعاثات الكربونية بمقدار ٢٧٨ مليون طن سنويًا في عام ٢٠٣٠م، وكيفية الانتقال إلى نظام الحياد الصفري للكربون بحلول عام ٢٠٦٠م مع ضمان حفظ أمن الكهرباء للوصول إلى طاقة مستقرة وبأسعار معقولة، مع ضمان توفير الوصول العالمي إلى الطاقة (المبادرة السعودية الخضراء، ٢٠٢١).

في ضوء ذلك، نجد أن الطاقة الشمسية نمت وتطورت لتصبح أسرع مصدر للطاقة على وجه الأرض، وتأتي أهميتها من كونها طاقة يمكن استثمارها في أي مكان، وتشكل مصدرًا مجانيًا للوقود والطاقة النظيفة (الصوري، ٢٠٢٠). وكذلك تعد طاقة الرياح من أقل أنواع الطاقة الملوثة للبيئة، حيث تحافظ على سلامة الأنظمة البيئية، وتُوظف الرياح في توليد الطاقة، وتعد الرياح من أكثر مكونات المناخ سرعة وديناميكية في تحول اتجاهاتها وكثافة الهواء والطاقة (أحمد وهادي، ٢٠١٥)؛ وعليه، فإن أنجح أنواع الطاقات المتجددة عقب المساقط المائية هي طاقة الرياح؛ وذلك لكونها الأكثر كفاءة من الناحيتين: الفنية والاقتصادية (محمود، ٢٠١٢).

من هذا المنطلق، جاءت هذه الدراسة لتقديم مراجعة شاملة للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمعة من منظور جغرافي؛ حيث نجد أن مصدر الطاقة المتجددة المجمعة (hybrid) يكون من مصدرين أو أكثر من مصادر الطاقة المتجددة، مثل: الألواح الكهروضوئية وتوربينات الرياح، المستخدمة معًا لتوفير زيادة كفاءة النظام وتحسين الاستقرار في إمدادات الطاقة إلى حد معين؛ مما سيساعد على توفير نظام احتياطي مستمر أثناء الانقطاع الكهربائي، والمساهمة في إمداد المناطق النائية بالطاقة بشكل أكثر كفاءة واستدامة في

جميع أنواع الطقس، الأمر الذي يضمن لمحطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمع؛ من مصدرين للطاقة على أن يُكْمَل بعضهما البعض؛ لأن وقت ذروة التشغيل يحدث في أوقات مختلفة من اليوم والسنة؛ فمن المرجح أن تنتج بتقنيات حديثة للطاقة المجمع على المدى الطويل بحسب الحاجة إليها. وبالتالي فإن هذه الطاقة الكهربائية المجمع توفر عديداً من المزايا مقارنة بأي نظام واحد من الطاقة. هذا، وتكمن أهمية الدراسة في معالجتها لعدة موضوعات اقتصادية حديثة وتحديات عالمية، وهي على النحو الآتي:

- تحقيق الاكتفاء الذاتي من مصادر الطاقة لمنطقة الدراسة بما يخدم الطلب المتزايد على الكهرباء مع استيعاب الزيادة السكانية المتوقعة في بعض المدن.
- ضرورة تنويع مصادر الطاقة والتوجه العالمي نحو اندماجها خاصة مع مشاريع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح؛ مما يزيد من فاعليتها ويقلل من الاعتماد على مصادر التقليدية في منطقة الدراسة.
- الحصول على كلٍّ من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح أمر معياري جداً، بحيث يمكن زيادة سعتهما تدريجياً لتتناسب مع نمو الحمل التدريجي (Patel, 1999).
- زمن التكلفة الإنشائية الخاصة بمشاريع الطاقة الشمسية والرياح أقصر بكثير من تلك الخاصة بالمصادر التقليدية، وبالتالي تقليل المخاطر المالية والتنظيمية (Patel, 1999).
- أن الطاقة الشمسية وطاقة الرياح تتوزعان بشكل عام في نطاقات زمنية مختلفة؛ ويساعد نظام الطاقة المجمع على أن يُكْمَل كل منهما الآخر حتى يتساوى مع تباينهما، وتكون هناك علاقة زمنية تكميلية (مرتبطة سلباً).

في ضوء ما سبق، كان من الضروري تحديد المواقع المثلى (Optimum Localities) لإقامة محطات توليد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح كإجراء تخطيطي في غاية الأهمية قبل البدء في إقامة مثل هذه المشاريع، مع دراسة جميع العوامل المؤثرة في الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وقد استدعى هذا الأمر ضرورة توظيف أسلوب القرار متعدد المعايير (Multi Criteria Decision Analysis (MCDA) والذي بات أسلوباً تقنياً عالي الجودة وفعالاً في عملية اتخاذ القرار وتقييمها لاختيار المواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمع (Estevez, et al., 2021).

١. مشكلة الدراسة:

سجلت المملكة العربية السعودية أعلى معدل استهلاك للطاقة للفرد في العالم، وذلك بسبب زيادة النمو السكاني والتصنيع بشكل أسرع (Salam & Khan, 2018)؛ حيث أظهرت عديد من الدراسات أن هناك زيادة حادة في استهلاك الطلب على الكهرباء بمتوسط النمو السنوي لعام ٢٠١٣م بنسبة (٧٪) (Al- Ajjlan, et al., 2006), (Al- Saleh, 2007)؛ ولا يزال هناك ارتفاع في استهلاك الطاقة الكهربائية

بنحو (٠,٢٪) حسب بيانات وزارة الطاقة، فقد بلغ ارتفاع استهلاك الطاقة الكهربائية السنوي بنسبة (٤,٢٣٪) إلى ٣٠٢ تيرا واط/ساعة في عام ٢٠٢١م؛ مقارنة بـ ٢٨٩,٣٣ تيرا واط/ساعة في عام ٢٠٢٠م، وارتفع إنتاج الطاقة الكهربائية بدوره بنسبة (٣,٣٥٪) ليصل إلى ٣٥٩ تيرا واط/ساعة، وعليه، فقد سجل نصيب الفرد من استهلاك الكهرباء لعام ٢٠٢١م حوالي ٨,٨٤١ كيلو واط/ساعة مقارنة بعام ٢٠٢٠م حيث بلغ حوالي ٨,٢٦٣ كيلو/ساعة (الهيئة العامة للإحصاء، ٢٠٢٠). كما تضاعف مقدار الاستهلاك السنوي للكهرباء خاصة في القطاع السكني من (١,٣ إلى ١,٥) ميغا واط/الساعة، وهو ما دلّ على أن أسعار الطاقة المدعومة أدّت دوراً بالغ الأهمية في هذه الزيادات إلى جانب النمو الاقتصادي والسكاني المطرد (Al dubyan & Gasim, 2021). هذا الارتفاع في أسعار الطاقة هو بلا شك أحد أبرز المشكلات المرتبطة من حيث التكلفة والكفاءة بإدارة استهلاك الطاقة المحلي، ولتشجيع الاستثمار في مجال كفاءة الطاقة، والحد من الآثار البيئية المرتبطة بالوقود الأحفوري (Parry, et al., 2014).

وعليه، تكمن مشكلة الدراسة في البحث عن مشاريع حديثة لمصادر الطاقة المتجددة؛ خاصة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمعة بحيث تُكمل الموارد كلاً منها الآخر، للاستفادة القصوى من نقاط القوة لكلتا الطاقنتين لصانع القرار بدلاً من وحيد المصدر، وإن كانت هناك قلة في الدراسات في المملكة العربية السعودية عن الطاقة المجمعة؛ وهو ما يُضيف إلى الدراسات في اختيار المواقع المحتملة بالجمع لأكثر من مصدر من مصادر الطاقة المتجددة مما يُعطي نتائج أفضل وأوفر اقتصادياً في المملكة العربية السعودية (Eltamaly, et al., 2013).

٢. أهداف الدراسة:

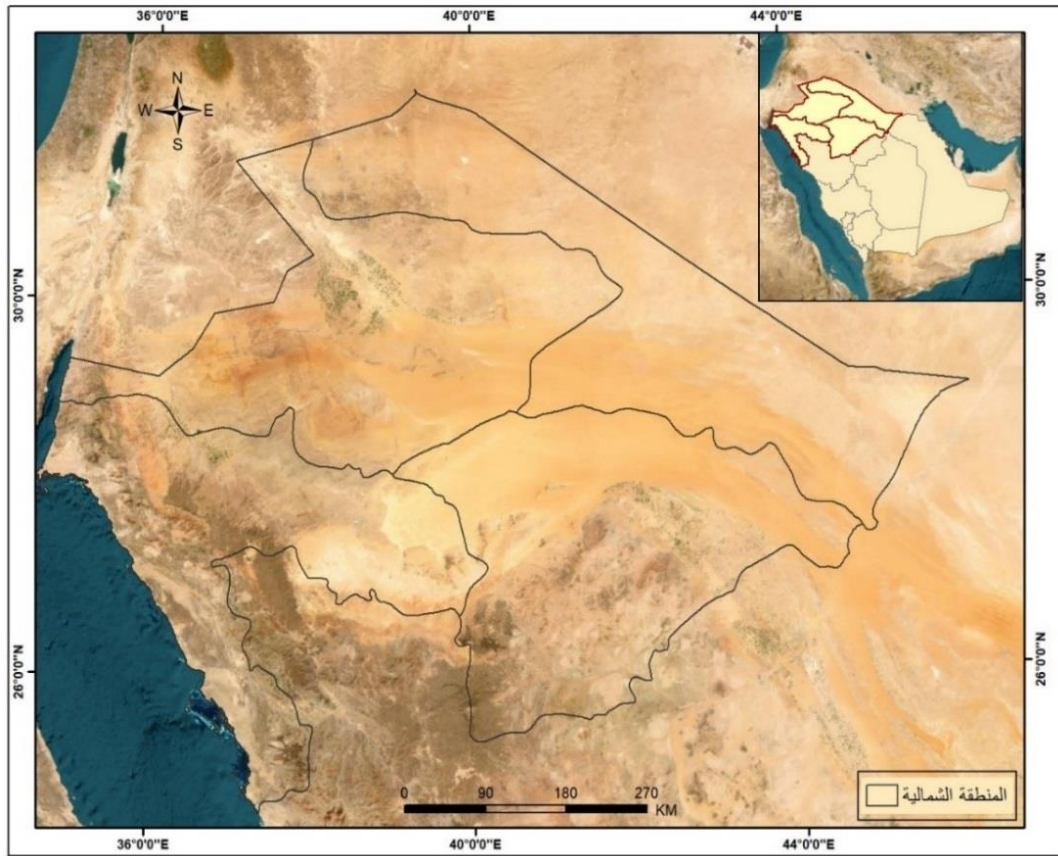
- استخدام أسلوب القرار متعدد المعايير (MCDA) في اختيار المواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمعة في شمال المملكة العربية السعودية باستخدام طريقة عملية التسلسل الهرمي التحليلي (AHP).
- تقييم أسلوب القرار متعدد المعايير (MCDA) للمواقع المثلى لطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمعة مع مواقع محطات الطاقة القائمة بمنطقة الدراسة.

٣. تساؤلات الدراسة:

- ما إمكانية استخدام أسلوب القرار متعدد المعايير (MCDA) في اختيار المواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمعة في شمال المملكة العربية السعودية باستخدام طريقة التسلسل الهرمي التحليلي (AHP)؟
- ما مدى دقة أسلوب القرار متعدد المعايير (MCDA) للمواقع المثلى لطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمعة مع مواقع محطات الطاقة القائمة بمنطقة الدراسة؟

٤. منطقة الدراسة:

تتمثل الحدود المكانية لمنطقة الدراسة في شمال المملكة العربية السعودية، والمحصورة ما بين خطي عرض ١٨° ١٥' ٣٢" و ٧٤° ٥٥' ٢٤" شمالاً، وخطي طول ١٦° ٧٢' ٤٥" و ٣٤° ٥٧' ٣٤" شرقاً (ArcGIS 10.8)، حيث تشمل أربع مناطق إدارية، هي: منطقة الحدود الشمالية، ومنطقة الجوف، ومنطقة تبوك، ومنطقة حائل كما في شكل (١)، وتتنوع مظاهر السطح بمنطقة الدراسة من الشرق إلى الغرب؛ ففي منطقة الحدود الشمالية تمتد الهضاب كهضبة الحرة في شمال غربها وهضبة الحمادا في جنوبها الشرقي، وهضبة الحجر تنحدر نحو الشمال الشرقي (الشريف، ٢٠٠٩)، وتسمى هضبة الحجر بهضبة الوديان لكثرة الأودية والمجاري السيلية، ولعل من أهمها وادي عرعر؛ كما تُعد هذه الهضاب الشمالية متصلة بهضبة بلاد الشام (الوليحي، ٢٠٠٨)، وفي منطقة الجوف تمتد على هضبة الحمادا و هضبة الحجر الواقعة إلى الشرق وحرّة الحرة بالشمال الشرقي، ومن أشهر أودية منطقة الجوف وادي السرحان؛ الذي تتبع مياهه من الأردن حتى الجوف (الوليحي، ٢٠٠٨)، وتشتهر الجوف أيضاً ببحيرة دومة الجندل وترتفع ٥٨٥ متراً فوق سطح البحر (الخليفة، ٢٠٠٩)، وأما منطقة حائل فتتمتد جبال شمر في عالية نجد، وهي مكونة من سلسلتي جبال أجا وسلمى من الشمال الشرقي إلى الجنوب الغربي، ويفصل بينهما سهل حائل الذي يبلغ عرضه ٧ كم^٢ (الرويشي، ٢٠٠٠)، ومنطقة تبوك تحتل المرتبة الأولى من بين مدن شمال المملكة من حيث المساحة، إذ تبلغ مساحة أراضيها ١١٧٠٠٠ كم^٢، وهي تمثل ما نسبته أكثر من ٦٪ من مساحة المملكة، والتي يطلق عليها بوابة الشمال للمملكة العربية السعودية (أمانة منطقة تبوك، ٢٠١٨). وقد تتأثر المنطقة الشمالية بمناخ البحر الأبيض المتوسط خاصة تبوك والجوف، كما تنخفض درجة الحرارة مما قد يؤدي إلى سقوط الثلوج بكثرة. وتدخل مناطق شمال المملكة العربية السعودية في نطاق الحزام الشمسي العالمي الذي يتميز بفيض من الإشعاع الشمسي وسرعة رياح مناسبة.



شكل (١) منطقة الدراسة - المصدر: عمل الباحثين اعتماداً على بيانات الهيئة العامة للمساحة الجيولوجية، وبيانات أمانة تبوك ١٤٤٣هـ

٥. الدراسات السابقة:

يستعرض هذا الجزء الدراسات الأدبية التي اهتمت بموضوع تقييم أسلوب القرار متعدد المعايير (MCDA) لاختيار المواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمعة في شمال المملكة العربية السعودية، وتم تقسيمها على ثلاثة أجزاء تتوافق مع موضوع الدراسة وإجراءاته المنهجية. أولاً: دراسات أدبية وفقاً لأسلوب القرار متعدد المعايير (MCDA). ثانياً: دراسات أدبية وفقاً لأسلوب عملية التحليل الهرمي (AHP). ثالثاً: دراسات أدبية وفقاً للأساليب الإحصائية والتحليلية.

أولاً: دراسات أدبية وفقاً لأسلوب القرار متعدد المعايير (MCDA):

مع تقدم تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) في قضايا اختيار الموقع؛ فقد أجريت عدد من الدراسات ذات الصلة في مجال تحليل الملاءمة المكانية لتحديد المواقع المثلى للطاقة كأداة لدعم القرار؛ خاصة منهجية اتخاذ القرار متعدد المعايير (MCDA)، فقد بحث كلٌّ من سولومون وهابنيز (Solomon & Haynes, 1984) نظم القرار للقواعد المتعددة الأهداف لحل مشكلات اختيار المواقع المناسبة في بناء محطة الطاقة لتوليد الكهرباء.

وقد تنوعت الدراسات التي تناولت أفضل المواقع لتجميع الطاقة الشمسية بالاعتماد على نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والمعايير المختلفة سواء كانت عالمية أو محلية؛ حيث استخدمت عدة دراسات معايير مختلفة، من أهمها: الجغرافية والفنية والبيئية والاقتصادية للحصول على نموذج ملائمة مكاني لأفضل مواقع إنشاء محطات الطاقة الشمسية كما في (Wang et al., 2018)، و(عبد الخالق وآل سرور، ٢٠١٩)، و(الزعيبي، ٢٠٢٠)، و(Rehman, et al. 2020). في حين استخدم في دراسة Wang et al., 2018) نموذج لصنع القرار متعدد المعايير (MCDM) على أساس العوامل البيئية والاجتماعية من خلال الجمع بين ثلاث منهجيات، هي: تحليلات تطوير البيانات (DEA)، وعملية التحليل الهرمي الضبابي (FAHP) لتقييم أوزان المعايير؛ وطريقة الترتيب التفضيلي عن طريق التشابه مع الحل المثالي (TOPSIS). وفي دراسة (عبد الخالق وآل سرور، ٢٠١٩) في محافظة النعيرية، توصلت نتائج الدراسة أن غالبية المناطق ذات ملائمة مكانية كمحطة طاقة شمسية وبمساحة تقدر بـ ١٠٣٠٠ كم^٢، وبنسبة تصل إلى ٦٩٪؛ وفي دراسات حصاد طاقة الرياح باستخدام اتخاذ القرار متعدد المعايير (MCDA)، ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) في اختيار المواقع المثلى؛ جاءت دراسة (Baban & Parry, 2001)، و (Tegou et al., 2010)، و(أحمد وهادي، ٢٠١٥)، و(بدوي، ٢٠٢١)، و(Alkhelaif & Salman, 2024). كما توجد عديد من الدراسات التي طبقت أسلوب اتخاذ القرارات بناءً على معايير متعددة للبحث عن الحل الأمثل في إدارة توليد الطاقة المجمع؛ واستخدام أساليب اتخاذ القرار (MCDA)، وتحديد المناطق المناسبة لمواقع الطاقة الشمسية، ومزارع الرياح باستخدام تقنيات نمذجة نظم المعلومات الجغرافية متعدد المعايير (MCDA) عند (Janke, 2010)، و(Anwarzai & Nagasaka, 2017).

