

Research Article

Meeting Solar Energy Demands: Significance of
Transposition Models for Solar IrradianceSaid M. Abdulwahab ^{1*}, Yasser F. Nassar ², Hala J. El-Khozondar ³, Mohamed Khaleel ⁴, Abdussalam A. Ahmed ⁵, Abdulgader Alsharif ⁶¹ Mechanical & Renewable Energy Engineering, Wadi Alshatti University, Brack-Libya² Mechanical & Renewable Energy Engineering, Wadi Alshatti University, Brack-Libya³ Electrical Engineering and Smart System Department, The Islamic University of Gaza, Gaza, Palestine⁴ Research and Development of Department, College of Civil Aviation, Misrata, Libya⁵ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Bani Waleed University, Bani Waleed, Libya⁶ Department of Electrical & Electronics Engineering, Faculty of Technical Sciences – Sebha, Libya*Corresponding author: s.abdadulwahab@wau.edu.ly

Received: May 26, 2023

Accepted: July 20, 2023

Published: July 26, 2023

This is an open access article under the BY-CC license

Abstract: The article discusses an analytical study aimed at examining the validity of a wide range of models for converting horizontal solar radiation to tilted solar radiation. Total solar radiation and its components falling on an inclined surface with different tilt angles and orientations are crucial for improving the simulation and performance of solar energy systems. Despite their significance, such data is often not readily available, posing a challenge for engineers and researchers in obtaining reliable data for use in the design and optimization of solar energy systems. Eighteen different models for converting horizontal solar radiation to tilted solar radiation were analyzed. These models were carefully selected to represent a diverse range of climatic and geographic conditions in 220 cities around the world. The suitability of these models was evaluated based on scientific and technical criteria, with a focus on their accuracy and high reliability in converting horizontal solar radiation to tilted solar radiation. These results serve as an important foundation for engineers and researchers to select the appropriate model for use in simulating and designing solar energy systems, contributing to improving the performance of such systems and achieving better results. This study is expected to support technological advancements in the field of solar energy and enhance its reliance as a sustainable energy source in the future.

Keywords: Transposition Model; Global Solar Irradiation; Isotropic Sky Models; Anisotropic Sky Models.

تلبية متطلبات الطاقة الشمسية: أهمية نماذج التحويل للإشعاع الشمسي

سعید عبد الوهاب ^{1*}، ياسر نصار ²، هالة الخزندار ³، محمد خليل ⁴، عبد السلام احمد ⁵، عبد القادر الشریف ⁶¹ الهندسة الميكانيكية والطاقة المتجددة، جامعة وادي الشطي، براك، ليبيا² قسم الهندسة ميكانيكية وطاقة متجددة، جامعة وادي الشطي، براك، ليبيا³ قسم الهندسة الكهربائية والأنظمة الذكية، الجامعة الإسلامية بغزة، فلسطين⁴ قسم البحث والتطوير، كلية الطيران المدني، مصراتة - ليبيا⁵ قسم الهندسة الميكانيكية، كلية الهندسة، جامعة بني الوليد، بني الوليد - ليبيا⁶ قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية، كلية العلوم التقنية، سبها - ليبيا

المخلص: البحث يتناول دراسة تحليلية تهدف إلى فحص صلاحية مجموعة واسعة من نماذج تحويل الإشعاع الشمسي الأفقي إلى الإشعاع الشمسي المائل. يُعتبر الإشعاع الشمسي الكلي ومركباته المساقطة على سطح مائل بزوايا ميل واتجاهات مختلفة من الأهمية البالغة في تحسين محاكاة أنظمة الطاقة الشمسية وتحسين أداءها. وعلى الرغم من أهمية هذه البيانات، فإنها غالباً ما تكون غير متوفرة بشكل كامل، مما يشكل تحدياً أمام المهندسين والباحثين للحصول على بيانات موثوقة لاستخدامها في تصميم وتحسين أنظمة الطاقة الشمسية. تم تحليل 18 نموذجاً مختلفاً لتحويل الإشعاع الشمسي الأفقي إلى الإشعاع الشمسي المائل، وقد تم اختيار هذه النماذج بعناية

لتمثيل مجموعة متنوعة من الظروف المناخية والجغرافية في 220 مدينة حول العالم. تم تقييم صلاحية هذه النماذج بناءً على المعايير العلمية والتقنية، مع التركيز على قدرتها على تحويل الإشعاع الشمسي الأفقي إلى الإشعاع الشمسي المائل بدقة وموثوقية عالية. تعتبر هذه النتائج قاعدة مهمة للمهندسين والباحثين لاختيار النموذج المناسب لاستخدامه في محاكاة وتصميم أنظمة الطاقة الشمسية، وتساهم في تحسين أداء هذه الأنظمة وتحقيق أفضل النتائج. يتوقع أن تسهم هذه الدراسة في دعم التطورات التكنولوجية في مجال الطاقة الشمسية وتعزيز الاعتماد عليها كمصدر للطاقة المستدامة في المستقبل.

الكلمات الاستفتاحية: نموذج التحويل، الإشعاع الشمسي الكلي، نماذج السماء المتجانسة، نماذج السماء غير المتجانسة

1. المقدمة

تواجه البشرية العديد من التحديات في مجالات الاقتصاد، والطاقة، والبيئة ومحدودية الموارد الطبيعية، إلا أن التحدي الأكبر يتمثل في الجانب البيئي [1]. حيث يعتمد الاقتصاد العالمي في الأساس على الطاقة المستمدة من حرق الوقود الأحفوري، والذي يعتبر المصدر الأول لتلوث الهواء، وهذا بدوره يؤدي بشكل رئيسي إلى ظاهرة الاحتباس الحراري التي تزيد من درجة الحرارة على سطح الكرة الأرضية، مما يعرض وجود البشرية للخطر [2]. بالإضافة إلى خطر انصوب الوقود الأحفوري وعدم استقرار أسعاره، مما يهدد اقتصاد الدول الفقيرة ويحول دون تطورها [3]. ولحل هذه المشكلة يجب على العلماء وصناع القرار البحث عن مصادر بديلة للطاقة الأحفورية ووضع سياسات واستراتيجيات للتصدي للظواهر البيئية وتلطيف أضرار التلوث البيئي، ومساعدة الدول النامية في التحول نحو التطور الاقتصادي المستدام، وهو الذي يعود بفوائد اقتصادية واجتماعية وبيئية على كل البشرية [4-7]. ويعتبر قطاع صناعة الطاقة في العالم أحد أكثر القطاعات مساهمة في التدهور البيئي حيث يساهم بحوالي 35% من انبعاثات الغازات الدفيئة [8-11]. يعتبر توفير امدادات مستمرة وأمنة ونظيفة من جميع أنواع الطاقات تحدياً كبيراً، وخصوصاً الطاقة الكهربائية، حيث تعتبر الطاقة الكهربائية المحرك الفعلي لجميع الأنشطة البشرية بمختلف أشكالها الصناعية والسكنية والتجارية والزراعية وغيرها. بلغ استهلاك الكهرباء في العالم حوالي 28,510 TWh خلال العام 2022، مقابل 27,810 TWh في عام 2021، بزيادة سنوية بلغت 694T Wh، ما يعادل نسبة 2.5% [12-15]. ولحسن الحظ فإن سياسات الحد من التلوث وتلطيف تبعياته مدروسة جيداً على المستوى العالمي، حيث تم اعتماد العديد من الاستراتيجيات للتخفيف من الانبعاثات في العديد من القطاعات الصناعية بشكل عام وفي قطاع صناعة الطاقة بشكل خاص. وتم الأخذ في الاعتبار الخطوط العريضة للاستراتيجيات المستخدمة في الولايات المتحدة الأمريكية لتخفيف الانبعاثات [16-19].

أما في مجال توليد الكهرباء، فإن سياسات التخفيف من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري واضحة، وتتألف من استغلال الطاقة المتجددة مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية. وتركز العديد من الأبحاث على الجدوى الفنية والاقتصادية والبيئية للطاقات البديلة بالخاصة الطاقة الشمسية كمصدر مستدام للطاقة في العالم [20-24]. واستناداً إلى ما نشرته IEA/IRENA لسياسات الطاقة المتجددة، فقد كشف تقرير صادر عن القمة العالمية للحكومات 2023 أن الطاقة المتجددة ستساهم في توليد 60% من الكهرباء على مستوى العالم بحلول عام 2035، وسيأتي هذه المشاركة من طاقة الرياح والطاقة الشمسية المركزة والطاقة الشمسية الكهروضوئية وأنظمة التدفئة الشمسية. في هذا السياق، يعتبر تحديد قيمة الإشعاع الشمسي أول الخطوات في توطين صناعة الطاقة الشمسية، وتقديم تقارير الجدوى الاقتصادية لمشاريع الطاقة الشمسية لصانعي القرار والمستثمرين. ونظراً لمحدودية توفر البيانات المقاسة في محطات الأرصاد الجوية والتكاليف المرتفعة التي ينطوي عليها حساب مركبات الإشعاع الشمسي الساقط على الأسطح المائلة، فقد أصبح من الشائع الاعتماد على النماذج الرياضية التي تحول الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على السطح الأفقي إلى السطح المائل ويطلق عليها مصطلح (Plan of Array Transposition Models).

