جامعة الملك سعود
كلية العلوم الإنسانية والاجتماعية
مجلة الآداب
ردمد (ورقي):٣٦١٢-١٠١٨
ردمد (النشر الإلكتروني): ٨٣٣٩-١٦٥٨

King Saud University
College of Humanities and Social Sciences
Journal of Arts
ISSN (Paper):1018-3612
ISSN (Electronic):1658-8339

مجلة الآداب، مج (٣٧)، ع (٤)، ص ص ١٩-٤٤، جامعة الملك سعود، الرياض (٢٠٢٥م/ ١٤٤٦هـ)
Journal of Arts, Vol. 37 (4), pp 19-44, © King Saud University, Riyadh (2025 /1446H.)

الملاءمة المكانية وإمكانيات توليد الطاقة الشمسية الكهروضوئية في منطقة تبوك باستخدام التحليل المكاني والذكاء الاصطناعي

ندى بنت دبسان السمين
ماجستير الجغرافيا، قسم الجغرافيا، كلية العلوم الإنسانية والاجتماعية، جامعة الملك سعود، السعودية.

محمد السيد حافظ
أستاذ المناخ التطبيقي، قسم الجغرافيا، كلية العلوم الإنسانية والاجتماعية، جامعة الملك سعود، السعودية.

(قدم للنشر في ١٩/ ٧/ ١٤٤٦هـ، وقبل للنشر في ١٣/ ٨/ ١٤٤٦هـ)
https:/doi.org/10.33948/ARTS-KSU-37-4-2

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، الملاءمة المكانية، الذكاء الاصطناعي، منطقة تبوك.

ملخص البحث: تواكب المملكة العربية السعودية التطور التي يشهده مجال استثمار الطاقة الشمسية من أجل تحقيق تنمية مستدامة وفق رؤية المملكة العربية السعودية ٢٠٣٠. في هذا البحث تم تحليل إمكانات الطاقة الشمسية، وتحديد الأماكن المناسبة لإقامة محطاتها، والتنبؤ بحجم الإنتاج المستقبلي في منطقة تبوك، من خلال نهجًا تحليليًّا كميًّا باستخدام التقنيات الجيومكانية والذكاء الاصطناعي منها: تحليل بيانات الإشعاع المباشر DNI، والكلي GHI، والمنعكس DHI الصادرة عن وكالة NASA، ومحطات المركز الوطني للأرصاد ومدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية المتجددة، وسجلات أطلس الإشعاع العالمي Global Solar Atlas 2.0، وإجراء عملية التحليل المكاني Spatial Analyst، وبناء النموذج الهيكلي Model builder ببرنامج ArcGIS 10.5، بالإضافة إلى تطبيق الشبكات العصبية الاصطناعية Artificial Neural Network، بواسطة طبقة مدخلات السلاسل الزمنية SARIMA. وتوصلت النتائج إلى ارتفاع المعدلات السنوية لكمية الطاقة من الإشعاع الكلي (GHI) والمباشر (DNI)؛ حيث تبلغ ٥,٩ و٦,٩ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم على التوالي، وأن المواضع الملائمة جدًّا لإقامة محطات الطاقة تقع في جهة الشمال الغربي بمساحة ٧كم٢، أما المواقع الملائمة فتبلغ مساحتها نحو ٨٢٦٠ كم٢. وأوضحت نتائج التنبؤ بحجم الإنتاج ٢٠٢٩/ ٢٠٣٠، تذبذبه فصليا؛ حيث تبلغ كمية الطاقة المقدرة ٩كيلوواط/ ساعة/ م٢/ يوم صيفا، و٣كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، شتاء، أما الربيع والخريف فتتجه نحو الاعتدال. وتوصي الدراسة بضرورة في تحفيز القطاعات الحكومية وغير الحكومية باستخدام الطاقة الشمسية؛ لكونها وسيلة فعالة في توفير طاقة مستدامة.

Spatial suitability and potential for solar photovoltaic energy generation in Tabuk region using spatial analysis and artificial intelligence

Nada Dabsan Al-Samin
Master's Degree in Geography, Department of Geography, College of Humanities and Social Sciences, King Saud University, Saudi Arabia.

Mohamed El-Sayed Hafez
Professor of Applied Climate, Department of Geography, College of Humanities and Social Sciences, King Saud University, Saudi Arabia.

(Received: 19/ 7/1446 H, Accepted for publication 13/ 8/1446 H)
https:/doi.org/10.33948/ARTS-KSU-37-4-2

Keywords: Solar energy, Spatial suitability, Artificial intelligence, Tabuk region.

Abstract. Saudi Arabia keeps pace of the development in the field of solar energy investment in order to achieve sustainable development in accordance with the vision o 2030. In this research, the potential of solar energy was analyzed, Spatial suitability, and the future production in the Tabuk region was predicted, through a quantitative analytical approach using geospatial techniques and artificial intelligence, including: analysis of DNI, GHI, and DHI data NASA, Center of Meteorology, King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy, and Global Solar Atlas. Spatial Analyst process, and Model Builder in ArcGIS, as well as the Artificial Neural Network application, with the time series input layer (SARIMA). The results found: the annual rates of energy from (GHI) and (DNI) 5.9 and 6.9 kWh/m2/day, respectively, Good spatial suitability is located in the northwest with an area of 8267 km2, and the forecast of production 2029/2030 showed that it fluctuates quarterly, with the estimated amount of energy 9 kilowatt/hours/ m2 /day in summer, 3 kilowatt/hours/m2 /day in winter, while spring and autumn are moving towards moderation. The study recommends the need to stimulate the governmental and non-governmental sectors to use solar energy, as it is an effective means of providing sustainable energy.

مقدمة

تصنَّف الطاقة الشمسية أحد مصادر الطاقات المتجددة التي تتصف بالاستمرارية؛ سواء أكان ذلك من حيث الإنتاج أم من حيث احتياطي الإنتاج، وهي طاقة بديلة نظيفة، توفر متطلبات العيش المريح في بيئة طبيعية خالية من التلوث؛ مما يجعل بالإمكان الاستفادة منها في العديد من المجالات المختلفة، مثل: توليد الطاقة الكهربائية، والتدفئة، وتجفيف الفاكهة، ومن الطبيعي بمكان أن نعلم أن استعمالها الأمثل سيوفر احتياجات الإنسان المستقبلية، وتكون نتيجة مردودها مؤكدة(١).

ومن الطبيعي بمكان تباين كمية الطاقة الشمسية المكتسبة عن طريق الامتصاص أو الفقد؛ بسبب الانعكاس والتشتت مكانيًّا وزمانيًّا، وذلك وفق موقع الأرض بالنسبة للشمس أثناء دورتها السنوية حول الشمس، وكذلك وفق طبيعة الغازات والسوائل والمواد الصلبة المتواجدة في الغلاف الجوي والغلاف المائي واليابس، وتنوعها مكانيًّا وزمانيًّا؛ حيث تتباين درجة حرارة الهواء، وتوزيعات الضغط الجوي، وسرعة الرياح واتجاهها، وكمية بخار الماء في الهواء، وما يبدَّد منها على هيئة أي مظهر من مظاهر التساقط(٢)، وتشير البيانات الصادرة من المختبر الوطني للطاقة المتجددة في كولورادو إلى أن المملكة العربية السعودية من الدول التي تتمتع بكميات هائلة من الإشعاع الشمسي، التي تصل قرابة ٧ مليارات ميغاواط/ ساعة سنويًّا(٣).

ويعد مشروع نيوم من أبرز مشروعات رؤية ٢٠٣٠ وأكثرها طموحًا؛ حيث يمتاز موقعه بمزايا طبيعية واقتصادية؛ مما يجعله بيئة مناسبة لإنتاج وتطوير مشاريع الطاقة المتجددة؛ لتوافر الرياح والطاقة الشمسية، ويقع المشروع في أقصى شمال غرب المملكة العربية السعودية، على مساحة ٢٦,٥٠٠ كم٢ (٤)، وبناء على ذلك، فإن من الأهمية بمكان دراسة إمكانات الطاقة الشمسية في نطاق المشروع، وبشكل أشمل منطقة تبوك؛ حيث تُعد أحد أهم الأبعاد المؤثرة في طبيعة المشروع والأنشطة البيئية المرتبطة به.

مشكلة الدراسة

يُعَد الاعتماد على مصادر الطاقة الأحفورية من حيث الاستهلاك سببًا في حدوث إشكالية بيئية، وفي إلحاق الضرر بجميع الجوانب الاقتصادية والاجتماعية. وفي هذا تكمن مشكلة الدراسة، التي تتطلب البحث عن مصادر بديلة توفر طاقة نظيفة بأقل تكلفة وأعلى إنتاج، وتتصف بالاستمرارية. ومن هذا المنطلق دعت الحاجة إلى تقويم الملاءمة المكانية، والتعرف على إمكانات توليد الطاقة الشمسية الكهروضوئية في منطقة تبوك، لما تشهده المنطقة من نمو وتطوير؛ من أجل تأمين الطاقة، وحماية البيئة، وتحقيق تنمية مستدامة بمنظور وطني متكامل.

الحدود المكانية

تقع منطقة تبوك في شمال غرب المملكة العربية السعودية بين دائرتي عرض ٣٠° ٢٤` و٣٠° ٠٠` شمالًا، وبين خطي طول ٣٤° ٤٥` و٤٠° ٠٠` شرقًا، وتحدها المملكة الأردنية الهاشمية من الشمال، ومن الشرق منطقتا الجوف وحائل،

(١) يوسف محمد زكري، "الطاقة الشمسية وأوجه استخداماتها في ليبيا"، *المجلة الليبية للدراسات*، دار الزاوية للكتاب، ع١٥(يناير ٢٠١٤): ١٤٠.

(٢) محمد إبراهيم محمد شرف. جغرافيا المناخ والبيئة، (جامعة الإسكندرية: دار المعرفة الجامعية، كلية الآداب، ٢٠٠٨)، ص٢٥.

(٣) أشرف فقيه (٢٠١٦)، "الطاقة الشمسية تحت سقفها الواقعي"، *مجلة القافلة*، ع ١، مج ٦٥، أرامكو السعودية، (٢٠١٦)، ٣٠.

(٤) لطفي شعباني وآخرون، "دور السياحة في تحقيق التنمية المستدامة مع الإشارة لمشروع نيوم المشترك بين السعودية ومصر والأردن"، *مجلة رماح للبحوث والدراسات*، ع٤٨، (نوفمبر ٢٠٢٠)، ٧٤.

وتحدها جنوبًا منطقة المدينة المنورة، ومن جهة الغرب خليج العقبة والبحر الأحمر (شكل١)، وتتصف المنطقة بموقع جغرافي استراتيجي؛ نظرًا لإطلالتها من الجهة الغربية على البحر الأحمر وخليج العقبة(٥).

الحدود الزمنية

وتنحصر الحدود الزمنية طبقا للمدة الزمنية لبيانات العناصر المناخية (الإشعاع الشمسي، ودرجة حرارة الهواء، والرطوبة النسبية) من ١٩٨٨ إلى عام ٢٠٢٢ على مستوى منطقة تبوك ومصدرها المركز الوطني لأرصاد، بالإضافة إلى الاعتماد على البيانات المستخلصة من أطلس مصادر الطاقة المتجددة في المملكة العربية السعودية من ٢٠١٤ إلى٢٠٢٠، وكذلك البيانات المستخلصة من سجلات أطلس الإشعاع العالمي Global Solar Atlas 2.0 الصادر عن البنك الدولي.

الحدود الموضوعية

أما الإطار الموضوعي فقائم على الطاقة الكهرومغناطيسية الصادرة من جسم الشمس، التي تعد المصدر الرئيس لمصادر الطاقة على سطح الأرض، وفيها تم التركيز على معرفة إمكانات الطاقة الشمسية المنتجة من هذا العنصر لتوليد الطاقة الكهربائية باستخدام الخلايا الكهروضوئية، بناء على تحديد الضوابط التي تتحكم في قوة الإشعاع الشمسي، بواسطة تقنيات التحليل المكاني Spatial Analyst، والذكاء الاصطناعي (AI)، وتحديد أنسب المواقع الملائمة لمحطات الطاقة الشمسية، والتنبؤ بحجم الإنتاج المستقبلي للطاقة حتى عام ٢٠٣٠.

أهداف البحث

يكمن الهدف الرئيس في التحليل المكاني للإشعاع الشمسي في منطقة تبوك، وتقييم إمكانات توليد الطاقة الكهروضوئية، من خلال تحقيق الأهداف الفرعية الآتية:

- تحليل الإشعاع الشمسي وإمكانات الطاقة الشمسية.
- تحديد أنسب الأماكن لإقامة محطات الطاقة الشمسية.
- التنبؤ بحجم الإنتاج المستقبلي للطاقة الشمسية الكهروضوئية.

تساؤلات البحث

- ما مقدار إمكانات الطاقة الشمسية في منطقة تبوك؟
- ما المواقع الملائمة لإقامة محطات الطاقة الشمسية في منطقة تبوك؟
- ما التوقعات المستقبلية لإنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية حتى ٢٠٣٠؟

أهمية البحث العلمية والعملية

تأتي أهمية هذه الدراسة في محورين، الأول: العلمي؛ حيث تعد مجالًا من المجالات غير المستوفاة ضمن الدراسات العربية والمحلية للمناخ التطبيقي، في محاولة لإضافة دراسة أكاديمية جديدة تفيد نتائجها في خدمة المجال المتعلق بالطاقة الشمسية، والأخر: العملي؛ حيث تواكب التطور الحاصل في مجال استثمار الطاقة الشمسية بوصفها مصدر من مصادر الطاقة المتجددة، وفق رؤية المملكة العربية السعودية ٢٠٣٠، التي من أهدافها توليد طاقة نظيفة، وتحقيق التوازن البيئي، بالإضافة إلى إمكانية استخدام طاقة الإشعاع الشمسي في

(٥) مطلق بن صياح البلوي. منطقة تبوك في عهد الملك عبد العزيز ١٣٤٤-١٣٧٣ه/١٩٢٦-١٩٥٣. (مكة: رسالة دكتوراه غير منشورة، جامعة أم القرى، كلية الشريعة والدراسات الإسلامية، ٢٠١٠)، ٤٩.