ثانيًا: دراسات أدبية وفقًا لأسلوب التحليل الهرمي (AHP):

يُعدُّ أسلوب عملية التحليل الهرمي (AHP) أحد الأساليب المعتمدة في اتخاذ القرارات متعددة المعايير؛ وتوظيف الأساليب الكمية في عملية تقييم البديل الأمثل من بين مجموعة من البدائل وفق معايير متعددة؛ ولندرة الدراسات التي تناولت الطاقة المجمع في المملكة العربية السعودية باستخدام منهجية قائمة على اتخاذ القرار متعدد المعايير (MCDM) ومنهج التحليل الهرمي (AHP)، فقد ارتكزت غالبية الدراسات على دراسة مصدر واحد من مصادر الطاقة، ومن تلك الدراسات التي تناولت اختيار المواقع المثلى لمحطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية في المملكة العربية السعودية: دراسة (داود وآخرون، ٢٠١٧)، و(Albraheem & Alabdulkarim, 2021)، و(Al-Shammari et al., 2021)، و(Al Garni & Awasthi, 2017)، و(Albraheem & Al Mutlaq, 2024) فقد جاءت بهدف البحث عن أنسب المناطق لمشاريع الطاقة الكهروضوئية، حيث نجد أن دراسات (Al Garni & Awasthi, 2017)، و(Baseer et al. 2015)، و (Al-

(Shammari et al., 2021) شملت كامل مناطق المملكة العربية السعودية؛ بينما اقتصرَت دراسة (Albraheem & Alabdulkarim, 2021) على منطقة الرياض، وأكدت نتائج دراسة (Al Garni & Awasthi, 2017) على ضرورة إدراج معايير إضافية مثل: النمو السكاني، والمواقع التراثية، وتوزيع النباتات، والعواصف الرملية؛ كونها لها تأثير كبير على جودة أداء جمع الطاقة الكهروضوئية. كذلك توصلت النتائج عند دراسة (Al-Shammari et al., 2021) على تفوق مدينة تبوك الواقعة في شمال المملكة العربية السعودية على أفضل موقع من بين الـ ١٧ مدينة؛ بينما أظهرت النتائج دراسة (Albraheem & Alabdulkarim, 2021) أن أنسب المواقع شمال وشمال غرب منطقة الرياض بمساحة تبلغ (١٦٧٤٨) كم^٢ بنسبة (٨٠٪) درجة الملاءمة. وفي مشروعات الرياح هناك دراسة (Baseer, et al., 2015)، و (Albraheem & Al Mutlaq, 2024) حيث توصلت نتائج دراسة (Baseer et al. 2015) إلى أن أنسب المواقع لمزارع الرياح هي رأس تنورة وطريف والوجه. بينما بحثت دراسة (Albraheem & Al Mutlaq, 2024) بأنسب المواقع لمزارع الرياح على البحر الأحمر، حيث بلغت مساحة المواقع بالملاءمة المكانية المرتفعة بـ ٣٠٣٢ كم^٢.

وفي دراسات مشابهة تؤكد أن أكثر الطرق المستخدمة دقة في المقارنة الثنائية في نظم المعلومات الجغرافية (GIS) طريقة أسلوب التحليل الهرمي (AHP)، فقد ركزت في دراسات: (Uyan, 2016)، و (Merrouni, et al., 2018)، و (Ali, et al., 2019)، و (Koc et al., 2019)، و (Olivero-Ortiz et al., 2021)، و (Effat & El-Zeiny, 2022)، و (Rekik & Alimi, 2023)، و (Ali Raza et al., 2023) على تحديد المواقع المثالية لمزارع الرياح والطاقة الشمسية بأسلوب التسلسل الهرمي التحليلي (AHP-GIS)، فقد صنفت (Olivero-Ortiz et al., 2021) المعايير إلى سبعة معايير فرعية، هي: (الإشعاع الشمسي، وسرعة الرياح، والمناطق المحمية، والمناطق العسكرية، والمحميات، والمناطق المأهولة بالسكان والطرق). وهناك أدبيات اعتمدت على نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، وتقنيات الاستشعار عن بعد (SR) في اتخاذ القرار متعدد المعايير (Georgiou & Skarlatos, 2016)، و (Kamati, et al., 2022)، وعند (Effat & El-Zeiny, 2022) في تحديد المواقع المثلى لمزارع الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح المجمع في محافظة أسيوط بمصر.

ثالثاً: دراسات أدبية وفقاً للأساليب الإحصائية والتحليلية:

تنوعت الأساليب الإحصائية والتحليلية في تحديد المواقع المناسبة للطاقة الشمسية وطاقة الرياح؛ ولعل من أبرز تلك الدراسات في المملكة العربية السعودية: (طلبة، ٢٠٠١)، و (المطيري، ٢٠١٧)، و (الحربي والحسن، ٢٠١٨)، و (الدليمي وحسين، ٢٠١٩)، و (Al Mutlaq, 2022)، و (الشمري، ٢٠٢٢)، فقد بحثت هذه الدراسات أساليب الكشف عن الطاقة الشمسية لكافة مناطق المملكة العربية السعودية كما عند دراسة (Al Mutlaq, 2022)، بينما اقتصرَت على بعض المناطق في المملكة عند دراسة (الشمري،

(٢٠٢٢)، ودراسة (طلبة، ٢٠٠١) عن المدينة المنورة. أما تحديد المواقع المناسبة لطاقة الرياح لكافة مناطق المملكة العربية السعودية، فنجده عند (الحربي والحسن، ٢٠١٨)، واقتصرت دراسة (المطيري، ٢٠١٧) على إمكانية استغلال طاقة الرياح في إنتاج الطاقة الكهربائية بمنطقة الحدود الشمالية. واعتمدت طريقة بولين لاختيار مواقع الملاءمة لطاقة الرياح كما في دراسة (Yousefi, 2018) في إيران، ودراسة (المطيري والمطلق، ٢٠٢٣) في المملكة العربية السعودية.

من خلال استعراض الأدبيات السابقة نجد أن غالبية تلك الدراسات اهتمت بتناول تحليل الملاءمة المكانية لإنشاء مشاريع محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بحسب عدة معايير وأوزان مختلفة لكل دراسة على حسب النوع والأهمية. كما اتفقت غالبيتها على أهمية الجمع بين منهجيات تحليل متعدد المعايير لاتخاذ القرار (MCDA) خاصة أسلوب التحليل الهرمي (AHP) وربطها ببرمجية نظم المعلومات الجغرافية (GIS) كما في دراسات: (Anwarzai, et al., 2017)، و (Albraheem & Alabdulkarim, 2021)، و (Effat & El-Zeiny, 2022). هذا، ويمكن القول بأن الدراسات التي تناولت الطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمع قليلة جدًا في المملكة العربية السعودية، خاصة بالشكل الجغرافي الذي يُضفي الأهمية على دور دمج عنصرين من مصادر الطاقة المتجددة بمواقع محددة؛ وقد اتفقت معها دراسات عربية وأجنبية تناولت اختيار مواقع الطاقة المجمع بأساليب تدعم اتخاذ القرار الأمثل للمعايير المتعددة مثل: (Uyan, 2016)، و (Ali, et al., 2019)، و (Koc et al., 2019)، و (Olivero-Ortiz et al., 2021)، و (Effat & El-Zeiny, 2022)؛ وهذا ما يُضيف إلى الأبحاث العلمية المنشورة في مجال الطاقة المتجددة.

٦. منهجية الدراسة:

أ. منهج الدراسة:

اعتمدت الدراسة على المنهج التحليلي الذي يضمن دعم القرار المكاني، وكذلك منهج دراسة التحليل المكاني بهدف تحليل الملاءمة المكانية القائم على اتخاذ القرار متعدد المعايير (MCDA) لاختيار المواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمع (hybrid) باستخدام المعايير المحلية والدولية؛ ودراسة مدى ملاءمتها باستخدام أسلوب التحليل الهرمي (AHP)، والذي يعكس الأفضلية النسبية على المعايير بتحديد الأوزان لكل معيار؛ حيث تعد أحد الأساليب المعتمدة في اتخاذ القرارات متعدد المعايير التي تعتمد توظيف الأساليب الكمية في عملية اتخاذ القرار الخاص بانتقاء البديل الأمثل من بين مجموعة من البدائل وفق معايير متعددة. وعَرَّفها (Thomas Saaty) عام ١٩٨٠م بأنها أسلوب كمي

لتقييم وترتيب البدائل نسبة للهدف، وهي تقنية مرنة وسهلة التنفيذ لاستكشافها مع عديد من التطبيقات التي تهتم بتحديد المواقع وتحليل ملائمة الأرض على حل مشكلات اتخاذ القرار متعدد المعايير لأحكام ذاتية بعدة مستويات وأولويات (Saaty, 1987)، (Georgiou & Skarlatos, 2016). مع تحديد المواقع المحتملة لكل نوع طاقة منهما على حدة، ومقارنتها مع محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح القائمة للمواقع الحالية والموزعة في منطقة الدراسة لتقييم صحة المعايير المستخدمة وكفاءة المواقع المكانية.

ب. إجراءات الدراسة وأهم المراحل:

عند البدء بدراسة تحديد المواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح، تبرز أهم أساليب التعامل مع المشكلات الجغرافية لصانع القرار، ممثلة في اتخاذ القرار متعدد المعايير (MCDA) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS) وذلك، لطبيعتهما التكميلية بحيث يمكن استخدامهما بسهولة وانتظام (Sanchez-Lozano, et al., 2013). ولتحقيق الهدف من الدراسة اتبعت الدراسة نموذجاً هرمياً للتحليل تم تنفيذه إلكترونياً باستخدام حزمة من البرامج؛ وذلك، بتحديد أهم مراحلها بدءاً من تحديد المعايير المستخدمة، وجمع البيانات من مصادر مختلفة، ومعالجتها ثم تحليل البيانات المكانية للحصول على تقييم المواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمعة.

أهم المراحل المستخدمة في النموذج التحليل الهرمي (AHP):

■ المرحلة الأولى: تحديد المعايير المستخدمة:

يُعد اختيار الموقع للمشروع من القرارات المهمة والصعبة التي تحدد نجاح المشاريع واستمرارية بقائه، والتحدي الرئيسي للمخططين والباحثين بالالتزام بعدد من الاشتراطات والمعايير ذات الموثوقية العالية لضمان تحقيق الأهداف المرجوة، كونها تؤثر تأثيراً مباشراً في اختيار المواقع المثلى؛ وبالتالي على مستوى كفاءة الأداء والنتائج المتوقعة للمشروع، وكذلك، لتجنب الوقوع في آثار سلبية تؤثر على مستقبل المشروع، وعليه؛ فمن الضروري عند البدء بالتخطيط لإقامة مشروعات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح تقييم مجموعة من المعايير والاشتراطات لتحقيق الغاية من تلك المشروعات ونجاحها، وذلك بالاعتماد في تحديد معايير الدراسة على المعايير الدولية، ومدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية والمتجددة، والدراسات الأدبية، وطبيعة منطقة الدراسة وآراء المختصين؛ وبناءً عليه، تم تصنيف معايير الدراسة إلى: معايير مناخية، ومعايير طبوغرافية، ومعايير بيئية، ومعايير اقتصادية؛ وكل معيار من المعايير الرئيسية يضم عدداً من البدائل والمعايير الفرعية، وقد تم تحديد الأهمية النسبية لكل من المعايير من خلال المقارنة الزوجية التي تعتمد على

٤ معايير رئيسية و١٧ معيارًا فرعيًا. ولقد اعتمدت هذه الدراسة على المفاضلة بين معايير التقييم واختيار البديل الأمثل من بينها باستخدام طريقة التحليل الهرمي (AHP)، كما في الجدول (١).

جدول (١) معايير الدراسة ومصادرها

نوع المعيار	معايير التقييم	حدود المعيار	المصادر
المعيار المناخي	أقصى درجة للإشعاع الشمسي	الحد الأدنى هو ١١٠٠ واط/م ^٢ /سنة	جمع الأشعة الكهروضوئية في المناطق التي تكون فيها الكمية أعلى من ١١٠٠ واط / م ^٢ /سنة مثل: دراسة (Pearce., 2010 & Nguyen).
	الإشعاع الأفقي الكلي	٤,٢ < واط/م ^٢	استنادًا إلى تقرير NREL اعتبرت المناطق التي يقل فيها الإشعاع الشمسي عن ٣.٥٦ واط/م ^٢ /ساعة يومي غير مناسبة في هذه الدراسة لأنها غير مجدية اقتصاديًا (Nebey, et al., 2020).
	سرعة الرياح	أعلى من ٥ م/ث	محطات الرياح تكون مناسبة لإنتاج الطاقة إذا كانت أعلى من ٥ م/ث وذلك بحسب المركز الإقليمي للطاقة المتجددة.
	كثافة الرياح	٣٥٠ < واط/م ^٢	يفضل أن تزيد كثافة الرياح عن ٣٥٠ واط / م ^٢ لزيادة الطاقة الإنتاجية.
	درجة الحرارة	أقل من ٣٠	في الطاقة الشمسية تؤثر درجة الحرارة العالية على كفاءة الألواح الشمسية (Hassan, et al., 2016), (Merrouni, et al., 2018).
المعيار الطبوغرافي	نموذج الارتفاع الرقمي	بدقة ٣٠ م	نموذج ارتفاعات رقمي من النوع SRTM.
	درجة الانحدار	١٠ لتوربينات الرياح. ولا تزيد عن ٥° للألواح الشمسية/ ما بين ١٠-٥°.	تعتبر المناطق التي يزيد ميلها عن ١٠° تكون غير مناسبة لإنشاء توربينات الرياح (Effat, ٢٠١٤).
	اتجاه الانحدار	الجنوب	في حين الألواح الشمسية يؤثر الانحدار في توزيع الأجهزة ومتابعتها فسطح غير المتساوي قد يزيد من التكلفة، دراسة Hudson & Watson, (٢٠١٥)؛ ولذا يفضل اختيار أرض مستوية لا تزيد عن ٥°.
	الارتفاع	١٠٠-٥٠ م	يفضل وضع مزرعة شمسية على أرض مستوية بزاوية انحدار تتراوح بين ٣٠° و١٠ درجات (Dominguez Bravo, et al., 2007).
المعيار الاقتصادي	القرب من الطرق الرئيسية	٥ كم ^٢ في الألواح الشمسية	غالبًا ما يرتبط الارتفاع بسرعة الرياح، ويؤثر على أداء طاقة الرياح نتيجة زيادة سرعة الرياح.
	القرب من خطوط الطاقة	٥ - ١٠ كم ^٢	في معظم مشروعات طاقة الرياح يتم النظر إلى المناطق القريبة من الطرق الأكثر ملاءمة (Yousefi, 2018)، وفي تركيب الألواح الشمسية فالطرق الرئيسية معيار مهم يؤثر في متابعة الأجهزة (Al Garni, et al., 2017).
	البعد عن المناطق العمرانية	٢٠-٥٠ كم ^٢	كلما اقترب موقع المشروع من خطوط الطاقة لنقل الكهرباء، أصبحت أكثر ملاءمة (Effat, ٢٠١٦)، وعند الألواح الشمسية اعتمد على هذا المعيار ٥ كم مثل دراسة القرني (Al Garni, et al., ٢٠١٧).
	البعد عن المحميات والمواقع الأثرية	١٠٠٠ م	ينصح تحديد المناطق البعيدة من المدن المأهولة بالسكان والمطارات التي تزيد عن ٢٠ كم ^٢ أكثر ملاءمة (Yousefi, 2018)، وفي تركيب الألواح الشمسية أوصت بعض الدراسات على المناطق الملاءمة تبعد بـ ٥٠ كم ^٢ مثل دراسة (El-Zeiny, 2022 & Effat).
المعيار البيئي			توربينات الرياح قد يكون لها تأثير على القيمة البيئية لهذه المناطق، لذلك يجب ألا تكون موجودة ضمن ١٠٠٠ متر منها في دراسة (Baban, et al., 2001).

المصدر: عمل الباحثين اعتمادًا على المعايير الدولية ومدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجددة والدراسات الأدبية.

■ المرحلة الثانية: جمع البيانات:

ترتكز عمليات التحليل المكاني (Spatial analysis) في الدراسة الحالية على قاعدة بيانات جغرافية، ويوضح جدول (٢) هذه البيانات ومصادرها.

