

دولة ليبيا



جامعة الزاوية

إدارة الدراسات العليا والتدريب

كلية العلوم/ قسم الفيزياء

تقدير الإشعاع الشمسي الكلي باستخدام بيانات درجة حرارة الهواء في مدينة الزاوية

Estimation of total solar radiation using air temperature data in the city of Al-zawia

إعداد الطالبة: أسماء الطاهر محمد أبوراس

إشراف الدكتورة: أسماء مصباح مفتاح سعيد

الدرجة العلمية: أستاذ

قدمت هذه الرسالة استكمالاً لمتطلبات الإجازة العالية (الماجستير) في الفيزياء

بتاريخ 1447/2/6 هـ الموافق 2025/7/31م

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

﴿هُوَ الَّذِي جَعَلَ الشَّمْسَ ضِيَاءً وَالْقَمَرَ نُورًا وَقَدَّرَهُ
مَنَازِلَ لِتَعْلَمُوا عَدَدَ السِّنِينَ وَالْحِسَابِ ۚ مَا خَلَقَ اللَّهُ ذَلِكَ إِلَّا
بِالْحَقِّ نُفَصِّلُ الْآيَاتِ لِقَوْمٍ يَعْلَمُونَ﴾

(سورة يونس، الآية 5)

الإهداء

إلى منارة دربي الأولى، والديّ العزيزين،
رمز التضحية والعطاء، من لم يبخلأ عليّ يوماً بالدعم والتشجيع.
إلى زوجي الغالي.
إلى سندي وقوتي، إخوتي وأخواتي.
الذين كانوا لي خير معين ورفيق في الدرب.
وإلى أطفالي قرّة عيني.
الذين كانوا دافعي للمثابرة والإنجاز.
وإلى كل أفراد عائلتي وأصدقائي المخلصين.
وإلى كل باحثٍ عن المعرفة، وساعٍ نحو النور.
أهدي هذا الجهد المتواضع، ثمرة صبركم ودعائكم.

الباحثة

أسماء الطاهر محمد أبوراس

الشكر والتقدير

الحمد لله رب العالمين، الذي بنعمته تتم الصالحات، وبتوفيقه تتحقق الغايات، له الحمد

والشكر أولاً وآخرأً، على ما أنعم
ن قوة وعزيمة لإتمام هذا العمل.

يُطيب لي أن أتقدم بأسمى آيات الشكر والعرفان والتقدير، إلى كل أساتذتي الأفاضل في قسم

الفيزياء بكلية العلوم - جامعة الزاوية، على ما قدموه لي من علم ومعرفة خلال مسيرتي

الدراسية.

وأخص بالذكر الأستاذ الدكتور الفاضل: الطاهر أبوعين، صاحب فكرة هذا البحث، ومؤسس

دعائمه فله مني جزيل الشكر والعرفان والامتنان.

ولا يفوتني أن أتقدم الشكر الجزيل والتقدير، إلى كل من مدّ لي يد العون والمساعدة في إنجاز

هذا العمل، سواء بالرأي، أو بالمشورة، أو بتوفير البيانات اللازمة.

ختاماً، أتوجه بالشكر الجزيل إلى عائلتي الكريمة، والديّ، وزوجي، وأبنائي، وإخوتي وأخواتي،

على صبرهم وتحملهم، ودعمهم المتواصل، الذي كان له أكبر الأثر في إنجاز هذه الرسالة.

والله ولي التوفيق.

الباحثة: أسماء الطاهر محمد أبوراس

قائمة المحتويات

ر.م	الموضوع	ر.ص
	قائمة المحتويات	I
	قائمة الأشكال	VI
	قائمة الجداول	VIII
	الملخص العربي	X
	الملخص الإنجليزي	XII
الفصل الأول	المقدمة	
1.	المقدمة	2
1.1.	مشكلة الدراسة	4
2.1.	أهمية الدراسة	6
3.1.	أهداف الدراسة	7
4.1.	حدود الدراسة	7
5.1.	مصطلحات الدراسة	8
الفصل الثاني	الإطار النظري والدراسات السابقة	
1.2.	مقدمة	11
2.2.	الطاقة المتجددة والتنمية المستدامة	11
1.2.2.	مصادر الطاقة المتجددة الرئيسية	13
2.2.2.	الطاقة المتجددة وأهداف التنمية المستدامة	14
3.2.	الطاقة الشمسية كمورد رئيسي	14
1.3.2.	وفرة الطاقة الشمسية ومزاياها	15
2.3.2.	أنواع تقنيات الطاقة الشمسية	17
3.3.2.	إمكانات الطاقة الشمسية عالميا ومحليا (ليبيا)	18
4.3.2.	تطبيقات الطاقة الشمسية في ليبيا	20
5.3.2.	إمكانات وتحديات استغلال الطاقة الشمسية	22
4.2.	البنية الداخلية للشمس ومصدر طاقتها (الاندماج النووي)	24
1.4.2.	الخصائص الفيزيائية الرئيسية للشمس	26
5.2.	مفهوم الإشعاع الشمسي	30