الكثير من المجالات، منها: توليد الطاقة الكهربائية والحرارية، ويمكن أن يستفيد من نتائج هذه الدراسة جهات عديدة ، منها: وزارة الطاقة، ومدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجددة، ومشروع نيوم.

مفاهيم البحث

الطاقة الشمسية: Solar Energy هي الطاقة التي تنتجها وتولدها الشمس، وتتلقاها الأرض على هيئة إشعاع شمسي؛ حيث تتلقى الطبقات العليا من الغلاف الجوي المحيط بالأرض ما يعادل (واحد بيتا واط = ١٥١٠ واط) من الطاقة الشمسية. ويمكن استثمار الإشعاع الشمسي بطريقتين، الأولى: الطاقة الشمسية الحرارية من خلال المكثفات الشمسية، والأخرى: الطاقة الشمسية الكهربائية عن طريق الخلايا الشمسية[٦].

الطاقة الشمسية الكهروضوئية: PV هي الطاقة التي يتم تحويلها بصورة مباشرة إلى كهرباء من ضوء الشمس، بواسطة الألواح الكهروضوئية[٧].

الإشعاع الشمسي المباشر Direct Solar Radiation: الأشعة التي تصل إلى سطح الأرض بشكل مباشر دون أن تخضع لعمليات الانتشار، والامتصاص، والانعكاس بواسطة مركبات الغلاف الجوي[٨].

الإشعاع الشمسي المنتشر Diffuse Radiation: ويُقصَد به الإشعاع الذي ينبعث من الشمس، ويسقط على سطح الأرض، ويتعرض للانتشار خلال عبوره طبقات الغلاف الجوي؛ حيث يتغير اتجاهه، وينقسم إلى قسمين، الأول: الأشعة المنتشرة في الهواء، والآخر: الأشعة المنعكسة من سطح الأرض[٩].

الإشعاع الشمسي الكلي Total Solar Radiation: إجمالي الإشعاع الشمسي الساقط على السطح المستقبل، الذي يعادل مجموع الإشعاع المباشر والمنتشر، ويعبر القياس العام للإشعاع الشمسي عن الإشعاع الكلي على سطح أفقي[١٠].

الثابت الشمسي Solar constant: يشير المفهوم إلى كمية التدفق الكلي للطاقة الكهرومغناطيسية، التي تأتي من الشمس وتصل إلى الحد الأعلى أو سطح الغلاف الجوي العلوي، ويُعرف عادةً بأنه معدل الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى حدود الغلاف الجوي الخارجي، ويساوي٢ سعر حراري/ سم٢/ دقيقة[١١].

الدراسات السابقة

تطرقت العديد من الدراسات والأبحاث على المستوى المحلي والإقليمي والعالمي إلى تناول الإشعاع الشمسي، وإمكانات توليد الطاقة، وتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة غير المتجددة، والاستغلال الأمثل لها، منها ما يلي:

درس (Bishop,1991) التباين في توزيعات الإشعاع الشمسي، من خلال الاعتماد على مرئيات الأقمار الصناعية لوكالة ناسا الفضائية لمناطق مختلفة من سطح الأرض؛ حيث تم استخدام البيانات من يوليو (١٩٨٣ و١٩٨٤) ويناير (١٩٨٤ و١٩٨٥) لفحص التباين المكاني والزماني للإشعاع

(٦) إبراهيم بدران، وشاكر مقبل، وعبد القادر عابد، *الطاقة أنواعها ومصادرها* (عمان: دار الفرقان للنشر والتوزيع، ١٩٨٦م، ٥٦).

(٧) غفران قاسم إسماعيل المعموري، *إمكانات استثمار الإشعاع الشمسي والرياح لتوليد الطاقة المتجددة في محافظة بابل* (العراق، رسالة ماجستير غير منشورة، كلية التربية للعلوم الإنسانية، قسم الجغرافيا، ٢٠٢٠)، ٩.

(٨) علي موسى، *المعجم الجغرافي المناخي*، (دمشق: دار الفكر للطباعة والتوزيع والنشر، ١٩٨٦)، ٤٥.

(٩) نبيل شهيد، "حساب الإشعاع الشمسي الساعي بمساعدة الحاسوب"، *مجلة الطاقة والحياة*، ع٢٣، (الصيف، يونيو ٢٠٠٦)، ٦٥.

(١٠) أمينة فارس، *أنظمة التسخين الشمسي* (دمشق: قسم الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهرباء، جامعة دمشق، ٢٠١٦)، ١٦.

(١١) صباح الراوي، ومحمود البياتي، وعدنان هزاع، *أسس علم المناخ*، (جامعة الموصل: دار الحكمة للطباعة والنشر، ١٩٩٠)، ٤٠.

السطحي، وتأثيره المحتمل على عمليات الغلاف الحيوي، وأظهرت النتائج أن المحيطات والأرض تشهد أنظمة ضوئية مختلفة اختلافًا جوهريًّا؛ حيث تتلقى القارات إشعاعًا أكبر بشكل ملحوظ صيفًا، كما تبين وجود اختلافات كبيرة بين المحيطات من حيث متوسط الإشعاع في نصف الكرة الشمالي؛ حيث ارتفع في المحيط الأطلسي بشكل ملحوظ عن المحيط الهادئ بما يصل إلى ٨٠ واطً/ م٢، وفي نصف الكرة الجنوبي(١٢).

ودرس (AksakaI & Rehman, 1999) عن الإشعاع الشمسي العالمي الفعلي على سطح أفقي، إلى جانب ظروف الأرصاد الجوية السائدة التي تمت مواجهتها خلال فترة القياس من يناير إلى ديسمبر، ولمدة عام كامل في ساحل الخليج العربي بالقرب من مدينة الظهران، وتم جمع ومعالجة بيانات عالية الدقة، والإشعاع الشمسي والأرصاد الجوية في الوقت الحقيقي، وتم إجراء الإحصاءات على بيانات ساعيّة ويومية وشهرية للإشعاع الشمسي، من خلال القِيَم المتوسطة المسجَّلة لمدة دقيقة واحدة. وأبرزت الدراسة أن أعلى متوسط إشعاع شمسي يومي وشهري تم قياسه قد بلغ ٣٥١ و٣٢٨ واط/ م٢ على التوالي؛ ولوحظ أن أعلى قيم لمتوسط الإشعاع الشمسي في الدقيقة الواحدة بلغ ١١٨٣واط/ م٢ في الصيف من مايو إلى سبتمبر، وأن أعلى تسجيل لقيمة الإشعاع الشمسي لكل ساعة بلغ ١٠٥٣واط/ م٢ في منتصف يونيو. إلى جانب قياسات الإشعاع الشمسي العالمية، كانت العوامل الرئيسة الملحوظة للأرصاد الجوية هي: درجة الحرارة، والضغط الجوي، وسرعة الرياح، والأمطار، والرطوبة النسبية(١٣).

وهدفت دراسة الحياسي (٢٠١١) إلى إيجاد معالجات لمشكلة نقص الطاقة الكهربائية في الجمهورية اليمنية؛ من خلال إظهار إمكانية توليد الكهرباء بمصادر الطاقة المتجددة، والمتمثلة في طاقتي الإشعاع الشمسي والرياح، واعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي لوصف البيانات المناخية وتحليلها، واستخدام المنهج الكمي والأسلوب الكارتوجرافي بإنشاء خريطة تحتوي على أنسب المواقع لإنشاء المزارع الخاصة بتوليد الطاقة سواء أكانت الشمسية أم الريحية، وتوصلت النتائج إلى أن كمية استهلاك محطات الكهرباء من الوقود وصلت إلى ١٩٧٦ مليون لتر، منها ١٠٨٠ لتر مازوت، و٨٩٦ مليون لتر ديزل، وبلغت أقل زاوية لسقوط الإشعاع الشمسي في صعدة ٤٩,٣°، وتحتل مأرب أعلى المناطق من حيث صفاء الجو بنسبة سنوية بلغت ٧٨٪، وتأخذ المرتفعات الجبلية المرتبة الأخيرة من حيث صفاء الجو بنسبة لا تزيد عن ٦١٪(١٤).

ودرس (Yadav & Chandel, 2014) التنبؤ بالإشعاع الشمسي باستخدام تقنيات الشبكة العصبية الاصطناعية، وكان الهدف الرئيس من هذه الدراسة مراجعة التقنيات القائمة على الشبكة العصبية الاصطناعية(ANN) ؛ من أجل تحديد الطرق المناسبة المتاحة الخاصة بالتنبؤ بالإشعاع الشمسي، وتحديد فجوات البحث. وأظهرت نتائج الدراسة أن تقنيات الشبكات العصبية الاصطناعية تتنبأ بالإشعاع الشمسي المعتمدة على ANN أكثر دقة مقارنة بالطرق التقليدية، وتم التوصل إلى دقة التنبؤ لنماذج؛ لتكون معتمدة

(12) Rossow ishop. Spatial and temporal variability of global surface solar irradiance. J. *Geophysical Research*, 96 (C9), (1991) 16. 839-16, 858

(13) Aksakal, A., & Rehman, S. Global solar radiation in northeastern Saudi Arabia. *Renewable Energy*, 17(4), (1999), 461-472.

(١٤) مقبل محمد علي الحياسي. *الإشعاع الشمسي والرياح ودورهما في إنتاج الطاقة في الجمهورية اليمنية: دراسة في الجغرافيا الاقتصادية*. (جامعة ذمار: رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب، قسم الجغرافيا، ٢٠١١)، ٦.

على مجموعات معلمات الإدخال وخوارزمية التدريب وتكوينات الهندسة المعمارية[١٥].

أما (Zell, et al., 2015) فدرس تقييم موارد الإشعاع الشمسي في المملكة العربية السعودية، وتهدف الدراسة إلى تحليل عام أولى لقياسات موارد الطاقة الشمسية عريضة النطاق من شبكة مراقبة جديدة في المملكة العربية السعودية طورتها مدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجددة؛ حيث تم تحليل بيانات الموارد الشمسية خلال عام، بالاعتماد على بيانات الإشعاع الأفقي الكلي (GHI)، والإشعاع العمودي المباشر (DNI)، والإشعاع الأفقي المنتشر (DHI)، ودرجة حرارة الهواء.

وأظهرت النتائج أن المناطق الشمالية الغربية من المملكة تعد من المواقع الواعدة لإقامة مشاريع الطاقة الشمسية؛ وذلك بفضل سمائها الصافية، والكمية الوفيرة من الإشعاع العمودي المباشر(DNI) ؛ حيث يعد الأعلى كثافة في المملكة؛ وأظهرت الدراسة أن مقدار الأشعة الساقطة عموديًّا يوميًّا على مدن حقل، أملج، ضبا، الوجه، تيماء وتبوك تتجاوز في معدلها ٦٥٠٠ واط/ ساعة/ م٢، وتصل إلى معدلات تزيد على ١١٠٠ واط/ ساعة/ م٢ في أوقات الصيف؛ وأظهرت الدراسة أيضًا أن المدن والمناطق الساحلية، مثل: جدة والدمام كان لها النصيب الأقل من الأشعة الشمسية الساقطة عموديًّا؛ بسبب تأثير الرطوبة المرتفعة والضباب[١٦].

هدفت دراسة (داود، وآخرون، ٢٠١٧) إلى تطبيق أسلوب نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير؛ لتحديد أنسب المواقع المكانية لتجميع الطاقة الشمسية في منطقة مكة المكرمة الإدارية؛ اعتمادًا على مجموعة من الشروط والمعايير المطلوبة؛ سواء أكانت الجغرافية أم الفنية أم البيئية أم الاقتصادية؛ للحصول على نموذج ملاءمة رقمي يوضح أفضل بيانات جغرافية رقمية لهذه الاشتراطات، ودمج الاشتراطات في نظام معلومات جغرافي متكامل؛ بهدف الحصول على نموذج الملاءمة المكانية المطلوب، وتشير النتائج إلى أن كل منطقة مكة المكرمة مناسبة لمشروعات تجميع الطاقة الشمسية بنسب ملاءمة جيدة؛ حيث تبلغ مساحة الأراضي التي تتميز بنسبة عالية من الملاءمة في محافظة مكة المكرمة ٢٢٪، تليها محافظتا رابغ وخليص بنسبة ١٩٪ لكلٍّ منهما، ثم محافظة جدة بنسبة ١٣٪[١٧].

وتهدف دراسة (السهو، ٢٠١٨) إلى التعرف على المقومات الطبيعية للطاقة الشمسية في المملكة العربية السعودية، ودراسة توزيع الإشعاع الشمسي، وتحديد المناطق ذات الإشعاع العالي، وتحديد المناطق الملائمة لإنتاج الطاقة الشمسية، وتحديد أهم العوامل المناخية المؤثرة في كمية الإشعاع الشمسي، واعتمدت الدراسة على عدد من المناهج والأساليب، ومنها: المنهج الوصفي التحليلي، وأسلوب التحليل الكمي، والأسلوب التقني باستخدام برنامج نظم المعلومات الجغرافية GIS. وتوصلت النتائج إلى أن الإشعاع الشمسي في المملكة العربية السعودية عالٍ في جميع المناطق لكن بنسب مختلفة؛ حيث تتميز المناطق المرتفعة بالمملكة بكمية أعلى من أشعة الشمس خاصة في جنوبها الغربي، مثل: النماص وأبها؛ إذ يكون أعلى إشعاع شمسي في إبريل ومايو ويونيو؛ حيث يزيد عن ٦٠٠ سعر حراري/ سم٢/ يوم في النماص خلال مايو ويونيو، وأن أعلى المعدلات السنوية في

(15) Yadav, A. K., & Chandel, S. S. *Solar radiation prediction using Artificial Neural Network techniques: A review*. Renewable and sustainable energy reviews, 33, (2014), 750.