جدول (٢) محتويات قاعدة البيانات الجغرافية ومصادرها

م	اسم الطبقة	نوع الطبقة	مكونات الطبقة	مصدر الطبقة
١	Solar	Points	الإشعاع الشمسي	- بيانات البنك الدولي للأطلس الشمسي العالمي على الرابط: https://globalsolaratlas.info/download/saudi - دراسة (Zell, 2015, et al).
٢	Wind	Points	سرعة الرياح وكثافتها	محطات الرصد المناخي للمنطقة الشمالية من الفترة الزمنية عام (١٩٩٠ - ٢٠٢٣)، من مدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجددة. والبيانات المناخية التابعة لوكالة الفضاء الأمريكية ناسا من الرابط: https://power.larc.nasa.gov
٣	Groundwater	Polygon	المياه السطحية	تصنيف الغطاءات الأرضية من موقع وكالة الفضاء الأوروبية من خلال الرابط: World Cover Viewer.org .
٤	Historical sites	Points	المواقع التاريخية	التراث التاريخي والثقافي المتاح على موقع الهيئة السعودية للسياحة من خلال الرابط: https://www.sta.gov.sa/ar/home .
٥	Landcover	Polygon	الغطاءات الأرضية	الغطاء الأرضي من موقع شركة ESRI من خلال الرابط: https://livingatlas.arcgis.com/landcover .
٦	Power Network	Lines	شبكة خطوط الطاقة	خرائط مدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والطاقة المتجددة على الرابط: rratlas.kacare.gov.sa .
٧	Power Planets	Points	محطات توزيع الكهرباء	خرائط مدينة الملك عبد الله للطاقة على الرابط: rratlas.kacare.gov.sa .
٨	Protected areas	Polygon	المحميات الطبيعية	بيانات المركز الوطني لتنمية الحياة الفطرية: https://ncw.gov.sa/centers . المحميات الطبيعية لمنظمة الأمم المتحدة على الرابط: https://www.protectedplanet.net/country/SAU .
٩	Roads	Lines	الطرق الرئيسية	قاعدة البيانات للطرق على الرابط: OpenStreetMap.
١٠	Saudi Dem	Raster	نموذج ارتفاعات رقمي	تحميل نموذج ارتفاعات رقمي من النوع SRTM من موقع هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية: Earthexplorer.usgs.gov .

المصدر: عمل الباحثين.

■ المرحلة الثالثة: تحليل البيانات ومعالجتها:

يتم إعداد طبقات المعايير (Criteria layers preparation in ArcGIS) وذلك بإنشاء قاعدة بيانات ومجموعة من (Datasets) لكل نوع من أنواع البيانات المطلوبة في النموذج؛ وتوحيد الخريطة (المنطق الغامض) (Map Standardization (Fuzzy Logic) لتوحيد طرق إدخال لمختلف الطبقات المختلفة

تقييم أسلوب القرار متعدد المعايير في اختيار المواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح الجمعية أ. سلوى المطرفي & د. عبير سلمان
والمساقط والمقاييس ونظم الإحداثيات. يسمح المنطق الغامض بمعالجة عدم اليقين والغموض في البيانات المكانية، وهو أمر مفيد لدمج مجموعات البيانات المتنوعة ذات الدقة ومقاييس القياس المختلفة. فقد تم توحيد الإسقاط الخاص بكل البيانات المتوفرة وهو إلى (UTM Zone 37) منسوب إلى نقطة عين العبد ١٩٧٠م.

ولتعيين أوزان المعايير نستخدم طريقة التسلسل الهرمي التحليلي (AHP) لأوزان كل معيار بناءً على أهميتها النسبية؛ ولتسهيل المقارنات الزوجية بين المعايير، كما في الجدول (٣)، حيث تم الجمع بين الخرائط الموحدة باستخدام الأوزان المخصصة لإنشاء خرائط ملائمة مركبة لاختيار أفضل الأماكن لإنشاء محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. وتجميع خرائط المعايير بناءً على أهميتها، مما يؤدي إلى إنتاج خريطة مؤشر ملائمة واحدة لكل مصدر للطاقة. وإعطاء الأوزان حسب أهمية المتغير، وذلك بوضع قيمة موزونة لكل معيار مقابل سائر المعايير بالنسبة إلى الهدف في المستوى الأعلى (الغناطسة، ٢٠١٨)، ويُعبر عن القيم التي تستخدم لمقياس الوزن بمقياس رقمي (من ١ إلى ٩)، ونحصل من خلال المقارنات الثنائية بين المعايير ضمن نفس المستوى الهرمي وترتيب الأولويات التي تضمن عدم تناقض الآراء وهذه النسبة يجب ألا تتجاوز ١٠٪، أي أن نسبة الثبات كلما اقتربت من الصفر كانت الأحكام تتصف بالثبات، وإذا زادت النسبة عن ١٠٪ فإن الأحكام فيها نوع من التناقض، ولذلك تجب مراجعته. وعليه؛ يوضح جدول (٣) النتائج النهائية لمصفوفة المقارنة الثنائية بين المعايير المستخدمة في الدراسة.

جدول (٣) المصفوفة النهائية للمقارنة الزوجية بين المعايير الرئيسية

الرتبة (Rank)	المعيار (Criteria)	الوزن النسبي (Weight)
١	مناخي	٣٤٪
٢	طبوغرافي	٢٦٪
٣	اقتصادي	٢٨٪
٤	بيئي	١٢٪

المصدر: عمل الباحثين اعتماداً على معايير مدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجددة والدراسات الأدبية.

كما تم استخدام حساب متوسط قيم المصفوفة الثنائية للوصول إلى أوزان المعايير المستخدمة لكل عنصر من المعايير للعمل عليها، وذلك، بتقييم هذه المعدلات من خلال مصفوفة المقارنة الزوجية من برنامج الأكسل (Excel). وكذلك للتأكد من دقتها على الموقع الإلكتروني: <https://bpmsg.com/ahp>، والتي تظهر كما في الجداول (٤)، (٥)، (٦)، (٧).

جدول (٤) المصفوفة الثنائية للمعايير المناخية

Global Weight	local weight	Rank	الإشعاع الأفقي الكلي	أقصى إشعاع شمسي	كثافة الرياح	سرعة الرياح	
%٣,٧٠	%١٠,٧٠	١٠	٣	٢	١	١	سرعة الرياح
%٨,٦٠	%٢٥	٥	٤,٨٢	٢	١	١	كثافة الرياح
%١٢	%٣٤,٧٠	٣	٢	١	٠,٥	٠,٥	أقصى إشعاع شمسي
%١٠,٢٠	%٢٩,٦٠	٤	١	٠,٥	٠,٢٥	٠,٣٣	الإشعاع الأفقي الكلي

المصدر: عمل الباحثين.

جدول (٥) المصفوفة الثنائية للمعايير الطبوغرافية

Global Weight	local weight	Rank	شبكة الأودية	الارتفاع	درجة الانحدار	اتجاه الانحدار	
%١٣	%٥٠,٧٠	١	٢	٤,٧٦	٢	١	اتجاه الانحدار
%٢,٦٠	%١٠,٣٠	٤	١	٢	١	٠,٥	درجة الانحدار
%٥,٣٠	%٢٠,٥٠	٢	٠,٥	١	٠,٥	٠,٢٥	الارتفاع
%٤,٧٠	%١٨,٥٠	٣	١	٢	١	٠,٥	شبكة الأودية

المصدر: عمل الباحثين.

جدول (٦) المصفوفة الثنائية للمعايير البيئية

Global Weight	local weight	Rank	الغطاءات الأرضية	المحميات	المواقع التاريخية	المياه الجوفية	المياه السطحية	
%٢,٥٠	%٢١,٢٠	٢	٢	٢	٢	١	١	المياه الجوفية
%٢,١٠	١٨,٢٠	٤	٢	٣	١	٠,٥	٠,٣٣	المواقع التاريخية
%١,٩٠	%١٦,٧٠	٥	٢	١	٦,٠٦	٥,٨	٣,٤	المحميات
%٢,٨٠	%٢٤,٢٠	١	1	٠,٥	٠,٥	٠,٥	٠,٥	الغطاءات الأرضية

المصدر: عمل الباحثين.

جدول (٧) المصفوفة الثنائية للمعايير الاقتصادية

Global Weight	local Weight	Rank	شبكة خطوط الطاقة	المناطق العمرانية	المطارات	الطرق الرئيسية	
%٤,٦٠	%١٦,١٠	٢	٣	٢	٠,٥	١	الطرق الرئيسية
%١٥,١٠	%٥٣,٤٠	١	٤,٨١	٤,٧	١	٢	المطارات
%٤,٠٠	%١٤,٣٠	٤	١	١	٠,١٧	٠,٥	المناطق العمرانية
%٤,٦٠	%١٦,١٠	٣	١	١	٠,١٧	٠,٣٣	شبكة خطوط الطاقة

المصدر: عمل الباحثين.

- مؤشر الاتساق:

لتحديد المواقع المقترحة لمشاريع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمع، لا بد من تحديد الأوزان والتصنيف لكل عامل مؤثر، وبالتالي؛ فإنه من أجل ضمان الاتساق داخل مصفوفة المقارنة الثنائية، فلا بد من التأكد من صحة الأوزان؛ فقد تم حساب قيمة نسبة الاتساق (CR)، حيث يجب ألا تتجاوز قيمة هذه النسبة عن 0.1، وقبل ذلك علينا حساب مؤشر الاتساق (الثبات) (RI)، والذي يمثل معدل الاتساق بمؤشر عشوائي وهي أرقام ثابتة وضعها (Saaty, 1980)، وتعطي قيمة (CI) بالمعادلة (١):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

حيث:

λ_{max} : تمثل الجذر الكامن الأعظمي.

n = حجم المصفوفة (عدد المعايير).

وللتأكد من ثبات القيم لمصفوفة المقارنة، وبالتالي الحكم على جودة القرار النهائي، ووفقاً لساعاتي فإنه كلما اقتربت هذه النسبة من الصفر، كانت الأحكام تتصف بالثبات، وأن الحد الأعلى المقبول هو $CR \leq 0.1$ (10%)، وإذا زادت عن ذلك، فإن ذلك يعني عدم ثبات الأحكام؛ وبالتالي يتطلب ذلك مراجعة المقارنات الثنائية.

ويتم حساب نسبة الثبات (CR) وفقاً للمعادلة التالية (٢):

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

CR = نسبة الثبات.

CI = مؤشر الثبات Index Consistency.

RI = مؤشر الثبات العشوائي Index Random.

وبتطبيق المعادلات (١، ٢) على مؤشرات القيم السابقة للدراسة؛ حيث أظهرت القيم مؤشرات

الاتساق كما في جدول (٨):

جدول (٨) مؤشرات الاتساق للمعايير المستخدمة في التحليل الهرمي (AHP)

λ_{max}	CI	RI	CR	N
1.4	1.49	1.63	0.92	17

المصدر: عمل الباحثين.

حيث أظهرت نتائج قيمة $CI = 1.49$ ، وقيمة $RI = 1.63$ ، بينما جاءت قيمة $CR = 0.92$ ؛

وعليه، فإن قيمة أقل $CR < 0.1$ ، وهي ما يؤكد على أن قيمة الثبات مقبولة لمؤشر الاتساق، وبالتالي فإن ذلك يؤكد على ثبات الأحكام في اتخاذ القرار النهائي للمصفوفة.

استعانت الدراسة بأدوات التحليل المكاني التي تخدم المعايير المتعددة لاتخاذ القرار الأمثل، ومعالجة كل نوع من البيانات على حدة: (المناخية، والطبوغرافية، والبيئية، والاقتصادية)، مع إنشاء خرائط مؤشر الملاءمة للطاقة الشمسية وطاقة الرياح من خلال تطبيق طريقة (WLC) على معايير الخرائط الموحدة. تمثل هذه الخرائط التوزيع المكاني للمواقع المثلى لمحطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمعة بناء على المعايير المحددة والأوزان.

١. المعايير المناخية (Climate Criteria's):

○ مؤشر الملائمة الشمسي:

- أقصى إشعاع شمسي (Maximum radiation):

توفر بيانات الحد الأقصى للإشعاع الشمسي معلومات محددة حول أعلى مستويات الإشعاع الشمسي في موقع معين خلال فترة زمنية معينة، والتي يمكن من خلالها تحديد الموقع المناسب لإنشاء المحطة، وذلك، لأن المناطق ذات الإشعاع الشمسي الأعلى تتيح استغلال الطاقة الشمسية بكفاءة أكبر وإنتاجية أعلى للمحطة. ويفضل اختيار المناطق خالية من الغيوم والسحب، مما يضمن استمرارية إنتاج الطاقة الشمسية؛ ويعد هذا المعيار من أهم العوامل التي تؤثر بشكل واضح في اختيار أنسب المناطق لمحطات الطاقة الشمسية؛ فالعلاقة بينهما تتسم بالطردية، فكلما زاد معدل الإشعاع، زادت الملاءمة المكانية لأفضل مواقع محطات الطاقة الشمسية؛ وعليه، تُعد قيمة الإشعاع الشمسي من أهم المعايير للتنبؤ المستقبلي بالمواقع المثلى (Nguyen & Pearce, 2010). وبالتالي، يجب أن تتلقى هذه المواقع ضوء الشمس الكافي طوال العام (Abdelrazek, 2017). واستناداً إلى تقرير NREL اعتبرت المناطق التي يقل فيها الإشعاع الشمسي عن ٣,٥٦ واط ساعة/م^٢ يومي غير مناسبة؛ لأنها غير مجدية اقتصادياً (Nebey , et al., 2020). ولذلك، تعد خريطة الإشعاع الشمسي المنتجة باستخدام أداة IDW مفيدة جداً تساعد في تحديد المواقع الأنسب لإنشاء محطات الطاقة المتجددة ذات الأداء الأمثل. وباستخدام الأداة تُعطى سطحاً مستمراً (Raster) يمثل أقصى قدر من الإشعاع الشمسي لمنطقة الدراسة بأكملها. هذا، وتوفر هذه الأسطح المستمرة فهماً أكثر شمولاً لتوزيع الإشعاع الشمسي مقارنة بالاعتماد على قياسات النقاط المنفصلة (Vector).

- الإشعاع الأفقي الكلي (Global Horizontal):

توفر بيانات الإشعاع الأفقي الكلي معلومات مهمة لتقييم إمكانات الطاقة الشمسية، وتحسين مواقع تخطيط محطات الطاقة الشمسية لتقدير إنتاجية الطاقة، بحيث يُمثل الإشعاع الأفقي الكلي إجمالي الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي في منطقة معينة. وهو ما يعكس الإشعاع المتاح للتحويل إلى

كهرباء باستخدام الخلايا الضوئية. مما يساعد في معرفة توزيع المواقع الأكثر إشعاعًا مع تلقي الطاقة الشمسية كما في شكل (٢). وقد تتباين كمية الإشعاع الشمسي من مكان لآخر فتصل تقديرات هذا الإشعاع إلى ذروتها في وقت الظهيرة، عندما تكون الشمس عمودية، وتقل في الصباح والعصر بسبب ميلان الأشعة الشمسية، ويترتب على ذلك التباين في مقدار الإشعاع الشمسي؛ وبالتالي الاختلاف في حجم الطاقة الكهربائية المتوقع إنتاجها.