ر.م	الموضوع	ر.ص
1.5.2	طبيعة الإشعاع الكهرومغناطيسي وطيفه	31
2.5.2	تفاعل الإشعاع الشمسي مع الغلاف الجوي	31
3.5.2	عمليات التوهين الرئيسية	32
6.2	الإشعاع الشمسي على سطح الأرض	34
1.6.2	مكونات الإشعاع الشمسي السطحي	34
2.6.2	العوامل المؤثرة في الإشعاع الشمسي السطحي	37
7.2	قياس الإشعاع الشمسي	42
1.7.2	الحاجة إلى القياس الدقيق	42
2.7.2	أجهزة القياس الرئيسية	42
3.7.2	تحديات القياس الميداني	46
8.2	مبررات الحاجة إلى نماذج التقدير	47
1.8.2	العلاقة الفيزيائية بين درجة حرارة الهواء والإشعاع الشمسي	48
2.8.2	نماذج قياس تأثير العوامل المؤثرة في الإشعاع الشمسي	49
3.8.2	تصنيف نماذج التقدير المعتمدة على درجة الحرارة	51
4.8.2	استعراض النماذج التجريبية الرئيسية	51
	النموذج 1: نموذج هارجريفز-ساماني	52
	النموذج 2: نموذج بريستو-كامبل	52
	النموذج 3: نموذج الين	53
	النموذج 4: نموذج أنانديل	54
	النموذج 5: نموذج دوناتيلي وكامبل	54
	النموذج 6: نموذج هانت وآخرين	55
	النموذج 7: نموذج وينسلو	55
	النماذج المتقدمة (الهجينة وتعلم الآلة)	56
9.2	الدراسات السابقة	57
1.9.2	الدراسات السابقة حول تطوير وتقييم نماذج تقدير الإشعاع الشمسي باستخدام درجة الحرارة	57
2.9.2	الدراسات السابقة ذات الصلة بالسياق الليبي	59
10.2	خلاصة الإطار النظري وتحديد فجوة البحث	60

ر.م	الموضوع	ر.ص
الفصل الثالث	المواد وطرق الدراسة والمنهجية	
1.3.	البيانات المستخدمة	63
2.3.	موقع الدراسة وبيانات المجال	64
3.3.	المنهجية المتبعة	66
1.3.3.	نموذج هارجريفز (Hargreaves model)	66
2.3.3.	نموذج الين (Allen model)	67
3.3.3.	نموذج آناندل (Annandale model)	67
4.3.3.	تعديل وتطوير معادلة نموذج الين لتحديد قيمة معامل تجريبي (Kr) جديدة	67
4.3.	الحساب الإشعاعي الشمسي	70
5.3.	تحليل التباين السنوي	70
6.3.	تحليل الانحدار الخطي والمتعدد	71
7.3.	تقييم أداء النماذج (المؤشرات الإحصائية المستخدمة)	71
8.3.	المقارنة بين تقديرات النماذج الأصلية والمعدلة والبيانات الفعلية للإشعاع الشمسي	72
الفصل الرابع	النتائج والمناقشة	
1.4.	تقديرات الإشعاع الشمسي اليومي الشهرية لمدينة الزاوية باستخدام نموذج هارجريفز (model Hargreaves) وبيانات درجات الحرارة الصغرى والعظمى	76
1.1.4.	النمط الموسمي للإشعاع الشمسي (نموذج هارجريفز)	77
2.1.4.	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية (نموذج هارجريفز)	79
3.1.4.	دقة النموذج (هارجريفز)	81
2.4.	تقديرات الإشعاع الشمسي اليومي الشهرية لمدينة الزاوية باستخدام نموذج الين (Allen model)	82
1.2.4.	النمط الموسمي للإشعاع الشمسي (نموذج الين)	83
2.2.4.	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية (نموذج الين)	86
3.2.4.	تأثير الارتفاع على قيم Kr (نموذج الين)	87