(16) Zell, E., Gasim, S., Wilcox, S., Katamoura, S., Stoffel, T., Shibli, H., & Al Subie, M. (2015). *Assessment of solar radiation resources in Saudi Arabia*. Solar Energy, 119, 423.

(١٧) جمعة داود، وخالد الغامدي، ومسعد مندور، "تحديد أفضل المواقع لتجميع الطاقة الشمسية في منطقة مكة المكرمة الإدارية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير"، *الملتقى الوطني الحادي عشر لتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في المملكة العربية السعودية*، جامعة الإمام، ١١، (ابريل ٢٠١٧) ٩.

عدد ساعات السطوع كانت في محطات: المدينة والطائف وحرض وسبت العلايا والحناكية وعردة وتبوك؛ حيث تزيد عن ٨,٣٠ ساعة/ يوم[١٨].

تهدف دراسة (Dasari, et al., 2019) إلى تقييمٍ مكانيٍّ وزمنيٍّ عالي الدقة لموارد الطاقة الشمسية في شبه الجزيرة العربية لمدة ٣٨ عامًا (١٩٨٠-٢٠١٧)، باستخدام نموذج الاستيعاب لأبحاث الطقس والتنبؤ بالطاقة الشمسية. وتم إجراء عمليات المحاكاة على أساس المجالات المتداخلة ثنائية الاتجاه بدقة ٥ كم و١٥ كم باستخدام المركز الأوروبي للتنبؤات الجوية متوسطة المدى؛ كظروف أولية وحدودية، واستيعاب معظم الملاحظات المتاحة في المنطقة. وتم التحقق من صحة موارد محاكاة الطاقة الشمسية، مثل: الإشعاع الأفقي العالمي(GHI) ، والإشعاع العادي المباشر(DNI) ، والإشعاع الأفقي المنتشر(DHI)، من خلال الملاحظات اليومية التي تم جمعها في ٤٦ من محطات راديومترية فوق المملكة العربية السعودية لمدة أربع سنوات (٢٠١٣ - ٢٠١٦)، وتبيَّن توافُق البيانات المرصودة والنمذجة جيدًا مع معاملات الارتباط العالية، ومؤشر الاتفاقيات، والانحياز الطبيعي المنخفض إلى ثلاثة آلاف واط/ ساعة/ م٢، وتوصلت النتائج إلى أن المعلمات الشمسية المحاكاة هي دقيقة بشكل معقول لإجراء دراسة تقييم الطاقة الشمسية، ويشير الاختلاف النهاري لمؤشر الوضوح إلى أن الأجزاء الشمالية الغربية والشرقية من المملكة العربية السعودية تظهر تقلبًا نهاريًّا كبيرًا في الشتاء، بينما تظهر المناطق الجنوبية الغربية تقلبًا نهاريًّا مرتفعًا في الصيف، وأظهر التحليل أن المناطق الشمالية الغربية والشرقية تتأثر بنظم الطقس في دوائر العرض المتوسطة في الشتاء، بينما تتأثر نسبيًّا المنطقة الجنوبية الغربية[١٩].

وتهدف دراسة (Siouti & Ali, 2019) إلى تحليل ومعرفة نتائج البيانات التي تم الحصول عليها، وفحصها؛ لمعرفة إمكانات الطاقة الشمسية، وسلط الضوء على نهج تقييم الإشعاع الشمسي في منطقة مشروع البحر الأحمر، من خلال دراسة وتحليل شدة الإشعاع الشمسي؛ للكشف عن مدى ملاءمته لإنتاج الطاقة. وتم الحصول على قياسات الإشعاع الشمسي من محطات رصد بيانات الإشعاع الشمسي على ساحل البحر الأحمر للفترة ٢٠١٣-٢٠١٧. وتوصلت النتائج إلى وجود توافق بمعدلات مرتفعة وثبات في قيم الإشعاع الشمسي على مدار العام، مما يفسر إمكانية الاعتماد الجزئي على الطاقة الشمسية في منطقة الدراسة[٢٠].

هدفت دراسة (Mujabar & Venkateswara, 2021) إلى إنشاء وفحص بعض نماذج الانحدار (الخطية والتربيعية واللوغاريتمية) لتقدير إمكانات الإشعاع الشمسي العالمي الشهري في مدينة الجبيل الصناعية بالمملكة العربية السعودية؛ حيث تمتلك المدينة الصناعية المزيد من إمكانات الطاقة الشمسية؛ إذ يتراوح الإشعاع الأفقي العالمي من ٤٠٠٠ إلى ٧٠٠٠ واط/ م٢/ يوم، وذلك من أجل الشروع في تطوير الطاقة الخضراء في المدينة، وتم تطوير نماذج هجينة خاصة بالموقع، وتوصلت النتائج إلى أن الطاقة الشمسية العالمية مرتبطة ارتباطًا مباشرًا بدرجة الحرارة المحيطة ومدة سطوع الشمس. ومع ذلك، فإن زيادة مستوى الرطوبة في الغلاف الجوي يقلل من الطاقة الشمسية الواردة. وأشار التحليل

(١٨) آلاء فهد عبد المحسن السهو. *الطاقة الشمسية في المملكة العربية السعودية: دراسة في المناخ التطبيقي باستخدام نظم المعلومات الجغرافية*. (الدمام: رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب، قسم الجغرافيا ونظم المعلومات الجغرافية، ٢٠١٨)، ١٦٣.

(19) Dasari, H. P, Desamsetti, S, Langodan, S., Attada, R., Kunchala, R. K., Viswanadhapalli, Y., & Hoteit, I. "High-resolution assessment of solar energy resources over the Arabian Peninsula". *Applied Energy*, 248, (2019), 360.

(20) Siouti, A., & Ali, A. B. "Evaluation of Solar Energy Potential for the Red Sea Project, Kingdom of Saudi Arabia". *Natural Resources*, 10(4), (2019), 100.

الإحصائي إلى أن نماذج الانحدار المطورة أظهرت درجة كبيرة من الدقة في تقدير الإشعاع الشمسي العالمي في المدينة [٢١].

تناولت دارسة (Alqahtani & Ozkan, 2021) أفضل السبل لتقليل اعتماد نيوم على الوقود الأحفوري من خلال توليد الطاقة الكهربائية باستخدام الخلايا الكهروضوئية على الأسطح في المباني السكنية وطورت الدراسة نموذجًا تقنيًّا اقتصاديًّا للطاقة الكهروضوئية على الأسطح، مع تخزين بطارية مناسب لأنواع المباني السكنية الحالية التي من المحتمل أن يتم بناؤها في نيوم، وتم تقييم الحجم الأمثل للطاقة الكهروضوئية، وسعة تخزين البطارية، والاتجاه الأمثل للألواح الكهروضوئية. واستَخدَمت الدراسة أحدث التطورات في الجدوى الفنية/ الاقتصادية لأنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية على الأسطح مع تخزين البطارية لتحديد الحجم الأمثل للنظام الكهروضوئي والتوجيه الأمثل للألواح الكهروضوئية. وتوصلت النتائج إلى الحجم الأمثل للنظام الكهروضوئي هو ١٤ كيلوواط للفيلا و١٠,٣ كيلوواط للشقة، ولكل منها بطارية بقدرة ١٢ كيلوواط في الساعة[٢٢].

تناولت دارسة (Barnawi et al., 2023)، (Barnawi et al., 2023) اعتماد الطاقة الشمسية في المباني السكنية في جميع أنحاء المملكة العربية السعودية، مع التركيز بشكل خاص على مدينة مكة المكرمة. على الرغم من الطلب العالمي الهائل على الطاقة والمخاوف البيئية المتزايدة، فإن اعتماد الطاقة الشمسية في المساكن السعودية لا يزال منخفضًا نسبيًا. في حين أن الدراسات السابقة قد بحثت الإمكانات والجدوى ودعم السياسات المتعلقة بالطاقة الشمسية، فإن هذا البحث يتناول هذه القضية بشكل فريد من وجهة نظر العملاء على المستوى الوطني. وتهدف الدراسة إلى التعرف على العوامل المؤثرة على نوايا العملاء لاستخدام الطاقة الشمسية في المملكة العربية السعودية، مما يساهم في تطوير سلسلة توريد دائرية مستدامة للطاقة المتجددة. ولتحقيق ذلك، يدمج البحث النظرية الموحدة لقبول واستخدام التكنولوجيا٢ (UTAUT2). ووزعت استبانة عبر الإنترنت، وحصل على إجابات من إجمالي ٢٥٠ مشاركًا. وتم استخدام تحليل الانحدار لتحليل البيانات وفحص العلاقات بين الفرضيات المقترحة. تكشف نتائج الدراسة أن أربعة عوامل حاسمة لها تأثير كبير على سلوك المستهلك وقراراته فيما يتعلق باعتماد تكنولوجيا الطاقة الشمسية الكهروضوئية. هذه العوامل هي: التأثير الاجتماعي (SI)، وتوقع الأداء (PE)، وتوقع الجهد (EE)، والظروف التيسيرية (FC)[٢٣].

ودرس (Farahat, et al., 2024) إمكانات بعض دول مجلس التعاون الخليجي (المملكة العربية السعودية، والإمارات العربية المتحدة وقطر، والبحرين، وعمان)، واليمن والعراق والأردن لاستخدام الإشعاع الشمسي الوفير لتوليد الكهرباء من خلال التكنولوجيا الكهروضوئية، لمساعدة صناع القرار في الوصول إلى البيانات اللازمة المتعلقة بحالة البنية التحتية للطاقة الشمسية وإنتاجها في منطقة الدراسة، وقد أُجري تحليل أولي لبصمة الكربون للانبعاثات التي تم تجنبها من استخدام الطاقة الكهروضوئية مقارنة بكثافة الشبكة الوطنية لكل بلد. وتشير النتائج إلى أن دول منطقة الدراسة لديها إمكانات كبيرة لاستخدام الطاقة الشمسية لتحل محل الوقود الأحفوري تدريجيا وحماية البيئة.

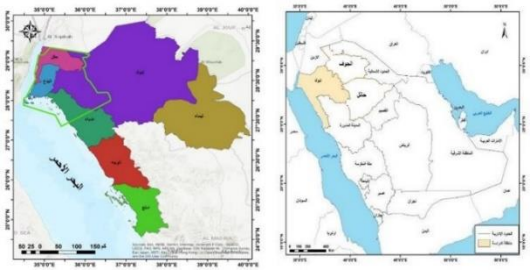
(21) Mujabar, S., & Venkateswara, R. C. "Empirical models for estimating the global solar radiation of Jubail Industrial City, the Kingdom of Saudi Arabia". *SN Applied Sciences*, 3 (1), (2021), 10.

(22) Alqahtani, N., & Balta-Ozkan, N. "Assessment of Rooftop Solar Power Generation to Meet Residential Loads in the City of Neom, Saudi Arabia". *Energies*, 14(13), (2021), 3805.

(23) Barnawi, Amin; Zohdy, Mohamed A; Hawsawi, Tarik. "Determining the Factors Affecting Solar Energy Utilization in Saudi Housing: A Case Study in Makkah". *Energies; Basel*, 16, (20), (2023), 7196.

وعلى الرغم من الإمكانات العالية لحصاد الطاقة الشمسية في منطقة الدراسة، لم يتم إنشاء سوى عدد قليل من المحطات الكهروضوئية ومرافق البنية التحتية، معظمها في المملكة العربية السعودية والإمارات العربية المتحدة والأردن. وقد وجد أن هناك حاجة ماسة لوضع لوائح وسياسات ورؤية للمستقبل القريب لدعم توليد الطاقة الشمسية وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري لإنتاج الكهرباء[٢٤].

يتضح من العرض السابق تشابه بعض الدراسات السابقة مع هذه الدراسة؛ من حيث دراسة عنصر الإشعاع الشمسي، وإمكانات توليد الطاقة، وعليه تم الاستفادة منها في البناء النظري والمعرفي لموضوع الدراسة، واختيار المنهج الملائم لتحقيق الأهداف، غير أنها تختلف عنهم من حيث البعد المكاني والمضمون والبعد الزمني؛ بالإضافة إلى اعتمادها على تقنيات التحليل المكاني والذكاء الاصطناعي في التحليل والربط للتوصل إلى نتائج مفيدة تمثل لبنة من لبنات الاستفادة من الطاقة الشمسية في منطقة الدراسة.



المصدر: الهيئة العامة للمساحة والمعلومات الجيومكانية، خريطة المناطق الإدارية ٢٠١٧، الرياض.

شكل١: الحدود المكانية لمنطقة الدراسة

(24) Farahat, Ashraf; Labban, Abdulhaleem H; Mashat, Abdul-Wahab S; Hasanean, Hosny M; Kambezidis, Harry D. "Status of Solar-Energy Adoption in GCC, Yemen, Iraq, and Jordan: Challenges and Carbon-Footprint Analysis". *Clean Technologies*; *Basel*, 6, (2), (2024), 700.

