



# Determining the Least Risky Solar Radiation Transposition Model for Estimating Global Inclined Solar Irradiation

Abdulhafiz Ahmed Aqila<sup>1\*</sup> , Yasser Fathi Nassar<sup>2</sup> , Hala J. El-Khozondar<sup>3</sup> .

<sup>1,2</sup>Department of Mechanical and Renewable Energy Engineering, Engineering Faculty,  
Wadi Elshatti University, Libya.

<sup>3</sup>Electrical Engineering and smart systems Department, Islamic University of Gaza, Gaza, Palestine.

E-mail: <sup>1</sup>[a.aqela@wau.edu.ly](mailto:a.aqela@wau.edu.ly), <sup>2</sup>[y.nassar@wau.edu.ly](mailto:y.nassar@wau.edu.ly), <sup>3</sup>[hkozondar@iugaza.edu.pa](mailto:hkozondar@iugaza.edu.pa).

## SPECIAL ISSUE ON:

The 1st International Conference on  
Technical Sciences, 2024.  
“Investing in Renewable Energies”  
11 November 2024 SEBHA, LIBYA.

## KEYWORDS

Transposition models;  
Global horizontal solar  
irradiation; Isotropic models;  
Anisotropic models; Global  
inclined solar irradiation.

## ABSTRACT

Solar energy is considered one of the most important energy resources and a key component in addressing major energy challenges worldwide. Therefore, solar radiation data is crucial for many solar energy applications. Due to the lack of measurements at times due to logistical challenges, mathematical transposition models are often used to compensate for this deficiency. This paper presents an analytical study to identify the least risky transposition model for estimating solar radiation on inclined surfaces among six commonly used models in scientific literature, for several regions around the world (Berlin, Rome, Tripoli, N'Djamena, Yandou).

Total horizontal solar radiation intensity data was obtained from the Solargis platform for the study regions, carefully selected to represent latitude variations and longitudinal alignment. The proposed approach was applied to these regions for six transposition models and multiple different tilt angles ranging from (90°-10°) to determine the least risky model for use in each region at each solar panel tilt angle. The study results show significant variation among the studied regions, with a notable difference in annual inclined solar radiation values between regions using transposition models, with the discrepancy increasing at higher latitudes. The results indicate that the Perez model is the least risky and dominant model in Tripoli, while in Berlin, the Liu & Jordan model was the least risky at tilt angles between 40°-10°, with the Perez model being the least risky at tilt angles greater than 40°. This study is expected to enhance the accuracy of solar radiation estimation, thus bolstering confidence in assessing the economic and environmental efficiency of solar energy systems.

\*Corresponding author.



## تحديد نموذج تحويل الاشعاع الشمسي الأقل خطورة لتقدير الإشعاع الشمسي المائل

عبدالحفيظ أحمد عقيلة، ياسر فتحي نصار، هالة جارالله الخزندار.

**ملخص:** تعد الطاقة الشمسية من أهم مورد للطاقة، وجزء رئيسي في حل التحديات الطاقوية الكبرى في العالم. لذلك، تعد بيانات الإشعاع الشمسي أمراً حاسماً وأساسياً للعديد من استخدامات الطاقة الشمسية. ونظراً لعدم توفر القياسات في بعض الأحيان بسبب التحديات اللوجستية، نلجأ غالباً للنماذج التحويل الرياضية لتعويض هذا النقص. تقدم هذه الورقة دراسة تحليلية لتحديد النموذج التحويل الأقل خطورة لتقدير الإشعاع الشمسي على الأسطح المائلة من بين ست نماذج الأكثر شيوعاً في المراجع العلمية، لعدة مناطق حول العالم (برلين- روما- طرابلس- انجamina- ياندوي).

تم الحصول على البيانات المتعلقة بشدة الإشعاع الشمسي الأفقي الكلي من منصة Solargis لمناطق الدراسة، تم اختيار هذه المناطق بعناية لتمثل تبايناً بين خطوط العرض وتوافقاً في خط الطول لتلك المناطق. تم تطبيق النهج المقترح على هذه المناطق لستة نماذج تحويل ولعدة زوايا ميل مختلفتة تتراوح بين ( $10^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ) لتحديد نموذج الأقل خطورة للاستخدام في كل منطقة عند كل زاوية ميل للمجمعات الشمسية. وتظهر نتائج الدراسة تبايناً ملحوظاً بين المناطق المدروسة. مع وجود تفاوتاً كبيراً في قيمة الإشعاع الشمسي السنوي المائل بين المناطق، باستخدام نماذج التحويل، حيث تزداد حدة الاختلاف بارتفاع زاوية خط العرض. وأظهرت النتائج ان نموذج Perez هو النموذج الأقل خطورة والمسيطر في مدينة طرابلس. بينما في مدينة برلين كان نموذج Liu & Jordan الأقل خطورة عند زوايا ميل تتراوح بين  $10^{\circ}$ - $40^{\circ}$  ونموذج Perez عند الزوايا المائل الأكبر من  $40^{\circ}$ . يتوقع ان تسهم هذه الدراسة في زيادة دقة تقدير الإشعاع الشمسي، وبالتالي تعزيز الثقة في تقدير النجاعة الاقتصادية والبيئية لمنظومات الطاقة الشمسية.

**الكلمات المفتاحية** - نماذج التحويل، الإشعاع الشمسي الأفقي الكلي، نماذج السماء المتجانسة، نماذج السماء غير المتجانسة، الإشعاع الشمسي المائل الكلي.

### 1. المقدمة

تلعب الطاقة دوراً أساسياً وبارزاً لا غنى عنه في عالمنا المعاصر. في المقابل تشكل صناعة الطاقة مشكلة اقتصادية واستراتيجية وبيئية لجميع دول العالم التي تعتمد على إنتاج الطاقة من حرق الوقود الاحفوري (الفحم والنفط والغاز الطبيعي) لتوليد الطاقة الكهربائية والحرارية، ومن خلالها يتم استنزاف للموارد الاحفورية وانبعثت كميات كبيرة من الغازات الدفيئة، والتي تعتبر المسبب الرئيسي لظاهرة الاحتباس الحراري وتغير المناخ. ولهذه الأسباب، تضافرت الجهود للحد من انبعاثات الغازات الدفيئة، وكانت ثمرتها اتفاقية باريس للتغير المناخي (الاتفاق المنصف) عام 2015 [1-4]، وانضمت معظم الدول إلى اتفاقية لمكافحة التلوث وتلطيف آثاره. ونظراً لكون قطاع صناعة الطاقة أحد أكثر القطاعات تلوثاً، حيث تبلغ مساهمته حوالي 35% من إجمالي انبعاثات الغازات الدفيئة [5,6]. وعليه، يسعى الباحثون والمهتمون في هذا المجال الى إيجاد مصادر بديلة للطاقة التقليدية تتميز بالتجدد والاستدامة وصديقة للبيئة، بحيث تساهم في تحقيق الأهداف التنموية للبلدان من النواحي الاقتصادية والاجتماعية والبيئية. ونتيجة لذلك، فقد تم توجيه الاهتمام نحو زيادة دعم مشاريع إنتاج الطاقة الكهربائية باستخدام تقنيات الطاقة الشمسية ومشاريع ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية باستخدام السخانات الشمسية لتسخين المياه للأغراض المنزلية أو الصناعية، أو لتدفئة المنازل في المواسم الباردة [7,8]. ووفقاً لإحصائيات عام 2022 فإن استهلاك الكهرباء في العالم بلغ حوالي 28,510 TWh، مقابل 27,810 TWh في عام 2021، بزيادة سنوية تصل الى 694 TWh، أي ما يعادل نسبة 2.5% [9,10]. واستناداً على منشورات الوكالة الدولية للطاقة IEA لسياسات الطاقة المتجددة عام 2023، فإن من المتوقع أن تصبح مصادر الطاقة المتجددة أكبر مصدر لتوليد الكهرباء على مستوى العالم بحلول عام 2025. ليبيا وكونها إحدى الدول التي صدقت على معاهدة باريس، أقرت الخطة الاستراتيجية لفترة 25 سنة القادمة والتي تقتضي بزيادة حصة مصادر الطاقة المتجددة من إجمالي توليد الكهرباء بنسبة 10% بحلول عام 2025، لتصل إلى أكثر من 50% حتى عام 2050، وسوف تعتمد هذه المساهمة على مزيج من مصادر الطاقات المتجددة، بما في ذلك طاقة الشمسية بأنواعها الكهروضوئية والحرارية والمركزة، وإيضاً طاقة الرياح [11]. يمكن لتقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية والمركزة المساهمة بشكل فعال في حل بعض من أكثر مشاكل العالم إلحاحاً اليوم. إلا انها تحتاج للعمل تحت الظروف المثالية من التصميم والتشغيل، وهذا سيقبل من تكاليف منظومات الطاقة الشمسية ويدعم فرص تنافس الطاقات النظيفة في سوق الطاقة العالمي.