ر.م	الموضوع	ر.ص
4.2.4	دقة النموذج (نموذج الين)	88
3.4	تقدير الإشعاع الشمسي اليومي لمدينة الزاوية باستخدام نموذج أنانديل (Annandale model)	89
1.3.4	النمط الموسمي للإشعاع الشمسي (نموذج أنانديل)	90
2.3.4	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية (نموذج أنانديل)	92
3.3.4	تأثير الارتفاع على قيم المعامل a (نموذج أنانديل)	94
4.3.4	دقة النموذج (نموذج أنانديل)	94
4.4	تقدير الإشعاع الشمسي اليومي لمدينة الزاوية باستخدام المعادلة المعدلة لنموذج الين	95
1.4.4	النمط الموسمي للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية (نموذج الين المعدل)	96
2.4.4	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية (نموذج الين المعدل)	98
3.4.4	دقة النموذج (نموذج الين المعدل)	99
5.4	تحليل التباين (Variance Analysis) السنوي للإشعاع الشمسي المقدر	100
6.4	نتائج تحليل الانحدار لتقييم العلاقات بين النماذج	102
7.4	نتائج تحليل ومقارنة تفصيلية لمؤشرات الخطأ ومؤشر الارتباط لنماذج الدراسة	104
8.4	مقارنة تفصيلية بين النماذج في تقدير الإشعاع الشمسي لمدينة الزاوية	109
9.4	تطوير وتقييم معادلة الين المعدلة وأثرها على نتائج التقدير	113
10.4	مقارنة الإشعاع الشمسي المقدر بالنماذج مع بيانات TerraClimate	114
1.10.4	مقارنة النمط الموسمي للإشعاع الشمسي المقدر والفعلي	115
2.10.4	مقارنة القيم المقدرة للإشعاع الشمسي بين النماذج والبيانات الفعلية	115
3.10.4	التغيرات السنوية (في النماذج)	115

ر.م	الموضوع	ر.ص
4.10.4	التغيرات السنوية في الإشعاع الشمسي (في بيانات TerraClimate)	116
5.10.4	المتوسط السنوي للإشعاع الشمسي	116
6.10.4	دقة النماذج في تقدير الإشعاع الشمسي (مقارنة بـ TerraClimate)	117
11.4	مناقشة النتائج	117
الفصل الخامس	الاستنتاجات والتوصيات	
1.5	الاستنتاجات	123
2.5	التوصيات	124
6	المراجع	
1.6	المراجع العربية	128
2.6	المراجع الأجنبية	128
3.6	المواقع الإلكترونية	137
7	الملاحق (Appendices)	
الملحق (1):	بيانات درجات الحرارة الصغرى والعظمى لمدينة الزاوية للفترة (2023-2000)	139
	درجة الحرارة الصغرى لمدينة الزاوية للفترة (2023-2000)	139
	درجة الحرارة العظمى لمدينة الزاوية للفترة (2023-2000)	140
ملحق (2):	البيانات الفعلية للإشعاع الشمسي لمدينة الزاوية (من TerraClimate)	141
	جدول متوسط الإشعاع الشمسي الشهري (MJ/m ² /day) من بيانات TerraClimate	141
	جدول متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m ² /day) من بيانات TerraClimate	142

قائمة الأشكال

ر.م	عنوان الشكل	ر.ص
1.	المجموع السنوي للإشعاع الأفقي العالمي 1986-2005	16
2.	ترتيب الطبقات المكونة للشمس	26
3.	الهيكل التخطيطي للشمس	26
4.	خصائص الشمس والأرض	28
5.	يوضح طيف الشمس	30
6.	تغير زاوية الانحراف مع اليوم التاسع من السنة.	39
7.	رسم خطي لمقياس الإشعاع الشمسي، يوضح الأجزاء الأساسية.	43
8.	مقطع تخطيطي لجهاز قياس الحرارة بالقرص الفضائي (Pyrheliometer).	45
9.	حلقة الظل مع مقياس الإشعاع الشمسي Hukseflux SR300-D1 لقياس الإشعاع المنتشر.	46
10.	الموقع (https://climatetoolbox.org/tool/data-download) الخاص بتجميع البيانات الشهرية للمناخ.	64
11.	المناخ في مدينة الزاوية	65
12.	متوسط درجات الحرارة العظمى والصغرى في الزاوية	65
13.	النمط الموسمي للإشعاع الشمسي المقدر (بحسب نموذج هارجريفز) للسنوات (2000، 2010، 2015، 2023 كمثال).	78
14.	مقارنة للإشعاع الشمسي المقدر (بحسب نموذج هارجريفز) بين شهري (يونيو ويوليو) وشهري (يناير وديسمبر) للسنوات (2000-2023).	79
15.	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) بحسب تقدير نموذج هارجريفز لكل سنة من سنوات الدراسة.	81
16.	النمط الموسمي للإشعاع الشمسي المقدر (بحسب نموذج الين) للسنوات (2000، 2010، 2015، 2020، 2023 كمثال).	84
17.	مقارنة للإشعاع الشمسي المقدر (بحسب نموذج الين) بين شهري (يونيو ويوليو) وشهري (يناير وديسمبر) للسنوات (2000-2023).	85