منهجية البحث

لتحقيق الأهداف اتبعت الدراسة منهجًا تحليليًّا كميًّا منظمًا من خلال جمع الكَمِّ المناسب من البيانات حول الظاهرة والمعلومات المتعلقة بالطاقة الشمسية؛ ثم توضيح العلاقة بين المتغيرات من خلال التحليل والربط والتفسير واستخراج النتائج منها، وتم الاعتماد في ذلك على المنهج التطبيقي، بالإضافة إلى عدد من الأساليب والإجراءات المنهجية؛ منها: التحليل الكمي لقيم الإشعاع الشمسي والعوامل المناخية المؤثرة فيه، وإيجاد مؤشر الجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ للمقارنة بين دقة بيانات وكالة ناسا لعلوم الفضاء NASA وبيانات محطات الرصد التابعة للمركز الوطني للأرصاد ومدينة الملك عبدالله للطاقة الذرية المتجددة (الوجه، تبوك، ضباء، حقل، أملج) باستخدام برنامج SPSS، وإجراء عملية التحليل المكاني (Spatial Analyst) ضمن برنامج ArcGIS، بعد تحديد المعايير المتعلقة بطبيعة الأرض والعوامل البشرية والعوامل المناخية وفق دراسة الآتية[٢٥]: ، (Sun et al., Al Garni et al., and Doljak & Stanojevi´c,)، وبناءً على المعايير المتبعة في مدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجددة، وتحديد الأوزان المرجحة بناءً على دراسة أرشيد[٢٦]، ومعالجة وتحليل البيانات من حيث توحيد المرجع الجغرافي، وحساب

(25) Sun, L., Jiang, Y., Guo, Q., Ji, L., Xie, Y., Qiao, Q., & Xiao, K. "A GIS-based multi-criteria decision-making method for the potential assessment and suitable sites selection of PV and CSP plants". *Resources, Conservation and Recycling*, 168, (2021), 105306; Al Garni, H. Z., & Awasthi, A. "Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia". *Applied energy*, 206, (2017), 1225-1240; Doljak, D, & Stanojević, G. "Evaluation of natural conditions for site selection of ground-mounted photovoltaic power plants in Serbia". *Energy*, 127, (2017), 299.

(٢٦) مأمون أحمد أرشيد. *اختيار الموقع الأمثل لإنشاء المحطات الكهروضوئية في الأردن باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد*. (الأردن: رسالة ماجستير غير منشورة، جامعة اليرموك، كلية الآداب،٢٠١٧)، ٣٤.

المسافة الإقليدية Euclidean Distance، وتطبيق إعادة التصنيف Reclassify Analysis، وتحديد الوزن النسبي بطريقة التحليل الهرمي Analytic Hierarchy Process (AHP)، من خلال موقع Calculator AHP، ومن ثَم بناء النموذج الهيكلي Model builder لتطبيق الملاءمة المكانية للمواقع الأنسب لإقامة المحطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية، التي تفيد نتائجها صانعي القرار في اتخاذ القرار المناسب.

وبهدف التنبؤ بالقيم الإشعاعية، تم تطبيق تقنية الذكاء الاصطناعي؛ باستخدام بيانات الإشعاع الشمسي المباشر DNI، والكلي GHI، والمنعكس DHI؛ حيث تم إنشاء طبقات متعددة، وعصبونات قادرة على فهم البيانات وتحليلها، وإعطاء أنسب تنبؤ للبيانات المدخلة. ويوضح الشكلان (٢) و(٣) الإجراءات المنهجية فيما يخص استخدام الذكاء الاصطناعي في هذه الدراسة، التي مرت بعدة مراحل بدءً من تجميع البيانات الشهرية لعناصر الإشعاع الشمسي للفترة الأساس (٢٠٠١– ٢٠٢٠)، وتهيئة البيانات قبل معالجتها لاستخدامها في عملية تدريب الشبكة العصبية باستخدام الصيغة المعيارية Standardized Formula الآتية:

$$X_{normalized} = \frac{X - mean(X)}{Standard\ deviation(X)}$$

ومن ثَم إجراء عمليات تحويل إلى أرقام تتراوح بين (٠–١) بحيث يستطيع التعلم العميق فهمها، وأيضًا تم حذف أو تعديل البيانات غير المرغوب فيها، وتشمل البيانات غير المسجلة بواسطة استخراج المتوسطات بناءً على البيانات المتاحة وتقدير القيم المفقودة وحذف القيم الشاذة، ثم تحميل البيانات في برنامج Google Collab لكتابة الكود البرمجي، وقراءة الملف الخاص ببيانات الإشعاع الشمسي، وتم تقسيم البيانات إلى قسمين الأول: التدريب ويشمل مدخلات ومخرجات بنسبة ٧٠٪ من البيانات للفترة (٢٠٠١–٢٠١٧)، والأخر: الاختبار ويشمل نسبة ٣٠٪ من البيانات للفترة (٢٠١٨– ٢٠٢٠). ومن خلال تطبيق نموذج السلاسل الزمنية Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average (SARIMA)، تم إدخال البيانات الأصلية لعناصر الإشعاع الشمسي، لحساب القيم المستقبلية حتى ٢٠٢٩؛ وذلك لقدرته على التنبؤ لفترات طويلة وتم تطبيق المعادلة بناء على دراسة[٢٧].

تم بعد ذلك تم تطبيق الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Network)، بواسطة طبقة المدخلات المولدة من السلاسل الزمنية SARIMA، بعد ضرب كل عنصر بالوزن النسبي، باستخدام نماذج متعددة الخطوات للتنبؤ المستقبلي حتى ٢٠٣٠ من خلال مجموعة من الخوارزميات تشمل (Dense, Baseline, Linear model Multi-step dense, CNN, RNN)، لمحطة الرصد تبوك نموذجا. وفي الأخير تم اختبار التنبؤ من خلال إدخال بيانات التعلم، أو بيانات حقيقية للإشعاع الشمسي في فترة الاختبار للفترة الزمنية (٢٠١٨–٢٠٢٠)، لإعطاء قرار التنبؤ، بتطبيق معادلة التنبؤ للتعلم العميق الآتية[٢٨]:

$$Z = W.X + b$$
$$y = f(Z)$$

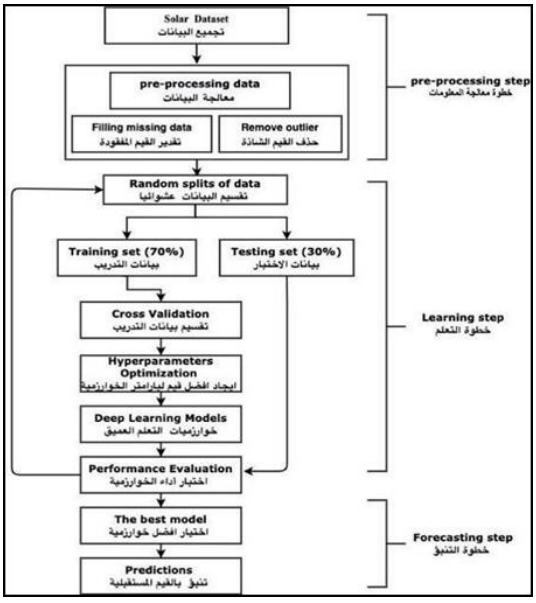
حيث: X تمثل البيانات وW الوزن المحسوب وb نسبة الخطأ وf تابع التحويل.

وتم إجراء التجارب باستخدام البيانات؛ لاختبار مدى قدرة الشبكة العصبية المُختارة على المحاكاة والتنبؤ بالقيم المستقبلية لسلسلة زمنية، من خلال قياس دقة التنبؤات بطريقتي متوسط مربعات الخطأ Mean of Squared Error

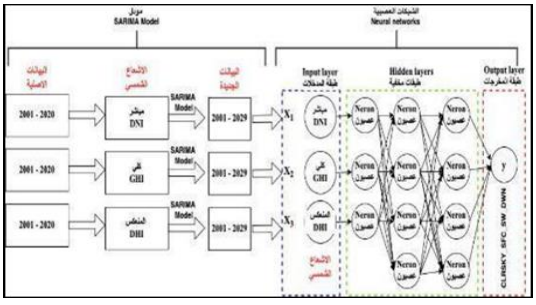
(27) Korstanje, J. "The AR Model, In Advanced Forecasting with Python". *Apress, Berkeley*, CA (2021), 45-69.

(28) Gao et al. "A deep learning method for improving the classification accuracy of SSMVEP-based BCI". *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67(12), (2020), 2784.

(MSE)، ومتوسط الخطأ المطلق Mean Absolute Error (MAE).



شكل٢: المراحل المنهجية لتطبيق تقنية الذكاء الاصطناعي

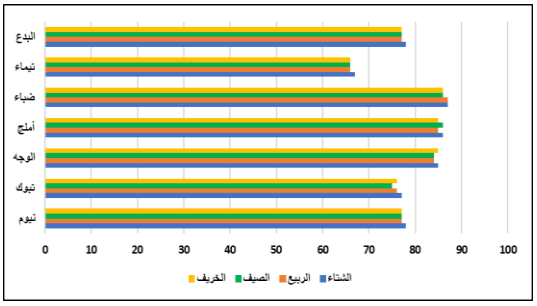


شكل٣: الشبكات العصبية الاصطناعية طبقا لمدخلات ومخرجات بيانات الدراسة

تحليل البيانات

أولاً: المعدلات النسبية للأشعة الشمسية المكتسبة

تبين من تحليل بيانات المعدلات النسبية لصافي الأشعة الشمسية المستنتجة من المعدلات النسبية الفصلية للألبيدو التي تم استردادها من مجموعات بيانات الطاقة الشمسية والأرصاد الجوية من أبحاث وكالة ناسا لعلوم الفضاء NASA لدعم الطاقة المتجددة وبناء كفاءة الطاقة والاحتياجات الزراعية (Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER، التي تغطي بياناتها منطقة الدراسة بدقة مكانية نصف درجة في اتجاه دوائر العرض وخطوط الطول، ودقة زمنية ٣ ساعات. الآتي (شكل ٤):



شكل٤: المعدلات النسبية الفصلية للأشعة الشمسية الصافية (٪) في منطقة تبوك للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).

يبلغ المعدل السنوي لصافي الأشعة الشمسية ٧٨٪؛ حيث تصل أعلى نسبة في ضباء ٨٦٪ يليها محطتي أملج والوجه بنسبة ٨٥٪ و٨٤٪ وفي تيوم ٧٧٪، تليها محطتي البدع وتبوك بنسبة ٧٦٪ و٧٥٪، بينما تقل إلى أدناها في محطتي حقل وتيماء بنسبة ٧٣٪ و٦٥٪.

تتقارب المعدلات الفصلية لصافي الأشعة الشمسية نسبيا؛ حيث تبلغ نسبة الشتاء ٧٩٪. وتبلغ أعلاها في ضباء ٨٧٪، أما في الربيع فتبلغ النسبة ٧٨٪، وتبلغ أعلاها في أملج ٨٥٪، وأدناها في تيماء ٦٦٪، وتبلغ النسبة في الصيف ٧٧٪، وتبلغ أعلاها في محطة ضباء إلى ٨٦٪، وفي فصل الخريف تبلغ نسبة الأشعة المكتسبة ٧٨٪ على مستوى جميع محطات منطقة تبوك.

ثانيًا: المعدلات السنوية والفصلية لطاقة الإشعاع الشمسي الكلي

تبين من تحليل بيانات جدول (١) والأشكال (٥ أ، ب، ج، د) أن المعدل السنوي لكمية الطاقة الشمسية الكلية يبلغ ٦,٠٨ كيلوواط/ ساعة/ م٢/ يوم، أعلاه في تبوك (٦,٢٣

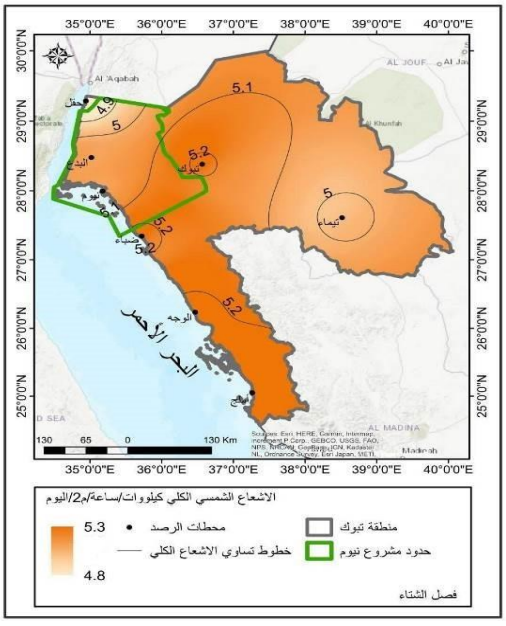
كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم)، وأدناه في حقل (٥,٩٢ كيلو واط/ ساعة / م٢/ يوم).

ويلاحظ -كذلك- تباين المعدلات الفصلية لطاقة الإشعاع الكلي؛ حيث تصل صيفا ٧,١٨ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، بينما يتميز الربيع بقوة الإشعاع الكلي؛ حيث تبلغ ٧,٤٩ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، مما يُسهم في استثمار الإنتاج للطاقة الكهروضوئية.

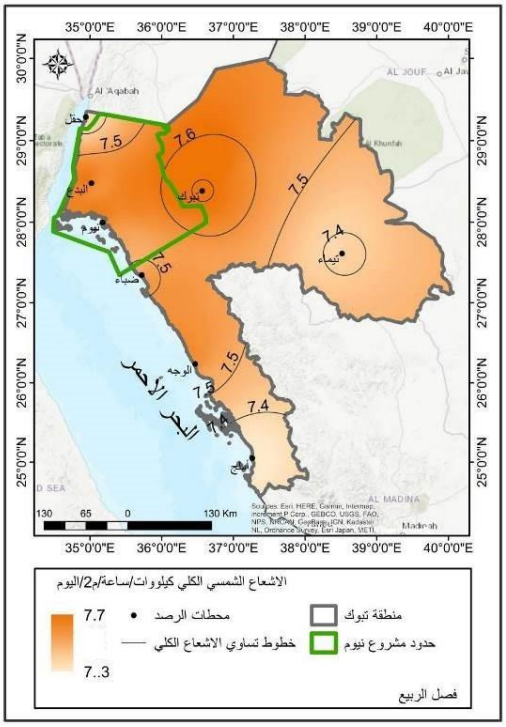
بينما تتناقص المعدلات خلال فصلي الشتاء والخريف؛ حيث يبلغ المعدل ٥ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، وينعكس ذلك سلبًا على الاستفادة من إنتاج طاقة الإشعاع الكلي.

جدول١: معدلات كميات الإشعاع الشمسي الكلي (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).