يُعتبر تقدير الإشعاع الشمسي في موقع ما أمراً ضرورياً في بيان النجاعة الاقتصادية للطاقة الشمسية وبالتالي اتخاذ القرار في الاستثمار في الطاقة الشمسية. ومع ذلك، هناك نقص شديد في بيانات الإشعاع الشمسي المائل الكلي بسبب التحديات اللوجستية لقياس شدة الإشعاع الشمسي الساقط على الأسطح المائلة لمجمعات الطاقة الشمسية في

موقع معين. ولتعويض هذا النقص في البيانات المقاسة، ازداد الاعتماد على النماذج الرياضية التي تحول الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على السطح الأفقي إلى السطح المائل ويطلق عليها مصطلح (Plan of Array Transposition Models - POA) [12]. بالإضافة إلى ذلك، فإن تحديد النموذج المناسب لمنطقة محددة يعتبر مهماً للغاية ليس فقط للحسابات الاقتصادية، وإنما أيضاً مهم لاختيار البرنامج وبنك المعلومات الأنسب لكل منطقة، حيث تستخدم العديد من الشركات التجارية المتخصصة في إنتاج برامج الحسابات الشمسية لهذه نماذج POA، بالإضافة إلى بنوك قواعد البيانات التي توفر المعلومات المناخية، ويشير الجدول (1) قائمة لبعض هذه الشركات ومنصات قواعد البيانات ونموذج POA المستخدم. وأيضاً من الجوانب المهمة في نمذجة الطاقة الشمسية هو دقة النموذج المستخدم والذي يتم تقييمه باستخدام المقاييس الإحصائية [13]. تعتبر النماذج الرياضية مصادر من عدم اليقين في النتائج [14]، ونتيجة ذلك سيؤدي إلى اتخاذ قرارات غير صحيحة. وقد كانت ولا زالت في تطور مستمر على مدى العقود الستة الماضية. عادةً ما يتضمن نموذج التحويل الرياضي معاملات الأرصاد الجوية والجغرافية والمناخية، منها مكونات شدة الإشعاع المقاسة (عن طريق المحطات الأرضية أو الأقمار الصناعية) على السطح الأفقي كمدخلات. إلى جانب العديد من الزوايا الهندسية الشمسية، مثل زاوية سمت الشمس، وزاوية ميل واتجاه السطح، وزاوية سقوط الأشعة الشمسية، وبالتالي يمكن للنموذج تقدير مكونات الإشعاع الساقط على سطح مائل [15].

الجدول (1): برامج المحاكاة التجارية لأنظمة الطاقة الشمسية وقواعد البيانات ونماذج التحويل المستخدمة في كلا منها.

نموذج التحويل المستخدم في البرنامج	البرنامج/قاعدة البيانات
Liu & Jordan	NASA
Muneer	SOLARGIS
Reindl	Solcast
Perez	Global solar atlas
Muneer	SoDa
Hay, Skartveit & Olseth	Meteonorm
HDKR	Meteoblue AG
HDKR	EnergyPro
HDKR	HOMER
Liu & Jordan	PVToolbox
Hay & Davies	Polysun
Skartveit & Olseth, HDKR and Perez	PV*Sol
HDKR and Perez	PVDesign
Perez	PVForm
Muneer	PVGIS
Perez	PVplanner
Hay and Perez	PVSyst
Perez	PVWatts
Liu & Jordan	RETscreen
Liu & Jordan, Hay & Davies, Perez	SAM
Liu & Jordan	SimulationX
HDKR	TRNSYS

ركزت العديد من الدراسات البحثية المتخصصة على التحقق من صحة وموثوقية هذه النماذج لمناطق معينة. فقد أجرى Nassar et al. اختباراً لصلاحية 24 نموذجاً للتحويل الأكثر شيوعاً لحساب الإشعاع الشمسي على الأسطح المائلة لعدة مدن فلسطينية، وذلك باستخدام عدة طرق إحصائية لقياس أداء نماذج التحويل. علاوة على ذلك، تم مقارنة نماذج التحويل مع بيانات فعلية مقيسة لعدة مدن فلسطينية لتحديد النموذج الواعد والأكثر دقة [13]. وكما قام Nassar et al. بدراسة تحديد نموذج التحويل الأكثر دقة للإشعاع الشمسي المنتشر في السماء من الأفقي إلى المائل لعواصم منطقة الشرق الأوسط وشمال إفريقيا، حددت الدراسة النماذج الأكثر دقة بمعادلات انحراف لا تزيد عن 3% لمعظم المدن [16]. أيضاً قام Munoz et al. بتطوير وتقييم النماذج التجريبية لتقدير الإشعاع الشمسي المنتشر الأفقي كل ساعة في المملكة المتحدة [71]. وفي الصين قام Cai et al. بمراجعة وتقييم نماذج تقدير الإشعاع الشمسي

الكلبي الساعي للسواء الصافية [18]. وخلصت جميع الأبحاث السابقة الى عدم وجود نموذج يمكن ان يتبناه الباحث لتقدير الاشعاع الشمسي الكلبي المائل وان لكل حالة دراسية يجب تحديد نموذج خاص لهذه الحالة، كما ويمكن ايضا وجود ضرورة لتطوير احد النماذج الموجودة ليتلائم مع الحالة المدروسة من حيث الموقع الجغرافي وزوايا الميل والاتجاه للمجمع الشمسي. كما تعتبر نماذج التحويل السبيل الوحيد لحساب زاوية الميل المثالية للمجمعات الشمسية للحصول على أقصى اشعاع شمسي. وفي هذا السياق، قدم Frimpong et al. دراسة لتحديد زاوية الميل المثالية للألواح الشمسية الكهروضوئية في كوماسي- غانا. تم خلاله تحليل آثار زاوية الميل على إنتاج الأنظمة الكهروضوئية الشمسية. وبالتالي، تم تقدير زاوية ميل مثالية والإخراج الكهروضوئي سنويًا لثلاثة أنظمة PV مختلفة. وُجد أن زاوية الميل المثلى لجميع الأنظمة الكهروضوئية التي من شأنها أن توفر عائداً أفضل وتسمح بالتنظيف الذاتي هي  $10^\circ$  [19]. وأيضاً قام Barbon et al. بدراسة تحليل زوايا الميل والتوجه للأنظمة الكهروضوئية للمباني الحضارية، تم من خلالها تقييم الخسائر في الطاقة الناتجة عن الانحرافات عن زاوية الميل ( $\beta$ ) والاتجاه ( $\gamma$ ) للثبيت فيما يتعلق بالوضع المثالي. حيث تم دراسة على عشر مدن حول العالم في نصف الكرة الشمالية، باعتبار ظروف السماء الغائمة في كل منطقة وحسب نظرياً، باستخدام كود MATLAB، وتظهر النتائج أن زوايا الميل والتوجه غير المثالية يمكن أن تؤدي أيضاً إلى مستويات مقبولة من توليد الطاقة الكهربائية. ويعد نظام الطاقة الكهروضوئية المثبت باتجاه الجنوب ( $0^\circ = \gamma$ ) وابتعاد  $\beta$  في مدى  $10^\circ$  عن زاوية الميل المثالية؛ له تأثيراً ضئيلاً على خسائر الطاقة. تبلغ خسائر الطاقة حوالي: 5%، 10%، 15% و20% عندما تكون ابتعاد  $\beta$  عن زاوية الميل المثالية في المدايات ( $21^\circ-23^\circ$ )، ( $31^\circ-33^\circ$ )، ( $40^\circ-37^\circ$ )، ( $43^\circ-47^\circ$ ) على التوالي [20].