ر.م	عنوان الشكل	ر.ص
18.	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) بحسب تقدير نموذج الين لكل سنة من سنوات الدراسة.	87
19.	النمط الموسمي للإشعاع الشمسي المقدر (بحسب نموذج أنانديل) للسنوات (2000، 2010، 2015، 2020، 2023 كمثال).	91
20.	مقارنة للإشعاع الشمسي المقدر (بحسب نموذج أنانديل) بين شهري (يونيو ويوليو) وشهري (يناير وديسمبر) للسنوات (2000-2023).	92
21.	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) بحسب تقدير نموذج أنانديل لكل سنة من سنوات الدراسة.	94
22.	النمط الموسمي للإشعاع الشمسي المقدر (بحسب نموذج الين المعدل) للسنوات (2000، 2010، 2015، 2020، 2023 كمثال).	97
23.	مقارنة للإشعاع الشمسي المقدر (بحسب نموذج الين المعدل) بين شهري (يونيو ويوليو) وشهري (ديسمبر) للسنوات (2000-2023).	98
24.	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) بحسب تقدير نموذج أنانديل لكل سنة من سنوات الدراسة.	99
25.	توزيع قيم مؤشرات الخطأ الإحصائية لتقديرات نماذج الدراسة للإشعاع الشمسي بمدينة الزاوية للسنوات (2000-2023).	107
26.	قيم الارتباط (R^2) بين نماذج تقدير الإشعاع الشمسي الخاصة بالدراسة.	109
27.	مقارنة بين تقديرات الإشعاع الشمسي الشهرية بمدينة الزاوية للأشهر (من يناير إلى يونيو) بحسب نماذج الدراسة هارجريفز وآلين وأنانديل والين المعدل للسنوات (2000-2023).	110
28.	مقارنة بين تقديرات الإشعاع الشمسي الشهرية بمدينة الزاوية للأشهر (من يوليو إلى ديسمبر) بحسب نماذج الدراسة هارجريفز وآلين وأنانديل والين المعدل للسنوات (2000-2023).	111

قائمة الجداول

ر.م	عنوان الجدول	ر.ص
الجدول (1):	خصائص الشمس	27
الجدول (2):	متوسط الأيام الموصي بها للأشهر وقيم n لكل شهر	39
الجدول (3):	قيم الإشعاع الشمسي الشهري (بوحدة ميغا جول لكل متر مربع في اليوم، MJ/m ² /day) في مدينة الزاوية خلال الفترة من 2000 إلى 2023، وذلك بناء على تقديرات نموذج هارديجر.	76
الجدول (4):	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m ² /day) بحسب تقديرات نموذج هارديجر لسنوات الدراسة.	80
الجدول (5):	الإشعاع الشمسي الشهري المقدر (MJ/m ² /day) لمدينة الزاوية (2023-2000) بحسب نموذج الين.	82
الجدول (6):	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m ² /day) بحسب تقديرات نموذج الين لسنوات الدراسة.	86
الجدول (7):	متوسط الإشعاع الشمسي الشهري (MJ/m ² /day) لمدينة الزاوية (2023-2000) بحسب نموذج أنانديل.	89
الجدول (8):	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m ² /day) بحسب تقديرات نموذج أنانديل لسنوات الدراسة.	93
الجدول (9):	متوسط الإشعاع الشمسي الشهري (MJ/m ² /day) لمدينة الزاوية (2023-2000) بحسب نموذج الين المعدل.	95
الجدول (10):	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m ² /day) بحسب تقديرات نموذج الين المعدل لسنوات الدراسة.	98
الجدول (11):	ملخص مقارن للتباين السنوي بين نماذج الدراسة.	101
الجدول (12):	قيم مؤشرات الخطأ الإحصائية لتقديرات نموذج هارديجر للإشعاع الشمسي بمدينة الزاوية للسنوات (2023-2000).	104
الجدول (13):	يوضح قيم مؤشرات الخطأ الإحصائية لتقديرات نموذج الين للإشعاع الشمسي بمدينة الزاوية للسنوات (2023-2000).	105
الجدول (14):	قيم مؤشرات الخطأ الإحصائية لتقديرات نموذج أنانديل للإشعاع الشمسي بمدينة الزاوية للسنوات (2023-2000).	106