○ مؤشر ملاءمة الرياح:

- سرعة الرياح (Wind Speed):

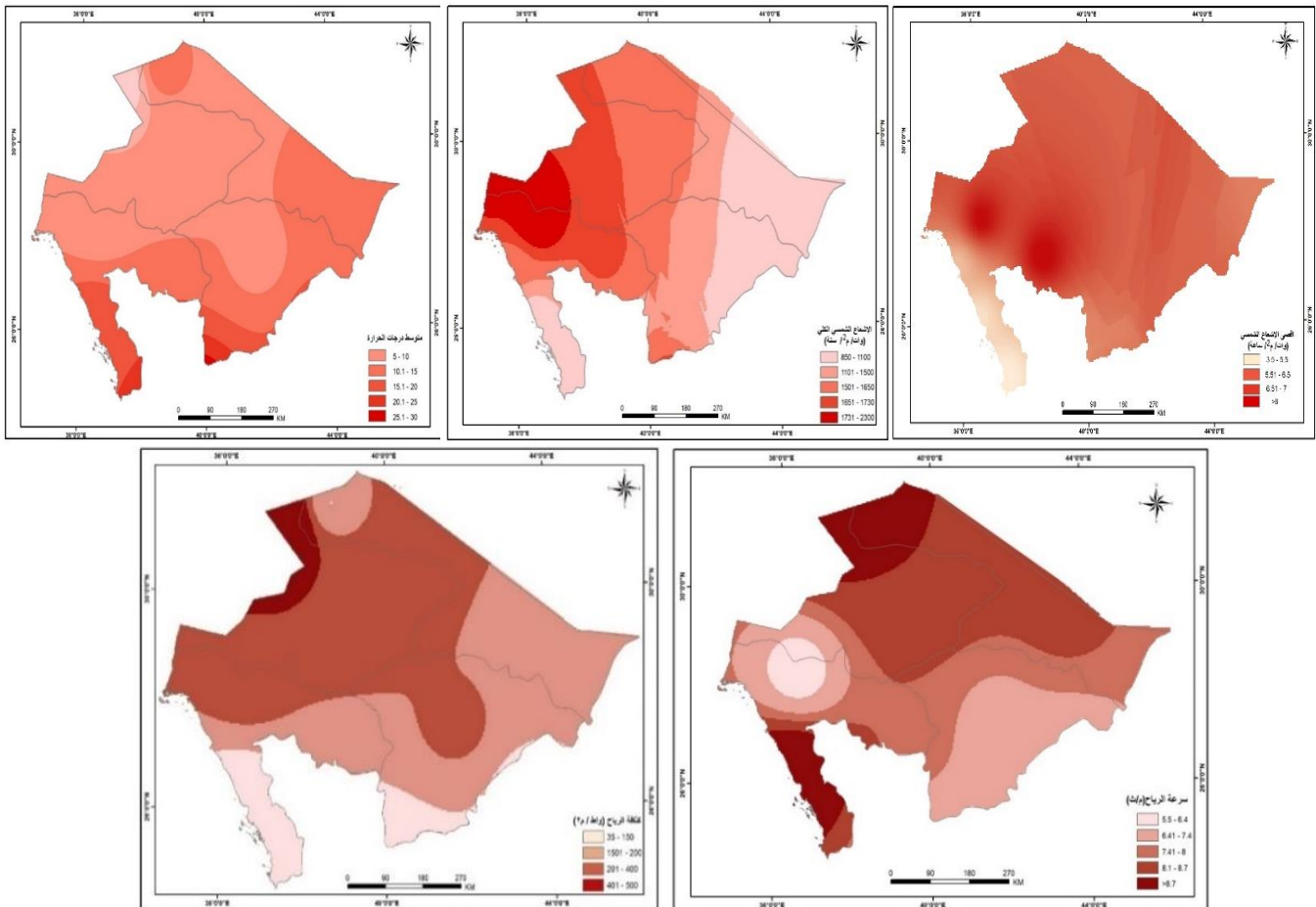
يتجلى تأثير سرعة الرياح وكثافتها في تحديد أنسب المواقع لإقامة مشروع محطة الرياح، وكذلك دورها في تحديد حجم الكهرباء المولدة من تلك المحطات؛ كما أن إنتاجية توليد الطاقة يمكن أن يستفاد منها في حال سرعة الرياح، حيث تتراوح ما بين ٣-٤ م/ث (Stiebler.,2008). وفي حين إذا زادت سرعة الرياح عن ٥,٤ م/ث أي بمعدل ١٩,٤ كم/ساعة قد تكون إنتاجية الكهرباء ذات فائدة اقتصادية (الديب، ٢٠٠٩). من هنا نستدل أنه كلما زادت سرعة الرياح عن ٥,٤ م/ث، زاد حجم الكهرباء المولدة من محطات الرياح، وبالتالي ارتفاع تكلفة إنتاج الكيلووات بمحطة الرياح؛ والجدير بالذكر، فإن محطات الرياح بحسب المركز الإقليمي للطاقة المتجددة قد تكون مناسبة لإنتاج الطاقة إذا كانت أعلى من ٥ م/ث. ولقد تم استخدام نفس البيانات في ارتفاع (SRTM) مع خريطة سرعة الرياح في تقدير كثافة طاقة الرياح. هذا، ويوفر استخدام أداة وزن المسافة العكسية (IDW) (Inverse Distance Weighting) لاستخراج قيم سرعة الرياح من مجموعة من النقاط مع استيفائها على منطقة الدراسة.

- كثافة الرياح (Wind Density):

يُعدُّ عامل كثافة الرياح من العوامل المهمة في تحديد مواقع بناء محطة الطاقة؛ حيث تسهم كثافة الهواء العالية بمدى توفر طاقة رياح، وغالبًا، تحظى المناطق ذات كثافة الرياح العالية بإشعاع شمسي أعلى أيضًا، مما يزيد من كفاءة وإنتاجية محطات الطاقة الشمسية. كما أن كثافة الرياح العالية تمنح استقرارًا أكبر للتيارات الهوائية؛ مما يحسن من أداء وإنتاجية أكثر فاعلية من الناحية التقنية والاقتصادية مقارنة بالمناطق ذات كثافة الرياح المنخفضة. وعليه، فقد استخدم لخريطة كثافة الرياح أداة IDW؛ والتي تساعد في تحديد المواقع الأنسب لإنشاء محطات الطاقة المتجددة ذات الأداء الأمثل.

○ درجة الحرارة (Temperature):

تبرز أهمية هذا المعيار في كونه من المؤشرات الملائمة في تحديد الموقع الأفضل؛ باعتبار أن درجة الحرارة ذات علاقة مباشرة مع محطات الطاقة الشمسية، بحيث من المحتمل أن يتأثر أداء الطاقة الكهروضوئية بارتفاع درجة الحرارة للخلايا الكهروضوئية (Hassan, et al., 2016)، (Al Garni, et al., 2017) (Ghasemi, et al., 2019)، وأفضل قيمة لدرجة الحرارة في إنتاج الطاقة الشمسية هي أقل من 25°C وبالتالي فإن العلاقة بينهما تتسم بالعلاقة العكسية، وكلما زاد مقدار درجة الحرارة، ساعد على انخفاض في إنتاج الطاقة (PV) بنسبة $0.4\% - 0.5\%$ (Li, 2013). وعليه، تكمن أهمية درجات الحرارة في تحديد نوع محطات الطاقة الشمسية التي ستقام في المنطقة؛ وذلك، باعتبار أن محطات الخلايا الكهروضوئية تعتمد على ضوء الشمس، بينما تستخدم أنظمة الطاقة الشمسية المركزة تبعاً لدرجات الحرارة؛ باعتبار تأثيرها على الخلايا الكهروضوئية وانخفاض في قدرة الخلية على الإنتاج بنسبة 0.05% ، حيث كلما ارتفعت درجة حرارة الخلية درجة مئوية عن 25°C ، أثر ذلك سلباً على الخلايا الضوئية لأن المدى الطبيعي لدرجة الحرارة للوحة الضوئية يتراوح من $(20 - 60^{\circ}\text{C})$ (يوسف، ٢٠١٦)، كما في الشكل (٢).



شكل (٢) معايير البيانات المناخية - المصدر: عمل الباحثين

يمكن القول: إنه كلما زادت كمية الإشعاع الشمسي، زادت كمية الكهرباء المولدة بواسطة وحدة الخلايا الشمسية؛ ولأجل أن تكون الأنظمة الكهروضوئية مجدية اقتصاديًا، فإنها تتطلب عادة إشعاعًا شمسيًا بمقدار ١١٠٠ كم^٢ واط/ساعة/م^٢ سنويًا. كما يُعد متوسط سرعة الرياح المؤشر الفني الأكثر أهمية، خاصة متوسط سرعة الرياح المرتفعة، دلّ على موارد رياح وفيرة ومفيدة لزيادة إنتاج الطاقة، وتزداد سرعة الرياح مع الارتفاع، بما أن التوربين مثبت على البرج، فكلما زاد ارتفاع البرج، زادت إنتاجيته من الطاقة.

وقد أظهرت نتائج الشكل (٢) أن مساحات الملاءمة المكانية لأقصى إشعاع شمسي تزيد عن ٥,٥ كيلو واط/ساعة/م^٢ يوميًا في الجهات الوسطى من مناطق تبوك والجوف وشمال حائل وشرق الحدود الشمالية؛ ويبلغ معدل الإشعاع الشمسي على تلك المناطق ما يزيد عن ٦,٩ كيلو واط/ساعة. بينما تتحدد مساحات الملاءمة للإشعاع الشمسي الأفقي الكلي من ١١٠١-١٥٠٠ واط/م^٢/سنة في الجهات الجنوبية من الحدود الشمالية والأجزاء الشرقية من منطقة حائل والجنوب الغربي من منطقة تبوك بالقرب من أمّالج، وفي حين تظهر غالبية مساحة المنطقة الشمالية ملاءمة لدرجة الحرارة تقل عن ٢٥° خاصة على الجهات الوسطى والشرقية والغربية، ما عدا أجزاء قليلة من الجهات الجنوبية الغربية من منطقتي حائل وتبوك بما يرتفع عن ٢٥°-٣٠°.

وبما أنه يتم استثمار موارد طاقة الرياح في المقام الأول في المناطق التي تتساوى فيها سرعة الرياح أو تتجاوز ٥.٥ م / ث، فقد أظهرت نتائج شكل (٢) أن مساحات الملاءمة لمتوسط سرعة الرياح المناسبة تتحدد بـ (٦,٤-٥,٥ م/ث) في الجهات الجنوبية من منطقة حائل والشمالية الغربية من منطقة تبوك، في حين ترتفع سرعات الرياح عن متوسط (٨,٧ م/ث) في أجزاء من الجهات الشمالية لمنطقة الجوف والجنوبية الغربية من منطقة تبوك. كما تبلغ كثافة الرياح المناسبة من (٥٠-٣٤,١ م) على الجهات الجنوبية من منطقتي الحدود الشمالية، وحائل، وأجزاء من شمال منطقة الجوف.

من خلال شكل (٢) لوحظ أنّ المنطقة الشمالية في المملكة العربية السعودية منطقة انتقالية مناخيًا، بحيث تقع في أطراف الضغوط الجوية المرتفعة التي تشكل إقليم المصدر للكتل الهوائية التي تغزو المنطقة، كونها تتعرض في فصل الصيف إلى هبوب الرياح الشمالية الغربية وأنها حارة جافة؛ أما في فصل الشتاء، فتتأثر بالرياح الشمالية الشرقية والرياح العكسية الغربية والشمالية الغربية بسبب الأعاصير من البحر المتوسط، والتي تكون غالبًا ممطرة في فصل الشتاء (الرويثي، ٢٠٠٠). ويعزى ذلك إلى التأثير الشديد بسيادة المنخفضات والأعاصير التي مصدرها البحر المتوسط وشمال البحر الأحمر (بخرجي، ٢٠١٠).

٢. المعايير الطبوغرافية (Topographic Criteria's):

○ درجات الانحدار:

من أجل الجدوى الاقتصادية، تعتبر التضاريس المسطحة أو ذات المنحدرات المنخفضة أمراً بالغ الأهمية لمزارع الطاقة الشمسية الكهروضوئية وتوربينات الرياح، حيث تسهم المناطق ذات المنحدرات الشديدة في ارتفاع التكاليف الاقتصادية؛ وعليه، كلما انخفض المنحدر كان أكثر ملاءمة. ومع ذلك، من الدراسات تفضل منحدرات تتراوح بين ٣٪ و ٥٪ على مساحات واسعة في حالة الطاقة الشمسية، في حين، هناك دراسات أدبية تعتمد تحديد نطاقات درجات الانحدار تتراوح بين ١٠٪ و ٣٠٪ لتوربينات الرياح (Ali, et al., 2019), (Xu, et al., 2020), (Effat, 2014), (Dominguez Bravo, et al., 2007), (Effat & El-Zeiny, 2022). وعليه، لا بد ألا يتجاوز المنحدر ١٠° لأنه يسبب مشكلات في النقل، والتركيب، والأداء في منطقة الدراسة. من هذا المنطلق، كلما كان السطح مستوياً، فهو أفضل لبناء المحطة؛ وذلك، فإنه بحسب درجات الانحدار المنخفضة، فإنها تساعد على زيادة ألواح الطاقة الشمسية وتوربينات الرياح وبالتالي زيادة إنتاجية الطاقة. كما أن زاوية الانحدار الأعلى من ٥° قد تنتج أنماط رياح أكثر اضطراباً مما يسبب اضطرابات في استقرار التوربينات، وبالإضافة إلى ارتفاع التكاليف، وبالتالي، تعتبر درجة انحدار ٥° أو أقل منحدرًا مناسباً وعليه، زوايا المنحدر الأكبر من ٥° غير مناسبة (Baban & Parry, 2001)، ولقد أُدخل تصنيف درجات الانحدار من أداة التصنيف Reclassify للوصول إلى فئات الانحدار.

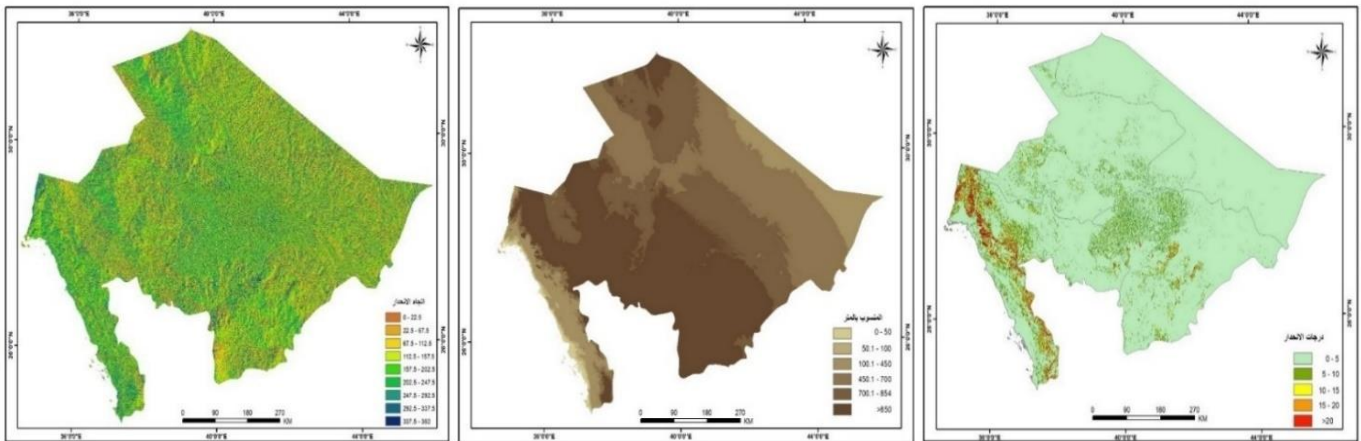
○ اتجاه الانحدار:

هو عامل طبوغرافي حاسم يؤدي دوراً كبيراً في ملاءمة الأرض لموقع الألواح الكهروضوئية، حيث يكون مواجهاً للجنوب الأفضل بالنسبة للأجهزة الكهروضوئية (Al-Shammari, et al., 2021). ووفقاً للأدبيات، تم تطبيق هذا المعيار في الغالب على محطات الطاقة الشمسية بحيث يحدد المنحدر في اتجاه عقارب الساعة من الشمال من ٠ إلى ٣٥٩.٩°. وفي نصف الكرة الشمالي، تتلقى المنحدرات المواجهة للجنوب والجنوب الغربي، والجنوب الشرقي أكبر قدرًا من ضوء الشمس، مما يجعلها الأكثر ملاءمة. (Watson & Hudson, 2015), (Georgiou & Skarlatos, 2016)، ولقد استخدمت الدراسة Classify وتحديد التصنيف إلى ٩ فئات، على أن تكون الفئة (157.5° - 202.5°) للاتجاه الجنوبي هي الأفضل باتجاه يتناسب مع أشعة الشمس الساقطة في منطقة الدراسة؛ يليها في الأهمية للاتجاه الجنوب الغربي والجنوب الشرقي الثاني والثالث على التوالي (Effat & El-Zeiny, 2022).

○ الارتفاعات (Elevation):

يؤثر التباين في الارتفاع والاتجاه (المنحدر والجانب) والظلال بواسطة الخصائص الطبوغرافية على كمية الإشعاع الواردة في مختلف المواقع (Effat, 2016). ويستخدم نموذج الارتفاع الرقمي (Digital Elevation Model) لتحليل مناسيب سطح الأرض، ويُعد فهم اختلافات الارتفاع أمراً ضرورياً لمهام مختلفة مثل، تصنيف التضاريس، وغالباً ما يرتبط الارتفاع بسرعة الرياح، ويؤثر الارتفاع على أداء إنتاجية طاقة الرياح نتيجة زيادة سرعة الرياح. ومن المرجح، أن تواجه المواقع الموجودة على الأراضي منخفضة العوائق (مثل المباني)، مما قد تسبب اضطرابات الرياح، وبذلك، تقل اضطرابات الرياح على الارتفاعات الأعلى وتكون سرعات الرياح أكثر اتساقاً (Baban & Parry, 2001).

بالتالي، فإن الارتفاعات يُفضل ألا تزيد عن ٢٠٠ م^٢ لانخفاض كثافة الهواء، والذي سيقبل من كفاءة توربينات الرياح (Noorollahi, et al., 2016), (Ari & Gencer, 2020)، وبالنسبة لمواقع الألواح الشمسية فإن ارتفاع الموقع الجغرافي هو ارتفاعه فوق أو تحت نقطة مرجعية ثابتة من مستوى سطح البحر على الأرض. والارتفاع الأعلى يدل على نتيجة أكبر في استقبال إشعاع الطاقة الشمسية مقارنة بالارتفاع المنخفض (Li, 2013). كما في شكل (٣).



شكل (٣) معايير البيانات الطبوغرافية - المصدر: عمل الباحثين

اتضح من خلال شكل (٣) أن المناطق الواقعة على الدرع العربي والمناطق الجنوبية التي تزيد في ارتفاعها عن ٨٥٠ م^٢ غير ملائمة للمواقع المثلى، وأما المناطق الشرقية والجنوبية الغربية التي لا يزيد انحدارها عن ٥° ملائمة مكانياً. وذلك يرجع إلى إمكانية الوصول بسهولة لمحطات الطاقة، وتستبعد التضاريس شديدة الانحدار التي تؤدي إلى صعوبة نقل مواد ومعدات البناء إلى الموقع والصيانة للمحطة.

في حين تظهر رتب الأودية الرئيسية ومناطق الملازمة المكانية لها بحسب التحليل الهرمي المناطق الأبعد أكثر ملائمة.