كما قدم Nassar et al. في أكثر من بحث [21-25] تحليلاً رياضياً لمعامل الشكل بين المجمع الشمسي والسماء والارض وباعتبار الظل بين الصفوف وايضا الاشعة المنعكسة من الاسطح الخلفية للصفوف السابقة. هذه الدراسات تحاكي الحالة في حقول الخلايا الشمسية وصفوف الخلايا الشمسية فوق أسطح المباني.

كما أختبر Chen et al. ملائمة عدة نماذج لتقدير الاشعاع الشمسي تحت 37 نمطاً مناخياً وتأثيرها على أداء أنظمة تتبع أقصى قدرة للخلايا الشمسية MPPT. بالإضافة إلى ذلك، تم دراسة أداء النماذج عن طريق اجراء قياسات ميدانية لسلوك منظومة MPPT لمدة يومين متتاليين تحت الظروف المناخية الحقيقية. وتبين وجود تباين كبير في نمط أداء MPPT تبعاً للنموذج المستخدم الامر الذي يشير الى ارتباط صلاحية النماذج مع زوايا ميل واتجاه المجمع الشمسية [26].

كما أكد Lukac et al. أهمية التحقق من ملائمة النموذج المستخدم للموقع المدروس، وخاصة في ظل تطوير تقنيات وطرق عديدة لتقدير إمكانات الطاقة الشمسية عالية الدقة، باستخدام وسائل الاستشعار عن بعد والاقمار الصناعية وبرامج المحاكاة مثل برنامج GIS الامر الي يتطلب اختيار صلاحية الإشعاع الشمسي المقدر مع قياسات محطات الارصاد الارضية. كما يمكن تعديل هذه النماذج ليتم دمج تأثيرات التظليل الناتج عن العوائق مع عامل عرض لكل منطقة في السماء [27]. واختيار النماذج التي سيتم اختبارها في هذه الدراسة، تم مراجعة 350 مقالة منشورة في دار النشر Elsevier. وتم تمثيل نتائج البحث على شكل سحابة الكلمات (Word cloud) والذي يعتبر تمثيلاً بصرياً، بحيث يكون حجم النموذج الأكبر هو الأكثر تكراراً في المراجع العلمية. يوضح الشكل (1) رسماً توضيحاً باستخدام سحابة الكلمات (Word cloud) لتوضيح النماذج الأكثر استخداماً في المراجع العلمية.



الشكل (1): سحابة الكلمات لتكرار استخدام 6 نماذج تحويل في الأبحاث، حيث حجم الكلمة يتناسب مع عدد تكرار نموذج تحويل.

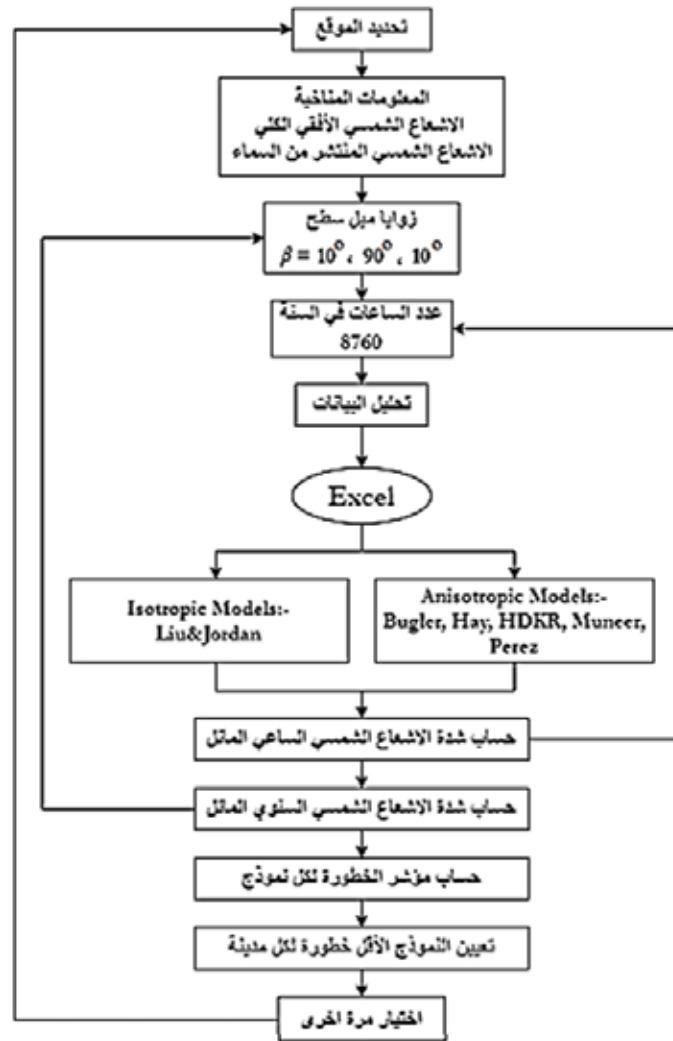
يتضح من الشكل 1 أن نموذج Perez يمثل حوالي 27% ونموذج HDKR يمثل حوالي 23%. وان حوالي 20% من الأبحاث استخدمت نموذج Liu & Jordan، واستحوذ نموذج Muneer على اهتمام حوالي 18% من الباحث، وسجل نموذج Bugler حوالي 14% من إجمالي الأبحاث المتخصصة في هذا المجال. وعلى هذا الأساس تم تحديد 6 نماذج

لتحويل الاشعاع الاكثر استخداما في الاوساط العلمية لتقدير الاشعاع الشمسي المائل وايضا الحصول على زوايا المسل المثالية للمجمعات الشمسية المستوية.

يهدف هذا البحث الى تحديد النموذج الأقل خطورة لتقدير الاشعاع الشمسي على الأسطح المائلة بعدة زوايا ميل تتراوح بين (10°-90°) لعدة مناطق حول العالم (برلين- روما- طرابلس- انجamina- ياندوي). يعتبر النموذج الأقل خطورة مصطلحاً له جوانب عديد منها هو الأقل انحرافاً بين النماذج الأكثر انحرافاً. وايضاً هو النموذج المستخدم للبيانات قواعد البيانات وليس بيانات مفاصة حقيقية من محطات الأرصاد الجوية.

## 2. منهجية البحث

تمثلت منهجية البحث بتحديد مواقع الدراسة ومعرفة البيانات المناخية لتلك المواقع. وبعد ذلك تتم معالجة البيانات من خلال برنامج Microsoft Excel لنماذج التحويل الـ 6 المختارة، ومن نتيجة التحليل يمكن تحديد النموذج الأقل خطورة لكل موقع. يوضح الشكل (2) المنهجية المتبعة في هذا البحث.



الشكل (2): منهجية البحث.

## 1.2. مواقع الدراسة والبيانات المناخية

تم اختيار المناطق التي تقع قريبة من خط الطول 13.17 شرقاً بالنسبة لمدينة طرابلس، بحيث تكون بعض المناطق اعلى مدينة طرابلس والبعض الاخر أسفل مدينة طرابلس. حيث تشكل هذه المناطق تباين واسع في الطبيعة الجغرافية والمناخية. كما موضح في الشكل (3)، والجدول (2). كذلك تم الحصول على البيانات المناخية (الاشعاع الشمسي الافقي الكلي والاشعاع الشمسي المنتشر من السماء) من منصة قاعدة البيانات Solargis للمواقع الدراسة.

حيث تعتبر البيانات المقدمة من هذه منصة بيانات موثوقة ويستخدمها العديد من الباحث حول العالم كما تم استخدامها أيضا في ليبيا. كما توجد اتفاقية بين المنصة وكلية الهندسة بجامعة وادي الشاطئ.



الشكل (3): خريطة مواقع الدراسة.

الجدول (2): الاحداثيات الجغرافية للمناطق المختارة للدراسة.

الدولة	المدينة	خط العرض	خط الطول	الارتفاع (m)
المانيا	برلين	52.51° N	13.38° E	44
إيطاليا	روما	41.89° N	12.48° E	12
ليبيا	طرابلس	32.89° N	13.17° E	9
تشاد	انجامينا	12.11° N	15.05° E	297
الكاميرون	ياندوي	3.86° N	11.52° E	717

## 2.2. نماذج تحويل الإشعاع الشمسي الأفقي الى المائل (Plan of array solar radiation transposition models)

تتضمن نماذج التحويل الرياضي عادة مكونات شدة الإشعاع الشمسي (المباشر والمنتشر) على السطح الأفقي كمدخلات. هذه المكونات يمكن قياسها من محطات الأرصاد الجوية. إلى جانب العديد من المعاملات الهندسية الشمسية المعروفة، مثل زاوية سمت الشمس، وميل السطح، وزاوية السقوط وبالتالي يتم تقدير النموذج بمكونات شدة الإشعاع على سطح مائل. يحتوي الشعاع الأفقي الكلي  $I_h$  على مكونين هما: - الإشعاع المباشر  $I_{bh}$ ، والإشعاع المنتشر من السماء  $I_{dh}$  [28].