ومع ذلك فإن اختيار النموذج الأنسب لمنطقة محددة يعتبر مهماً للغاية، لأنها قد تكون مصدراً لعدم اليقين في النتائج، وهذا بدوره سيؤدي إلى اتخاذ قرارات غير صحيحة. يوجه العديد من الباحثين جهودهم نحو التحقق من صلاحية نماذج التحويل نظراً لأهميتها. وعلى وجه الخصوص، ركزت بعض الدراسات البحثية على التحقق من صحة هذه النماذج لمناطق معينة، وطور البعض الآخر نماذجاً أخرى لمطابقة البيانات المتاحة المتعلقة بالعديد من المناطق [25]. تكمن أهمية تحديد نماذج التحويل المناسبة في أن جميع برامج المحاكاة، وأيضاً دراسات زوايا الميل والاتجاه للواقط الشمسية (الواح فوتوضوئية أو مجمعات شمسية حرارية) وتقييم وتحليل الأداء الاقتصادي لمنظومات الطاقة الشمسية، وأيضاً حسابات الطاقة للمباني تعتمد بصورة كبيرة على دقة تقدير شدة الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على هذه الأسطح أو اللاقطات. تم تطوير العديد من برامج محاكاة أنظمة الطاقة الشمسية من قبل الهيئات التجارية والحكومية وذلك لتيسير عمليات تصميم وتقييم مشاريع الطاقة الشمسية تقنياً واقتصادياً. بالرغم من انتشارها الواسع في الأوساط العلمية والبحثية إلا أنه لا توجد نصائح محددة بالحدود المكانية لاستخدام هذه البرامج، تشير الدراسات أن لكل موقع نموذج تحويل محدد يمكن استخدامه لحساب الإشعاع الشمسي الساقط على الأسطح المائلة، والحيود عن هذا النموذج يؤدي إلى تقديرات غير دقيقة للإشعاع الشمسي، وهذا بدوره يؤدي إلى أخطاء في عمليات التقييم الاقتصادية والتقنية. الجدول (1) يبين برامج الطاقة الشمسية المستخدمة على نطاق واسع، تم ادراج اسم البرنامج والبلد ونموذج التحويل المستخدم في البرنامج في الجدول. يهدف هذا البحث إلى تحديد نموذج التحويل الأقل خطورة لأي موقع في العالم. كما تم تجربة 18 نموذجاً للتحويل الأكثر استخداماً على زوايا ميل عديدة من 10° إلى 90° لعدة مواقع حول العالم وبدون الحاجة إلى قياس الإشعاع الشمسي الكلي المائل.

تعتمد نماذج التحويل بشكل عام على القيم المقاسة للإشعاع الأفقي المنتشر من السماء (I_{dh}) والإشعاع الأفقي الكلي (I_h). وذلك لحساب شدة الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح مائل، علاوة على ذلك، يمكن استخدامها للحصول على زوايا الميل والاتجاه المثالية للمجمعات الشمسية (الحرارية والخلايا الشمسية) [26-29]. قام العديد من الباحثين بتطوير العديد من

نماذج تحويل الإشعاع الشمسي الساقط على السطح الافقي الى السطح المائل [30-31]. إلا أنه لا توجد طريقة حتى الآن يمكن من خلالها تحديد نموذج تحويل مناسب إلا بوجود قيمة الإشعاع الشمسي الكلي المائل للمنطقة المدروسة، وبالتالي أي دراسة تقوم بتقدير الإشعاع الشمسي أو إيجاد زاوية الميل المثالية بدون قياسات أرضية تعتبر غير دقيقة لوجود احتمال أن نموذج التحويل المعتمد في الدراسة لا يناسب المنطقة المحددة للدراسة، بل أكثر من ذلك، بينت هذه الدراسة أن نماذج التحويل يمكن ان تطابق حالة الدراسة في نطاق محدد من زوايا ميل السطح وأن دقته تضحل خارج هذا النطاق وبالتالي يجب الحذر عند تحديد زاوية الميل المثالية فزوايا الميل التي تتغير يمكن أن تخرج عن صلاحية نموذج التحويل المعتمد للدراسة، تبعاً لذلك تظهر الأبحاث تبايناً كبيراً في تقدير الإشعاع الشمسي الكلي المائل وحساب الزاوية المثالية لنفس الموقع، ويرجع السبب في ذلك التباين إلى اختلاف نماذج التحويل المستخدم لكل دراسة. تفتقر المراجع إلى دراسات مقارنة واضحة بين نماذج التحويل المختلفة، عادة يقوم الباحثون بتعيين أو بتطوير نموذجاً للتحويل يناسب منطقة الدراسة ويقوم بعرض قدرة النموذج المقترح على تمثيل البيانات المقاسة لموقع معين وزاوية ميل معينة وفترة زمنية محددة كما [32-42].

الجدول (1): بعض برامج المحاكاة وبنوك المعلومات ونماذج التحويل المستخدمة في كلا منها

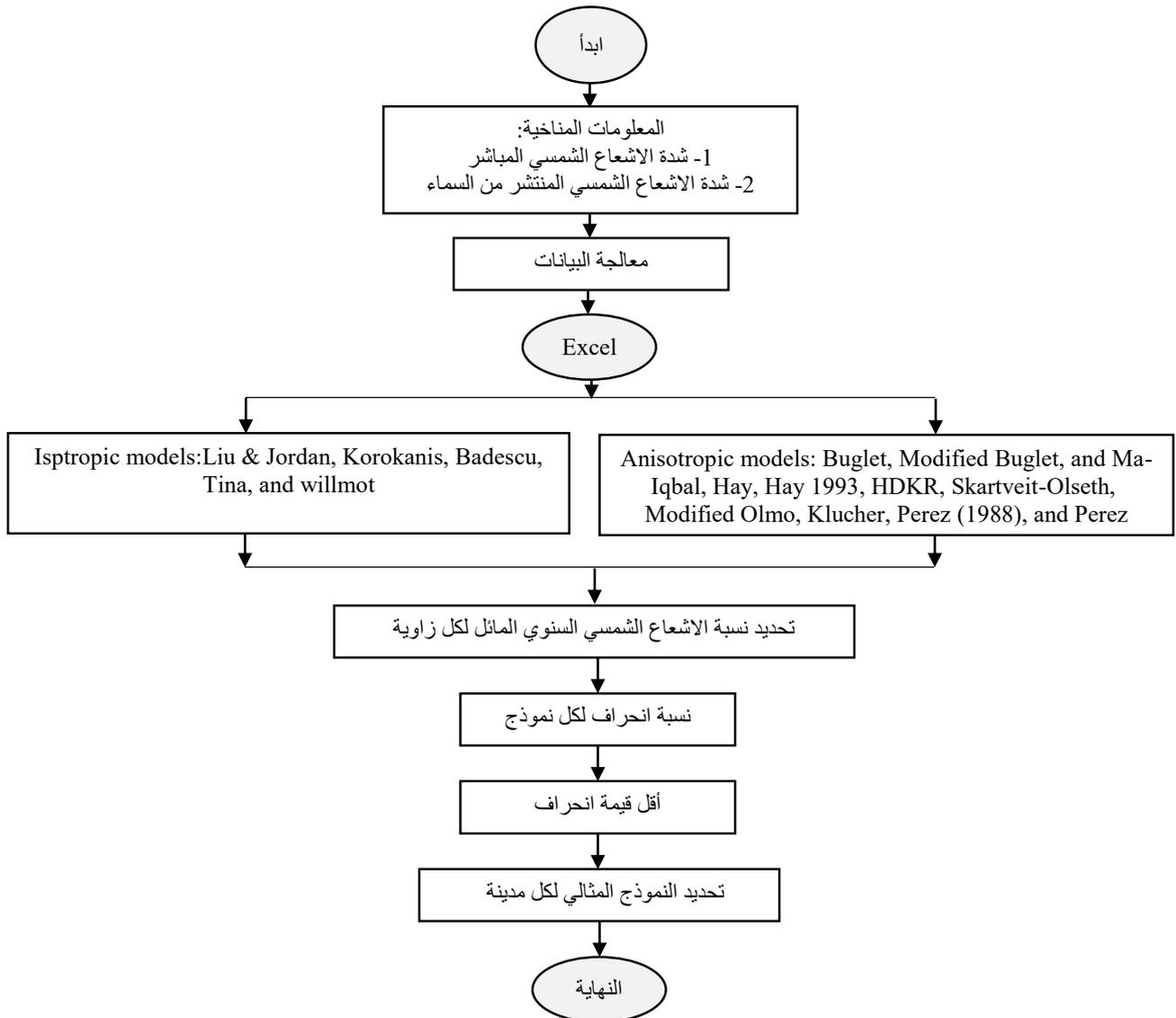
الرقم	البرنامج	الدولة المنتجة	نموذج التحويل المستخدم في البرنامج
1	EnergyPro	الدنمارك	HDKR
2	HOMER	الولايات المتحدة الأمريكية	HDKR
3	INSEL	ألمانيا	Liu & Jordan, Temps & Coulson, Bugler, Klucher, Hay, Willmott, Skartveit & Olseth, Gueymard, Perez, and HDKR
4	Matlab (Simulink)	الولايات المتحدة الأمريكية	Perez
5	Meteonorm	ألمانيا	Hay, Skartveit & Olseth, and Gueymard
6	Polysun	سويسرا	HDKR
7	PV F-chart	الولايات المتحدة الأمريكية	Liu & Jordan
8	PV*Sol	ألمانيا	Skartveit & Olseth, HDKR, and Perez
9	PVDesign Pro	بريطانيا	HDKR and Perez
10	PVForm	الولايات المتحدة الأمريكية	Perez
11	PVGIS	سلوفاكيا	Muneer
12	PVplanner	سلوفاكيا	Perez
13	PVSyst	سويسرا	Hay, and Perez
14	PVToolbox	كندا	Liu & Jordan
15	PVWatts	الولايات المتحدة الأمريكية	Perez
16	RETscreen	كندا	Liu & Jordan
17	SAM	الولايات المتحدة الأمريكية	Liu & Jordan, Perez, and HDKR
18	SimulationX	ألمانيا	Liu & Jordan
19	TRNSYS	الولايات المتحدة الأمريكية	HDKR