ر.م	عنوان الجدول	ر.ص
الجدول (15):	قيم مؤشرات الخطأ الإحصائية لتقديرات نموذج الين المعدل للإشعاع الشمسي بمدينة الزاوية للسنوات (2000-2023).	106
الجدول (16):	مقارنة تفصيلية بين النماذج الثلاثة (هارجيرفز، الين، وأنانديل) في تقدير الإشعاع الشمسي لمدينة الزاوية.	112
الجدول (17):	جدول يعرض مقارنة بين متوسط قيم الإشعاع الشمسي السنوي لكل نموذج (هارجيرفز-أنانديل-الين-الين المعدل) بوحدة (ميغا جول لكل متر مربع في اليوم) وقيم متوسط الإشعاع الشمسي السنوي الفعليه من بيانات TERRACLIMATE لمدينة الزاوية من العام 2000 الى 2023	126

المخلص:

هدفت هذه الدراسة إلى تقدير الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية بليبيا، نظراً لأهمية الطاقة الشمسية كمصدر واعد للطاقة المتجددة والنظيفة، وفي ظل محدودية بيانات القياس المباشر للإشعاع الشمسي في المنطقة، ركزت الدراسة على تطوير وتقييم نماذج رياضية تجريبية، تعتمد بشكل أساسي على بيانات درجات الحرارة، وذلك لتقدير متوسط الإشعاع الشمسي اليومي. استعرضت الدراسة ثلاثة نماذج تجريبية شائعة: نموذج هارجريفز (Hargreaves)، ونموذج الين (Allen)، ونموذج آنانديل (Annandale)، بالإضافة إلى تطوير معادلة معدلة لنموذج الين (Modified Allen model)، من خلال تحديد قيمة جديدة لمعامل تجريبي (Kr) خاص بمدينة الزاوية، بهدف تحسين دقة التقديرات. وذلك باستخدام بيانات مناخية للفترة الممتدة من عام 2000 إلى 2023 من موقع TerraClimate. وأظهرت النتائج أن جميع النماذج استطاعت التقاط النمط الموسمي العام للإشعاع الشمسي، حيث ترتفع القيم في أشهر الصيف وتنخفض في الشتاء، وعند مقارنة أداء النماذج المختلفة، أثبت نموذج الين المعدل (Modified Allen model) أنه الأفضل أداءً، والأكثر دقة وموثوقية في تقدير الإشعاع الشمسي لمدينة الزاوية، حيث سجل أقل قيم لمؤشرات الخطأ الإحصائية (مثل RMSE, MBE, MABE, MPE)، وأعلى قيمة لمعامل الارتباط (R). في حين أظهرت النماذج الأخرى (هارجريفز، الين الأصلي، وآنانديل) تبايناً أكبر في دقة التقديرات، مقارنة بالنموذج المعدل والبيانات الفعلية (عند مقارنتها بشكل غير مباشر).

خلصت الدراسة إلى أن نموذج الين المعدل يوفر أداة قيمة وفعالة لتقدير الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية، والمناطق ذات الظروف المناخية المشابهة، التي تقتقر إلى محطات قياس مباشر. وأوصت الدراسة باستخدام هذا النموذج المعدل، مع التأكيد على أهمية تضمين متغيرات مناخية إضافية في النماذج المستقبلية، وإجراء دراسات مستقبلية باستخدام نماذج أكثر تعقيداً، وإنشاء محطات قياس مباشر لتعزيز دقة التقديرات.

Thesis Abstract

This study aimed to estimate solar radiation in Al Zawiyah, Libya, given the importance of solar energy as a promising renewable and clean energy source, and in light of the limited direct solar radiation measurement data in the region. The research focused on developing and evaluating empirical mathematical models, primarily based on temperature data, sunshine duration, and altitude, to estimate average daily solar radiation. The study reviewed three common empirical models: the Hargreaves model, the Allen model, and the Annandale model. Additionally, a modified Allen model was developed by determining a new empirical coefficient (K_r) specific to Al Zawiyah to enhance estimation accuracy. Climatic data for the period 2000-2023 were obtained from the Terra Climate dataset. The results indicated that all models successfully captured the general seasonal pattern of solar radiation, with values increasing during summer months and decreasing during winter. Upon comparing the performance of the different models, the modified Allen model proved to be the best performing, most accurate, and most reliable for estimating solar radiation in Al Zawiyah. It registered the lowest values for statistical error indicators (e.g., RMSE, MBE, MABE, MPE) and the highest value for the coefficient of determination (R^2). In contrast, the other models (Hargreaves, original Allen, and Annandale) showed greater variability in estimation accuracy compared to the modified model and (indirectly compared) actual data.