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

تقوم نماذج التحويل بتحويل الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي الى سطح مائل بزاوية  $(\beta)$ ، وبالتالي فإن الإشعاع الكلي المائل يمكن صياغته على العلاقة التالية: -

$$I_t = I_{bt} + I_{dt} + I_{rt} \quad (2)$$

وبناء على ذلك، يمكن تعويض المعادلة (1) للبيانات المناخية المقاسة في المعادلة (2) لتصبح العلاقة كالتالي: -

$$I_t = I_{bh}R_b + I_{dh}R_d + I_hR_r \quad (3)$$

يمثل معامل التحويل  $R_b$  (Direct-beam transposition factor) كدالة للمعاملات الهندسية للسطح المائل وموضع الشمس، ويعطى بالعلاقة: -

$$R_b = \max\left(\frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z}, 0\right) \quad (4)$$

حيث:

$\theta_z, \theta_i$  يمثلان زاوية سقوط الإشعاع الشمسي (Solar incidence angle) وزاوية سمت (Solar zenith angle)، على

النوالي. وإيضاً، معامل التحويل  $R_r$  يمثل الإشعاع الشمسي المنعكس من الأرض (Ground reflected transposition factor)، ويعطى بالعلاقة: -

$$R_r = \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (5)$$

حيث:  $\rho_g$  يمثل انعكاسية الأرض (Ground reflectivity) أو ما يسمى «Albedo»، وتقدر غالباً بحوالي 0.2 [24]. ويمثل  $R_d$  معامل التحويل (Sky-diffused transposition factor) مقدار الإشعاع المنتشر من السماء على كثافة الغيوم ومدى رؤية السطح المائل لقبة السماء. فالأسطح المائلة ترى جزء من القبة السماوية. ويمكن تقسيمه إلى فئتين: السماء المتجانسة والسماء غير المتجانسة.

### 1.2.2 نماذج السماء المتجانسة (Isotropic sky models)

ولتقدير الإشعاع الشمسي الكلي المائل يتطلب أولاً تقدير مركبات الأشعة الشمسية المباشرة والمنعكسة من الأرض والمنتشرة من السماء. يفترض منتسبو هذه المدرسة؛ أن السماء تعكس الإشعاع الشمسي بتجانس من القبة السماوية (والتي يمكن اعتبارها نصف كرة)، ولا يوجد أي مصدر آخر للإشعاع الشمسي المنعكس من السماء. ومن رواد هذه الفرضية [28]:

1. Liu & Jordan model [29]:

نموذج Liu & Jordan هو الأكثر شهرة في عائلة نماذج السماء المتجانسة، تم تطويره في عام 1963. وهو نموذج بسيط يعتمد فقط على زاوية ميل السطح دون الأخذ في الاعتبار زوايا السمات والسمت. يستخدم على نطاق واسع في الحسابات الهندسية، ولكنه يؤدي في كثير من الأحيان إلى التقليل من تقدير الإشعاع الشمسي، لأنه يتجاهل أجزاء من الإشعاع المنتشر. إلا أنه يقدم تقديرات جيدة للظروف الملبدة بالغيوم. ويمثل رياضياً على الصيغة التالية:

$$R_{dL} = \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \quad (6)$$

### 2.2.2 نماذج السماء غير المتجانسة (Anisotropic sky models)

لتقدير الإشعاع الشمسي الكلي المائل يتطلب أولاً تقدير مركبات الأشعة الشمسية المباشرة والمنعكسة من الأرض والمنتشرة من السماء.

ويتم تقدير الأشعة الشمسية المنتشرة من السماء بدقة أكبر من خلال نماذج السماء اللامتجانسة، حيث تتضمن هذه النماذج في معظمها على ثلاث مركبات وهي الأشعة المنعكسة من قبة السماء (Isotropic sky dome) ومن الأفق (Horizon) ومن محيط الشمس (Circumsolar) [28]. وهناك العديد من النماذج التي تتبنى هذا العرض، ومن هذه النماذج:

2. Bugler model [30]:

تم تطويره في عام 1977 من نموذج Liu & Jordan. ويشمل الإشعاع القادم من محيط الشمس المنتشر والإشعاع المنتشر من قبة السماء ويأخذ بعين الاعتبار الارتفاع الزاوي للشمس فوق الأفق، ويصاغ رياضياً على الصورة التالية:

$$R_d = R_{dL} + 0.05 \frac{I_{bh}}{I_{dh}} R_b \quad (7)$$

3. Hay model [31]:

نموذج Hay and Davies، أو يُسمى أيضاً Hay، تم نشره في عام 1980. ويعالج الإشعاع المنتشر حيث أنه يتكون من جزأين، الإشعاع المنتشر من محيط الشمس ومن القبة السماوية. ويحسب من المعادلة التالية:

$$R_d = F_{Hay} R_b + (1 - F_{Hay}) R_{dL} \quad (8)$$

$$F_{Hay} = \frac{I_{bh}}{I_{sc}}$$

4. HDKR model [32]:

تم تطويره بواسطة Hay, Davies, Klucher and Reindl في عام 1990 واستند على نموذج  $yaH$  حيث تم إضافة الجزء الخاص بالإشعاع من الأفق، مما يجعل تقديراته أكثر دقة. والصيغة المستخدمة في هذا النموذج هي:

$$R_d = F_{Hay} R_b + (1 - F_{Hay}) R_{dl} \left[ 1 + f \sin^2 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right], \quad f = \sqrt{\frac{I_{bh}}{I_h}} \quad (9)$$

: [33] Muneer model .5

تم تطوير نموذج Muneer في عام 2004. وهو ايضا نسخة مطورة من نموذج Hay ، لأنه يستخدم معامل  $F_{Hay}$ . وهو يختلف عن النماذج الأخرى الموصوفة لأنه يحتوي على معادلتين ويفرق فيما اذا كان السطح المعني مظلاً أو مضاً بأشعة الشمس. كما يفصل الأسطح المضاء بنور الشمس إلى ملبدة بالغيوم وغير ملبدة بالغيوم. بالنسبة لحالة كل من الاسطح المضاء بنور الشمس والمظلة تحت سماء غائمة، والصيغة الرياضية لهذا النموذج على الصورة التالية:

$$R_d = TM(1 - F_M) + F_M R_b$$

$$TM = \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + \frac{2}{\pi(3 + 2b)} \left( \sin \beta - \beta \cos \beta - \pi \sin^2 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right) \quad (10)$$

: [34] Perez model .6

يعد نموذج Perez أحد أكثر النماذج شيوعاً. لدى هذا النموذج عدة اطوار من التطور على مر السنين. اخر نسخة لهذا النموذج تم تقديمه في عام 1990. يعتبر نتائج هذا النموذج الاكثر دقة من بين كافة النماذج السالفة الذكر، ولكنها أكثر تعقيداً، حيث أنها تأخذ في الاعتبار حساب جميع الأجزاء الثلاثة للإشعاع المنتشر. علاوة على ذلك، يتم استخدام الكثير من المعاملات في هذا النموذج لتشكيل المعادلة التالية:

$$R_d = F_1 \frac{a}{b} + (1 - F_{Hay}) R_{dl} + F_2 \sin \beta$$

$$b = \max(\cos 85^\circ, \sin \gamma), \quad a = \max(0, \cos \theta_i)$$

$$F_1 = F_{11}(\varepsilon) + F_{12}(\varepsilon)\Delta + F_{13}(\varepsilon)\theta_z \quad (11)$$

$$F_2 = F_{21}(\varepsilon) + F_{22}(\varepsilon)\Delta + F_{23}(\varepsilon)\theta_z$$

جميع المعاملات مدرجة في الجدول (3).

الجدول (3): معاملات نموذج Perez.