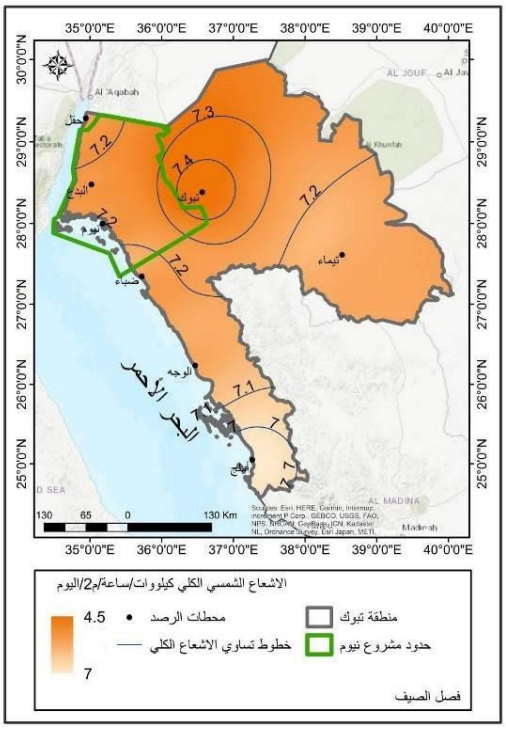
المحطات	الشتاء	الربيع	الصيف	الخريف	السنوي
نيوم	5.04	7.56	7.20	4.48	6.07
تبوك	5.21	7.71	7.48	4.53	6.23
الوجه	5.21	7.53	7.16	4.69	6.15
أملج	5.30	7.33	6.95	4.71	6.07
ضباء	5.22	7.49	7.17	4.70	6.15
تيماء	4.98	7.39	7.14	4.39	5.98
البدع	5.04	7.56	7.20	4.48	6.07
حقل	4.82	7.37	7.17	4.31	5.92
منطقة الدراسة	5.10	7.49	7.18	4.53	6.08



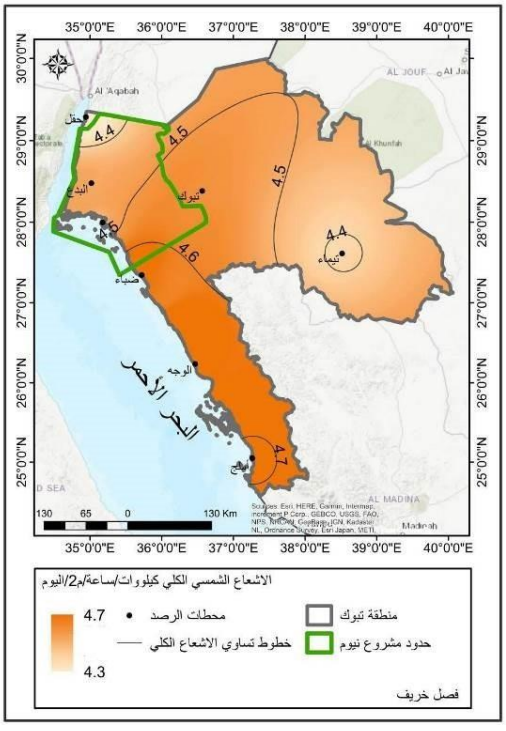
شكل٥-أ: المعدلات الفصلية (الشتاء) لطاقة الإشعاع الشمسي الكلي (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).



شكل٥-ب: المعدلات الفصلية (الربيع) لطاقة الإشعاع الشمسي الكلي (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).



شكل٥-ج: المعدلات الفصلية (الصيف) لطاقة الإشعاع الشمسي الكلي (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).



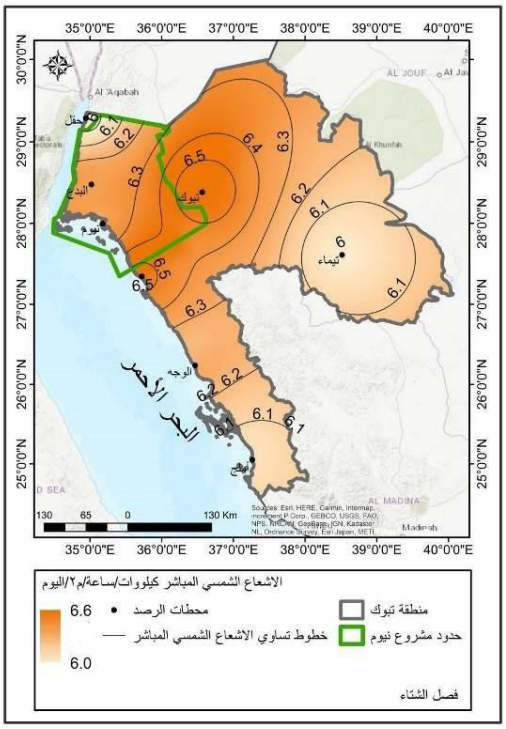
شكل٥-د: المعدلات الفصلية (الخريف) لطاقة الإشعاع الشمسي الكلي (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).

ثالثًا: المعدلات السنوية والفصلية لطاقة الإشعاع الشمسي المباشر

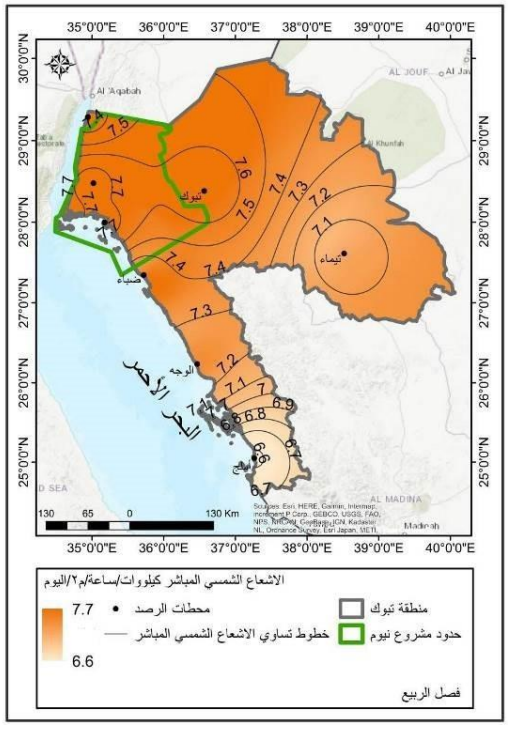
تبين من تحليل بيانات جدول (٢) والأشكال (٦ أ، ب، ج، د) أن المعدل السنوي لكمية الطاقة من الإشعاع الشمسي المباشر يبلغ ٦,٨٥ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم؛ حيث يبلغ أعلى معدل في تبوك ٧,١٧ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، بينما يبلغ أدناه في أملج ٦,٣٠ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم.

جدول٢: معدلات كميات الإشعاع الشمسي المباشر (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).

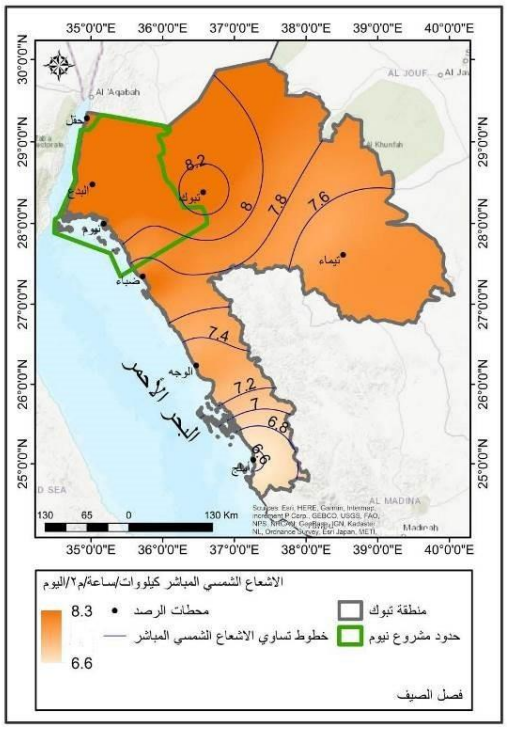
المحطات	الشتاء	الربيع	الصيف	الخريف	السنوي
نيوم	6.25	7.74	8.14	6.23	7.09
تبوك	6.60	7.69	8.29	6.11	7.17
الوجه	6.21	7.23	7.31	6.18	6.73
أملج	6.04	6.59	6.58	5.99	6.30
ضباء	6.53	7.34	7.74	6.55	7.04
تيماء	6.00	7.04	7.44	5.82	6.58
البدع	6.25	7.74	8.14	6.23	7.09
حقل	5.97	7.36	8.07	5.94	6.83
منطقة الدراسة	6.23	7.34	7.71	6.13	6.85



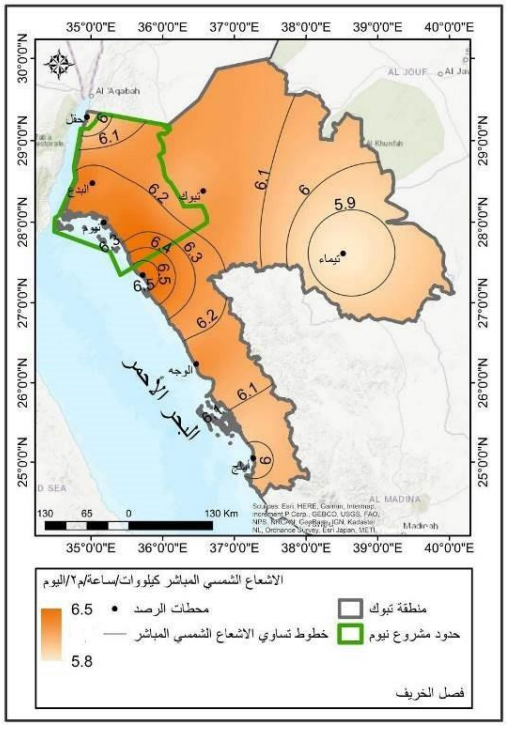
شكل٦-أ: المعدلات الفصلية (الشتاء) لطاقة الإشعاع الشمسي المباشر (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).



شكل٦-ب: المعدلات الفصلية (الربيع) لطاقة الإشعاع الشمسي المباشر (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).



شكل٦-ج: المعدلات الفصلية (الصيف) لطاقة الإشعاع الشمسي المباشر (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).



شكل٦-د: المعدلات الفصلية (الخريف) لطاقة الإشعاع الشمسي المباشر (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).

ذلك ويلاحظ تباين المعدلات الفصلية لطاقة الإشعاع المباشر؛ حيث تزداد كمية الإشعاع المباشر صيفا؛ إذ يبلغ ٧,٧١ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، ويعزى ذلك إلى صفاء الغلاف الجوي، وتبلغ في الربيع ٧,٣٤ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، بينما تبلغ في فصلي الشتاء والخريف ٦,٢٣ و٦,١٣ كيلو واط/ ساعة / م٢/ يوم على التوالي؛ مما يؤهل منطقة الدراسة للاستفادة من الإشعاع المباشر في إنتاج الطاقة الشمسية المركزة.

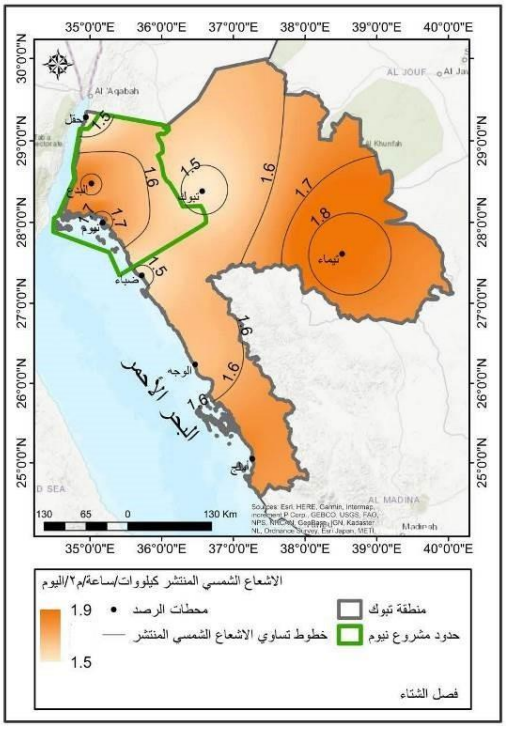
رابعًا: المعدلات السنوية والفصلية لطاقة الإشعاع الشمسي المنتشر

تبين من تحليل بيانات جدول (٣) والأشكال (٧ أ، ب، ج، د) أن المعدل السنوي لكمية الطاقة من الإشعاع الشمسي المنشر يبلغ ١,٧٥ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم؛ حيث يبلغ أعلى معدل في تيماء ٢,٠١ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، بينما يبلغ أدناه في حقل ١,٥٤ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم.

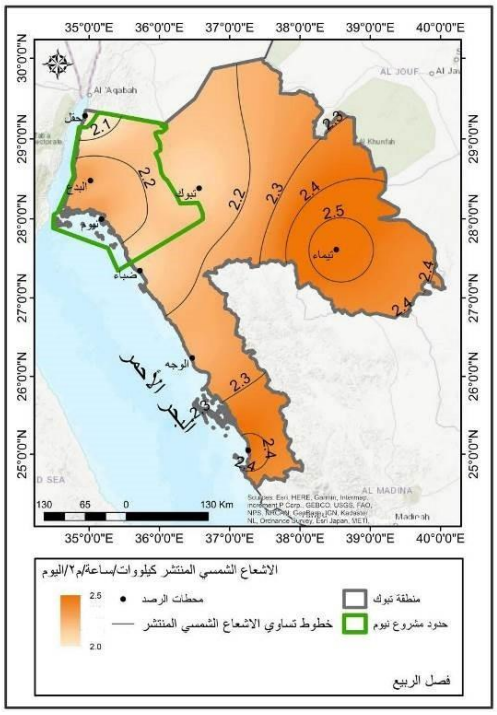
ذلك ويلاحظ تباين المعدلات الفصلية لطاقة الإشعاع المنتشر؛ حيث تشهد تناقصًا شتاءً؛ إذ يبلغ ١,٦١ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، ويعزى ذلك إلى زيادة كمية بخار الماء، وترتفع تدريجيا في شهور الربيع نتيجة زيادة المواد العالقة في الهواء الجوي؛ إذ يبلغ المعدل ٢,٢٤ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، بينما يبلغ في فصلي الصيف والخريف ١,٨١، ١,٣٤ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم على التوالين وتتصف المعدلات على هذا النحو بأنها منخفضة إشعاعيا.