The study concluded that the modified Allen model provides a valuable and effective tool for estimating solar radiation in Al Zawiyah and similar climatic regions lacking direct measurement stations. The study recommended the use of this modified model, emphasizing the

importance of including additional meteorological variables in future models, conducting further research using more complex models, and establishing direct measurement stations to enhance estimation accuracy.

الفصل الأول: المقدمة

- مشكلة الدراسة
- أهمية الدراسة
- أهداف الدراسة
- حدود الدراسة
- مصطلحات الدراسة

الفصل الأول: المقدمة (Chapter 1: Introduction)

1. المقدمة (Introduction):

تُعدّ الطاقة الشمسية من أهم مصادر الطاقة المتجددة والنظيفة التي يمكن الاعتماد عليها لتلبية الاحتياجات المتزايدة من الطاقة، وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري الذي يساهم بشكل كبير في تغير المناخ والاحتباس الحراري. (Tiwari, 2024) وفي هذا السياق، يكتسب التقييم الدقيق للإشعاع الشمسي أهمية بالغة، فهو أساس تصميم وتشغيل أنظمة الطاقة الشمسية بكفاءة عالية. (Lang, 2006) وفي ظل محدودية محطات القياس المباشرة للإشعاع الشمسي، أصبح الاعتماد على النماذج الرياضية لتقدير هذه الطاقة أمراً ضرورياً، خاصة في المناطق التي تفتقر إلى البيانات المباشرة (Duffie & Beckman, 2013).

تتمتع ليبيا بموقع جغرافي متميز، حيث تتلقى كميات كبيرة من الإشعاع الشمسي على مدار العام، مما يجعلها مؤهلة بشكل خاص للاستثمار في مشاريع الطاقة الشمسية (Elmnifi et al., 2024; NSREEE, 2023). وتُعدّ مدينة الزاوية، الواقعة على الساحل الغربي لليبيا، من المناطق الواعدة، التي يمكن استغلال هذا المورد فيها بشكل فعال. (الطباخ، 2002) إلا أن التخطيط لمشاريع الطاقة الشمسية في هذه المنطقة يتطلب فهماً دقيقاً لخصائص الإشعاع الشمسي المتاح، وكيفية تغيره مع مرور الوقت، وهو ما لا يمكن تحقيقه إلا من خلال نماذج رياضية، تعتمد على متغيرات مناخية متاحة (Jäger et al., 2014).

ينتقل الإشعاع الشمسي عبر الفضاء الخارجي ليصل إلى الأرض في شكل موجات كهرومغناطيسية (Tiwari, 2024). ويتم تصنيف هذا الإشعاع إلى ثلاثة أنواع رئيسية: إشعاع الحزمة (المباشر)، والإشعاع المنتشر، والإشعاع الكلي (Iqbal, 1983). ويتم قياس الإشعاع الشمسي عادة باستخدام أجهزة متخصصة، مثل جهاز القياس الشمسي الكلي (Pyranometer)

الذي يقيس الإشعاع الكلي الساقط على سطح ما، وجهاز قياس الإشعاع الشمسي المباشر (Pyrheliometer)، الذي يقيس الإشعاع المباشر فقط (Duffie & Beckman, 2013). كما يُستخدم جهاز قياس الإشعاع المنتشر (Diffusometer) لقياس الإشعاع المنتشر فقط.

تعتمد النماذج الرياضية المستخدمة لتقدير الإشعاع الشمسي على متغيرات مناخية مختلفة، حيث تشمل النماذج البسيطة تلك التي تعتمد على بيانات درجة الحرارة فقط، مثل نموذج "هارجريفز" (Hargreaves, 1982)، في حين أن النماذج الأكثر تعقيداً قد تتضمن بيانات إضافية مثل الضغط الجوي، كما في نموذج "آلين" (Allen, 1997)، أو الارتفاع عن سطح البحر، كما في نموذج "أنانديل" (Annandale *et al.*, 2002). وتختلف هذه النماذج أيضاً في طريقة حساب المعاملات التجريبية، وفي مدى مراعاتها للعوامل الجغرافية والمناخية المؤثرة في الإشعاع الشمسي.

ترتكز الدراسة الحالية على ثلاثة نماذج تجريبية معروفة، وهي: نموذج "هارجريفز" الذي يعتمد بشكل أساسي على بيانات درجة الحرارة، ونموذج "آلين" الذي يأخذ في الاعتبار درجة الحرارة والضغط الجوي، ونموذج "أنانديل" الذي يعتمد على درجة الحرارة والارتفاع عن سطح البحر. وقد تم اختيار هذه النماذج نظراً لشيوع استخدامها في الأبحاث السابقة، وتنوعها من حيث المتغيرات المناخية المستخدمة. كما تم اختيارها لأنها لا تحتاج إلى بيانات معقدة، وتُعدّ مناسبة لتقدير الإشعاع الشمسي في المناطق التي تفتقر إلى البيانات المباشرة.