$\varepsilon$	$F_{11}$	$F_{12}$	$F_{13}$	$F_{21}$	$F_{22}$	$F_{23}$
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

### 3.2. حساب مؤشر الخطورة (RI)

يعتبر مؤشر الخطورة لنموذج معين مؤشراً حاسماً لتقييم أداء نماذج التحويل في هذه الدراسة، ويمكن التعبير عنه على صيغة التالية:

$$RI(i) = \frac{H_{gt}^{(i)} - H_{gt}^{(j)}}{H_{gt}^{(i)}} \times 100\% \quad , \quad (i=18, \quad j=1,8) \quad (12)$$

حيث ( $H_{gt}$ ) هو الإشعاع الشمسي الكلي المائل السنوي المحسوب باستخدام نموذج التحويل ( $i$ ). وبالنسبة للنماذج الستة التي تم أخذها في الاعتبار، فإن عدد معدلات الانحراف لكل نموذج تحويل هي خمس قيم، ومن ثم يتم اختيار القيمة الأكبر.



#### 4.2. التحليل الرياضي والاحصائي للبيانات

تمت معالجة البيانات المناخية باستخدام برنامج MS Excel. لتوضيح طريقة العمل سيتم ادراج خطوات التحليل لمدينة طرابلس عند زاوية ميل  $30^\circ$ .

**الخطوة الأولى:** حساب شدة الاشعاع الشمسي المائل الساعي ( $H_{gt}(t)$ ) لمدينة طرابلس لسطح مائل بزواوية ميل  $\beta = 10^\circ$  ومنتجه جنوبا  $\psi = 0^\circ$  باستخدام جميع نماذج التحويل المختارة.

ومن تم ايجاد المجموع السنوي ( $\sum_{t=1}^{8760} H_{gt}(t)$ ). والنتائج المتحصل عليها مدرجة في الجدول (4).

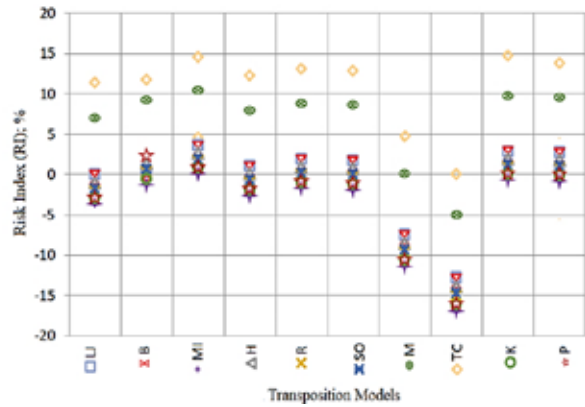
الجدول (4): الاشعاع الشمسي الكلي المائل الساعي لمدينة طرابلس لسطح مائل بزواوية ميل  $\beta = 10^\circ$  ومنتجه جنوبا  $\psi = 0^\circ$  باستخدام جميع نماذج التحويل المختارة.

نموذج Perez	نموذج Muneer	نموذج HDKR	نموذج Hay	نموذج Bugler	نموذج Liu & Jordan	الساعة	اليوم	الشهر
0	0	0	0	0	0	1	1	1
0	0	0	0	0	0	2	1	1
0	0	0	0	0	0	3	1	1
0	0	0	0	0	0	4	1	1
0	0	0	0	0	0	5	1	1
0	0	0	0	0	0	6	1	1
0	0	0	0	0	0	7	1	1
215	195	212	206	209	203	8	1	1
388	347	387	375	374	367	9	1	1
549	498	544	530	527	517	10	1	1
700	652	696	681	674	661	11	1	1
740	694	738	721	712	700	12	1	1
728	692	732	711	703	690	13	1	1
525	486	531	510	505	496	14	1	1
414	386	423	394	392	384	15	1	1
401	269	290	234	234	229	16	1	1
1	1	1	1	1	1	17	1	1
0	0	0	0	0	0	18	1	1
0	0	0	0	0	0	19	1	1
0	0	0	0	0	0	20	1	1
0	0	0	0	0	0	21	1	1
0	0	0	0	0	0	22	1	1
0	0	0	0	0	0	23	1	1
0	0	0	0	0	0	24	1	1
								2
								3
								.
								.
								12
		3113	2816	3086	3058	3040	3025	kWh/m <sup>2</sup> المجموع الكلي السنوي

**الخطوة الثانية:** حساب مؤشر الخطورة باستخدام المعادلة 12.

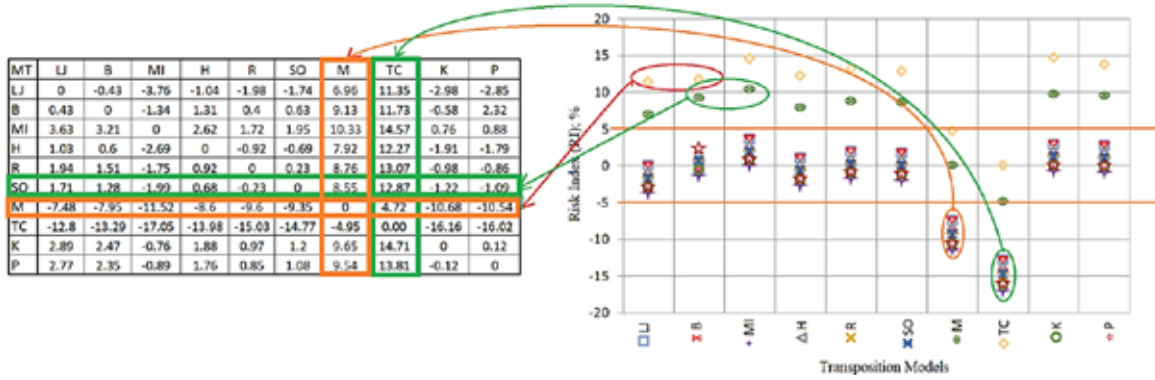
يوضح الشكل (4) التمثيل العددي والبياني للخطوة الثانية.

MT	LJ	B	MI	H	R	SO	MI	TC	K	P
LJ	0	-0.43	-3.76	-1.04	-1.98	-1.74	6.96	11.35	-2.98	-2.85
B	0.43	0	-1.34	1.31	0.4	0.63	9.13	11.73	-0.58	2.32
MI	3.63	3.21	0	2.62	1.72	1.95	10.33	14.57	0.76	0.88
H	1.03	0.6	-2.69	0	-0.92	-0.69	7.92	12.27	-1.91	-1.79
R	1.94	1.51	-1.75	0.92	0	0.23	8.76	13.07	-0.98	-0.86
SO	1.71	1.28	-1.99	0.68	-0.23	0	8.55	12.87	-1.22	-1.09
M	-7.48	-7.95	-11.52	-8.6	-9.6	-9.35	0	4.72	-10.68	-10.54
TC	-12.8	-13.29	-17.05	-13.98	-15.03	-14.77	-4.95	0.00	-16.16	-16.02
K	2.89	2.47	-0.76	1.88	0.97	1.2	9.65	14.71	0	0.12
P	2.77	2.35	-0.89	1.76	0.85	1.08	9.54	13.81	-0.12	0



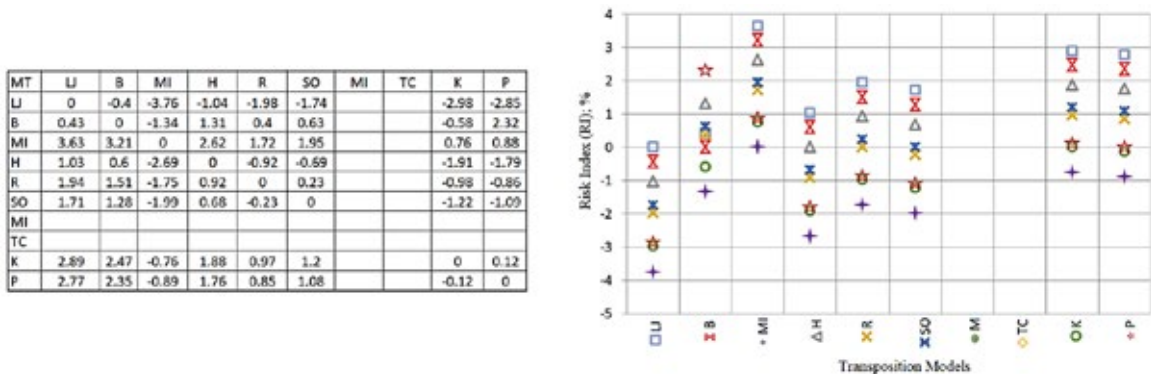
الشكل (4): معامل الخطورة لثمانية نماذج تحويل لمدينة طرابلس.