جدول٣: معدلات كميات الإشعاع الشمسي المنتشر (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).

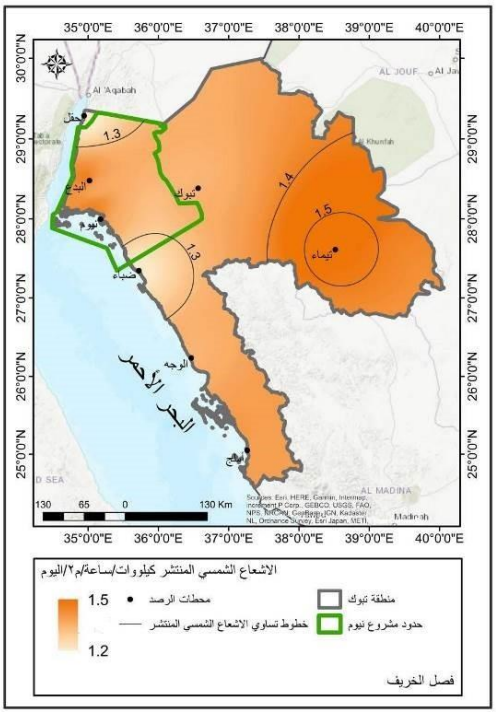
المحطات	الشتاء	الربيع	الصيف	الخريف	السنوي
نيوم	1.71	2.26	1.81	1.40	1.80
تبوك	1.47	2.13	1.64	1.32	1.64
الوجه	1.57	2.22	1.90	1.32	1.75
أملج	1.68	2.41	2.11	1.36	1.89
ضباء	1.49	2.13	1.68	1.21	1.63
تيماء	1.86	2.55	2.09	1.54	2.01
البدع	1.71	2.26	1.81	1.40	1.80
حقل	1.45	2.02	1.50	1.20	1.54
منطقة الدراسة	1.61	2.24	1.81	1.34	1.75



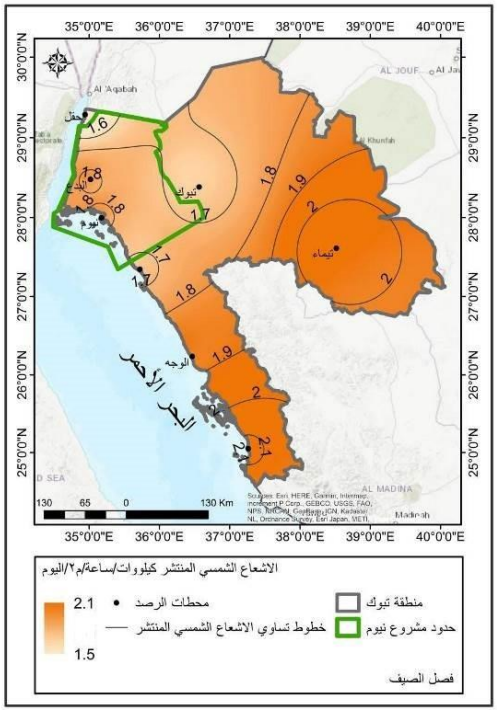
شكل٧-أ: المعدلات الفصلية (الشتاء) لطاقة الإشعاع الشمسي المنتشر (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).



شكل٧-ب: المعدلات الفصلية (الربيع) لطاقة الإشعاع الشمسي المنتشر (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).



شكل٧-د: المعدلات الفصلية (الخريف) لطاقة الإشعاع الشمسي المنتشر (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).

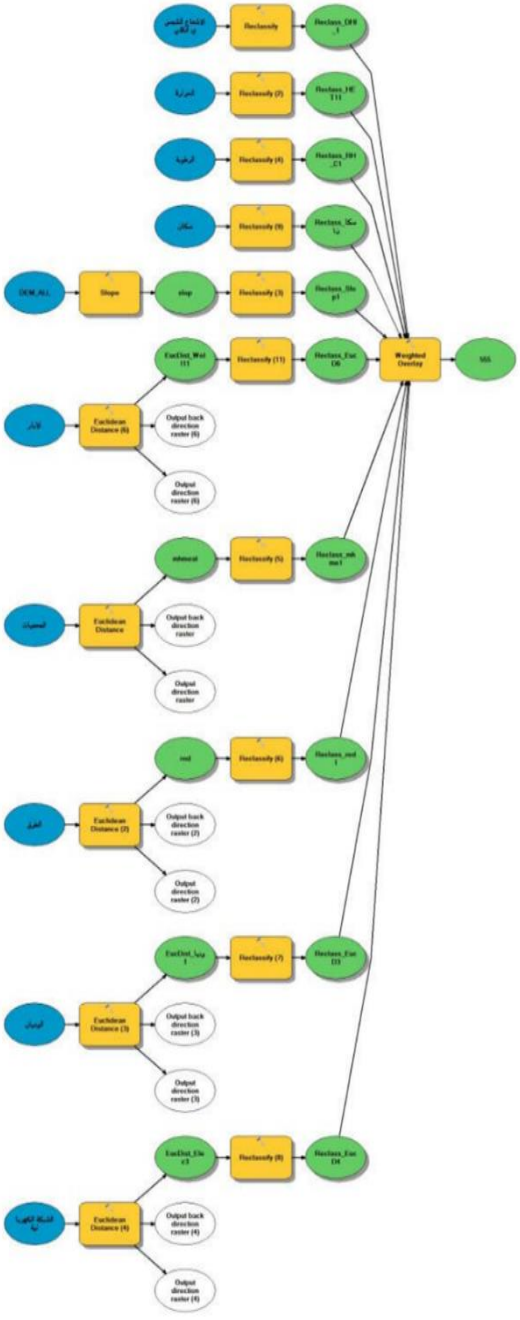


شكل٧-ج: المعدلات الفصلية (الصيف) لطاقة الإشعاع الشمسي المنتشر (كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) للفترة (١٩٨٨-٢٠٢١).

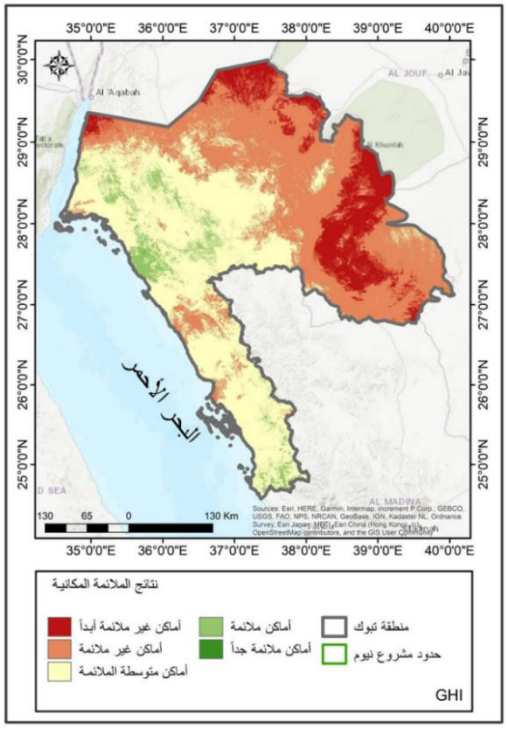
خامسًا: التصنيف النسبي للملاءمة المكانية للطاقة الشمسية

بُني النموذج الهيكلي Model builder لتحليل أنسب الأماكن لإقامة محطة الطاقة الشمسية لكلا من الطاقة الشمسية المركزة والطاقة الشمسية الكهروضوئية، بعد جمع وتحديد المعايير على شكل طبقات خلوية Raster، وتشمل درجة حرارة الهواء، والرطوبة النسبية، والانحدار، والأودية، والآبار، وعدد السكان، والتجمعات العمرانية، وشبكة الطرق، وشبكة الكهرباء، والمحميات، وإعادة تصنيفها، ودرجة أهميتها، وتحديد نسب أوزانها، وقد تبين من قياس نسبة التحقق من التوافق بين المعايير Consistency Ratio CR، أنها تتسم بالثبات الجيد؛ إذ بلغت ٤,١٪. ويوضح الشكل (٨) النموذج الهيكلي التي تم بناء عليه إنتاج خريطة الملاءمة المكانية وتتضمن التصنيف النسبي لمساحات المواضع

الملائمة مكانيًا لإنتاج الطاقة الشمسية الكهروضوئية (شكل ٩).



شكل٨: نموذج Model builder للطاقة الشمسية الكهروضوئية.



شكل٩: نموذج الملاءمة المكانية لمواقع الطاقة الشمسية الكهروضوئية في منطقة تبوك.

تبين من تحليل نتائج الطاقة الشمسية الكهروضوئية أن المناطق الملائمة جدًّا لإنتاجها تبلغ مساحتها ٧كم٢ بنسبة ٠,٠٠٤٪، أما المواقع الملائمة فتبلغ مساحتها نحو ٨٢٦٠ كم٢ بنسبة ٤٪، أما المواقع متوسطة الملاءمة فتبلغ مساحتها ٧٢٢٥٨ كم٢ بنسبة تبلغ ٤٢٪، وأما المواقع غير الملائمة فتبلغ مساحتها ٦٧٤١٣كم٢ بنسبة ٣٩٪، بينما المواقع غير الملائمة أبدًا تبلغ مساحتها ٢١٧٢٧ كم٢ بنسبة ١٢٪.

سادسًا: القيم المتوقعة لإنتاج الطاقة الكهروضوئية-تبوك نموذجًا

تم التنبؤ بحجم الإنتاج المستقبلي للطاقة الكهروضوئية حتى عام ٢٠٣٠ بناء على فترة أساس (٢٠٠١- ٢٠٢٠)، باستخدام نماذج الشبكات العصبية، وبأسلوب بالسلاسل الزمنية المولدة من نماذج Seasonal Auto-Regressive Intergraded Moving Average (SARIMA)، ويبين

جدول (٤) المقاييس الإحصائية التي تم من خلالها اختيار النموذج الأفضل لأنواع الأشعة الشمسية، وبناء على النتائج يتضح أن أقل قيمة للخطأ في الإشعاع الشمسي الكلي وتقدَّر بـ٠,٠٣٨، مما يدل على كفاءة أداء النموذج، وعليه تم استخدام هذا النوع من الأشعة للتحديد القيم المتوقعة حتى ٢٠٣٠.

جدول٤: المقاييس الإحصائية لنموذج السلاسل الزمنية SARIMA لأنواع الأشعة الشمسية.

نموذج السلاسل الزمنية (1,1,2) (1,0,1,12)	متوسط الخطأ النسبي المطلق	متوسط الخطأ المطلق	جذر متوسط مربع الخطأ
الإشعاع الشمس المباشر	1.578	0.250	0.293
الإشعاع الشمسي الكلي	0.115	0.038	0.048
الإشعاع الشمسي المنتشر	1.575	0.177	0.221

١. قيم التنبؤ بالطاقة الشمسية بنموذج السلاسل الزمنية حتى ٢٠٢٩

يوضح جدول (٥) بيانات التنبؤ حتى ٢٠٢٩ في محطة تبوك، بعد معالجة البيانات الأصلية الشهرية بدءً من يناير ٢٠٠١ حتى إبريل ٢٠٢٩. وتبين من نتائج التحليل أن كمية الإشعاع الشمسي المنتشر تبلغ أدنى مستوياتها في شهور الشتاء؛ حيث تقدر في ديسمبر ١,٢٦ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، يلي ذلك شهرا يناير وفبراير؛ إذ تقدر ١,٣٤ و١,٦٢ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم على التوالي، وتزداد نسبيا في الربيع؛ إذ تقدر في مارس وإبريل ١,٨٧ و٢,٢٢ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم على التوالي.

جدول٥: قيم التنبؤ بطاقة الإشعاع الشمسي كيلو واط/ ساعة/ م2/ يوم حتى 2029.

البيان	الإشعاع الشمسي المنتشر	الإشعاع الشمسي الكلي	الإشعاع الشمسي المباشر
2001-01	1.07	4.50	7.20
2001-02	1.38	5.56	7.53
2001-03	1.85	6.47	7.16
2001-04	2.49	7.09	6.51
2001-05	2.43	8.01	7.58
...	...	...	...
2028-12	1.26	3.89	6.07
2029-01	1.34	4.17	6.17
2029-02	1.62	5.10	6.37
2029-03	1.87	6.29	6.84
2029-04	2.22	7.18	6.91

المصدر: بتطبيق نموذج السلاسل الزمنية اعتمادا على بيانات وكالة علوم الفضاء الأمريكية.

بينما تقدر كمية الطاقة المتوقعة من الإشعاع الشمسي الكلي شتاءً في ديسمبر ٢٠٢٨ ويناير وفبراير ٢٠٢٩ على التوالي ٣,٨٩ و٤,١٧ و٥,١٠ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، ومن المتوقع أن ترتفع في ربيع ٢٠٢٩؛ إذ تقدر في شهري مارس وإبريل ٦,٢٩ و٧,١٨ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم.

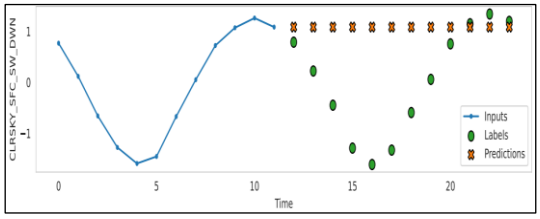
ومن المتوقع أن ترتفع كمية الطاقة المنتجة من الإشعاع الشمسي المباشر في ديسمبر ٢٠٢٨ بمقدار ٦,٠٧ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، وفي شهرا يناير وفبراير ٢٠٢٩ بمقدار ٦,١٧ و٦,٣٧ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، وترتفع نسبيا في مارس وإبريل؛ إذ تقدر ٦,٨٤ و٦,٩١ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم على التوالي.

٢. قيم التنبؤ باستخدام النماذج المتعددة الخطوات حتى ٢٠٣٠.