٣. المعايير البيئية (Environmental Criteria's):

○ شبكة تصريف الأودية (Drainage network):

إن تحديد أماكن تصريف الأودية له أهمية كبيرة في تحقيق أفضل كفاءة وأداء للمحطة. وبشكل عام، يُفضل أن تكون المحطة بعيدة عن مجاري المياه وشبكات تصريف الأودية، وذلك لتجنب المشكلات الناتجة عن التعرض للمياه والرطوبة، مما قد يؤثر سلباً على المعدات والأنظمة الكهربائية للمحطة، وضمان سلامة وأمان تصريف الأودية بعيداً عن ملوثات المحطة. وقد استخدم أداة (Euclidean Distance Tool) لتحديد المسافات داخل منطقة الدراسة، وشبكات التصريف الخاصة بالأودية وخاصة الرتب العليا منها؛ وتحديد المناطق الأفضل للرتب ذات المسافة الأبعد عن شبكات تصريف الأودية.

○ المواقع التاريخية (Historical sites):

يُفضل عند بناء محطة الطاقة الشمسية وتوربينات الرياح تجنب القرب من المواقع الأثرية والتاريخية؛ وذلك، للبعد عما يؤثر على أهمية تلك المواقع وقيمتها الثقافية والتاريخية؛ بالإضافة إلى ذلك، قد تؤدي محطات الطاقة إلى تغيير في البيئة المحيطة وتأثير عوامل الضوضاء والاهتزازات على هذه الأماكن التاريخية. وعلى الرغم، من أن المواقع التاريخية قد تكون مصدر جذب سياحي واقتصادي، إلا أن وضع محطات الطاقة بالقرب منها يمكن أن يؤدي إلى تقليل جاذبيتها وقد يؤثر على السياحة المحلية.

○ المياه الجوفية (Underground Water):

تتحدد الأهمية عند بناء المحطات الشمسية وطاقة الرياح في تجنب القرب من المياه الجوفية؛ وذلك، من أجل تجنب المحطات الطاقة تلوث المياه الجوفية؛ مما قد يؤدي إلى تسرب المواد الكيميائية المستخدمة في عمليات التشغيل ومواد البناء. وقد تحتاج تلك المحطات مساحات كبيرة من الأرض للاستفادة من المياه، لتبريد المعدات أو لأغراض أخرى. وبالتالي؛ قد يؤدي ذلك إلى نقص في المياه المتاحة للاستخدام البشري أو الزراعي.

○ المحميات (Protectorate):

في المناطق الأكثر ملائمة يفضل عند بناء المحطات الشمسية وطاقة الرياح تجنب إنشائها داخل المحميات الطبيعية أو بالقرب منها، وذلك، كونها مصدرًا للسياحة الطبيعية؛ وعليه، فإن القرب من هذه المناطق قد يُشوّه المنظر الطبيعي ويقلل من قيمتها البيئية والسياحية، والحفاظ عليها من تأثير انبعاثات

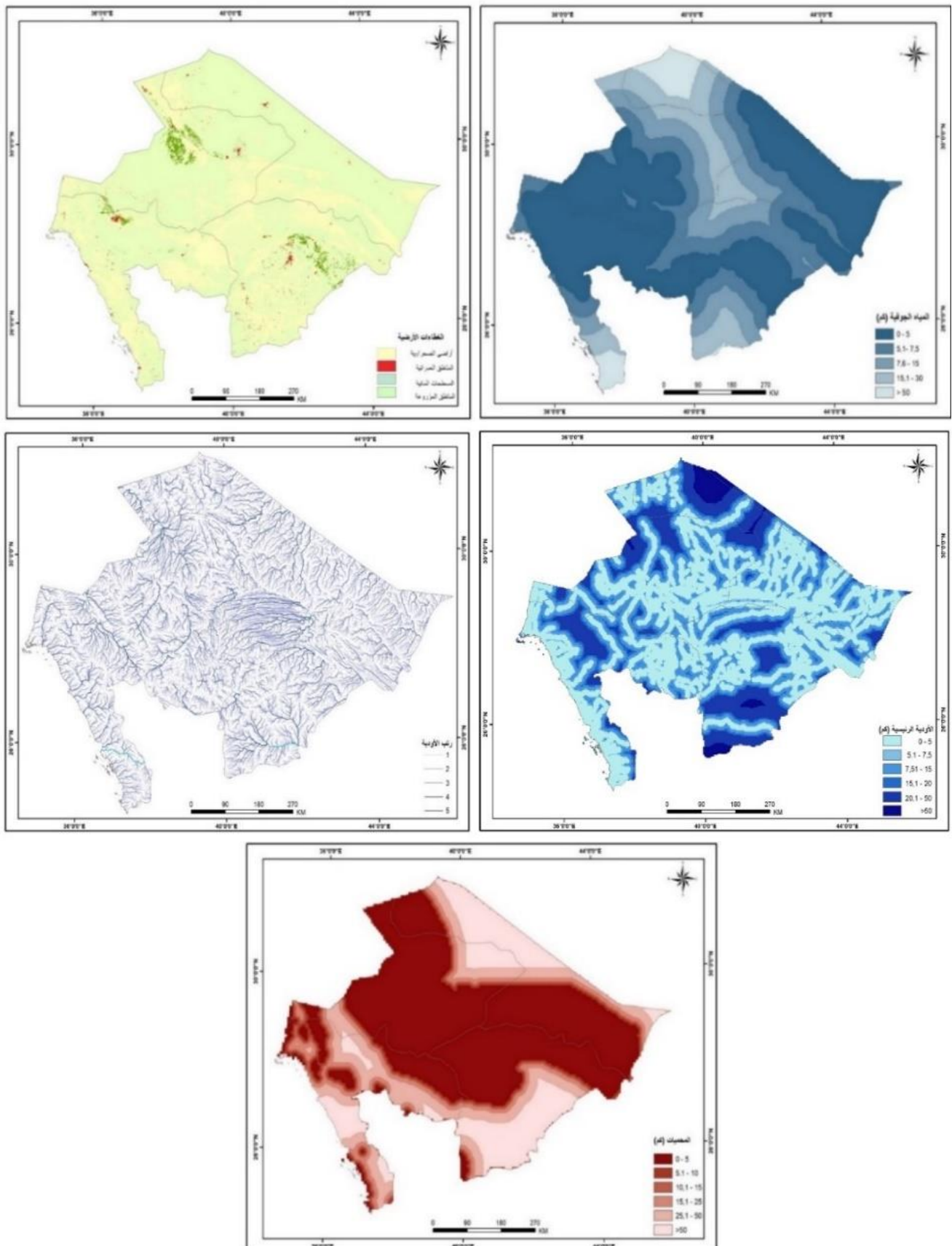
تقييم أسلوب القرار متعدد المعايير في اختيار المواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمع..... أ. سلوى المطرفي & د. عبير سلمان
التلوث البيئي، مما يؤثر سلبيًا على الحياة البرية المحيطة فيها، وعند دراسة (Baban, et al., 2001) يفضل
تركيب توربينات الرياح ألا تكون في حدود ١٠٠٠ م^٢ عن المحميات حتى لا يكون هناك لها تأثير على
القيمة البيئية لهذه المناطق.

○ المياه السطحية (Ground Water):

تعد المياه السطحية من أهم المؤشرات البيئية المؤثرة في اختيار الموقع لمحطات الطاقة، حيث
تتطلب محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح توفير مصدر مستدام للمياه، بحيث يمكن الاعتماد عليه
أثناء مرحلة الإنشاء والتشغيل، وقد تعتمد محطات الطاقة في منطقة الدراسة على المياه الجوفية في
المناطق النائية لتوصيل المياه للمحطة.

○ الغطاء الأرضي (Landcover):

تؤدي بيانات الغطاء الأرضي دورًا حاسمًا في تحديد مواقع وتخطيط محطات الطاقة الشمسية
وطاقة الرياح. وتوفر نظم المعلومات الجغرافية (GIS) أدوات لتحليل بيانات الغطاء الأرضي ودمجها في
عملية صنع القرار. وتكمن أهمية الغطاء الأرضي لمنطقة الدراسة في تحديد المناطق الملائمة لبناء
محطات الطاقة؛ خاصة المساحات الخالية من التضاريس الصعبة أو الغابات الكثيفة التي قد تعيق
تركيب معدات الطاقة، وكذلك تحديد المساحات التي تكون فيها أكثر عرضة للإشعاع الشمسي والرياح
الأكثر قوة واستمرارية، مثل: المناطق السهلية أو المناطق ذات التضاريس المنخفضة؛ كونها أكثر
ملاءمة لتوليد الطاقة الشمسية وسرعة الرياح بشكل فعال. وعليه، يتم النظر إلى المناطق البعيدة من
المدن المأهولة بالسكان والمطارات التي تزيد عن ٢٠ كم^٢ أكثر ملاءمة (Yousefi, 2018)، وأما تركيب
الألواح الشمسية، فقد أوصت بعض الدراسات على أن المناطق الملائمة للمحطات تبعد بـ ٥٠ كم^٢ مثل
دراسة (Effat & El-Zeiny, 2022)، وإنشاء منطقة آمنة بمساحة ٢٠ كم^٢ لتوربينات الرياح و ٥٠ كم^٢
للألواح الشمسية حول المناطق العمرانية لتجنب الإخلال بالبيئة الاجتماعية. كما في شكل (٤).



شكل (٤) معايير البيانات البيئية - المصدر: عمل الباحثين

في السياق ذاته، في الدراسات الأدبية بعضها يفضل تحديد مواقع مشروعات الطاقة الشمسية الأقرب إلى المناطق ذات الطلب العالي للكهرباء مثل: المدن والقرى؛ تكون مرغوبة أكثر، لأنها تقلل من المسافة التي يجب أن تقطعها الكهرباء، بحيث تقلل من فقدان الخطوط المرتبطة بها ونفقات النقل (Janke, 2010)، في حين قد يُشكل ذلك عائقاً أمام التنمية الحضرية في المستقبل (Effat, 2013). وقد تتجه إقامة تلك المحطات في الأراضي الصحراوية غير المأهولة ورخيصة الثمن. وعليه، تم استبعاد المناطق الزراعية ومناطق الغابات والمناطق الحضرية في هذه الدراسة. وبالنسبة للمياه الجوفية كانت المناطق الواقعة أقل من ٥ كم^٢ غير ملائمة لإقامة مشروعات الطاقة، وفي حين المواقع التي تبعد عن المياه الجوفية بمسافة تزيد عن ٥ كم^٢، فإنها تعدّ ملائمة مناسبة لتجنب التأثيرات السلبية على جودة وكمية المياه.

كذلك جاءت المناطق الوسطى وأجزاء من المناطق الشمالية والجنوبية في المحميات ضمن نطاق المستبعدة بمسافة أقل من ٥ كم^٢؛ وذلك، لامتداد محمية الأمير تركي بن عبد الله الملكية، ومحمية الملك سلمان بن عبد العزيز الملكية، واحتلت محمية الملك سلمان أكبر مساحة للمحميات بمساحة تصل إلى ١٣٠٧٠٠ كم^٢ حيث تضم ضمن مساحتها ثلاث محميات سابقة، وهي: الخنفة، والطبيق، وحرّة الحرّة. والمواقع الملائمة تقع بمسافة تزيد عن ٥ كم^٢.

٤. المعايير الاقتصادية (Economical Criteria's):

○ الطرق الرئيسية (Roads):

يُمثل القرب من شبكة الطرق الرئيسية أمراً ضرورياً في تحديد أنسب المواقع لإنشاء المحطات الشمسية والرياح؛ ويرجع ذلك إلى دورها في تسهيل نقل المواد المطلوبة لإنشاء المحطة، بالإضافة إلى إمكانية الوصول إلى إجراء عمليات الصيانة الدورية للمحطة، وعليه، فإن الاعتماد على هذا العامل كأحد المعايير المؤثرة في اختيار المواقع المثلى؛ له دور بارز في تقليل تكاليف النقل والتشغيل، فقد تعد المناطق البعيدة عن الطرق وشبكات الكهرباء وكذلك مناطق البناء؛ بأنها ليست مجدية اقتصادياً وغير مناسبة. وعند (Al Garni, et al., 2017) نجده أكد على أهمية تركيب الألواح الشمسية بالقرب من الطرق الرئيسية؛ كونه معيار مهم يؤثر على متابعة الأجهزة. فقد استخدم للمسافات التصنيف (Reclassify).

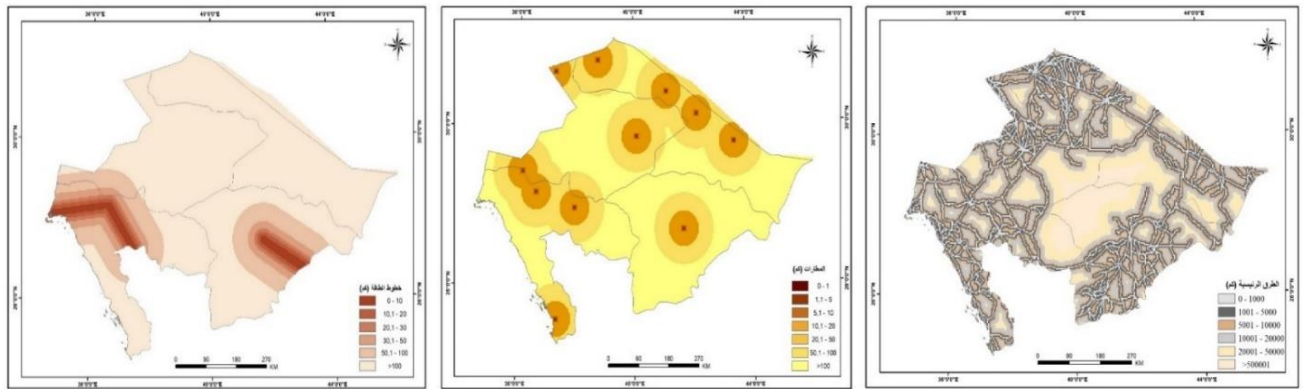
○ المطارات (AirPort):

تحدد المناطق الأكثر ملائمة عند إنشاء موقع المحطة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح بالبعد عن المطارات؛ كونها قد تزيد من الحوادث للطائرات؛ ولذا يفضل توجيه محطات الطاقة بعيداً عن المطارات؛

لتجنب التداخل مع حركة الطيران الملاحية. وقد تؤثر توربينات الرياح خاصة على المجال الجوي بحيث قد تنشأ منها انعكاسات رادارية قد تؤثر على أنظمة الرادار المستخدمة لمراقبة الحركة الجوية، ومراقبة الطقس، والمراقبة العسكرية (Rehman, et al., 2020)؛ مما قد يؤدي إلى تعطيل إشارات الرادار.

○ خطوط الطاقة (Power Network):

يُعدُّ القرب من شبكة الطاقة الموحدة أحد العوامل المؤثرة في بناء محطات الطاقة؛ لما ينتج عنه من انخفاض تكلفة إنشاء محطة الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، وكذلك يقلل من نسبة الفقد الكهربائي للطاقة المنقولة من محطات الطاقة إلى مراكز الاستهلاك، وتعزيز استقرار الشبكة وموثوقيتها من خلال تنوع إمدادات الطاقة، ودمج الطاقة المتجددة في البنية التحتية للشبكة الحالية. كما في شكل (٥).



شكل (٥) معايير البيانات الاقتصادية - المصدر: عمل الباحثين

تُعدُّ الطرق الرئيسية وشبكة خطوط الطاقة والمناطق العمرانية عاملاً إيجابياً يلعب دوراً حيوياً في استدامة مرافق الطاقة الشمسية وطاقة الرياح؛ بحيث يرتبط القرب من خطوط الطاقة الكهربائية بشكل مباشر بتكاليف نقل وتوزيع الطاقة الناتجة؛ وعليه، فإنه كلما كانت المسافة إلى خطوط الطاقة أقصر، انخفضت تكلفة التوصيل وفقدان الطاقة عن المحطة (Ari & Gencer, 2020). كما يعد قرب التغذية الكهربائية عاملاً اقتصادياً، فهو يقلل من تكلفة التركيب وإنشاء بنية تحتية جديدة، بالإضافة إلى أن الاتصال بالشبكة أرخص.