الخطوة الثالثة: تحديد قيمة لمؤشر الخطورة IR (فرضا أقل من 5%). بعد ذلك، ارسم خطاً عند -5% و 5%. يتم حذف الصفوف والاعمدة التي تقع خارج الخططين (-5%، 5%) كما هو موضح في الشكل (5).



الشكل (5): عملية تحديد النماذج التي سيتم مقارنتها للحصول على النموذج الأقل خطورة.

بعد تحديث الشكل والجدول وحذف النماذج ذات التي تقع خارج المنطقة المجددة بين (-5%، 5%)، يتبقى لدينا النماذج التالية المعروضة في الشكل (6).

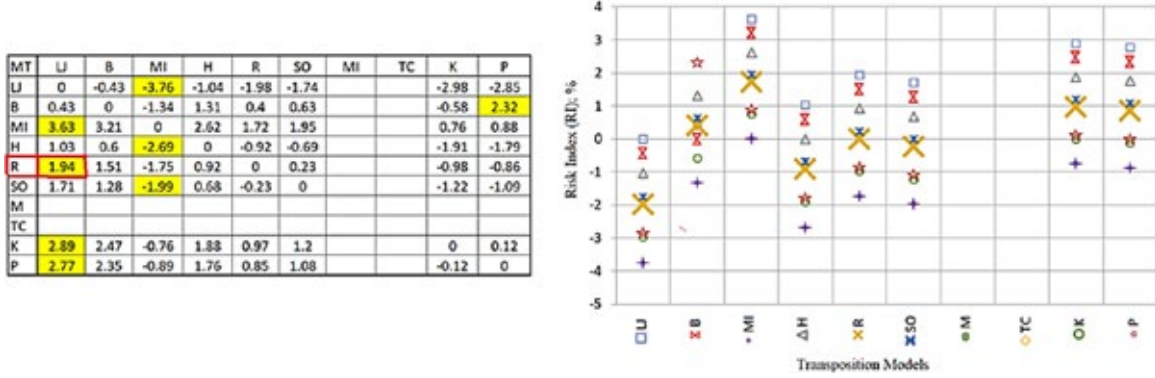


الشكل (6): النماذج التي سيتم اختبارها.

الخطوة الرابعة: حدد النماذج ذات أعلى قيمة للمؤشر DR وكون المصفوفة التالية.

$$\begin{bmatrix} LJ \\ B \\ MI \\ H \\ R \\ SO \\ K \\ P \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} -3.8 \\ 2.3 \\ 3.6 \\ -2.7 \\ 1.9 \\ -2.0 \\ 2.9 \\ 2.8 \end{bmatrix}$$

واخيرا حدد اقل قيمة مطلقة للمؤشر RI وبالتالي يكون النموذج المناظر لهذه القيمة هو النموذج الاقل خطورة للحالة المدروسة من الموقع وزاوية الميل. وهي 1.9 والنموذج المقابل هو نموذج HDKR الذي يمثل النموذج الاقل خطورة لهذه الحالة من الدراسة. النتائج موضحة في الشكل (7).

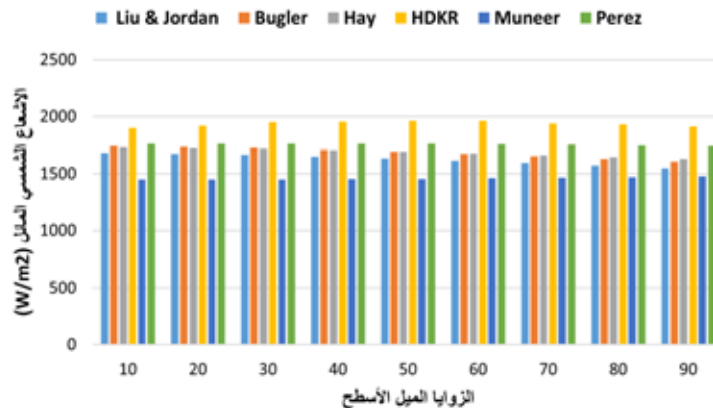


الشكل (7): تحديد النموذج الاقل خطورة.

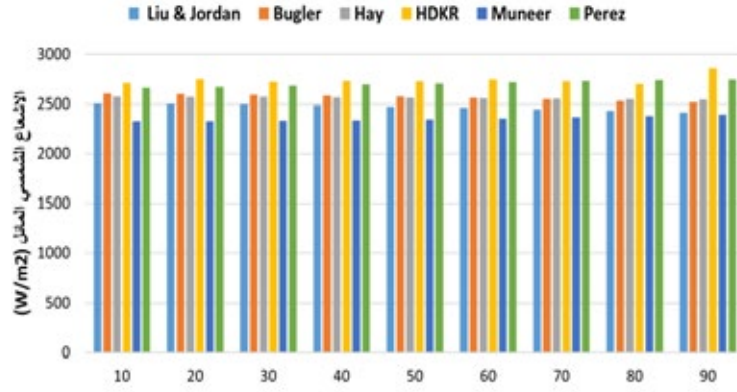
من الشكل (7)، من الواضح أن نموذج التحويل الذي تم الحصول عليه باستخدام نظرية RI هو النموذج الأقل خطورة من بين جميع النماذج التي تم اختبارها، حيث كانت قيمة المؤشر RI الأقرب إلى 0% من بين جميع النماذج الأخرى.

### 3. النتائج والمناقشة

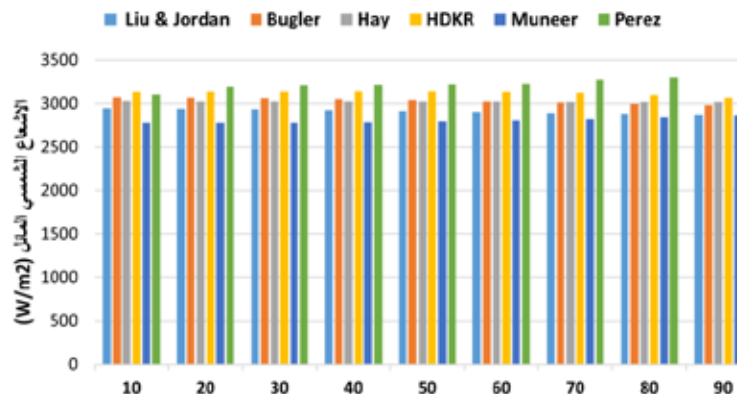
تم اجراء تحليل للبيانات لحساب شدة الاشعاع الشمسي السنوي المائل الكلي، باستخدام 6 نماذج تحويل الأكثر استخداماً حول العالم عند زوايا ميل اسطح المجمعات اشمسية في النطاق 10° - 90° لكل مناطق الدراسة. ومثلت النتائج المتحصل عليها في الأشكال (8-12).



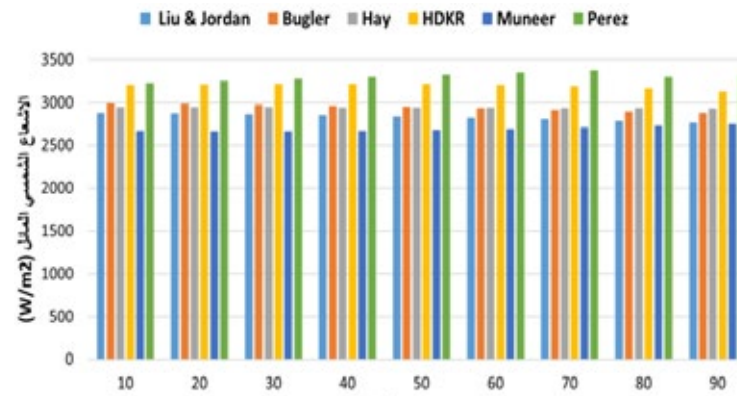
الشكل (8): شدة الاشعاع الشمسي السنوي المائل لمدينة برلين-ألمانيا.