تتناول الدراسة عدداً من الجوانب مهمة، بدءاً من استعراض الأدبيات النظرية التي تبين مفهوم الطاقة الشمسية وخصائصها، مروراً بشرح المبادئ الفيزيائية للإشعاع الشمسي، ومصادره، وخصائصه الطيفية، وطرق قياسه وتقديره، والعوامل المؤثرة عليه (Iqbal, 1983; Proutsos *et al.*, 2022; El-Nouby, 2010). وبعد ذلك، تنتقل الدراسة

إلى الجانب العملي، حيث يتم تطبيق النماذج المذكورة على بيانات مناخية من مدينة الزاوية، وتحليل النتائج، وتقييم أداء النماذج المستخدمة باستخدام مجموعة من المؤشرات الإحصائية (Wong & Chow, 2001; Despotovic *et al.*, 2016).

1.1. مشكلة الدراسة:

تتزايد أهمية الطاقة الشمسية كمصدر مستدام ونظيف للطاقة، مما يدفع إلى ضرورة تطوير نماذج دقيقة لتقدير الإشعاع الشمسي، خاصة في المناطق التي تقتصر إلى محطات القياس المباشرة. وتُعدّ مدينة الزاوية في ليبيا، والتي تتميز بإمكانات شمسية واعدة، من هذه المناطق التي تحتاج إلى تقديرات دقيقة للإشعاع الشمسي لتلبية احتياجاتها المتزايدة من الطاقة، وللتخطيط الفعال لمشاريع الطاقة المتجددة.

إلا أن تقدير الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية يواجه تحديات عدة، من بينها: محدودية البيانات المباشرة للإشعاع الشمسي، وتأثير العوامل المناخية المختلفة على كمية الإشعاع الواصل إلى سطح الأرض. هذا النقص في البيانات المباشرة يجعل من الاعتماد على النماذج الرياضية أمرًا لا مفرّ منه، مما يثير تساؤلات حول دقة هذه النماذج، ومدى ملاءمتها للظروف المناخية المحلية في مدينة الزاوية.

تعتمد العديد من الدراسات السابقة على نماذج تجريبية لتقدير الإشعاع الشمسي، وتستخدم في ذلك بيانات مناخية مختلفة، مثل درجة الحرارة، والرطوبة، وساعات سطوع الشمس (El-Metwally, 2005; Salisu, 2017)، ومع ذلك، فإن هذه النماذج قد لا تكون دقيقة بالقدر الكافي في المناطق التي تختلف ظروفها المناخية عن المناطق التي تم تطوير النماذج فيها (Gevorgian *et al.*, 2023; Si *et al.*, 2021). فمثلاً، أشارت دراسة (الطباخ، 2002) إلى أهمية مقارنة الإشعاع الشمسي المقاس مع المحسوب في مدينة طرابلس، للتأكد من دقة

التقديرات المستخدمة في تصميم الأنظمة الشمسية. وفي المقابل، بينت دراسة (El-Sebaili & Trabea, 2003) أن العوامل المناخية تؤثر بشكل كبير على امتصاص وتشتت الإشعاع الشمسي. كما أظهرت دراسة (Proutsos *et al.*, 2022) تأثير مكونات الغلاف الجوي، مثل جزيئات الهواء، وبخار الماء، والأوزون على الإشعاع.

بالإضافة إلى ذلك، تختلف النماذج الرياضية فيما بينها في طريقة حساب المتغيرات، وكيفية أخذها في الاعتبار لتأثير العوامل المناخية المختلفة. فـنموذج "هارجريفز" يعتمد بشكل أساسي على بيانات درجة الحرارة فقط، في حين يضيف نموذج "آلين" الضغط الجوي إلى جانب درجة الحرارة. أما نموذج "أنانديل"، فيأخذ في الاعتبار تأثير الارتفاع عن سطح البحر (Hargreaves, 1982; Allen, 1997; Annandale *et al.*, 2002). هذا التباين في طريقة عمل النماذج قد يؤدي إلى اختلافات في قيم الإشعاع الشمسي المقدر، وهو ما يستدعي الحاجة إلى دراسة تقييمية لأداء هذه النماذج في منطقة الزاوية لتحديد مدى ملاءمتها.