■ المرحلة الرابعة: تحديد المواقع المثلى بالملاءمة المكانية:

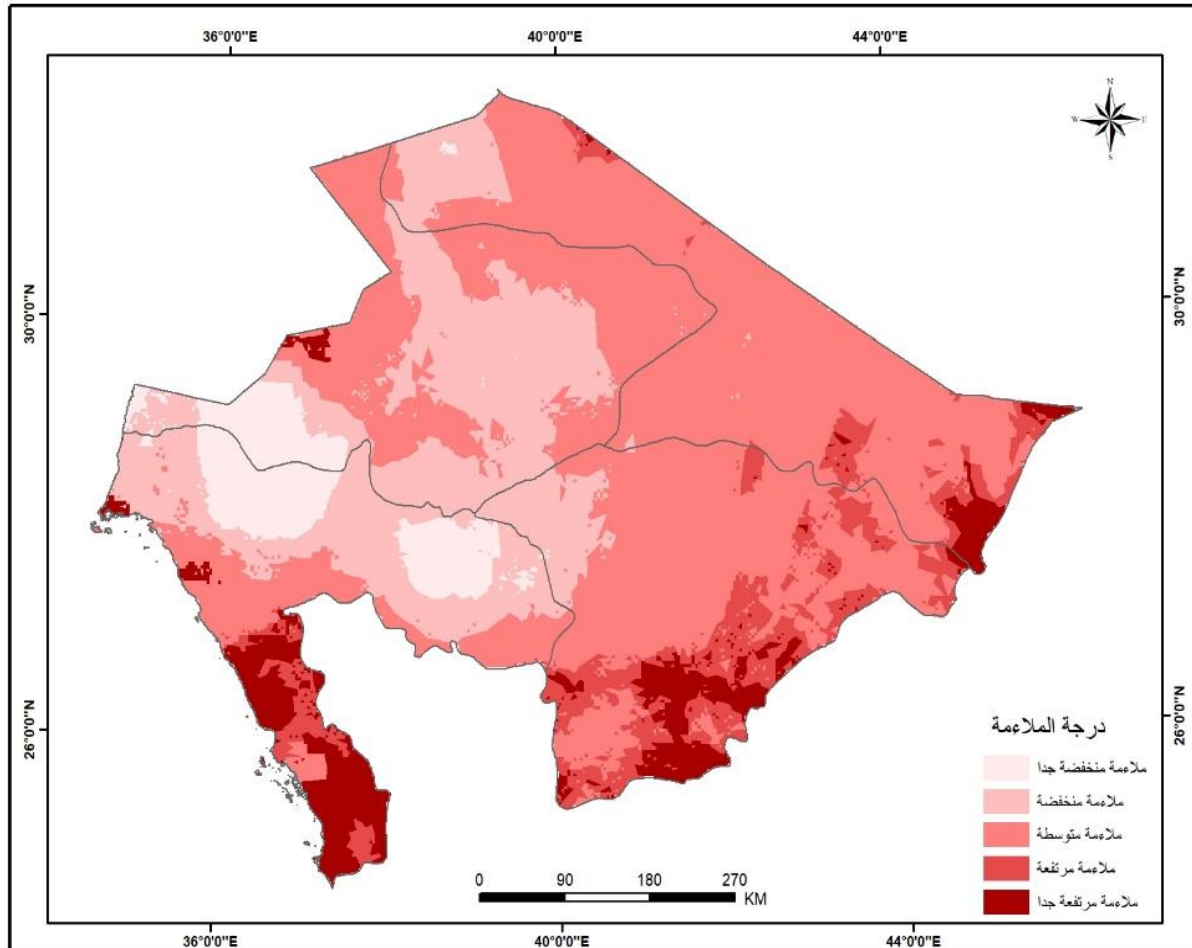
استخدمت الدراسة لتجميع ما سبق من عمليات التصنيف أداة (Weighted Sum) "المجموع المرجح الموزون" على برنامج (ArcGIS) والتي تتيح أكبر قدرًا من التوجيه لعمليات الجمع؛ وذلك عن طريق تعيين أوزان نسبية لكل طبقة تعبر عن مدى أهميتها في اختيار الموقع الأمثل، وإنشاء الخريطة

تقييم أسلوب القرار متعدد المعايير في اختيار المواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمع..... أ. سلوى المطرفي & د. عبير سلمان المجمع عن طريق ضرب جميع الخرائط الثنائية بتراكب عديد من البيانات النقطية، وضرب كل منها بوزنها المحدد وجمعها معًا؛ وذلك تمهيدًا لاستخراج المناطق ذات الملاءمة المكانية بالتحليل الهرمي (AHP) الموزونة المجمع؛ وذلك بتحويل هذه الخرائط إلى خرائط ثنائية ممثلة بقيمتين، وهي قيمة صفر للمناطق المقيدة، وقيمة واحد للمناطق المناسبة القابلة للتطوير.

التحليل والمناقشة:

- النتائج:

أظهرت نتائج الدراسة عن تقييم المواقع المثلى لإقامة مشروعات طاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمع كما يلي في شكل (٦)، وإجمالي المساحات الملاءمة لإقامة مشروعات الطاقة الشمسية والرياح المجمع للمنطقة الشمالية كما في جدول (٩).



شكل (٦) الملاءمة المكانية بطريقة التحليل الهرمي للمواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمع للمنطقة الشمالية - المصدر: عمل الباحثين اعتمادًا على نتائج المقارنة الثنائية للتحليل الهرمي (AHP)

جدول (٩) إجمالي المساحات الملائمة لإقامة مشروعات الطاقة الشمسية والرياح الممجة للمناطق الشمالية

المنطقة	درجة الملائمة المكانية				
	مرتفعة جدًا	مرتفعة	متوسطة	منخفضة	منخفضة جدًا
الحدود الشمالية	١٢٩٠	٩٢١٥	٨٥٢٠١	٨٠٩١	٢٠٤
الجوف	٨٩٥	٢٤٥	٣٦٨١٧	٣٨٢٠٣	٨٨٤٢
حائل	٢٣٧٧	٣٦٥٥٤	٧٠٩٠٠	١٠١١١	٦٥
تبوك	١٩٩٦٨	١٣٤٢٨	٢٧٤٤٢	٤٢٨٩٩	٣٢٢٦٥
المجموع	٢٤٥٣٠	٥٩٤٤٢	٢٢٠٣٦٠	٩٩٣٠٤	٤١٣٧٦

المصدر: عمل الباحثين اعتمادًا على نتائج المقارنة الثنائية للتحليل الهرمي (AHP) للمنطقة الشمالية.

من الملاحظ من جدول (٩) وشكل (٦) ظهور المناطق التي حققت غالبية المعايير المحددة

لاختيار مشروعات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح الممجة في المنطقة الشمالية؛ كما يلي:

- حازت منطقة تبوك على غالبية درجة الملاءمة المرتفعة جدًا بمساحة تصل إلى ١٩٩٦٨ كم^٢، فقد أظهرت تفوقها في توفر غالبية المعايير للمواقع المثلى الممجة؛ وشملت المناطق الجنوبية الغربية لمنطقة تبوك باتجاه الوجه، وأملج، وأقصى الشمال الغربي عند نيوم، تليها المنطقة الجنوبية من منطقة حائل بمساحة ٢٣٧٧ كم^٢ والمنطقة الجنوبية للحدود الشمالية بمساحة ١٢٩٠ كم^٢.
- شغلت المناطق الواقعة في منطقة الجوف أقل درجة في فئة الملاءمة المرتفعة جدًا بمساحة تصل إلى ٨٩٥ كم^٢، ماعدا منطقة طبرجل في أقصى الشمال على الحدود الأردنية؛ ويرجع ذلك إلى أنها تعاني من حرمانها من شبكة خطوط الطاقة والطرق الرئيسية وامتداد المحميات، مما يؤثر سلبيًا على المنطقة؛ وهو ما يتفق مع دراسة (Rehman, et al. 2020) حيث جاءت منطقة الجوف بملاءمة منخفضة.
- نالت منطقة الحدود الشمالية أعلى درجة في فئة الملاءمة المكانية المتوسطة بمساحة تصل إلى ٨٥٢٠١ كم^٢، وقد يعود إلى امتداد أجزاء من صحراء الدهناء في الجنوب وحرمانها من امتداد خطوط الطاقة؛ كما شغلت فئة الملاءمة المتوسطة على مستوى المنطقة الشمالية أكبر فئة للمساحة في درجة الملاءمة المكانية بما يقدر مساحته ٢٢٠٣٦٠ كم^٢.
- تحددت المناطق ذات الملاءمة المنخفضة جدًا، والتي تمتلك الدرجة الأقل من درجات الملاءمة المكانية في منطقة حائل بمساحة منخفضة تصل إلى ٦٥ كم^٢ لامتداد المحميات الطبيعية وقربها

من المناطق الأكثر انحدارًا لمرتفعات أجا وسلمى؛ تليها منطقة الحدود الشمالية بمساحة تصل إلى ٢٠٤ كم^٢، وذلك لحرمانها من خطوط الطاقة والطرق وامتداد المحميات الطبيعية.

- حازت المساحة الملاءمة المرتفعة جدًّا نسبة حوالي ٥,٥١٪ والملاءمة المرتفعة ١٣,٣٪ لمنطقة الدراسة بمجموع ١٨,٨٪؛ في حين نالت الملاءمة المنخفضة نسبة حوالي ٢٢,٣٪ والملاءمة المنخفضة جدًّا ٩,٢٪ بمجموع ٣١,٥٪.

في السياق ذاته، تم تقدير المساحة الملاءمة والمساحة غير الملاءمة للمعايير المستخدمة لاختيار المواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمع في المنطقة الشمالية، فلقد جاءت كما في جدول (١٠).

جدول (١٠) المساحة الملاءمة والمساحة غير الملاءمة للمعايير المستخدمة في المنطقة الشمالية

المعيار	المساحة الملاءمة (كم ^٢)	النسبة % للمساحة الملاءمة	المساحة غير الملاءمة (كم ^٢)	النسبة % للمساحة غير الملاءمة
أقصى الإشعاع الشمسي	٩٢٥٤٦٨,٣	١٦,٤	٣٥٨١٠٧,٦	٨
الإشعاع الأفقي الكلي	٢٤٩٦٧٢,٨	٤,٤	٣٠٣٨٨١,١	٦,٨
سرعة الرياح	٦٨٠٣٣٥,٩	١٢	٣٨١٤٢٠,٤	٨,٥
كثافة الرياح	٨١٦٣٩٥,٧	١٤,٥	٣٦٧٩١٤,٢	٨,٢
درجة الحرارة	١٥٦٨٥٢,٣	٣,٧	١٢٩٤١١,٥	٢,٨
المنسوب	٢٠٤٠٩٩,٣	٣,٦	٢٤٨٣٤٣,٧	٥,٥
درجة الانحدار	١٧٦٨٨٦	٣,١	٢٧٦٦٦٧,٩	٦,١٩
اتجاه الانحدار	٩٥٢٤٦٣,٤	١٦,٩	٣٥٨٣٠٧,٦	٨,٠٢
القرب من الطرق الرئيسية	٨٨٩٧٥	١,٥	٣٦٧٣٧٨,٧	٨,٢٣
القرب من خطوط الطاقة	١٨١٤٢,١	٠,٣	٤٣٥٤١١,٨	٩,٧٥
البعد عن المناطق العمرانية	٥٩١٨٦,٤	١,٠٥	٢٥٦٤٤٩,٨	٥,٧٤
البعد عن المطارات	٢٣١٣١٢,٥٤	٤,١	٢٢٢٢٤١,٤	٤,٩٧
البعد عن المياه السطحية	٤٠٣٦٦٣	٧,١	٤٩٨٩٠,٩	١,١١
البعد عن المياه الجوفية	٢٣٥٨٤٨,٠٨	٤,١	٢١٧٧٠٥,٩	٤,٨
البعد عن المحميات والمواقع التاريخية	١٢٦٩٩٥	٢,٢	٣٢٦٥٥٨,٨	٧,٣
الغطاء الأرضي	٢٩٠٢٧٤,٥	٥	١٦٣٢٧٩,٤	٣,٦٥
المجموع	٥٦١٦٥٧٠,٣٢	١٠٠	٤٤٦٢٩٧٠,٧	١٠٠

المصدر: عمل الباحثين اعتمادًا على نتائج المقارنة الثنائية للتحليل الهرمي (AHP) للمنطقة الشمالية.

- حققت المعايير المناخية مساحة ملاءمة مرتفعة، فبلغت مساحة الملاءمة المكانية لأقصى الإشعاع الشمسي ٩٢٥٤٦٨,٣ كم^٢، بينما بلغ الإشعاع الأفقي الكلي ٢٤٩٦٧٢,٨ كم^٢، في حين بلغت مساحة الملاءمة لسرعة الرياح ٦٨٠٣٣٥,٩ كم^٢ ومساحة الملاءمة لكثافة الرياح ٨١٦٣٩٥,٧ كم^٢.

وذلك يدلُّ على أن المنطقة الشمالية لديها مساحات واسعة ذات إمكانات عالية من الإشعاع الشمسي، وكثافة سرعة الرياح.

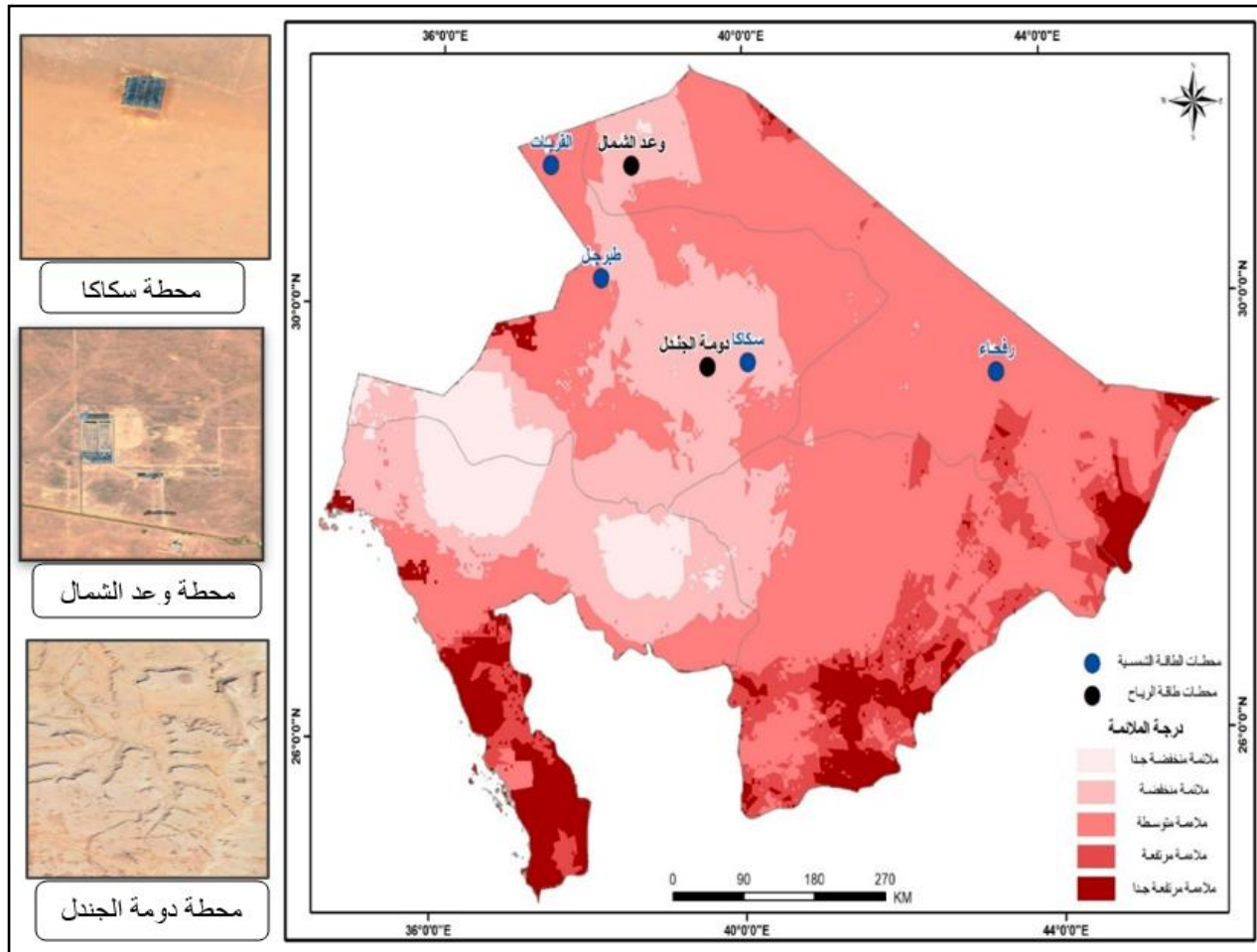
- سجلت النسبة المئوية للمساحة الملاءمة ما يقرب من ٢٠,٨٪ و ٢٦,٥٪ لمعايير الإشعاع الشمسي والرياح على التوالي. وكقاعدة عامة، كلما زادت الموارد المتاحة من الإشعاع الشمسي والرياح، زادت الطاقة الكهربائية المولدة، والتي تتفق مع نتائج دراسة (طلبة، ٢٠٠١)، حيث تتمتع منطقة مدينة تبوك بمعدل سنوي عالٍ للسطوع الشمسي؛ ليصل المعدل السنوي (٨,٩) ساعة يوميًا.
- المعيار الأكثر تأثيرًا هو قلة امتداد خطوط الطاقة وامتداد المحميات الطبيعية بمساحات واسعة. يليه معيار قلة امتداد الطرق الرئيسية في المناطق الوسطى لمنطقة الدراسة، وجاء كلٌّ من المعيارين: خطوط الطاقة، والطرق الرئيسية بمساحة ملاءمة منخفضة. حيث سجلت مساحة الملاءمة لخطوط الطاقة ١٨١٤٢,١ كم^٢ والطرق الرئيسية بمساحة ٨٨٩٧٥ كم^٢.
- جاءت شبكة خطوط الطاقة بنسبة منخفضة تصل إلى ٠,٣٪ بنطاق يبلغ ٥ كم^٢؛ بحكم حرمان المنطقة منها ما عدا الجنوب بمنطقة حائل، والأجزاء الشمالية الغربية من منطقة تبوك. والطرق الرئيسية بنسبة منخفضة ١,٥٪ بنطاق يبلغ ٥ كم^٢ للألواح الشمسية، مع أن المنطقة الشمالية تعتبر لديها شبكة طرق ملاءمة ما عدا المنطقة الوسطى لامتداد المحميات الطبيعية.
- سجل معيار البعد عن المحميات الطبيعية والمواقع التاريخية مساحة ملاءمة منخفضة بنحو ١٢٦٩٩٥ كم^٢ على نطاق امتداده لا يقل عن ٥ كم^٢، وذلك لامتداد ثلاث محميات طبيعية: (محمية الأمير تركي بن عبد الله الملكية، ومحمية الملك سلمان بن عبد العزيز الملكية، ومحمية الأمير محمد بن سلمان الملكية).
- حقق معيار البعد عن المناطق العمرانية مساحة ملاءمة ٥٩١٨٦,٤ كم^٢، وبنسبة منخفضة تصل إلى ١,٥٪ بنطاق محصور ما بين ٢٠ - ٥ كم^٢، وبلغت مساحة الملاءمة منخفضة لمعيار المطارات بنحو ٢٣١٣١٢,٥ كم^٢، وعلى نطاق لا يقل امتداده عن ٢ كم^٢.
- سجل معيار البعد عن المياه السطحية والمياه الجوفية مساحة منخفضة، بمساحة تصل إلى ٤٠٣٦٦٣ كم^٢ للمياه السطحية، و ٢٣٥٨٤٨,٠٨ كم^٢ للمياه الجوفية، وبنطاق امتداده لا يقل عن ٥ كم^٢.
- حققت المناطق التي نالت درجة ملاءمة مرتفعة جدًا، بلغت متوسط سرعة الرياح السنوية ٧,٥-٨ م/ث وأقصى الإشعاع الشمسي ما يزيد عن ٦,٥ كيلو واط/م^٢ ساعة والإشعاع الشمسي الكلي ما يزيد

تقييم أسلوب القرار متعدد المعايير في اختيار المواقع المثلى للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمع..... أ. سلوى المطرفي & د. عبير سلمان

عن ١٠٠ واط/م^٢ سنة؛ وهذا يدل على مدى ملائمة المنطقة المحددة لتطوير محطات الألواح الشمسية ومزارع الرياح المجمع.