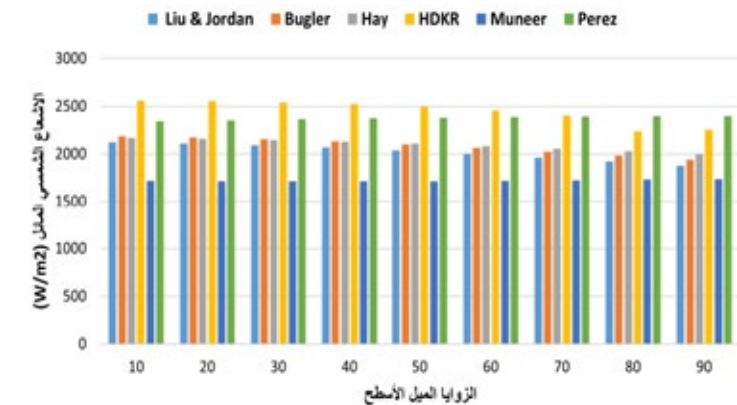
الشكل (9): شدة الاشعاع الشمسي السنوي المائل لمدينة روما-ايطاليا.



الشكل (01): شدة الاشعاع الشمسي السنوي المائل لمدينة طرابلس - ليبيا.



الشكل (11): شدة الاشعاع الشمسي السنوي المائل لمدينة انجمينا- تشاد.



الشكل (12): شدة الاشعاع الشمسي السنوي المائل لمدينة ياوندي- الكاميرون.

من الواضح من الأشكال السابقة وجود تفاوت كبيراً في قيمة الإشعاع الشمسي السنوي المائل المحسوبة باستخدام نماذج التحويل، وتزداد حدة الاختلاف بارتفاع زاوية خط العرض. كذلك لا تظهر النماذج نفس السلوك عند اختلاف زوايا ميل الأسطح. الأمر الذي يعطى أهمية لاجتاد طرق لتحديد النموذج الأنسب لكل موقع جغرافي على الكرة الأرضية.

استناداً على منهجية الدراسة المبينة في الفقرة 2 تم تحديد نموذج التحويل الأقل خطورة لكافة المدن تحت الدراسة ولكل نطاق زوايا الميل  $10^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ، وجدولت النتائج في الجدول (5).

الجدول (5): نماذج تحويل الأقل خطورة للمدن المدروسة ولعدة زوايا ميل الأسطح.

بانديوي	انجامينا	طرابلس	روما	برلين	$\beta$
Liu & Jordan	Perez	HDKR	Liu&Jordan	Liu&Jordan	10
Liu & Jordan	Perez	Perez	Perez	Liu&Jordan	20
Liu & Jordan	Perez	Perez	HDKR	Liu&Jordan	30
Bugler	Perez	Perez	HDKR	Liu&Jordan	40
Liu & Jordan	Perez	Perez	HDKR	Perez	50
Liu & Jordan	Perez	Perez	HDKR	Perez	60
Liu & Jordan	Bugler	Perez	Perez	Perez	70
HDKR	Perez	Liu & Jordan	Perez	Perez	80
HDKR	Perez	Perez	Perez	Perez	90

يتضح من الجدول (5) اعتماد نوعية النموذج على زاوية خط عرض الموقع وايضا زاوية ميل المجمع الشمسي. ولا يمكن تحديد نموذج واحد لمنطقة معينة عند زوايا ميل مختلفة.

بالنسبة لمدينة برلين، يعد النموذج Liu & Jordan الأقل خطورة عند زوايا ميل تتراوح بين  $10^{\circ}$ - $40^{\circ}$ . أما عند الزوايا الميل ما بين  $50^{\circ}$ - $90^{\circ}$  هو Perez. أما بالنسبة لمدينة روما فإن النموذج التحويل الأقل خطورة عند زاوية  $10^{\circ}$  هو Liu & Jordan. أما عند زاوية  $20^{\circ}$  هو Perez. وأما عند الزوايا ميل ما بين  $30^{\circ}$ - $60^{\circ}$  هو HDKR. بينما عند زوايا ميل من  $70^{\circ}$ - $90^{\circ}$  هو Perez. بينما بالنسبة لمدينة طرابلس النموذج التحويل الأقل خطورة عند زاوية ميل  $10^{\circ}$  هو HDKR. وبينما عند باقي زوايا ميل هو Perez. وأما بالنسبة لمدينة انجمينا فإن النموذج التحويل الأقل خطورة عند زوايا ميل تتراوح بين  $10^{\circ}$ - $90^{\circ}$  هو Perez. ماعدا عند زاوية ميل  $70^{\circ}$  هو Bugler. واخيراً بالنسبة لمدينة ياندوي فإن النموذج التحويل الأقل خطورة عند زوايا ميل ما بين  $10^{\circ}$ - $70^{\circ}$  هو Liu & Jordan، ماعدا زاوية ميل  $40^{\circ}$  هو Bugler. أما ما بين زاويتين  $80^{\circ}$ - $90^{\circ}$  هو HDKR. كما ان قيمة الانحراف القصوى للنماذج المختارة لكل مدينة عند أي زاوية ميل هي 12.21%، والتي حدثت في مدينة انجمينا لنموذج Perez عندما كانت زاوية الميل  $60^{\circ}$ . وبالتالي، من الممكن التوصية بنموذج تحويل واحد لكل مدينة. بالنسبة لمدينة برلين كما هو متفق عليه سابقاً. أما بالنسبة لمدينة روما، يعد نموذج HDKR هو الأنسب. في حين أن النموذج الأكثر ملائمة لمدينتي طرابلس وانجمينا كان النموذج Perez، بينما بالنسبة لمدينة ياندوي كان النموذج Liu&Jordan.

وبالرغم من أهمية الموضوع إلا أنه لم يكن هناك الكثير من المراجع عن نماذج تحويل يوصى بها من قبل بحاث محليين للمواقع المدروسة ولعدة زوايا ميل للمجمعات الشمسية. يمثل الجدول (6) نتائج مقارنة الدراسة الحالية مع دراسة سابقة لمدينة طرابلس.

الجدول (6): مقارنة بين نماذج التحويل المتحصل عليها من هذه الدراسة مع نماذج التحويل الموصى بها من دراسات أخرى.

المدينة	زاوية الميل	نماذج التحويل	المرجع	النموذج المقترح في هذه الدراسة	نسبة الانحراف %
طرابلس	30	Liu & Jordan	[35]	Perez	2.66
روما	90	Perez	[36]	Perez	0

يتضح من الجدول (6) قدرة النظرية المستجدة في هذا البحث في الحصول على النموذج الأقل خطورة بدون الحاجة الى معلومات ارضية مقاسة.

## 4. الاستنتاجات والدراسات المستقبلية

تساهم هذه الدراسة في تقدير الإشعاع الشمسي على الأسطح المائلة في عدة مناطق حول العالم الواقع قريبة من خط طول لمدينة طرابلس باستخدام نماذج تحويل، كبديل للبيانات الأرصاد الجوية لتلك المناطق. كما أظهرت هذه الدراسة أن نموذج التحويل يعتمد بشكل كبير على زاوية ميل المجمع الشمسي بالإضافة إلى الموقع. وبالتالي تأخذ هذه المناطق فرصة عادلة في برامج التنمية المستدامة وتساهم في تلطيف الضرر البيئي الناجم من حرق الوقود الأحفوري لإنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية. وكذلك يمكن استخدام النموذج الأقل خطورة لإجراء عمليات النمذجة والأتمتة ودراسات جدوى الاقتصادية والتقنية لمنظومات الطاقة الشمسية وكذلك لحساب احمال الكسب الحراري الشمسي في المباني. وأيضاً تعزز هذه الدراسة إلى تحول إلى مصادر الطاقات المتجددة، خاصة في الدول العالم الثالث. وخصوصاً في مجال الطاقة الشمسية لأنها تتزايد بشكل كبير ومن المتوقع أنه مع زيادة عدد البلدان التي تستثمر في الطاقة الشمسية، ستصبح الطاقة الشمسية أكبر مصدر للطاقة المتجددة في العالم.

ان النجاح الذي حققته النظرية المقترحة في هذا البحث على 5 مدن و 6 نماذج تحويل فقط، وذلك لعدم توفر البيانات الجوية والدراسات المتعلقة بتقدير الأشعة الشمسية في عدة مناطق مختلفة حول العالم، فقد تم تحديد الاهداف التالية في دراسات مستقبلية:

1. إجراء مزيد من الدراسات عن تأثير معاملات اخرى على تحديد نوعية نموذج التحويل المثالي لاي موقع جغرافي على الارض.
2. توسيع البحث بحيث يشمل انواع اخرى من نماذج تحويل الاشعاع الشمسي الافقي الى المائل.
3. توسيع الرقعة الجغرافية للمدن بحيث تشمل تنوعاً جغرافياً ومناخياً واسعاً.