2. المواد وطرق العمل

بدأت منهجية البحث بعرض 18 نموذجاً للتحويل الأكثر استخداماً حول العالم وتم الحصول على البيانات المناخية للمواقع المختارة أخيراً تم تقديم طريقة إحصائية لمعرفة النموذج الأقل خطورة عند كل مدينة. ويبين الشكل (1) تدفق البيانات وسير العمليات الحسابية المتبعة في البحث.

1.2. الإشعاع الشمسي على الاسطح المائلة

تساهم امالة اللاقطات الشمسية الى زاوية الميل المثالية في زيادة كفاءة استخدام الطاقة الشمسية وتحسين أداء الخلايا الشمسية. وتستخدم نماذج التحويل لتحديد أفضل زاوية ميلان للواقط الشمسية. يبين الشكل (2) رسماً توضيحياً باستخدام سحابة الكلمات (word cloud) لتوضيح النماذج الأكثر استخداماً في المراجع العلمية، حيث تم مراجعة 185 مقالة علمياً نشرت خلال عامي 2022-2023. تبين من مراجعة الأبحاث ان النموذج الأكثر استخداماً وخاصة في حساب زاوية الميل المثالية للمجمعات الشمسية هو نموذج Liu & Jordan، وغالباً ما يستخدم هذا النموذج مع عدم وجود أي دلالة لصلاحية هذا النموذج للمنطقة المدروسة، وهذا يعطى أهمية لهذه الدراسة [32-42].



الشكل (1): المخطط الانسيابي لمنهجية البحث



الشكل (2): سحابة الكلمات لتكرار استخدام نماذج التحويل في الأبحاث

2.2. البيانات المناخية ومواقع الدراسة

تم الحصول على مركبات الإشعاع الشمسي الأفقي (الإشعاع الشمسي المباشر والإشعاع الشمسي المنتشر من السماء) من منصة Solcast (<https://solcast.com/>). اختيرت المواقع الخاضعة للدراسة بعناية لتغطي التباين الواسع في المواقع

الجغرافية والمناخ والتضاريس والبيئة، وزعت على كافة الكرة الأرضية. وكانت 45 موقعاً في إفريقيا و45 موقعاً في أوروبا و46 موقعاً في آسيا و45 موقعاً في أمريكا الشمالية و12 موقعاً في أمريكا الجنوبية، كما هو موضح في الشكل (3)، وذلك لتحديد المعالم الأساسية التي تؤثر على نوع نموذج التحويل.



الشكل (3): مواقع الدراسة

3.2. نماذج التحويل

تتطلب نماذج التحويل بيانات عن الإشعاع الشمسي الأفقي المباشر (I_{bh}) والمنتشر من السماء (I_{dh})، وهذه القيم يمكن قياسها في محطات الرصد الجوية مباشرة. ولتقدير الإشعاع الشمسي الكلي على سطح مائل (I_t). يحتوي I_h على مكونين، الشعاع المباشر (I_{bh}) والمنتشر من السماء (I_{dh}) [43].

$$I_h = I_{bh} + I_{dh} \quad (1)$$

ويقدر الإشعاع الشمسي العمودي المباشر (IDN) بالعلاقة [44,45]:

$$IDN = \frac{I_{bh}}{\cos \theta_z} \quad (2)$$

تقوم نماذج التحويل بتحويل الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي إلى سطح مائل بزواوية (β)، وبالتالي فإن الإشعاع الكلي المائل (I_t) يمكن صياغته على الصورة التالية:

$$I_t = I_{bt} + I_{dt} + I_{rt} \quad (3)$$

ترتب المعادلة (3) لتتضمن البيانات المناخية المقاسة I_{bh} و I_{dh} لتصبح على الصورة التالية:

$$I_t = I_{bh} R_b + I_{dh} R_d + I_h R_r \quad (4)$$

يعطى معامل التحويل R_b كدالة للمعاملات الهندسية للسطح المائل وموضع الشمس بواسطة:

$$R_b = \max \left(\frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z}, 0 \right) \quad (5)$$

حيث: θ_i ، θ_z تمثلان زاوية سقوط الإشعاع الشمسي وزاوية السم، على التوالي. وبالمثل، R_r يمثل معامل التحويل للإشعاع الشمسي المنعكس من الأرض، ويمكن اعتبار أن الأرض متجانسة ويعطى بالعلاقة التالية:

$$R_r = \rho_g \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (6)$$

حيث: ρ_g يمثل انعكاسية الأرض أو ما يسمى "الالبيدو"، وتقدر عموماً بحوالي 0.2. وهناك بعض المراجع تعرض قيم مخالفة لهذه القيمة حيث تم قياس قيمة انعكاسية الأرض لمدينة مرزق وكانت تساوي تقريباً 0.4. بينما اعطتها مؤسسة SANDIA كدالة في زاوية السم θ_z على النحو التالي [43,44]:

$$\rho_g = 6 \times 10^{-4} \theta_z + 0.35 \quad (7)$$

معادلات لانعكاسية الارض لمعامل تحويل الأرض R_r بواسطة [44]:

$$R_r = \rho_g |\cos \psi| \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \left[1 + \sin^2 \left(\frac{\theta_z}{2} \right) \right] \quad (8)$$

حيث ψ تمثل زاوية اتجاه السطح.

ينتج الإشعاع المنتشر عن تشتت الإشعاع الشمسي بواسطة المكونات المختلفة للغلاف الجوي. يمكن تقسيم نماذج التحويل إلى فئتين: السماء المتجانسة والسماء غير المتجانسة. وسيتم عرض النماذج الأكثر استخداماً للفئتين [45-54].