والجدير بالذكر، أن ما يجعل الموقع من أهم العوامل المؤثرة في توطن محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح؛ ارتباطه بكمية الإشعاع الشمسي وسرعة الرياح، وبالتالي يؤثر على حجم الطاقة المتوقع إنتاجها منه، ويمكن القول: إن موقع المنطقة الشمالية المميز في النطاق المداري الجاف الذي يتقاطع مع مدار السرطان، أضفى لها قيمة؛ كونها تتلقى أعلى نصيباً من الإشعاع الشمسي؛ وخاصة، في شهري يونيو ويوليو من فصل الصيف، وكلما ابتعدنا عن المنطقة المدارية شمالاً، قلت كمية الإشعاع الشمسي تدريجياً.

- العلاقة بين المواقع الحالية والمواقع المثلى المقترحة على مستوى المنطقة الشمالية:



شكل (٧) مواقع محطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح القائمة والمواقع المحتملة للمنطقة الشمالية - المصدر: عمل الباحثين اعتماداً على نتائج المقارنة الثنائية للتحليل الهرمي (AHP)

توصلت نتائج شكل (٧) عن مواقع محطات طاقة الشمسية وطاقة الرياح القائمة والمواقع المحتملة للمنطقة الشمالية؛ إلى ما يلي:

- بلغت المساحة الملائمة للمواقع المحتملة للطاقة الشمسية وطاقة الرياح المجمعة للمنطقة الشمالية حوالي (٣٠٤٣٣٢ كم^٢) بالملاءمة المرتفعة جدًا والمرتفعة والمتوسطة؛ واحتلت أفضل هذه المواقع ملاءمة في رفحاء في جنوب الحدود الشمالية، والحائط، والسليمي أقصى جنوب حائل، وأملج في الجزء الجنوبي الغربي من تبوك، والوجه على الساحل الغربي وأقصى الشمال الغربي في نيوم، بينما تكاد تنعدم المواقع الملائمة في منطقة الجوف ماعدا طبرجل في أقصى الشمال الغربي، ويرجع ذلك إلى الامتداد الكبير للمحميات الطبيعية، وعدد من المواقع التاريخية وحرمانها من خطوط الطاقة.
- جاءت محطة رفحاء وطبرجل والقريات في نطاق الملاءمة المكانية المتوسطة، وحصولها على غالبية المعايير الرئيسية في اختيار مشروعات الطاقة، وتوفر إمكانات عالية لموارد الإشعاع الشمسي وسرعات الرياح المناسبة.
- ظهرت محطة وعد الشمال، وسكاكا، ودومة الجندل في نطاق الملاءمة المكانية المنخفضة؛ وذلك كونها تعاني من قلة خطوط الطاقة، والطرق الرئيسية، وامتداد المحميات الطبيعية.
- تتمتع محطة طبرجل للطاقة الكهروضوئية بخاصية الألواح الشمسية ثنائية الوجه، وهي أحدث التقنيات من حيث تلقى الإشعاع الشمسي على كل من الجزء الأمامي والخلفي من الألواح، وبالتالي زيادة كفاءة توليد الطاقة (JinkoPower, 2023)، والواقعة شمال شرق طبرجل بمسافة ١٧ كم^٢، وبقدرة إنتاجية تصل ٤٠٠ ميغاواط.
- محطة دومة الجندل بمنطقة الجوف تعتبر أول محطة رياح في المملكة العربية السعودية والأكبر من نوعها، فهي تمتد بمساحة ١٠٠ كم^٢ وتتكون من ٩٩ توربين؛ وكل توربين ينتج ٤,٣ ميغاواط، وإنتاجية تصل إلى ١٦٢٠٠٠٠ ميغاواط سنوياً، ومعدل سرعة الرياح تصل لـ ٧,٩ م/ث سنوياً؛ تم بناؤها على أرض مرتفعة من الحجر الرملي المتماسك والتي تعود إلى رمل السليكا؛ ويمكن القول: إن حرمت تلك المحطتين (دومة الجندل، وسكاكا) من بعض المعايير؛ إلا أننا نجد أنها تفوقت بمعايير عالمية الخاصة بهندسة الهواء وإشعاع شمسي ملائم بحسب البرنامج الوطني للطاقة المتجددة (NREP, 2023).
- أقيمت محطة سكاكا على أرض مستوية مكونة من الأحجار الرملية الصلبة وقليلة الانحدار وتمتاز بمستوى كافٍ من الإشعاع الشمسي، ويبلغ عدد الألواح الشمسية أكثر من ١,٢ مليون لوحة شمسية

وإنتاجية تصل لـ ٣٠٠ ميغاواط/ساعة، وذلك الإنتاج من شروق الشمس للغروب، وليست لديها خاصية تخزين الطاقة.

في هذا السياق، توافقت تلك النتائج مع دراسة (Al-Shammari et al., 2021) التي أكدت تفوق مدينة تبوك على أفضل موقع من بين الـ ١٧ مدينة من حيث الأشعة الكهروضوئية؛ ودراسة (Al Mutlaq, 2022) على أفضلية منطقة حائل والجوف وتبوك من ضمن مدن المملكة العربية السعودية وفقاً لجودة كمية الأشعة الكهروضوئية الساقطة والمساحة؛ والتي حظيت بها بمساحة إجمالية حوالي (٢٠٢,٥٣٤) كم^٢، ودراسة (المطيري والمطلق، ٢٠٢٣) تفوق منطقة الجوف والحدود الشمالية، وتبوك كمناطق واعدة لطاقة الرياح.

ويمكن القول: إن هذه النتائج جاءت لتؤكد أهمية الاستفادة من المساحات غير المستغلة في محطات توربينات الرياح بألواح شمسية؛ وذلك بحكم أن طاقة الرياح تحتاج خمس مساحات الأراضي لتوليد نفس الطاقة التي تولدها الألواح الشمسية (العربي، ٢٠١٨)؛ وأن زيادة القدرة الإنتاجية لتوربين الرياح اليومي من الكهرباء في مناطق كفاءة الرياح العالية يتراوح من ١٢ إلى ٢٠ ساعة خلال اليوم، وهو يمثل تقريباً ٢,٥ ضعف إنتاجية الألواح الشمسية، فإنتاج التوربين الرياح بقدرة ١ ك/واط ينتج كهرباء فعلية تعادل خرج ٢,٥ ك/واط للألواح الشمسية؛ مما يؤكد ارتفاع سعر الواط في توربينات الرياح بنفس النسبة تقريباً عن نظيره في الألواح الشمسية (العربي، ٢٠١٨).

الخاتمة:

إن التنوع في استخدام مصادر الطاقة المتجددة كطاقة مجمعة تنشأ عنه ميزات جديدة، وتحسين للإنتاجية بطاقة مستقرة؛ يُحفز على القضاء على مشكلات سابقة، ويعزز من التوسع في تطوير مشروعات الطاقة المتجددة والاستثمار فيها، وعلى تشجيع استخدام أحدث التقنيات الجيومكانية، وأشمل معايير في اختيار المواقع الملائمة؛ وفي هذه الدراسة، تم تطوير نموذج أسلوب القرار متعدد المعايير في اختيار المواقع المثلى للطاقة الشمسية، وطاقة الرياح المجمع لشمال المملكة العربية السعودية. باستخدام نظم المعلومات الجغرافية وطريقة التحليل الهرمي (AHP) في تقييم المواقع وتحري مدى دقة النتائج مع المواقع الحالية، وتقييمها بالمعايير المتعددة في عملية الاختيار للكشف عن المواقع الواعدة التي تدعم تقليل تكلفة استهلاك الطاقة على المدى الطويل؛ وتمكين نمو اقتصادي قوي ليحدد مساراً فعالاً من حيث التكلفة والإمدادات، والإنتاجية الاقتصادية.

➤ أبرز النتائج:

- حازت منطقة تبوك على غالبية درجة الملاءمة المرتفعة جدًا بمساحة تصل إلى ١٩٩٦٨ كم^٢، فقد أظهرت تفوقها في توفر غالبية المعايير للمواقع المثلى المجمعة؛ وشملت المناطق الجنوبية الغربية لمنطقة تبوك باتجاه الوجه وأملج وأقصى الشمال الغربي عند نيوم؛ وهو ما يتفق مع دراسة (Rehman, et al. 2020) حيث نالت الوجه على ساحل البحر الأحمر ملاءمة مرتفعة، تليها المنطقة الجنوبية من منطقة حائل بمساحة ٢٣٧٧ كم^٢ والمنطقة الجنوبية للحدود الشمالية بمساحة ١٢٩٠ كم^٢.
- شغلت المناطق الواقعة في منطقة الجوف أقل درجة في فئة الملاءمة المرتفعة جدًا بمساحة تصل إلى ٨٩٥ كم^٢، ماعدا منطقة طبرجل في أقصى الشمال على الحدود الأردنية؛ ويرجع ذلك إلى حرمانها من شبكة خطوط الطاقة مما يؤثر سلبًا؛ لاعتبار أن لديها مساحات واسعة ذات إمكانات عالية من الإشعاع الشمسي وكثافة سرعة الرياح، كما عند دراسة (Rehman, et al. 2020a) حيث جاءت بملاءمة منخفضة.
- نالت منطقة الحدود الشمالية أعلى درجة في فئة الملاءمة المكانية المتوسطة بمساحة تصل إلى ٨٥٢٠١ كم^٢، وقد يعود ذلك إلى امتداد أجزاء من صحراء الدهناء في الجنوب وحرمانها من امتداد خطوط الطاقة؛ كما شغلت فئة الملاءمة المتوسطة أكبر فئة للمساحة في درجة الملاءمة المكانية بما يقدر مساحته ٢٢٠٣٦٠ كم^٢.
- تحددت المناطق ذات الملاءمة المنخفضة جدًا والتي تمتلك الدرجة الأقل من درجات الملاءمة المكانية في منطقة حائل بمساحة منخفضة تصل إلى ٦٥ كم^٢ لامتداد المحميات الطبيعية وقربها من المناطق الأكثر انحدارًا لمرتفعات أجا وسلمى؛ تليها منطقة الحدود الشمالية بمساحة تصل إلى ٢٠٤ كم^٢، وذلك لحرمانها من خطوط الطاقة والطرق وامتداد المحميات الطبيعية.
- أهمية دمج طاقتين من مصادر الطاقة المتجددة بشكل منتظم، مما يتيح الحد من فقد الطاقة، مقارنة بتوحيد مصدر الطاقة الذي يصعب نمذجته.
- تعدُّ المعايير المناخية هي من أبرز العوامل الأكثر تأثيرًا في اختيار مواقع مشروعات الطاقة المتجددة وبالأخص عامل شدة الإشعاع الشمسي وسرعة الرياح.
- أظهرت غالبية الدراسات تأثير حساسية درجة الحرارة على أنظمة الطاقة الشمسية؛ تليه أهمية الانحدار وخطوط الطاقة؛ وذلك بسبب تأثيره المباشر على إنتاجية الطاقة وتقليل التكلفة الفنية.

- تفعيل دور الطاقة المجمع في تحليل مخاطر الإنتاج مع تغييرات في توليد الطاقة بسبب الأحوال الجوية واستغلالها لتحقيق كفاءة طاقة أعلى.
- أثبتت معظم الدراسات الأدبية المتاحة أن الأنظمة المجمع تخفف بشكل كبير من مشكلات انقطاع الطاقة، وتعزز استقرار الشبكة، وأنها أكثر فاعلية من حيث التكلفة بسبب البنية التحتية المشتركة.
- دور أسلوب القرار متعدد المعايير (MCDA) في حل المشكلات المعقدة؛ ودقة التحليل الهرمي لمتخذي القرار في تحديد المواقع المثلى المتجددة المجمع.

➤ المقترحات للدراسات المستقبلية:

- بناء على هذه النتائج، فإن الدراسة توصي بالآتي:
- أن التنوع بالمصادر يُولد نتائج متعددة تقضي على المشكلات الموجودة اليوم. كذلك التنوع في التقنيات المتقدمة لتحسين كفاءة محطات توليد الطاقة المتجددة باستخدام الذكاء الاصطناعي الجغرافي (Geo AI) في بناء نماذج المحاكاة المكانية الزمنية والنماذج الرياضية كتحليلات الغابة العشوائية، والتحليلات التنبؤية بما يسهم في الكشف عن مواقع ملائمة جديدة.
- الحث على التنوع في استخدام أساليب التحليل الإحصائية في اتخاذ القرار متعدد المعايير مع برمجيات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد.
- بناء نموذج تفاعلي لمصادر الطاقة المتجددة جيو مكاني بتقنيات حديثة عن المملكة العربية السعودية لمواجهة تحديات استدامة الطاقة وتنويع الاستفادة من مصادر الطاقة المجمع.

قائمة المراجع:

○ المراجع العربية:

- أحمد، وسن شهاب؛ وهادي، أزهار سلمان (٢٠١٥): اختيار أفضل موقع لاستغلال طاقة الرياح في العراق باعتماد نظم المعلومات الجغرافية، مجلة الآداب، ٢(١١١)، ٣٩٣-٤١٤.
- الحربي، سعود حمود؛ والحسن، عبد الرحمن محمد (٢٠١٨): المواقع الملائمة لإنتاج طاقة الرياح في المملكة العربية السعودية، المجلة الجغرافية الخليجية، (١٠)، ٢٥٤-٣٠٨.
- الدليمي، يونس هندي عليوي؛ وحسين، عادل رشيد (٢٠١٩): إمكانية توليد الطاقة الكهربائية من الشمس والرياح في محطات مدن الأنبار لتحقيق التنمية المستدامة، مجلة مداد الآداب، (١٦)، ٦٧٩-٦٩٩.

- الديب، محمد محمود إبراهيم (١٩٩٣): الطاقة في مصر، دراسة تحليلية في اقتصاديات المكان، مكتبة الأنجلو، ١٢-٨٦١.
- الرويثي، محمد أحمد (٢٠٠٠): الشخصية الجغرافية للمملكة العربية السعودية، (٤)، دار الواحة العربية.
- الزعبي، سلام محمد (٢٠٢٠): تحديد أفضل المواقع لتوليد الطاقة الشمسية في محافظة البلقاء باستخدام نظم المعلومات الجغرافية. رسالة ماجستير غير منشورة، جامعة مؤتة.
- الشريف، عبد الرحمن صادق (٢٠٠٩): جغرافية المملكة العربية السعودية دراسة في الجغرافيا البشرية، (١)، دار المريخ للنشر، الرياض، ٣٣٦.
- الشمري، صالح عبد المحسن (٢٠٢٢): معايرة كفاءة نموذج Hargreaves-Samani في تقدير المتوسط اليومي لإجمالي الإشعاع الشمسي باستخدام مخرجات نموذج (CSR) ببعض مناطق المملكة العربية السعودية، مجلة الشرق الأوسط للنشر العلمي، ٥ (٢)، ٢٤٣-٢٦٢.
- الصوري، السيد علي أحمد (٢٠٢٠): تكنولوجيا الطاقة الشمسية، المجلة العلمية للدراسات التجارية والبيئية، جامعة قناة السويس، كلية التجارة بالإسماعلية، ١١ (٤).
- الفناطسة، عبد الحميد أيوب (٢٠١٨): توظيف التحليل المكاني المتعدد في برامج نظم المعلومات الجغرافية لتحديد الموقع الأمثل لحديقة جديدة في مدينة العقبة، مجلة مركز البحوث الجغرافية الكارتوجرافية، جامعة المنوفية، (٢٦)، ٤٩ - ٨٨.
- المطيري، مطيرة خويتم (٢٠١٧): إمكانية استغلال طاقة الرياح في إنتاج الطاقة الكهربائية في منطقة الحدود الشمالية بالمملكة العربية السعودية "دراسة في المناخ التطبيقي"، دار المنظومة، ٢٦(١).
- المطيري، وفاء عبيد؛ والمطلق، فهد عبد العزيز (٢٠٢٣): الملاءمة المكانية بالاعتماد على أسلوب نموذج بولين (Model Boolean) لاختيار أفضل المواقع لمزارع طاقة الرياح، المجلة الجغرافية المصرية، ٥٤(١٨٠)، ١٧٦-١٩٠.
- الوليعي، عبد الله ناصر (٢٠٠٨): جيولوجية وجيومورفولوجية الجغرافيا الطبيعية للمملكة العربية السعودية - أشكال سطح الأرض، مكتبة الرشد، ط ٣ (٥٢٦).