**Authors contribution:** All authors have made a substantial, direct, and intellectual contribution to the work and approved it for publication.

**Funding:** This research received no external funding.

**Data Availability Statement:** No data were used to support this study.

**Conflicts of Interest:** The authors declare that they have no conflict of interest.

**Acknowledgements:** The authors would like to express their appreciation to the Research Center for Renewable Energy and Sustainable Development, Wadi Alshatti University, Brack-Libya, for their support during the study.

## REFERENCES

- [1] Y. Nassar, K. Aissa, and S. Alsadi, "Air Pollution Sources in Libya," *J. Ecol. Environ. Sci.*, vol. 6, no. 1, p. 17, 2018.
- [2] 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," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 23, no. 9, pp. 13998–14026, Sep. 2021, doi: 10.1007/s10668-021-01248-9.
- [3] 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 Econ.*, vol. 08, no. 04, pp. 118–132, 2017, doi: 10.4236/lce.2017.84010.
- [4] M. Andeef et al., "The Role of Renewable Energies in Achieving a More Secure and Stable Future," *Int. J. Electr. Eng. Sustain. IJEES*, vol. 1, p. 10, 2023.
- [5] 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, 2021.
- [6] S. Yousif, A. Salem, Y. Fathi, and I. F. Bader, "Investigation of pollutants dispersion from power stations," *Int. J. Energy Res.*, vol. 30, no. 15, pp. 1352–1362, 2006.
- [7] M. Obaid and A. Jaber, "A Review on Plane to Array Solar Radiation Transposition Models," *Int. J. Res. Anal. Rev.*, vol. 9, no. 2, 2022.

- [8] K. Amer et al., "Power Losses on PV Solar Fields: Sensitivity Analysis and A Critical Review," *Int. J. Eng. Res.*, vol. 9, no. 09, 2020.
- [9] L. Atwoli, G. E. Erhabor, and A. A. Gbakima, "COP27 Climate Change Conference: Urgent action needed for Africa and the world," *Health SA Gesondheid*, p. 3, 2022.
- [10] G. Ziervogel, M. New, E. Archer van Garderen, G. Midgley, A. Taylor, and R. Hamann, "Climate change impacts and adaptation in South Africa," *WIREs Clim. Change*, vol. 5, p. 16, 2014.
- [11] N. Yasser, et al., "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, May 8-9, 2023.
- [12] K. Bakouri, et al., *Learning Lessons from Murzuq-Libya Meteorological Station: Evaluation criteria and improvement recommendations. Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol.12, no.2, 2023, 30-48.
- [13] Y. Nassar, A. Hafez, and S. Alsadi, "Multi-Factorial Comparison for 24 Distinct Transposition Models for Inclined Surface Solar Irradiance Computation in the State of Palestine: A Case Study," *Front. Energy Res.*, vol. 7, p. 163, Feb. 2020, doi: 10.3389/fenrg.2019.00163.
- [14] H. El- Khozondar, et al., "Standalone hybrid PV/Wind/Diesel electric generator system for a COVID-19 Quarantine Center," *Environ Prog Sustainable Energy*, pp. 1-18, 2022.
- [15] H. Quan and D. Yang, "Probabilistic solar irradiance transposition models," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 125, p. 109814, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109814.
- [16] Y. Nassar, S. Alsadi, H. El-Khozondar, and S. Refaat, "Determination of the Most Accurate Horizontal to Tilted Sky-Diffuse Solar Irradiation Transposition Model for the Capital Cities in MENA Region," in *2022 3rd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*, Doha, Qatar: IEEE, Mar. 2022, pp. 1-6. doi: 10.1109/SGRE53517.2022.9774146.
- [17] M. Munoz, E. Ballantyne, D. Stone, "Development and evaluation of empirical models for the estimation of hourly horizontal diffuse solar irradiance in the United Kingdom," *Energy*, vol. 241, no. 2, 2022, p. 122820, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122820>.
- [18] Hong Cai, Wenmin Qin, Lunche Wang, Bo Hu, Ming Zhang, "Hourly clear-sky solar irradiance estimation in China: Model review and validations," *Solar Energy*, vol. 226, no. 8, 2021, pp. 468-482, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.08.066>.
- [19] T. Frimpong, E. Kwaku Anto, E. Ramde, and L. Dzifa Mensah, "Determination of Optimum Tilt Angle for Rooftop Solar Photovoltaic System Installation for KikuKunderhaus in Kumasi," *Int. J. Energy Environ. Sci.*, vol. 5, no. 1, p. 7, 2020, doi: 10.11648/j.ijees.20200501.12.
- [20] A. Barbón, C. Bayón-Cueli, L. Bayón, and C. Rodríguez-Suanzes, "Analysis of the tilt and azimuth angles of photovoltaic systems in non-ideal positions for urban applications," *Appl. Energy*, vol. 305, p. 117802, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.117802.
- [21] Y. Nassar, "Analytical-numerical computation of view factor for several arrangements of two rectangular surfaces with non-common edge," *International journal of heat and mass transfer*, vol. 159, no. 10, 2020, p. 120130. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120130>
- [22] Y. Nassar and S. Alsadi, "View factors of flat solar collectors array in flat, inclined, and step-like solar fields," *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 138, no. 6, p.061005. <https://doi.org/10.1115/1.4034549>
- [23] Y. Nassar, et al., "View factors in horizontal plane fixed-mode solar PV fields," *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, no. 5, 2022, p. 859075. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.859075>

- [24] S. Alsadi, Y. Nassar, "Estimation of solar irradiance on solar fields: an analytical approach and experimental results," *IEEE transactions on sustainable energy*, vol. 8, no. 4, 2017, pp. 1601-1608. <https://doi.org/10.1109/TSTE.2017.2697913>
- [25] Y. Nassar, et al., "Analysis of the View Factors in Rooftop PV Solar," In the 3<sup>rd</sup> International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE), 20-22 March 2022, Doha, Qatar. <https://doi.org/10.1109/SGRE53517.2022.9774104>
- [26] T. Chen, et al., "Leveraging MPPT capability for solar irradiance estimation: H-INC-IBS-based assessment of explicit models under real-world climatic conditions," *Computers and Electrical Engineering*, vol. 118, no. 8, p. 109366, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2024.109366>
- [27] N. Lukac, D. Mongus, B. Žalik, G. Štumberger, M. Bizjak, "Novel GPU-accelerated high-resolution solar potential estimation in urban areas by using a modified diffuse irradiance model," *Applied Energy*, vol. 353, no. 1, 2024, p. 122129, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122129>.
- [28] Y Fathi. *Solar energy engineering, active applications, a book of 528 pages*, Sebha university publications, Libya, 2006. [https://www.researchgate.net/publication/374471974\\_ktab\\_altaqt\\_alshmsyt](https://www.researchgate.net/publication/374471974_ktab_altaqt_alshmsyt)
- [29] B. Liu and R. Jordan, "The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors," *Sol. Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 53-74, Apr. 1963.
- [30] 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, 1976.
- [31] J. Hay. "Calculating solar radiation for inclined surfaces: practical approaches." *Renew. Energy* 3, 373-380, 1993. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(93\)90104-O](https://doi.org/10.1016/0960-1481(93)90104-O)
- [32] D. Reindl, W. Beckman, and J. Dufte, "Evaluation of Hourly Tilted Surface Radiation Models," *Sol. Energy*, vol. 47, 1990.
- [33] T. Muneer, "Solar radiation models for Europe." *Build. Serv. Eng. Res. Technol.* 11, 153-163, 1993. <https://doi.org/10.1177/014362449001100405>
- [34] R. Perez, R. Seals, P. Ineichen, R. Stewart, and J. Michalsky, "Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance." *Solar Energy* 44, 271-289, 1990. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(90\)90055-H](https://doi.org/10.1016/0038-092X(90)90055-H)
- [35] N. Yasser, 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," *Int. Maghreb Meet. Conf. Sci.*, 2022, doi: 10.1109.
- [36] D. Paul, G. De Michele, B. Najafi, S. Avesani, " Benchmarking clear sky and transposition models for solar irradiance estimation on vertical planes to facilitate glazed facade design," *Energy and Buildings*, vol. 255, no. 1, 2022, p.111622, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111622>