1.3.2. نماذج السماء المتجانسة

1. Liu & Jordan model [55]
$$R_{dL} = \frac{(1 + \cos \beta)}{2} \quad (9)$$

2. Korokanis model [56]
$$R_d = \frac{1}{3} (2 + \cos \beta) \quad (10)$$

3. Badescu model [57]
$$R_d = \frac{(3 + \cos 2\beta)}{4} \quad (11)$$

4. Tian model [58]
$$R_d = 1 - \frac{\beta}{180}, \quad \beta \text{ is given in degrees} \quad (12)$$

5. Willmot model [59]
$$R_d = \frac{I_{bn} R_b}{I_0} + C_\beta \left(1 + \frac{I_{bn}}{I_{sc}} \right) \quad (13)$$

$$I_{bn} = \frac{I_b}{\cos \theta_z},$$

$$C_\beta = 1.0115 - 0.20293\beta$$

$$- 0.080823\beta^2$$

β is in radians, and $I_{sc} = 1367 \text{ W/m}^2$

2.3.2. النماذج السماء غير المتجانسة

6. Bugler model [60]
$$R_d = R_{dL} + 0.05 \frac{I_{bh}}{I_d} R_b \quad (14)$$

7. Modified Bugler model [61]
$$R_d = \left(1 - 0.05 \frac{I_{bh}}{I_d} \right) R_{dL} + 0.05 \frac{I_{bh}}{I_d} R_b \quad (15)$$

8. Ma-Iqbal model [62]
$$R_d = k_t R_b + (1 - k_t) R_{dL} \quad (16)$$

$$k_t = \frac{I_h}{I_{ext}}$$

9. Modified Ma-Iqbal model [63]
$$R_d = \hat{k}_t R_b + (1 - \hat{k}_t) R_{dL} \quad (17)$$

$$\hat{k}_t = \frac{I_h / I_{ext}}{1.031 \exp \left(\frac{-1.4}{0.9 + \frac{9.4}{M}} \right) + 0.1}$$

- $$M = [\cos \theta_z + 0.15(93.885 - \theta_z)^{-1.253}]^{-1}$$
10. Steven & Unsworth model [64] $R_d = 0.143 \left[\sin \beta - \beta \cos \beta - \pi \sin^2 \frac{\beta}{2} \right] + R_{dL}$ (18)
11. Hay model [65] $R_d = F_{Hay} R_b + (1 - F_{Hay}) R_{dL}$ (19)
 $F_{Hay} = I_{bh} / I_{ext}$
12. Hay model [66] $R_d = \hat{F}_{Hay} R_b + (1 - \hat{F}_{Hay}) \cos^2 \left(\frac{\beta}{2} \right)$ (20)
 $\hat{F}_{Hay} = I_{bh} / I_{sc}$
13. HDKR model [67] $R_d = F_{Hay} R_b + (1 - F_{Hay}) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^2 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right]$ (21)
 $F_{Hay} = \frac{I_{bh} f}{I_{ext}} = \sqrt{\frac{I_{bh}}{I_h}}$
14. Skartveit & Olseth [68] $R_d = F_{Hay} R_b + Z \cos \beta + (1 - F_{Hay} - Z) R_{dL}$ (22)
 $Z = \max[(0.3 - 2F_{Hay}), 0]$
15. Modified Olmo model [69] $R_d = F_{Hay} R_b + (1 - F_{Hay}) R_{dL} \left[1 + f \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right]$ (23)
 $f = \sqrt{(I_{bh} / I_h)}$
16. Klucher model [70] $R_d = R_{dL} (1 + f_k \cos^2 \theta_i \sin^3 \theta_z) \left(1 + f_k \sin^3 \left(\frac{\beta}{2} \right) \right)$ (24)
 $f_k = 1 - \left(\frac{I_{dh}}{I_h} \right)^2$
17. Perez model [71] $R_d = F_1 \frac{a}{b} + (1 - F_1) R_{dL} + F_2 \sin \beta$ (25)
18. Perez model [71] $b = \max(\cos 85^\circ, \sin \gamma), a = \max(0, \cos \theta_i)$
 $F_1 = F_{11}(\varepsilon) + F_{12}(\varepsilon) \Delta + F_{13}(\varepsilon) \theta_z$
 $F_2 = F_{21}(\varepsilon) + F_{22}(\varepsilon) \Delta + F_{23}(\varepsilon) \theta_z$
 $\varepsilon = \frac{\frac{I_h}{I_{dh}} + 1.041 \theta_z^3}{1 + 1.041 \theta_z^3}$

$$\Delta = M \frac{I_{dh}}{I_{ext}}$$

$$M = \frac{1}{\cos \theta_z}$$

جدول 2: معاملات نموذج Perez (1988) [71]

ϵ	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
0-1.065	-0.196	1.084	-0.006	-0.114	0.180	-0.019
1.065-1.23	0.236	0.519	-0.180	-0.011	0.020	-0.038
1.230-1.50	0.454	0.321	-0.255	0.072	-0.098	-0.046
1.500-1.95	0.866	-0.381	-0.375	0.203	-0.403	-0.049
1.950-2.80	1.026	-0.711	-0.426	0.273	-0.602	-0.061
2.800-4.50	0.978	-0.986	-0.350	0.280	-0.915	-0.024
4.500-6.20	0.748	-0.913	-0.236	0.173	-1.045	0.065
>6.200	0.318	-0.757	0.103	0.062	-1.698	0.236

جدول 3: معاملات نموذج Perez (1990) [72]

ϵ	F_{11}	F_{12}	F_{13}	F_{21}	F_{22}	F_{23}
1.000-1.065	-0.008	0.588	-0.062	-0.060	0.072	-0.022
1.065-1.230	0.130	0.683	-0.151	-0.019	0.066	-0.029
1.230-1.500	0.330	0.487	-0.221	0.055	-0.064	-0.026
1.500-1.950	0.568	0.187	-0.295	0.109	-0.152	-0.014
1.950-2.800	0.873	-0.392	-0.362	0.226	-0.462	0.001
2.800-4.500	1.132	-1.237	-0.4112	0.288	-0.823	0.056
4.500-6.200	1.060	-1.600	-0.359	0.264	-1.127	0.131
>6.200	0.678	-0.3327	-0.250	0.156	-1.377	0.251

4.2. حساب معدل الانحراف (DR)

يعد معدل الانحراف لنموذج معين (DR_i) هي النقطة الحاسمة في هذا البحث، ويتم التعبير عنه على النحو التالي:

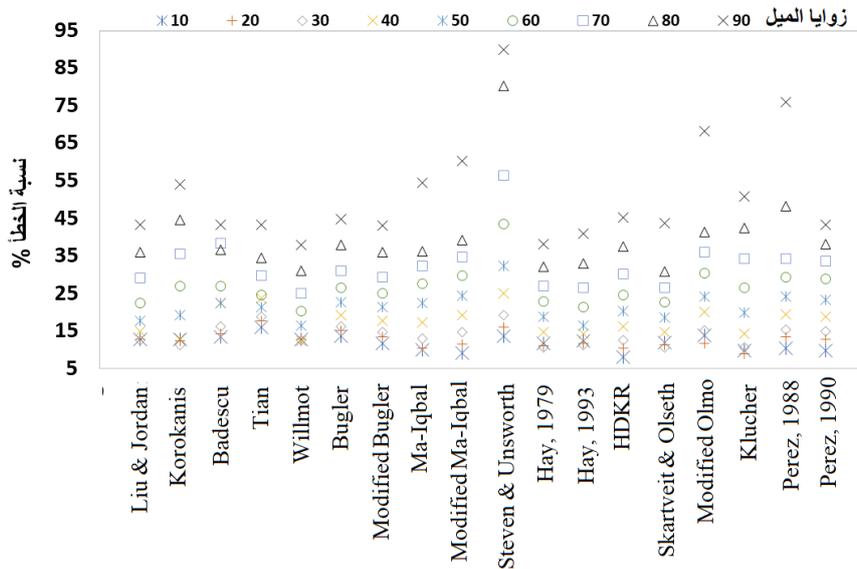
$$DR_i\% = \frac{I_{t,i} - I_{t,j}}{I_{t,i}} \times 100 \quad (26)$$

$$i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, n \text{ and } i \neq j$$

حيث (t, i) هو الإشعاع الشمسي العالمي المائل السنوي المحسوب باستخدام نموذج التحويل (i). بالنسبة للنماذج 18 المدروسة، فإن عدد معدلات الانحراف لكل نموذج تحويل هو 17 قيم ومن ثم سيتم اختيار أكبر قيمة.

3. النتائج والمناقشة

يوضح الشكل (3) متوسط نسبة الخطأ عند تبني النموذج الخاطئ بالنسبة للنموذج الصحيح عند كل زاوية ميل.



الشكل (3): نسبة الخطأ للنماذج

يتبين من الشكل (3) انه كلما زادت زاوية الميل يصبح اختيار نموذج التحويل اكثر حساسية وتتعاظم نسبة الخطأ عند الاسطح العمودية للتراوح بين 35% - 90%. تم في هذا البحث الحصول على نموذج التحويل الاقل خطورة لجميع المدن ودرجت في الجدول (4). تشير الاعداد في الجول الى رقم نموذج التحويل في الفقرة (3.2). كما تم مقارنة النتائج المتحصل عليها مع نتائج ابحاث اخرى ودرجت المقارنة في الجدول (5).