- بخرجي، فوزية عمر (٢٠١٠): دراسة العلاقة بين الكتل الهوائية الشتوية والخصائص المناخية في شمال المملكة العربية السعودية، سلسلة بحوث جغرافية، الجمعية الجغرافية السعودية، ٤٧ (٩٢).

- بدوي، هشام داود (٢٠٢١): تحديد المواقع المثلى لحصاد طاقة الرياح في مصر اعتماداً على أسلوب المعايير المتعددة ونظم المعلومات الجغرافية، مجلة كلية الآداب، ١٣ (١)، ١٨٨-١٢١.

- دواد، جمعه محمد؛ والغامدي، خالد عبد الرحمن؛ ومندور، مسعد سلامة (٢٠١٧): تحديد أفضل المواقع لتجميع الطاقة الشمسية في منطقة مكة المكرمة الإدارية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير، الملتقى الوطني الحادي عشر لتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في المملكة العربية السعودية، جامعة الملك فيصل بن عبد الرحمن، الدمام.

- طلبة، شحاتة سيد أحمد (٢٠٠١): الطاقة الشمسية في المدينة المنورة إمكانياتها واستخداماتها، دراسة في المناخ التطبيقي، مجلة جامعة الملك عبد العزيز، العلوم التربوية، ١٣، ٤٤٦-٣٩١.

- عبد الخالق، شريف عبد السلام؛ وآل سرور، فوزية علي أحمد (٢٠١٩): التوزيع الأمثل لمواقع استغلال الطاقة الشمسية بمحافظة النعيرية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية، الجمعية الجغرافية التونسية، مجلة منشورات علوم جغرافية، (٨).

- محمود، ماجد كرم الدين (٢٠١٢): رياح التغيير في أنظمة الطاقة العالمية والعربية: الكهرباء من الرياح. المركز الإقليمي للطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة. ٩٧٧-٩٧٨.

- يوسف، كاميليا محمد (٢٠١٦): الطاقة الكهروشمسية، وزارة الكهرباء والطاقة المتجددة، دار الكتب والوثائق القومية.

○ المراجع الأجنبية:

- Al-Ajlan, S. A., Al-Ibrahim, A. M., Abdulkhaleq, M., & Alghamdi, F. (2006). *Developing Sustainable Energy Policies for Electrical Energy Conservation in Saudi Arabia. Energy Policy*, 34(13), 1556-1565.
- Abdelrazek, M. (2017). *A geographic information systems approach to finding suitable sites for installing renewable energy production units in the Sinai Peninsula. Egypt.*
- Al-braheem, L. & Alabdulkarim, L. (2021). *Geospatial Analysis of Solar Energy in Riyadh Using a GIS-AHP-Based Technique. ISPRS International Journal of Geo-Information*. 10(5), 291.

- Albraheem, L., & Al- Mutlaq, F. (2024). A Geographic Information System-Based Model and Analytic Hierarchy Process for Wind Farm Site Selection in the Red Sea. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*, 13(11), 416.
- Al dubyan, M. & Gasim, A. (2021). Energy price reform in Saudi Arabia: Modeling the economic and environmental impacts and understanding the demand response. *Energy Policy*, 148(B), <https://www.sciencedirect.com>.
- Al Garni, H.Z. & Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied Energy*, Elsevier, 206(15), 1225-1240.
- Ali Raza, M. Yousif, M. Hassan, M. Numan, M. Kazmi, S, A. (2023). Site suitability for solar and wind energy in developing countries using combination of GIS-AHP; a case study of Pakistan. *Renewable Energy*, 206, 180-191, <https://doi.org/10.1016/j.renene>.
- Ali, S., Taweekun, J., Techato, K., Waewsak, J., Gyawali, S. (2019). GIS based site suitability assessment for wind and solar farms in Songkhla, Thailand. *Renewable Energy*, 132, 1360-1372.
- Alkhelaif, J, A., & Salman, A, Sh. (2024). Multi-Criteria Analysis of Wind Power Station Distribution Along the Red Sea Coast of the Kingdom of Saudi Arabia Using GIS (1985-2017). *Journal of Architecture and Planning*, 36 (4), 467-508.
- Al- Mutlaq, F. (2022). Spatial Suitability Analysis for Identification of Best Sites for Collecting Photovoltaic Energy in the Kingdom of Saudi Arabia using Boolean Model. *Human and Social Sciences*, 49 (4).
- Al-Saleh, Y. (2007). A Glimpse into the Status and Prospect of Renewables in Oil-Producing Countries; with a Special Reference to the Kingdom of Saudi Arabia. *Geopolitics of Energy*, 29 (11), 2-13.
- Al-Shammari, S., ko, W., Al-Ammar, E, A. (2021). Optimal Decision-Making in Photovoltaic System Selection in Saudi Arabia, *Energies*, 14(2), 357.
- Anwarzai, M. A. & Nagasaka, K. (2017). Utility-scale implementable potential of wind and solar energies for Afghanistan using GIS multicriteria decision analysis. *Renew Sustain Energy Rev*, 71, 150–160, <http://www.sciencedirect.com/science>.
- Ari, E, S., & Gencer, C. (2020). The use and comparison of a deterministic, a stochastic, and a hybrid multiple-criteria decision-making method for site selection of wind power plants: An application in Turkey. *Wind Eng*, 44 (1), 60-74.
- Baban, S.M.J., & Parry, T. (2001). Developing and applying a GIS-Assisted Approach to Locating Wind Farms in the UK. *Renewable Energy*, (24)1, 59–71.
- Baseer, M, A., Meyer, J, P, Alam, M, M., & Rehman, S. (2015). Wind speed and power characteristics for Jubail industrial city, Saudi Arabia, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, (52), 1193-1204.

- Dominguez Bravo, J., Garcia Casals, X., Pinedo Pascua, I., (2007). GIS approach to the definition of capacity and generation ceilings of renewable energy technologies. *Energy Policy*, 35 (10), 4879–4892.
- Effat, H., A. (2013). Selection of potential sites for solar energy farms in Ismailia Governorate, Egypt using SRTM and multicriteria analysis.
- Int J Adv Remote Sens GIS. *International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS*, 2 (1), 205-220.
- 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(4),358-374.
- Effat, H., A. (2016). Mapping Solar Energy Potential Zones, using SRTM and Spatial Analysis, Application in Lake Nasser Region, Egypt. *International Journal of Sustainable Land use and Urban Planning*, 3 (1), 1-14.
- Effat, H., A. & El-Zeiny, A., M. (2022). Geospatial modeling for selection of optimum sites for hybrid solar-wind energy in Assiut Governorate. Egypt, *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 25(2) ,627-637.
- Estevez, R., A. Espinoza, V., Ponce Oliva, R., D. Vasquez-Lavin, F.& Gelcich, S.(2021). Multi-Criteria Decision Analysis for Renewable Energies: Research Trends, Gaps and the Challenge of Improving Participation. *Sustainability*, 13(6), 3515.
- Eltamaly, A., Addoweesh, K., Bawa, U., & Mohamed, M. (2013). Economic modeling of hybrid renewable energy system: A case study in Saudi Arabia. *Arabian Journal of Sciences and Engineering*, Springer, 39(5), 3827–3839.
- Georgiou, A., & Skarlatos, D. (2016). Optimal site selection for sitting a solar park using multi-criteria decision analysis and Geographical Information Systems. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 5(2), 321-332.
- Ghasemi, G., Noorollahi, Y., H. Alavi, H., Marzband, M., Shahbazi, M. (2019). Theoretical and technical potential evaluation of solar power generation in Iran. *Renew Energy*, 1 (138), 1250-1261.
- Hassan, Q., Jaszczur, M., Przenzak, E., Abdulateef, J. (2016). The PV cell temperature effect on the energy production and module efficiency. *Engineering and Environmental Protection*, (33).
- Janke, J, R. (2010). Multicriteria GIS modeling of wind and solar farms in Colorado. *Renewable Energy*, 35(10),2228-2234.
- Kamati, K, Smit, J, & Hull, S. (2022). Multicriteria Decision Method for Siting Wind and Solar Power Plants in Central North Namibia. *Geomatics*, 3(1), 47–67. <https://doi.org/>.

- Koc, A. Akturk, S. & Sahin, G. (2019). Multi-criteria of wind-solar site selection problem using a GIS-AHP-based approach with an application in Igdir Province/Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(4),1-13
- Li, D. (2013). Using GIS and Remote Sensing Techniques for Solar Panel Installation Site Selection. *Master's Thesis, University of Waterloo on Canada*. - 24-140.
- Mazurek, J. & Strzalka, D. (2022). On the Monte Carlo weights in multiple criteria decision analysis. *National Library of Medicine*, 17(10).
- Mohanty, P., Muneer, T., Gago, E. & Kotak, Y. (2015). *Solar Radiation Fundamentals and PV System Components*. Springer, 196 (5),7-47.
- Merrouni, A.A., Elalaoui, F.E., Mezrhab, A., Mezrhab, A., Ghennoui, A. (2018). Large scale PV sites selection by combining GIS and Analytical Hierarchy Process. Case study: Eastern Morocco. *Renewable energy*, 1(119), 863-73.
- Nguyen, H. T., & Pearce, J. M. (2010). Estimating Potential Photovoltaic Yield with r. sun and the Open-Source Geographical Resources Analysis Support System. *Solar Energy*, 84(5), 831-843.
- Nebey, A.H., Taye, B.Z., & Workineh, T.G. (2020). Site Suitability Analysis of Solar PV Power Generation in South Gondar, Amhara Region.
- *Journal of Energy*, 10–15.
- Noorollahi, E., Fadaei, D., Shirazi, M., A. & Ghodsipour, S, H. (2016). Land suitability analysis for solar farms exploitation using GIS and fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) study of Iran. *Energies*, 9 (8), 643.
- Olivero-Ortiz, V., Robles-Algarin, C., & Vilorio-Porto, J. (2021). An AHP-GIS Based Approach for Site Suitability Analysis of Solar-wind Projects in Santa Marta, Colombia. *International Journal of Energy Economics and Policy*, ISSN: 11(5), 2146-4553.
- Patel, M, R. (1999). *Wind and Solar Power Systems*. Library of Congress Cataloging. CRC Press LLC, 8493-1605.
- Parry, I., Dirk Heine, D., Lis, E., & Li, Sh. (2014). Getting Energy Prices Right: from Principle to Practice. *International Monetary Fund*, 35-183
- Rehman, S., Baseer, M., A. & Alhems, L. M. (2020). GIS-based multi-criteria wind farm site selection methodology, *Interdisciplinary Research Center for Sustainable Energy Systems*, 48(4), 855-867.
- Rekik, S, M., & Alimi, E. (2023). Optimal wind-solar site selection using a GIS-AHP based approach: A case of Tunisia. *Energy Conversion and Management*, 18(2), 100355.
- Saaty, T, L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill International. *Open Journal of Social Sciences*, 4(12).

- Saaty, W, R. (1987). *The Analytic Hierarchy Process- What it is and how it is used. Mathematical Modelling*, 9(3-5), 161- 176.
- Sanchez-Lozano, J, M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P, L., García-Cascales, M, S. (2013). *Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. Sustainable Energy Reviews*, (24), 544-556.
- Salam, M, A. Khan, S, A. (2018). *Transition towards sustainable energy production – A review of the progress for solar energy in Saudi Arabia. Energy Exploration & Exploitation*, 36(1), 3-27.
- Stiebler, M. (2008). *Wind Energy System for Electric Power Generation. Springer*, ISSN,1865-3529.
- Solomon, B, D. Haynes, K, E. (1984). *A Survey and Critique of Multiobjective Power Plant Siting Decision Rules. Socio-Economic Planning Sciences*, 18(2), 71–79.
- Tegou, L, I. Polatidis, H. & Haralambopoulos, D. (2010). *Environmental management framework for wind farm sitting: Methodology and case study. Journal of Environmental Management*, 91(11), 2134 – 2147.
- Uyan, M. (2016). *GIS-Supported mapping of solar power plant sites using AHP method. Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 23(4), 343-351.
- Xu, Y., Li, Y., Zheng, L., Cui, L., Li, S., Li, W.& Cai, Y. (2020). *Site selection of wind farms using GIS and multi-criteria decision-making method in Wafangdian, China. Energy*,207(15).
- Yousefi, H., Hafeznia, H., Yousefi-Sahzabi, A. (2018). *Spatial Site Selection for Solar Power Plants Using a GIS-Based Boolean-Fuzzy Logic Model: A Case Study of Markazi Province, Iran. Energies*, 11(7), 1648.
- Wang, C, N., Nguyen, V, T., Thai, H, T, N. & Duong, D, H. (2018). *Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Approaches for Solar Power Plant Location Selection in Viet Nam. Energies*, 11(6), 1504.
- Zell, E., Gasim, S., Wilcox, S., Katamoura, S., Stoffel, T., Shibli, H., ... Subie, M. (2015). *Assessment of solar radiation resources in Saudi Arabia. Solar Energy*, 119, 422–438.

○ المراجع الإلكترونية:

- أمانة منطقة تبوك (٢٠١٨)، مسترجع من: <https://www.tabukm.gov.sa/OurGeography.aspx>
- موقع الهيئة السعودية للسياحة، مسترجع من: <https://www.sta.gov.sa/ar/home>.
- الخليفة، سامي (٢٠٠٩): دراسة علمية لبحيرة دومة الجندل تتفحصها جامعة الجوف. صحيفة اليوم، مسترجع من: <https://web.archive.org/web>.

- العربي، محمد السيد (٢٠١٨): أنظمة طاقة الرياح والأنظمة الهجينة، منافس أم مكمل للطاقة الشمسية؟ مسترجع من: <https://www.solarmarketegypt.com>.
- شبكة خطوط الطاقة ومحطات إنتاج وتوزيع الكهرباء من خرائط مدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والطاقة المتجددة، مسترجع من: rratlas.kacare.gov.sa.
- المحميات الطبيعية من بيانات المركز الوطني لتنمية الحياة الفطرية، مسترجع من: <https://ncw.gov.sa/centers>.
- المحميات الطبيعية المتوفرة على موقع عالم محمي التابع لمنظمة الأمم المتحدة، مسترجع من: <https://www.protectedplanet.net/country/SAU>.
- البيانات المناخية التابع لوكالة الفضاء الأمريكية ناسا، مسترجع من: <https://power.larc.nasa.gov/data-access->.
- محطات الرصد المناخي للمنطقة الشمالية من الفترة الزمنية عام (١٩٩٠ - ٢٠٢٣)، من مدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجددة.
- المبادرة السعودية الخضراء، (٢٠٢١). مسترجع من <https://www.greeninitiatives.gov.sa/ar-sa>.
- الهيئة العامة للإحصاء. (٢٠٢٠). مسترجع من: <https://database.stats.gov.sa/home/landing>.
- Jinko Power، اتفاقية شراء الطاقة (PPA) لمشروع الطاقة الشمسية الكهروضوئية طبرجل بقدرة ٤٠٠ ميغا واط، مسترجع من: <https://www.prnewswire.com/ae/ar/news->.
- NREL Transforming Energy, (2023). Solar Resource Glossary. National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/solar->.

Abstract

With the acceleration of global growth in renewable energy projects due to population growth and the expansion of the globally economy, the main challenge for decision-makers is to reduce the environmental impact caused by fossil fuels. Globally, solar and wind energy is one of the fastest growing and advanced electric power generation technologies, and in this study, the Multi-Criteria Decision-Making Method in choosing the optimal sites in the north of the kingdom of Saudi Arabia was evaluated by hierarchical analysis (AHP) for its suitability for the development of combined solar and wind energy projects, The study was based on several criteria, namely climatic criteria, topographic criteria, environmental criteria, and economic criteria. And the results showed the superiority of the Tabuk region over the majority of the very high suitability with an area of up to 19,968 km², including the southwestern regions of Tabuk towards Al-Wajh, Amluj and the extreme northwest at NEOM, followed by the southern region of hail with an area of 2,377 km² and the southern area of the northern border with an area of 1290 km²; occupied The areas located in the Al-Jouf region are the lowest in the category of very high suitability with an area of up to 895 km², except for the tabargil area in the far north on the Jordanian border; due to this, they suffer from deprivation of the network of power lines and Main Roads, which negatively affects the area and the extension of nature reserves; climatic parameters have also achieved a high suitability area, so the spatial suitability area for maximum solar radiation reached 925,468.3 km², while the total horizontal radiation reached 249,672. 8 km², while the suitability area for wind speed is 680335, 9 km², and the area of suitability for wind density is 816395, 7 km². This is what literary studies have confirmed that the Kingdom of Saudi Arabia has promising potential in solar and wind energy.

Key words:

GIS-Multi-Criteria Decision Making- hierarchical analysis method (AHP) - combined energy(hybrid) - solar energy- wind energy.