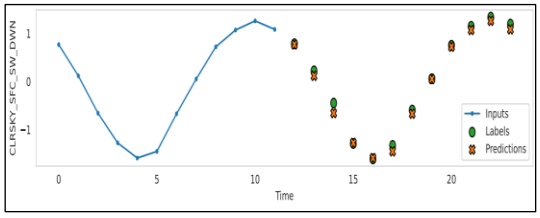
الهدف من استخدام الشبكة العصبية (النماذج المتعددة الخطوات) Multi-step models هو التنبؤ لمدة عام، بتطبيق العديد من الخوارزميات، نحصرها في (Baseline, Repeat Baseline - Linear, Dense, CNN, LSTM, AR LSTM)، وتشتمل المدخلات على عناصر الإشعاع الشمسي (الكلي، والمباشر، والمنتشر)، بينما تكون طبقة الإخراج المتنبئ بها الإشعاع الشمسي الكلي. وتمثل المحاور الأفقية والأشكال من (١٠-أ) إلى (١٠-ز) التي توضح قيم التنبؤ بطاقة الإشعاع الشمسي الكلي باستخدام نماذج الشبكة العصبية، عدد الشهور البالغة ٢٤ شهرًا، منها ١٢ شهرًا تحتوي على المدخلات Inputs، و١٢ شهرًا تحتوي على القيم المتوقعة Predictions.

وتبين من تحليل الأشكال (١٠ أ، ب، ج، د، هـ، و، ز) والجدول (٦) أن القيم المتوقعة للإشعاع الشمسي الكلي، والقيم الحقيقية Labels باستخدام خوارزمية النموذج الأساسي Baseline وخوارزمية النموذج الخطي Linear غير متطابقة، ذلك لارتفاع متوسط الخطأ المطلق، كما يلاحظ أن القيم المتوقعة والقيم الحقيقية باستخدام خوارزمية الشبكة العصبية الكثيفة Dense غير متطابقة تمامًا، وبالتالي تؤثر على الأداء.

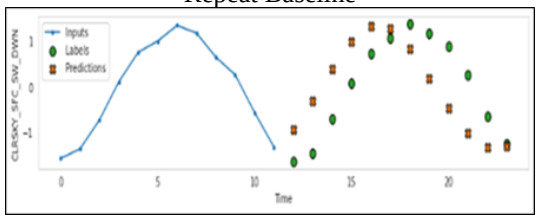
أما بتطبيق خوارزمية الشبكة العصبية الالتفافية Convolution neural network (CNN)، وخوارزمية الذاكرة طويلة/ قصيرة المدى LSTM، وخوارزمية الشبكة العصبية المتكررة Autoregressive RNN model (AR LSTM) فينتج حالة تطابق إلى حد ما. مما يعطي دقة نسبية للأداء. بينما خوارزمية النموذج الأساسي المتكرر Repeat Baseline متطابقة، ويعزى ذلك لانخفاض متوسط الخطأ المطلق ٠,٠٠٥؛ مما يجعل الأخيرة تعطي نتائج أفضل للتنبؤ المستقبلي.



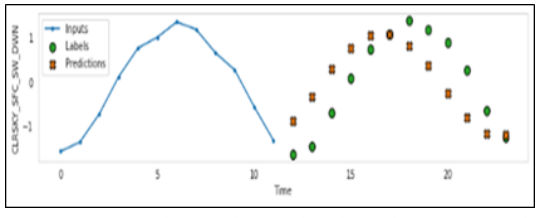
شكل ١٠-أ: قيم التنبؤ بطاقة الإشعاع الشمسي الكلي باستخدام نموذج Baselines



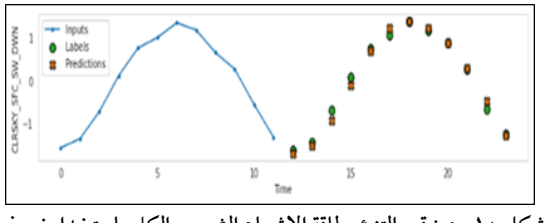
شكل ١٠-ب: قيم التنبؤ بطاقة الإشعاع الشمسي الكلي باستخدام نموذج Repeat Baseline



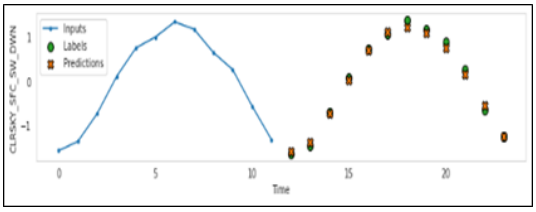
شكل ١٠-ج: قيم التنبؤ بطاقة الإشعاع الشمسي الكلي باستخدام نموذج Linear



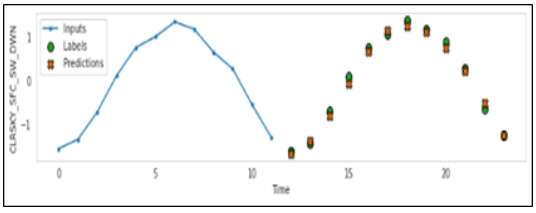
شكل ١٠-د: قيم التنبؤ بطاقة الإشعاع الشمسي الكلي باستخدام نموذج Dense



شكل ١٠-هـ: قيم التنبؤ بطاقة الإشعاع الشمسي الكلي باستخدام نموذج CNN



شكل ١٠-و: قيم التنبؤ بطاقة الإشعاع الشمسي الكلي باستخدام نموذج RNN



شكل ١٠-ز: قيم التنبؤ بطاقة الإشعاع الشمسي الكلي باستخدام نموذج AR LSTM

جدول٦: متوسط الخطأ المطلق للنماذج المتعددة الخطوات Multi-step models

الخوارزميات Models	متوسط الخطأ المطلق MAE
Baseline	0.9583
Repeat Baseline	0.0050
Linear	0.4381
Dense	0.3809
CNN	0.1085
LSTM	0.1139
AR LSTM	0.1327

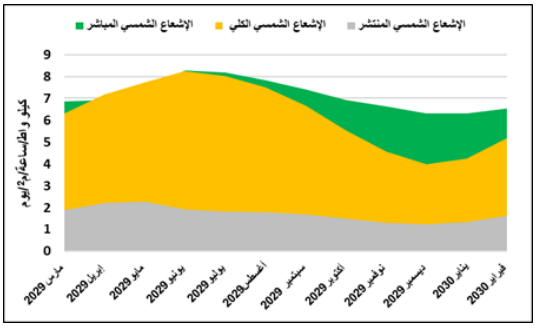
المصدر: بالاعتماد على (نماذج متعددة الخطوات) Multi- step models.

وبناءً على ما سبق تعد خوارزمية Repeat Baseline أفضل شبكة عصبية للتنبؤ، تليها خوارزمية CNN وخوارزمية LSTM، وتمثل قيمة الخطأ في كلتاهما ٠,١٠ و٠,١١ على التوالي، وتبلغ قيمة الخطأ في خوارزمية AR LSTM ٠,١٣، بينما أعلى قيمة للخطأ في خوارزمية Last؛ إذ تبلغ ٠,٩٥. ويدل ذلك على كفاءة منخفضة، وبشكل عام كلما كانت نتائج الخطأ تقترب نحو الصفر تعطي كفاءة عالية، والعكس صحيح؛ لذلك تم استخدام نموذج Repeat Baseline لحساب التنبؤات المستقبلية؛ لكونه يمتلك أقل قيمة خطأ.

ويوضح الجدول (٧) والشكل (١١) القيم المتوقعة للطاقة الكهروضوئية من الإشعاع الشمسي (الكلي، والمباشر، والمنتشر)، بتطبيق نموذج Repeat Baseline، وتبين من التحليل بعد معالجة البيانات الشهرية بدءً من يناير ٢٠٢٩ حتى فبراير ٢٠٣٠، أن متوسط كمية الطاقة من الإشعاع المباشر شتاءً ٦,٢٨ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم؛ حيث تقدر في ديسمبر، ويناير، وفبراير٦,٣١ و٦,١٧ و٦,٣٧كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم على التوالي.

جدول٧: قيم التنبؤ بطاقة الإشعاع الشمسي كيلو واط/ ساعة/ م2/ يوم حتى فبراير ٢٠٣٠ بتطبيق نموذج Repeat Baseline.

البيان	الإشعاع الشمسي المباشر	الإشعاع الشمسي الكلي	الإشعاع الشمسي المنتشر
2029-1	6.17	4.17	1.34
2029-2	6.37	5.10	1.63
2029-3	6.84	6.29	1.88
2029-4	6.91	7.18	2.22
2029-5	7.32	7.74	2.27
2029-6	8.28	8.25	1.91
2029-7	8.18	8.01	1.82
2029-8	7.83	7.50	1.77
2029-9	7.41	6.66	1.69
2029-10	6.92	5.54	1.49
2029-11	6.64	4.55	1.30
2029-12	6.31	3.99	1.25
2030-01	6.32	4.23	1.34
2030-02	6.53	5.16	1.61



شكل١١: قيم التنبؤ بالطاقة الإشعاعية باستخدام نموذج Repeat Baseline.

أما في الربيع فيبلغ المتوسط ٧,٦٢ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم؛ حيث تقدر في مارس، وإبريل، ومايو ٦,٨٤ و٦,٩١ و٧,٣٢كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم على

التوالي، ويرتفع متوسط كمية الطاقة المقدرة نسبيا صيفًا ٨,١ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم؛ حيث تبلغ أعلى مستوياتها في يونيو، ويوليو، وأغسطس؛ بقيم تقديرية ٨,٢٨ و٨,١٨ و٧,٨٣كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، ثم تنخفض نسبيا في الخريف بمتوسط ٦,٩٩ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم؛ حيث تقدر في سبتمبر، أكتوبر، نوفمبر ٧,٤١ و٦,٩٢ و٦,٦٤ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) على التوالي، بينما تقدر في يناير وفبراير ٢٠٣٠ بنحو ٦,٣٢ و٦,٥٣كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم على التوالي.

تتباين كمية الطاقة المنتجة من الإشعاع الشمسي الكلي في محطة تبوك زمنيا من شهر إلى آخر ومن فصل لآخر؛ نظرًا لتأثير العوامل الجوية المختلفة ومنها: كمية السحب، حيث تبين من التحليل أن أدنى مستوياتها التقديرية في الشتاء بمتوسط ٤,٤٤ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم؛ حيث تقدر في ديسمبر، يناير، فبراير ٣,٩٩ و٤,٢٣ و ٥,١٠ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، وترتفع بشكل ملحوظ في الربيع بمتوسط ٧,١ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم؛ حيث تقدر في مارس، إبريل، مايو ٦,٢٩ و٧,١٨ و٧,٧٤ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، وتبلغ الذروة في الصيف بمتوسط ٧,٩٢ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم؛ حيث تقدر في يونيو، يوليو، أغسطس بنحو ٨,٢٥ و٨,٠١ و٧,٥٠ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، وتتناقص كمية الطاقة المقدرة في الصيف بمتوسط ٥,٥٨ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم؛ حيث تقدر في وخلال أشهر الخريف (سبتمبر، أكتوبر، نوفمبر) بنحو ٦,٦٦ و٥,٥٤ و٤,٥٥كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، بينما تبلغ الكمية المقدرة في يناير وفبراير ٢٠٣٠ نحو ٤,٢٣ و٥,١٦كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم) على التوالي.

تشير التنبؤات الشهرية إلى أن أعلى كمية للطاقة المنتجة من الإشعاع الشمسي المنتشر تقدر بنحو ٢,٣ كيلو واط/ ساعة/ م٢ / يوم)، بينما أدنى قيمة تقدر بنحو ١,٣ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم.

النتائج والتوصيات

تمثلت اهم النتائج التي توصلت إليها الدراسة فيما يأتي:

- ارتفاع المعدلات السنوية لكمية الطاقة من الإشعاع الشمسي الكلي (GHI) في منطقة الدراسة؛ حيث تتراوح بين ٥,٩ و٦ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، ويبلغ ذروته صيفا بمعدل ٧,٥ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم في تبوك. ذلك ويبلغ المعدل السنوي لكمية الطاقة من الإشعاع الشمسي المباشر (DNI) ٦,٩ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، ويبلغ ذروته صيفا بمعدل ٨,٣ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم في تبوك، الأمر الذي يشجع على استغلال الطاقة الشمسية الكهروضوئية Solar photovoltaic energy في منطقة الدراسة؛ وبخاصة تبوك.

- تبين من اختيار المواقع المناسبة لإقامة محطات الطاقة الشمسية، إلى أن المناطق الملائمة جدًّا تقع في جهة الشمال الغربي، تبلغ مساحتها ٧كم٢ بنسبة ٠,٠٠٤٪، وتتوافق النتائج مع موضع محطة ضباء الخضراء[٢٩]، أما المواقع الملائمة فتبلغ مساحتها نحو ٨٢٦٠ كم٢ بنسبة ٤٪. وأوضحت نتائج التنبؤ بحجم الإنتاج المستقبلي للطاقة ٢٠٢٩/ ٢٠٣٠، تذبذبه فصليا بين الصعود والهبوط، ويعد الصيف أعلى الفصول في كمية الطاقة المقدرة؛ حيث تقدر ٩كيلوواط/ ساعة/ م٢/ يوم، وأدناها الشتاء بقيمة مقدرة ٣كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، أما فصلا الاعتدال الربيع والخريف فتتجه فيهما كمية الطاقة نحو الاعتدال.

(٢٩) محطة ضباء الخضراء: مشروع يجري تنفيذه لإنشاء محطة توليد كهرباء، يقع في محافظة ضباء بمنطقة تبوك، وتعد المحطة واحدة من أكبر المحطات على مستوى العالم التي تعمل بنظام دمج الطاقة الشمسية مع الدورة المركبة.