الجدول (4): قائمة بنماذج التحويل الاقل خطورة المتحصل عليها في هذه الدراسة لعدة زوايا ميل للخلايا الشمسية

زاوية ميل السطح									المدينة	الدولة	القارة
90	80	70	60	50	40	30	20	10			
17	4	4	4	1	1	2	11	9	أتلانتا	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
17	4	1	1	1	2	5	11	18	أثينا	اليونان	اوربا
17	4	4	4	1	1	5	5	11	إسلام آباد	باكستان	اسيا
11	14	9	4	15	5	14	1	18	أكرا	غانا	افريقيا
6	17	4	1	5	5	1	2	9	أمستردام	هولندا	اوربا
5	8	9	4	5	5	14	9	18	أنجمنينا	تشاد	افريقيا
14	4	4	1	1	1	2	14	8	إنديانابوليس	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
12	4	4	1	1	5	12	11	13	أنقرة	تركيا	اروبا
14	17	4	4	1	1	2	11	9	أوستن	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
17	17	4	4	1	1	12	11	9	أوكلاهوما سيتي	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
14	14	4	4	1	1	11	15	18	باتون روج	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
14	17	17	4	4	5	16	12	8	باريس	فرنسا	اوربا
17	17	4	4	1	1	12	14	13	برشلونة	اسبانيا	اوربا
18	17	17	4	5	5	1	11	13	برلين	المانيا	اوربا
12	1	1	1	12	5	14	14	11	برمنغهام	برمنغهام	اوربا
12	4	17	17	1	1	12	17	13	بروفيدانس	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
14	17	4	4	5	5	1	2	13	بروكسل	بلجيكا	اوربا
17	17	4	4	1	1	2	17	13	البصرة	العراق	اسيا
14	8	15	4	15	15	14	9	7	بمكا	مالي	افريقيا
17	1	1	1	1	2	12	5	7	بودغوريتشا	الجيل الأسود	اوربا
14	1	1	17	1	2	12	14	8	بوسطن	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
14	4	4	4	5	12	11	13	16	بويسبي	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية

14	1	1	1	12	12	14	14	13	بيشكيك	قيرغيزستان	اسيا
9	14	14	4	14	14	7	17	5	تالاهاسي	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
14	4	4	4	1	1	5	2	11	تاويوان	الصين	اسيا
4	1	1	1	1	2	5	12	7	ثيليبسي	جورجيا	اسيا
14	4	4	1	1	1	2	12	13	توييكا	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
14	14	4	5	5	1	11	15	8	تورونتو	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
12	4	4	4	5	12	11	11	14	تونس	تونس	افريقيا
4	4	1	1	1	2	12	5	7	تيرانا	ألبانيا	اوربا
14	4	4	4	1	1	5	2	11	تيمفو	بوتان	اسيا
17	17	17	1	17	17	17	17	5	الجزائر	الجزائر	افريقيا
4	1	1	1	2	7	7	7	14	الخرطوم	السودان	افريقيا
5	8	9	8	5	8	9	13	16	داكار	السنغال	افريقيا
12	1	1	1	12	5	14	14	8	دبلن	أيرلندا	اوربا
17	17	4	4	4	1	1	12	8	دكا	بنغلاديش	اسيا
17	4	4	1	2	1	11	8	16	دمشق	سوريا	اسيا
12	1	1	1	1	2	12	5	8	دنفر	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
14	4	4	1	1	1	2	12	13	دي موين	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
4	4	17	17	1	5	12	17	7	ديفيدسون	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
17	4	4	4	1	1	5	12	8	رالي	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
17	4	4	1	1	2	5	17	13	الرباط	المغرب	افريقيا
4	1	1	1	2	2	12	12	7	روما	إيطاليا	اروبا
1	4	4	1	1	2	17	17	15	الرياض	السعودية	اسيا
4	1	1	1	12	2	5	12	11	زغرب	كرواتيا	اوربا
16	18	18	18	18	18	18	17	5	ساكرمينتو	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
12	1	1	1	1	5	2	12	11	سايلم	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
14	14	4	5	5	1	11	16	18	ساينت بول	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
14	4	4	1	1	1	12	12	11	سبرينغفيلد	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
14	4	4	1	1	7	12	12	12	شينينغ	الصين	اسيا
5	8	15	15	15	9	7	13	16	صنعاء	اليمن	اسيا
4	4	1	1	1	2	12	12	11	الصين	بكين	اسيا
12	17	4	17	1	7	5	5	14	طرابلس	ليبيا	افريقيا
17	17	4	4	1	1	7	17	13	طهران	ايران	اسيا
8	8	8	8	8	8	8	8	8	طوكيو	اليابان	اسيا
4	4	4	1	5	14	13	13	11	عمان	الاردن	اسيا
12	4	1	1	2	11	8	16	16	غزة	فلسطين	اسيا
14	6	1	1	1	5	12	5	5	غلازغو	اسكتلندا	اوربا
14	4	4	4	5	5	12	15	13	فادوز	ليختنشتاين	اوربا
17	17	4	1	1	2	12	17	13	فالييتا	مالطا	اوربا
4	4	4	4	14	14	7	13	5	فانكوفر	كندا	أمريكا الشمالية
9	17	4	4	5	5	12	11	9	فيينبوس	ليتوانيا	اوروبا
17	4	4	1	1	2	14	17	7	فينيكس	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
7	14	4	4	5	5	12	11	9	فيينا	النمسا	اوروبا
17	4	4	1	1	1	12	14	17	القاهرة	مصر	افريقيا
14	4	4	1	1	2	14	13	18	كابل	أفغانستان	اسيا
14	4	4	4	1	1	5	5	11	كاتماندو	نيبال	اسيا
14	4	1	1	1	2	5	5	8	كوالالمبور	ماليزيا	اسيا
17	17	4	4	1	1	1	1	12	كولومبس	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
14	4	4	4	1	1	2	14	13	كولومبيا	كولومبيا	أمريكا الجنوبية
14	1	1	1	12	5	5	5	11	كولونيا	المانيا	اوربا
5	8	15	4	17	5	12	8	7	كوناكري	غينيا	افريقيا
12	17	4	17	1	2	14	8	13	الكويت	الكويت	اسيا
14	1	1	12	12	5	14	14	11	كييف	أوكرانيا	اوربا
14	14	1	1	1	12	11	11	13	لانسنج	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية

17	4	1	1	1	2	5	11	9	لشبونة	البرتغال	اوربا
14	4	1	1	1	2	12	14	8	لندن	بريطانيا	اوربا
5	1	5	5	5	5	1	1	15	لندن	انجلترا	اوربا
5	18	18	8	9	5	8	9	10	ليبيريل	الغابون	افريقيا
14	17	4	4	17	1	14	12	13	ليتل روك	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
17	1	1	1	2	12	5	12	7	مارسيليا	فرنسا	اوربا
15	14	9	17	15	5	17	17	18	مالي	مالي	افريقيا
12	1	1	12	5	14	11	11	8	مانشستر	انجلترا	اوربا
17	17	4	4	1	1	7	5	18	مدريد	اسبانيا	اوربا
8	4	17	17	1	17	14	8	13	مسقط	الامارات	اسيا
4	14	1	1	1	2	16	8	18	موسكو	روسيا	اوربا
4	4	6	6	1	1	7	12	5	مونتريال	كندا	أمريكا الشمالية
14	8	15	4	15	15	5	1	9	مونروفيا	ليبيريا	افريقيا
12	12	12	12	2	5	14	14	11	مينسك	روسيا البيضاء	اسيا
17	17	4	4	1	1	7	12	8	نابولي	إيطاليا	اوربا
14	9	4	5	5	14	9	13	16	نواكشوط	موريتانيا	افريقيا
14	8	9	4	17	5	12	8	18	نيامي	النيجر	افريقيا
17	1	1	1	2	12	12	12	17	نيس	فرنسا	اوربا
14	4	4	4	1	1	2	12	13	نيودلهي	الهند	اسيا
14	4	4	5	5	12	11	15	18	هارتفورد	الولايات المتحدة الامريكية	أمريكا الشمالية
14	1	1	1	12	12	14	14	11	هامبورغ	المانيا	اوربا
18	12	5	5	14	1	7	7	16	هرجيسا	الصومال	افريقيا
5	14	8	9	9	5	9	1	18	ياوندي	الكاميرون	افريقيا

الجدول (5): مقارنة بين نماذج التحويل المتحصل عليها من هذه الدراسة مع نماذج التحويل الموصي بها من دراسات أخرى

الدولة	المدينة	نماذج التحويل	المرجع	النموذج المقترح في هذه الدراسة	نسبة الانحراف
مصر	القاهرة	Hay (1979)	[72]	Hay, 1993	4.1
إيران	كارج	Skartveit and Olseth	[27]	Modified Bugler	3.7
عراق	بغداد	Liu and Jordan	[73]	Korokanis	4.0
ليبيا	طرابلس	Liu and Jordan	[74]	Modified Bugler	3.8
عمان	مسقط	Perez, 1990	[75]	Perez, 1988	5.0
السعودية	الرياض	Liu and Jordan	[76]	Perez, 1988	3.4
الصين	هونج كونج	Perez, 1990	[77]	Willmot	5.9
فرنسا	رينيون	Perez, 1990	[78]	Klucher	4.1
الهند	بهبال	Perez, 1988	[79]	Korokanis	6.6
بلجيكا	بروكسل	Willmot	[80]	Liu and Jordan	5.0
ماليزيا	سارواك	Liu and Jordan	[81]	Willmot	8.2
الدنمارك	كوبنهاغن	Perez, 1990	[82]	Perez, 1988	4.1
تركمانستان	اسغابات	Liu and Jordan	[83]	Tian	3.9
فلسطين	القدس	HDKR	[84]	Ma-Iqbal	5.4
الإمارات	حبل هافيت	Perez, 1990	[85]	Perez, 1988	4.1
إيطاليا	بادوفا	HDKR	[86]	Skartveit & Olseth	2.6
اليونان	اثينا	Tian	[87]	Tian	0
اليابان	طوكيو	Perez, 1988	[89]	Ma-Iqbal	4.6
اسبانيا	سيفيل	Perez, 1988	[90]	Hay, 1993	3.8
جنوب افريقيا	كالابولت	Perez, 1988	[91]	Skartveit & Olseth	6.5
المانيا	هانوفار	HDKR	[92]	Skartveit & Olseth	6.4
النمسا	فيينا	Perez, 1988	[93]	Hay, 1993	5.1
ليبيا	سبها	Liu and Jordan	[72]	Wollmit	3.1
الصين	بيكين	Munner	[94]	Hay, 1993	6.1
نيوزيلندا	قراسفيلد	Liu and Jordan	[95]	Tian	2.2

6.5	Modified Bugler	[96]	Perez, 1990	سليسيا	بولندا
-----	-----------------	------	-------------	--------	--------

يتبين من الجدول أن نسبة الخطأ لبعض المدن التي تم مقارنتها تتراوح بين 0% - 8.2% وبمتوسط لا يتعدى 4.6% لكل مدن العالم وهو ما يعادل حوالي $60 \pm \text{kW/m}^2/\text{year}$ ، وهذه النسبة صغيرة جدا مقارنة بالنسب المدرجة في الشكل (3) لزاويا ميل 30° والتي كانت في حدود 30%.

4. الاستنتاجات

يعزز هذا العمل الجهود التي تبذلها دول العالم للتحويل إلى الطاقات المتجددة من أجل تلطيف الاثار السلبية الناجمة عن التلوث البيئي والحفاظ على النظام البيئي. في هذا السياق، يتحقق العمل الحالي من صلاحية 18 نموذجاً لتحويل الاشعاع الشمسي الافقي الى المائل لحوالي 220 مدينة حول العالم ودون الحاجة إلى بيانات مقاسة. حيث تطلبت الدراسة معرفة قيم الاشعاع الشمسي الافقي الكلي والاشعاع الشمسي المنتشر من السماء الافق فقط لاجراء التحليل معرفة النموذج الاقل خطأ. كما أظهرت هذه الدراسة أن نموذج التحويل الصحيح يعتمد بصورة كبيرة على زاوية ميل المجمع الشمسي بالإضافة إلى الموقع. كان النهج المقترح قادرا على معرفة نموذج التحويل الأكثر دقة لكل موقع وأيضاً لكل زاوية ميل. كما تم مقارنة النتائج المتحصل عليها مع توصيات بعض المراجع لنماذج تحويل لمواقع محددة، وكانت نسبة الخطأ لا تتعدى 5% لجميع المدن؛ اي ما يعادل $60 \text{ kW/m}^2 \pm$ في السنة. وهذا يشجع المؤلفين بتوصية هذا النهج لتحديد نماذج تحويل أكثر دقة لمناطق أوسع حول العالم. أخيراً، يوصى المؤلفين بتوخي الحذر عند اعتماد نموذج تحويل معين تم التحقق من صحته عند زاوية معينة ويطبق على جميع زوايا الميل الاخرى وخاصة الزوايا العالية مثل العمودية كواجهات المباني.

مساهمات المؤلفين: قدم المؤلفون المدرجون مساهمة جوهرية ومباشرة وفكرية في العمل ووافقوا جميعاً على النشر.

التمويل: لم يتلق هذا البحث أي تمويل خارجي.

بيان توفر البيانات: لا ينطبق.

شكر وتقدير: نود أن ننتهز هذه الفرصة للتعبير عن خالص امتناني لجامعة وادي الشاطي وجامعة بني وليد وكلية الطيران المدني مصراتة على دعمهم الذي لا يقدر بثمن خلال بحثنا.

تضارب المصالح: يعلن المؤلفون عن عدم وجود أي تضارب في المصالح.

References

- [1] Y. Nassar, K. Aissa, and S. Alsadi, "Air Pollution Sources in Libya," *Research & Reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 63–79, 2018.
- [2] Y. Nassar, K. Aissa, and S. Alsadi, "Estimation of Environmental Damage Costs from CO2e Emissions in Libya and the Revenue from Carbon Tax Implementation," *Low Carbon Economic*, vol. 8, pp. 118–132, 2017.
- [3] A. Almabrouk and S. Abulifa, "The Technology of Renewable Energy and Its Role in Achieving Sustainable Development," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 2, pp. 1–9, 2023.
- [4] M. M. Khaleel, M. R. Adzman, and S. M. Zali, "An integrated of hydrogen fuel cell to distribution network system: Challenging and opportunity for D-STATCOM," *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 7073, 2021.
- [5] M. Andeef et al., "The Role of Renewable Energies in Achieving a More Secure and Stable Future," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 2, pp. 11–20, 2023.
- [6] Y. Nassar, M. Salem, K. Iessa, I. Alshareef, K. Ali, and M. Fakher, "Estimation of CO2 emission factor for the energy industry sector in libya: a case study, Environment," *Environment, Development and Sustainability*, vol. 23, pp. 13998–14026, 2021.
- [7] M. E. Agbor, S. O. Udo, I. O. Ewona, S. C. Nwokolo, J. C. Ogbulezie, and S. O. Amadi, "Potential impacts of climate change on global solar radiation and PV output using the CMIP6 model in West Africa," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 13, no. 100630, p. 100630, 2023.
- [8] A. Steynor, L. Pasquini, A. Thatcher, and B. Hewitson, "Understanding the links between climate change risk perceptions and the action response to inform climate services interventions," *Risk Anal.*, vol. 41, no. 10, pp. 1873–1889, 2021.
- [9] S. K. Opoku, W. Leal Filho, F. Hubert, and O. Adejumo, "Climate change and health preparedness in Africa: Analysing trends in six African countries," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 18, no. 9, p. 4672, 2021.
- [10] S. Yousif, A. Salem, Y. Nassar, and I. Bader, "Investigation of pollutants dispersion from power stations," *Int. J. Energy Res.*, vol. 30, no. 15, pp. 1352–1362, 2006.