- تشير نتائج التحليل إلى إمكانية ارتفاع كمية الطاقة الكهروضوئية ٢٠٣٠ في تبوك إلى ٩ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم، اعتمادا على تقديرات الطاقة المنتجة من الإشعاع الشمسي الكلي والمباشر. وأن أدنى قيمة لها يمكن أن تصل إلى ٦,٥ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم للإشعاع المباشر، و٤,٥ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم للإشعاع الكلي؛ نتيجة تباين المؤثرات الجوية الفصلية؛ وبخاصة الشتاء التي ترتفع فيه كميات السحب. وهي كميات تتناسب مع حجم معظم أنظمة الطاقة الشمسية التي يقدر أفضلها بمتوسط ٥ كيلو واط/ ساعة/ م٢/ يوم لتوليد طاقة كافية تغطي الاحتياجات من الطاقة الكهروضوئية، فوفق تقارير المختبر الوطني للطاقة المتجددة (National Renewable Energy (NREL Laboratory، يمكن أن تتراوح كمية ضوء الشمس التي يتم تلقيها يوميًا من حوالي ٢,٥ إلى ٧,٥ كيلو واط/ ساعة/ م٢، اعتمادًا على الموقع.

تكشف الدراسة بناء على ما توصلت إليه من نتائج، ووفق تقارير الوكالة الدولية للطاقة المتجددة International Renewable Energy Agency (IRENA)، التي تشير إلى انخفاض تكاليف مشاريع الطاقة الشمسية الكهروضوئية ٣٠٪ في منطقة الخليج العربي، وبخاصة المملكة العربية السعودية في ٢٠٢٢ بالمقارنة مع ٢٠٢١؛ إذ أصبحت السعودية ثاني أرخص الأسعار بعد الهند؛ حيث قدرت الدراسة تكلفة النظام الشمسي ٦٢٨ دولار/ ك وات، بما يعادل ٢٠٠ فلس/ وات، التي يعد سعر قياسي. توصي الدراسة بالآتي:

- تبنى وزارة الطاقة ومدينة الملك عبد الله للطاقة الذرية والمتجددة مجموعة من المحفزات والآليات لتحفيز المؤسسات والقطاعات الحكومية والعامة على استخدام الطاقة الشمسية، منها: توفير استشارات مجانية ومدعومة، وتطوير منصات إلكترونيه لعمليات التقديم والترخيص، وتطبيق آلية تعرية التغذية Fed-in Tariff لشراء فائض الطاقة.
- اعتماد الجهات المعنية على التقنيات الحديثة وتسهيل التعاون مع شركات التكنولوجيا، لنقل المعرفة وتوطين التقنيات منها: البرمجة والذكاء الاصطناعي؛ لدعم إجراءات المشاريع والبحوث المتخصصة في مجال الطاقة الشمسية.
- فتح مراكز بحثية متخصصة في مجال الطاقة الشمسية، في جامعات منطقة تبوك، بدعم من وزارتي الكهرباء والطاقة.
- إنشاء محطات قياس عناصر الإشعاع الشمسي تدعم مشاريع الطاقة الشمسية في منطقة تبوك.

ذلك ويمكن أن يسهم تنفيذ هذه التوصيات في توفير بيئة مشجعة على تبني الطاقة الشمسية، وتساعد في تحقيق أهداف رؤية ٢٠٣٠ لتعزيز التنمية المستدامة.

مساهمة المؤلفين

قام المؤلفان بالمشاركة في وضع الفكرة البحثية والقيام بالعمل العلمي، وقد ساهم المؤلف الأول في بنسبة ٦٠٪ منها: جمع البيانات ومعالجتها وإنتاج الخرائط والتحليل واستخلاص النتائج، وساهم المؤلف الثاني بنسبة ٤٠٪، منها: الجداول التحليلية وتفسير النتائج وتقسيم البحث وتبويبه والمراجعة العلمية.

الإفصاح والتصريحات:

تضارب المصالح: ليس لدى المؤلف أي مصالح مالية أو غير مالية ذات صلة للكشف عنها، والمؤلفون يعلنون عن عدم وجود أي تضارب في المصالح.

الوصول المفتوح: هذه المقالة مرخصة بموجب ترخيص إسناد الإبداع التشاركي غير تجاري 4.0 الدولي (CC BY-NC 4.0)، الذي يسمح بالاستخدام والمشاركة والتعديل والتوزيع وإعادة الإنتاج بأي وسيلة أو تنسيق، ما دام أنك

تمنح الاعتماد المناسب للمؤلف (المؤلفين) الأصليين. والمصدر، قم بتوفير رابط لترخيص المشاع الإبداعي، ووضح ما إذا تم إجراء تغييرات. يتم تضمين الصور أو المواد الأخرى التابعة لجهات خارجية في هذه المقالة في ترخيص المشاع الإبداعي الخاص بالمقالة، إلا إذا تمت الإشارة إلى خلاف ذلك في جزء المواد. إذا لم يتم تضمين المادة في ترخيص المشاع الإبداعي الخاص بالمقال وكان الاستخدام المقصود غير مسموح به بموجب اللوائح القانونية أو يتجاوز الاستخدام المسموح به، فسوف تحتاج إلى الحصول على إذن مباشر من صاحب حقوق الطبع والنشر. لعرض نسخة من هذا الترخيص، قم بزيارة:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0

الدعم المالي

لا يوجد أي دعم مالي من أي جهة.

الإهداء

يتوجه المؤلفون بالشكر إلى سعادة الدكتورة عنبرة خميس بلال السعود، وسعادة الدكتورة سلافة صلاح الدين عبدالقادر حاج الصافي، قسم الجغرافيا جامعة الملك سعود على مراجعتهم وملاحظاتهم القيمة للمادة البحثية، ودعمها العلمي.

المصادر والمراجع

المراجع العربية

أرشيد، مأمون أحمد. *اختيار الموقع الأمثل لإنشاء المحطات الكهروضوئية في الأردن باستخدام نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد*. الأردن: رسالة ماجستير غير منشورة، جامعة اليرموك، كلية الآداب، ٢٠١٧م.

بدران، إبراهيم، وشاكر مقبل، وعبد القادر عابد، *الطاقة أنواعها ومصادرها*. عمان: دار الفرقان للنشر والتوزيع،١٩٨٦.

البلوي، مطلق بن صياح. *منطقة تبوك في عهد الملك عبد العزيز ١٣٤٤-١٣٧٣هـ/١٩٢٦-١٩٥٣*. مكة: رسالة دكتوراه غير منشورة، جامعة أم القرى، كلية الشريعة والدراسات الإسلامية، ٢٠١٠.

الحياسي، مقبل محمد علي. *الإشعاع الشمسي والرياح ودورهما في إنتاج الطاقة في الجمهورية اليمنية: دراسة في الجغرافيا الاقتصادية*. ذمار، جامعة ذمار: رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب، قسم الجغرافيا، ٢٠١١.

داود، جمعة، وخالد الغامدي، ومسعد مندور، *تحديد أفضل المواقع لتجميع الطاقة الشمسية في منطقة مكة المكرمة الإدارية باستخدام نظم المعلومات الجغرافية متعددة المعايير*. الدمام: الملتقى الوطني الحادي عشر لتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في المملكة العربية السعودية، جامعة الإمام، ٢٠١٧.

الراوي، صباح محمود وعدنان هزاع البياتي، *أسس علم المناخ*، الموصل: جامعة الموصل، وزارة التعليم العالي والبحث العلمي، دار الحكمة للطباعة والنشر، ١٩٩٠.

زكري، يوسف محمد، الطاقة الشمسية وأوجه استخداماتها في ليبيا، *المجلة الليبية للدراسات*، ع١٥(يناير ٢٠١٤): ١٣٩- ١٥٤.

السهو، آلاء فهد عبد المحسن. *الطاقة الشمسية في المملكة العربية السعودية: دراسة في المناخ التطبيقي باستخدام نظم المعلومات الجغرافية*. الدمام: رسالة ماجستير غير منشورة، كلية الآداب، قسم الجغرافيا ونظم المعلومات الجغرافية، ٢٠١٨.

شرف، محمد إبراهيم محمد. *جغرافيا المناخ والبيئة*. جامعة الإسكندرية: دار المعرفة الجامعية، كلية الآداب، ٢٠٠٨.

شعباني، لطفي وسهام زرقان، وسهام موفق، دور السياحة في تحقيق التنمية المستدامة مع الإشارة لمشروع نيوم المشترك بين السعودية ومصر والأردن، *مجلة رماح للبحوث والدراسات*، ع٤٨ (نوفمبر ٢٠٢٠): ٧١-٧٣.

شهيد، نبيل، "حساب الإشعاع الشمسي الساعي بمساعدة الحاسوب"، *الطاقة والحياة*، ع٢٣، (٢٠٠٦).

فارس، أمينة. *أنظمة التسخين الشمسي-١-*. جامعة دمشق: قسم الميكانيك العام، كلية الهندسة الميكانيكية والكهرباء، ٢٠١٦.

فقيه، أشرف، الطاقة الشمسية تحت سقفها الواقعي، *مجلة القافلة*، *أرامكو السعودية*، ع١، مج٦٥، (٢٠١٦).

المعموري، غفران قاسم إسماعيل. *إمكانات استثمار الإشعاع الشمسي والرياح لتوليد الطاقة المتجددة في محافظة بابل*. جمهورية العراق: رسالة ماجستير غير منشورة، كلية التربية للعلوم الإنسانية، قسم الجغرافيا، ٢٠٢٠.

موسى، على. *المعجم الجغرافي المناخي*. دمشق: دار الفكر للطباعة والتوزيع والنشر، ١٩٨٥.

المراجع الأجنبية:

Al Garni, H. Z., & Awasthi, A. "Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia" Applied energy, 206, (2017): 1225-1240

Aksakal, A., & Rehman, S. "Global solar radiation in northeastern Saudi Arabia" Renewable Energy, 17(4), (1999): 461-472.

Alqahtani, N., & Balta-Ozkan, N. "Assessment of Rooftop Solar Power Generation to Meet Residential Loads in the City of Neom, Saudi Arabia" Energies, 14(13), (2021): 3805

Barnawi, Amin; Zohdy, Mohamed A; Hawsawi, Tarik."Determining the Factors Affecting Solar Energy Utilization in Saudi Housing: A Case Study in Makkah" Energies; Basel, 16, (20), (2023: 7196.

Bishop; Rossow."Spatial and temporal variability of global surface solar irradiance" J. Geophysical Research, 96 (C9), (1991):16. 839-16, 858

Dasari, H. P., Desamsetti, S., Langodan, S., Attada, R., Kunchala, R. K., Viswanadhapalli, Y., & Hoteit, I. "High-resolution assessment of solar energy resources over the Arabian Peninsula" Applied Energy, 248, (2019): 354 - 371.

Doljak, D., & Stanojević, G. "Evaluation of natural conditions for site selection of ground-mounted photovoltaic power plants in Serbia". Energy, 127, (2017): 291-300.

Farahat, Ashraf; Labban, Abdulhaleem H; Mashat, Abdul-Wahab S; Hasanean, Hosny M; Kambezidis, Harry D. "Status of Solar-Energy Adoption in GCC, Yemen, Iraq, and Jordan: Challenges and Carbon-Footprint Analysis". Clean Technologies; Basel, 6, (2), (2024):700.

Gao, Z., Yuan, T., Zhou, X., Ma, C., Ma, K., & Hui, P. "A deep learning method for improving the classification accuracy of SSMVEP-based BCI". IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 67 (12), (2020): 3447-3451.

Korstanje, J. (2021). "The AR Model. In Advanced Forecasting with Python Apress", Berkeley, CA, 45-69.

Mujabar, S., & Venkateswara, R. C. "Empirical models for estimating the global solar radiation of Jubail Industrial City, the Kingdom of Saudi Arabia". SN Applied Sciences, 3 (1), (2021): 1-11 .

Siouti, A., & Ali, A. B. "Evaluation of Solar Energy Potential for the Red Sea Project, Kingdom of Saudi Arabia". Natural Resources, 10(4), (2019): 96 -114.

Sun, L., Jiang, Y., Guo, Q., Ji, L., Xie, Y., Qiao, Q., & Xiao, K. "A GIS-based multi-criteria decision-making method for the potential assessment and suitable sites selection of PV and CSP plants". Resources, Conservation and Recycling, 168, (2021): 105306

Yadav, A. K., & Chandel, S. S. "Solar radiation prediction using Artificial Neural Network techniques: A review". Renewable and sustainable energy reviews, 33, (2014): 772-781.

Zell, E., Gasim, S., Wilcox, S., Katamoura, S., Stoffel, T., Shibli, H., & Al Subie, M. "Assessment of solar radiation resources in

Saudi Arabia". Solar Energy, 119, (2015): 422-438.

https://pandas.pydata.org/
_تمت زيارة الموقع والاطلاع في ٥ يناير ٢٠٢٣م
https://scikit-learn.org/stable/index.html
تمت زيارة الموقع والاطلاع في ٨ يناير ٢٠٢٣م
https://numpy.org/
تمت زيارة الموقع والاطلاع في ١٠ يناير ٢٠٢٣م
https://scipy.org/
تمت زيارة الموقع والاطلاع في ١٥ يناير ٢٠٢٣م
https://www.kacare.gov.sa/ar/Pages/fq.aspx
تمت زيارة الموقع والاطلاع في ١٨ يناير ٢٠٢٣م
https://bpmsg.com/ahp/ahp-calc.php
تمت زيارة الموقع والاطلاع في ٢٠ يناير ٢٠٢٣م
https://colab.research.google.com/
تمت زيارة الموقع والاطلاع في ٢٢ يناير ٢٠٢٣م
https://power.larc.nasa.gov/
تمت زيارة الموقع والاطلاع في ٢٨ يناير ٢٠٢٣م
https://www.dextragroup.com/ar/green-duba-integrated-solar-combined-cycle-power-plant/
تمت زيارة الموقع والاطلاع في ٥ فبراير ٢٠٢٣م
https://www.nrel.gov/
تمت زيارة الموقع والاطلاع في ١٣ يناير ٢٠٢٣م
https://www.irena.org/
تمت زيارة الموقع والاطلاع في ١٣ يناير ٢٠٢٣م.