- [11] M. Khaleel, A. Alsharif, and I. Imbayah, "Renewable energy technologies: Recent advances and future predictions," *AJAPAS*, vol. 1, no. 3, pp. 58–64, 2022.
- [12] R. Akpahou, F. Odoi-Yorke, and L. Osei, "Techno-economic analysis of a utility-scale grid-tied solar photovoltaic system in Benin republic," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 13, no. 100633, p. 100633, 2023.
- [13] L. Atwoli *et al.*, "COP27 Climate Change Conference: urgent action needed for Africa and the world," *Nutr. Rev.*, vol. 81, no. 7, pp. 755–757, 2023.
- [14] G. Ziervogel *et al.*, "Climate change impacts and adaptation in South Africa," *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change*, vol. 5, no. 5, pp. 605–620, 2014.
- [15] M. Abdunnabi, N. Etiab, Y. Nassar, H. El-Khozondar, and R. El-Khozondar, "Energy savings strategy for the residential sector in Libya and its impacts on the global environment and the nation economy," in *Advances in Building Energy Research*, 2023.
- [16] M. Khaleel, S. Abulifa, I. Abdaldeal, A. Abulifa, M. Amer, and T. Ghandoori, "A current assessment of the renewable energy industry," *African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS)*, vol. 2, no. 1, pp. 122–127, 2023.
- [17] V. Ongoma, T. Epule, Y. Brouziyne, M. Tanarhte, and A. Chehbouni, "COVID-19 response in Africa: impacts and lessons for environmental management and climate change adaptation," *Environ. Dev. Sustain.*, 2023.
- [18] Y. Zhao and S. Liu, "Effects of climate change on economic growth: A perspective of the heterogeneous climate regions in Africa," *Sustainability*, vol. 15, no. 9, p. 7136, 2023.
- [19] S. Ogunjo, A. Olusola, and C. Olusegun, "Potential of using floating solar photovoltaic and wind farms for sustainable energy generation in an existing hydropower station in Nigeria," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 25, no. 6, pp. 1921–1934, 2023.
- [20] A. Osman *et al.*, "Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 21, no. 2, pp. 741–764, 2023.
- [21] M. Khaleel, T. Ghandoori, A. Ahmed, A. Alsharif, A. Alnagrat, and A. Abulifa, "Impact of mechanical storage system technologies: A powerful combination to empowered the electrical grids application," in *2022 IEEE 2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, 2022, pp. 628–636.
- [22] H. Elegeonye *et al.*, "Techno-economic optimization of mini-grid systems in Nigeria: A case study of a PV–battery–diesel hybrid system," *Energies*, vol. 16, no. 12, p. 4645, 2023.
- [23] M. Benchrifa, R. Tadili, A. Idrissi, H. Essalhi, and A. Mechaqrane, "Development of new models for the estimation of hourly components of solar radiation: Tests, comparisons, and application for the generation of a solar database in Morocco," *Int. J. Photoenergy*, vol. 2021, pp. 1–16, 2021.
- [24] B. Belgasim, Y. Aldali, M. Abdunnabi, G. Hashem, and K. Hossin, "The potential of concentrating solar power (CSP) for electricity generation in Libya," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 90, pp. 1–15, 2018.
- [25] A. M'Baye, "Reduction of carbon emissions of HVAC systems: A case study of a pharmaceutical site in France," *Int. J. Energy Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 1–14, 2022.
- [26] C. Stanciu and D. Stanciu, "Optimum tilt angle for flat plate collectors all over the World-A declination dependence formula and comparisons of three solar radiation models," *Energy Conversion and Management*, vol. 81, pp. 133–143, 2014.
- [27] A. Yadav, and S. Chandel, "Solar radiation prediction using Artificial Neural Network techniques: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 33, pp. 772–781, 2014.
- [28] Y. Nasser, H. El-Khozondar, and N. Abohamoud, A. Abubaker, A. Ahmed, A. Alsharif, and M. Khaleel, "Regression Model for Optimum Solar Collectors' Tilt Angles in Libya," in *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023)*, Gaza Strip, Palestine, 2023.
- [29] M. Khaleel, Z. Yusupov, N. Yasser, H. Elkhonzondar, and A. Ahmed, "An integrated PV farm to the unified power flow controller for electrical power system stability," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 1, pp. 18–30, 2023.
- [30] A. Noorian, I. Moradi, and G. Kamali, "Evaluation of 12 models to estimate hourly diffuse irradiation on inclined surfaces," *Renew. Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 1406–1412, 2008.
- [31] A. Tuomiranta, and A. Ghedira, "Optimal weighting of parameters for constructing typical meteorological year datasets for photovoltaic power stations operated under hot dry maritime climates," in *Proceedings of the ISES Solar World Congress 2015*, 2016.

- [32] C. Nicolás-Martín, D. Santos-Martín, M. Chinchilla-Sánchez, and S. Lemon, "A global annual optimum tilt angle model for photovoltaic generation to use in the absence of local meteorological data," *Renew. Energy*, vol. 161, pp. 722–735, 2020.
- [33] A. Frimpong, E. Anto, E. Ramde, and L. Mensah, "Determination of optimum tilt angle for rooftop solar photovoltaic system installation for Kiku Kinderhaus in Kumasi," *Int. J. Energy Environ. Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 7–13, 2020.
- [34] A. Yassir, U. Zamzami, K. Fauzan, and T. Hasannuddin, "Optimization of tilt angle for photovoltaic: Case study Sabang-Indonesia, Int," *Int. Conf. Sci. Innovated Eng. (I-COSINE)*, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, vol. 536, 2019.
- [35] J. Romero, D. Garrido, M. Scoberanis, and M. Banuelos, *Estimation of the optimum tilt angle of solar collectors in Coatzacoalcos*, vol. 153. Veracruz, Renewable Energy, 2020.
- [36] K. Dabai, S. Buda, and G. Argungu, "Determination of optimum tilt angles and its effect on solar radiation for solar collectors for some locations in Africa," *Nigerian Journal of Renewable Energy*, vol. 1, no. 2, pp. 1–12, 2018.
- [37] Hailu and Fung, "Optimum tilt angle and orientation of photovoltaic thermal system for application in greater Toronto area, Canada," *Sustainability*, vol. 11, no. 22, p. 6443, 2019.
- [38] K. Skeiker, "Optimum tilt angle and orientation for solar collectors in Syria," *Energy Convers. Manag.*, vol. 50, no. 9, pp. 2439–2448, 2009.
- [39] R. Abdallah, A. Juaidi, S. Abdel-Fattah, and F. Manzano-Agugliaro, "Estimating the optimum tilt angles for south-facing surfaces in Palestine," *Energies*, vol. 13, no. 3, p. 623, 2020.
- [40] A. Ghayth, M. Khaleel, and Z. Yusop, "Performance enhancement of PV array utilizing Perturb & Observe algorithm," *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 2, pp. 29–37, 2023.
- [41] M. A. Kallioğlu, A. Durmuş, H. Karakaya, and A. Yılmaz, "Empirical calculation of the optimal tilt angle for solar collectors in northern hemisphere," *Energy Sources Recovery Util. Environ. Eff.*, vol. 42, no. 11, pp. 1335–1358, 2020.
- [42] M. Z. Jacobson and V. Jadhav, "World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels," *Sol. Energy*, vol. 169, pp. 55–66, 2018.
- [43] Y. Nassar, *Solar energy engineering active applications*. Sebha University, Sebha, Libya, 2006.
- [44] K. Bakouri, O. Ahwidi, A. Abubaker, T. Foqha, Y. Nassar, and H. El-Khozondar, "Learning lessons from Murzuq-Libya meteorological station: Evaluation criteria and improvement recommendations," *Solar Energy and sustainable development*, vol. 12, no. 1, 2023.
- [45] S. Alsadi, and Y. Nassar, "A numerical simulation of a stationary solar field augmented by plane reflectors: Optimum design parameters," *Smart Grid Renew. Energy*, vol. 08, no. 07, pp. 221–239, 2017.
- [46] A. M. Gracia and T. Huld, *Performance comparison of different models for the estimation of global irradiance on inclined surfaces*, EUR--Scientific and Technical Research series. 2013.
- [47] P. Ineichen, "Validation of models that estimate the clear sky global and beam solar irradiance," *Sol. Energy*, vol. 132, pp. 332–344, 2016.
- [48] J. Boland, J. Huang, and B. Ridley, "Decomposing global solar radiation into its direct and diffuse components," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 28, pp. 749–756, 2013.
- [49] J.-Y. Han and P. Vohnicky, "Estimation of global and diffuse horizontal irradiance by machine learning techniques based on variables from the Heliosat model," *J. Clean. Prod.*, vol. 371, no. 133696, p. 133696, 2022.
- [50] A. Starke et al., "Assessing one-minute diffuse fraction models based on worldwide climate features," *Renew. Energy*, vol. 177, pp. 700–714, 2021.
- [51] Y. Tan, Q. Wang, and Z. Zhang, "Algorithms for separating diffuse and beam irradiance from data over the East Asia-Pacific region: A multi-temporal-scale evaluation based on minute-level ground observations," *Sol. Energy*, vol. 252, pp. 218–233, 2023.
- [52] K. Bakirci, "Evaluation of models for prediction of diffuse solar radiation and comparison with satellite values," *J. Clean. Prod.*, vol. 374, no. 133892, p. 133892, 2022.
- [53] K. Gopinathan, "Diffuse radiation models and monthly-average, daily, diffuse data for a wide latitude range," *Energy (Oxf.)*, vol. 20, no. 7, pp. 657–667, 1995.
- [54] F. Alasali, A. S. Saidi, N. El-Naily, O. Alsmadi, M. Khaleel, and I. Ghirani, "Assessment of the impact of a 10-MW grid-tied solar system on the Libyan grid in terms of the power-protection system stability," *Clean Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 389–407, 2023.

- [55] B. Liu, and R. Jordan, "The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors: with design data for the US, its outlying possessions and Canada," *Solar energy*, vol. 7, pp. 53–74, 1963.
- [56] P. Koronakis, "On the choice of the angle of tilt for south facing solar collectors in the Athens basin area," *Sol. Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 217–225, 1986.
- [57] V. Badescu, "3D isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces," *Renew. Energy*, vol. 26, no. 2, pp. 221–233, 2002.
- [58] Y. Tian, R. Davies-Colley, P. Gong, and B. Thorrold, "Estimating solar radiation on slopes of arbitrary aspect," *Agric. For. Meteorol.*, vol. 109, no. 1, pp. 67–74, 2001.
- [59] C. Willmot, "On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors," *Solar Energy*, vol. 28, pp. 205–e216, 1982.
- [60] J. Bugler, "The determination of hourly insolation on an inclined plane using a diffuse irradiance model based on hourly measured global horizontal insolation," *Sol. Energy*, vol. 19, no. 5, pp. 477–491, 1977.
- [61] C. Ma and M. Iqbal, "Statistical comparison of models for estimating solar radiation on inclined surfaces," *Sol. Energy*, vol. 31, no. 3, pp. 313–317, 1983.
- [62] M. Iqbal, and M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*. Elsevier, 1983.
- [63] M. Steven, and H. Unsworth, "The angular distribution and interception of diffuse solar radiation below overcast skies," *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, vol. 106, no. 447, pp. 57–61, 1980.
- [64] J. Hay, and D. McKay, "Estimating solar irradiance on inclined surfaces: a review and assessment of methodologies," *Int. J. Solar Energy*, vol. 3, pp. 203–240.
- [65] D. Reindl, W. Beckman, and J. Duffie, "Evaluation of hourly tilted surface radiation models," *Sol. Energy*, vol. 45, no. 1, pp. 9–17, 1990.
- [66] A. Skartveit, and J. Asle Olseth, "Modelling slope irradiance at high latitudes," *Sol. Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 333–344, 1986.
- [67] M. Carbajo *et al.*, "Laparoscopic treatment vs open surgery in the solution of major incisional and abdominal wall hernias with mesh," *Surg. Endosc.*, vol. 13, no. 3, pp. 250–252, 1999.
- [68] T. Klucher, "Evaluation of models to predict insolation on tilted surfaces," *Sol. Energy*, vol. 23, no. 2, pp. 111–114, 1979.
- [69] R. Perez, R. Stewart, R. Seals, and T. Guertin, "The development and verification of the Perez diffuse radiation model," in *SNL-NM*, Albuquerque, NM (United States).
- [70] N. Nijegorodov, K. Devan, P. Jain, and S. Carlsson, "Atmospheric transmittance models and an analytical method to predict the optimum slope of an absorber plate, variously oriented at any latitude," *Renew. Energy*, vol. 4, no. 5, pp. 529–543, 1994.
- [71] R. Perez, R. Seals, P. Ineichen, R. Stewart, and J. Michalsky, "Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance," *Solar Energy*, no. 44, pp. 271–e89, 1990.
- [72] S. Khalil, and A. Shaffie, "Evaluation of transposition models of solar irradiance over Egypt," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 66, pp. 105–119, 2016.
- [73] A. Jadallah, D. Mahmood, and Z. Abdulqader, "Estimation and simulation of solar radiation in certain Iraqi Governorates," *International Journal of Science and Research*, vol. 3, pp. 945–949, 2014.
- [74] Y. Nassar, N. Abuhamoud, G. Miskeen, H. El-Khozondar, S. Alsadi, and O. Ahwidi, "Investigating the applicability of horizontal to tilted sky-diffuse solar irradiation transposition models for key Libyan cities," in *2022 IEEE 2nd International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, 2022.
- [75] N. Al-Rawahi, Y. Zurigat, and N. Al-Azri, "Prediction of hourly solar radiation on horizontal and inclined surfaces for Muscat/Oman," *J. Eng. Res. [TJER]*, vol. 8, no. 2, p. 19, 2011.
- [76] A. El-Sebaei, F. Al-Hazmi, A. Al-Ghamdi, and S. Yaghmour, "Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 568–576, 2010.
- [77] D. Li, and G. Cheung, "Study of models for predicting the diffuse irradiance on inclined surfaces," *Appl. Energy*, vol. 81, no. 2, pp. 170–186, 2005.
- [78] M. David, P. Lauret, and J. Boland, "Evaluating tilted plane models for solar radiation using comprehensive testing procedures, at a southern hemisphere location," *Renew. Energy*, vol. 51, pp. 124–131, 2013.
- [79] C. Pandey, and A. Katiyar, "A comparative study of solar irradiation models on various inclined surfaces for India," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 1455–1459, 2011.
- [80] C. Demain, M. Journée, and C. Bertrand, "Evaluation of different models to estimate the global solar radiation on inclined surfaces," *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 710–721, 2013.

- [81] M. Fadaeenejad, M. A. Mohd Radzi, M. Fadaeenejad, M. Zarif, and Z. Gandomi, "Optimization and comparison analysis for application of PV panels in three villages," *Energy Sci. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 145–152, 2015.
- [82] Z. Tian, B. Perers, S. Furbo, J. Fan, J. Deng, and J. Dragsted, "A comprehensive approach for modelling horizontal diffuse radiation, direct normal irradiance and total tilted solar radiation based on global radiation under danish climate conditions," *Energies*, vol. 11, no. 5, p. 1315, 2018.
- [83] Y. Nassar, A. Hafez, and S. Alsadi, "Multi-Factorial Comparison for Twenty-Four Distinct Transposition Models for Inclined Surface Solar Irradiance Computation, Study Case: State of Palestine," *Frontiers in Energy Research, Solar Energy*, vol. 7, no. 2, 2019.
- [84] A. Tuomiranta and H. Ghedira, "Evaluation of decomposition and transposition models for irradiance data conversion under a hot desert climate," in *Proc. 3rd Int. Conf. Energy & Meteorology (ICEM)*, Boulder, USA, 2015.
- [85] A. Padovan and D. Del Col, "Measurement and modeling of solar irradiance components on horizontal and tilted planes," *Sol. Energy*, vol. 84, no. 12, pp. 2068–2084, 2010.
- [86] H. Kambezidis, B. Psiloglou, and C. Gueymard, "Measurements and models for total solar irradiance on inclined surface in Athens, Greece," *Sol. Energy*, vol. 53, no. 2, pp. 177–185, 1994.
- [87] M. Utrillas, and J. Martinez-Lozano, "Performance evaluation of several versions of the Perez tilted diffuse irradiance model," *Sol. Energy*, vol. 53, no. 2, pp. 155–162, 1994.
- [88] R. Mubarak, M. Hofmann, S. Riechelmann, and G. Seckmeyer, "Comparison of modelled and measured tilted solar irradiance for photovoltaic applications," *Energies*, vol. 10, no. 11, p. 1688, 2017.
- [89] J. Zhou, G. Yan, and Y. Wu, "Analysis of solar radiation for Beijing China," *Acta Energiæ Solaris Sinica*, vol. 26, no. 5, pp. 712–716, 2005.
- [90] D. Włodarczyk, and H. Nowak, "Statistical analysis of solar radiation models onto inclined planes for climatic conditions of Lower Silesia in Poland," *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 127–144, 2009.
- [91] D. Yang, Z. Dong, A. Nobre, Y. Khoo, P. Jirutitijaroen, and W. Walsh, "Evaluation of transposition and decomposition models for converting global solar irradiance from tilted surface to horizontal in tropical regions," *Sol. Energy*, vol. 97, pp. 369–387, 2013.
- [92] E. Evseev, and A. Kudish, "An assessment of a revised Olmo et al. model to predict solar global radiation on a tilted surface at Beer Sheva, Israel," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 1, pp. 112–119, 2009.
- [93] A. Tuomiranta, and H. Ghedira, "Evaluation of decomposition and transposition models for irradiance data conversion under a hot desert climate," in *3rd International Conference Energy & Meteorology*, 2015.
- [94] D. Yang, "Solar radiation on inclined surfaces: Corrections and benchmarks," *Sol. Energy*, vol. 136, pp. 288–302, 2016.
- [95] M. Lave, and J. Kleissl, "Optimum fixed orientations and benefits of tracking for capturing solar radiation in the continental United States," *Renew. Energy*, vol. 36, no. 3, pp. 1145–1152, 2011.
- [96] J. Zhou, G. Yan, and Y. Wu, "Analysis of solar radiation for Beijing China, Acta Energi," *Acta Energi*.
- [97] S. Alsadi, and Y. Nassar, "Energy demand based procedure for tilt angle optimization of solar collectors in developing countries," *J. Fundam. Renew. Energy Appl.*, vol. 07, no. 02, 2017.
- [98] Y. Nassar et al., "A Generic Model for Optimum Tilt Angle of Flat-plate Solar Harvesters for Middle East and North Africa Region," *Applied Solar Energy*, vol. 58, no. 6, pp. 800–812, 2022.
- [99] Y. Nassar, and S. Alsadi, "Wind Energy Potential in Gaza Strip-Palestine state," *jsesd*, vol. 7, no. 2, pp. 41–57, 2018.
- [100] Y. Nassar, and S. Alsadi, "Assessment of solar energy potential in Gaza Strip-Palestine," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 31, pp. 318–328, 2019.