تكمن المشكلة البحثية في عدم وجود دراسات كافية تقيم أداء هذه النماذج التجريبية في تقدير الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية، وكذلك في عدم وجود فهم دقيق لكيفية تأثير العوامل المناخية المحلية على دقة هذه النماذج. هذا النقص في المعرفة يمثل تحدياً أمام التخطيط الفعال لمشاريع الطاقة الشمسية في هذه المدينة، ويجعل من الضروري تقييم أداء النماذج المتاحة، وتحديد النموذج الأنسب لتقديم تقديرات دقيقة وموثوقة للإشعاع الشمسي (Kumar *et al.*, 2022; Jahani *et al.*, 2017).

2.1. أهمية الدراسة:

تكتسب هذه الدراسة أهمية خاصة في ظل التوجه العالمي المتزايد نحو الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة، وفي مقدمتها الطاقة الشمسية، فمن خلال توفير تقديرات دقيقة للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية، يمكن لهذه الدراسة أن تساهم في التخطيط الفعال لمشاريع الطاقة الشمسية في هذه المنطقة، وجذب الاستثمارات اللازمة لتطوير هذا القطاع. إضافة إلى ذلك، فإن فهمنا لخصائص الإشعاع الشمسي، وكيفية تأثير العوامل المناخية عليه، يساعدنا في تحسين تصميم الأنظمة الشمسية، وتحديد المواقع المثلى لإنشائها.

إن استخدام النماذج الرياضية لتقدير الإشعاع الشمسي، يُعدّ بديلاً فعالاً عن القياسات المباشرة، التي قد تكون غير متوفرة أو مكلفة في بعض المناطق، وبتقييم أداء النماذج الشائعة مثل "هار جريفز" و"آلين" و"أنانديل"، فإن هذه الدراسة تتيح لنا تحديد النموذج الأنسب للظروف المناخية في مدينة الزاوية، مما يضمن الحصول على تقديرات دقيقة وموثوقة للإشعاع الشمسي. هذا بدوره يساهم في اتخاذ قرارات مستنيرة في مجال تصميم وتنفيذ مشاريع الطاقة الشمسية، ويقلل من المخاطر الاستثمارية في هذا القطاع.

تتجاوز أهمية هذه الدراسة الجانب التقني، لتشمل الجوانب الاقتصادية والاجتماعية والبيئية، حيث إن مشاريع الطاقة الشمسية تساهم في توفير فرص عمل جديدة، وتعزيز النمو الاقتصادي، وتحسين مستوى المعيشة في المجتمعات النائية والمحرومة. بالإضافة إلى ذلك، فإن استخدام الطاقة الشمسية في تحلية المياه -على سبيل المثال- يمكن أن يساهم في حل مشكلة ندرة المياه في العديد من المناطق (Elmnifi *et al.*, 2024). كما أن الطاقة الشمسية -كما أوضحت العديد من الدراسات (الصواني، 2019؛ Besharat *et al.*, 2013)- هي طاقة نظيفة لا تسبب أي تلوث للبيئة، مما يجعلها حلاً مثاليًا لتحقيق التنمية المستدامة، التي تحافظ على البيئة للأجيال القادمة.

3.1. أهداف الدراسة:

تهدف هذه الدراسة بشكل أساسي إلى تحقيق الآتي:

1. تطوير وتقييم نماذج رياضية تجريبية لتقدير متوسط الإشعاع الشمسي اليومي على السطح الأفقي في مدينة الزاوية، وذلك باستخدام بيانات مناخية متاحة (درجات الحرارة)، مع مراعاة تأثير الارتفاع عن سطح البحر.
2. مقارنة أداء ثلاثة نماذج تجريبية شائعة (هارجريفز، آلين، وأنانديل) في تقدير الإشعاع الشمسي بمدينة الزاوية، وذلك باستخدام مجموعة من المؤشرات الإحصائية، لتقييم دقة كل نموذج، وتحديد الأنسب منها لظروف المنطقة.
3. تعديل وتطوير نموذج "آلين" لتقدير الإشعاع الشمسي، من خلال تحديد قيمة جديدة لمعامل تجريبي (K_r) خاصة بمدينة الزاوية، بهدف تحسين دقة التقديرات، وجعلها أقرب للبيانات الفعلية للإشعاع الشمسي.
4. تحليل التباين السنوي للإشعاع الشمسي المقدر، الناتج عن النماذج المطورة والمعدلة، وذلك بهدف تقييم مدى استقرار هذه التقديرات على مدى السنوات المدروسة، وتحديد مدى تأثير العوامل المناخية على هذا التباين.

4.1. حدود الدراسة:

تقتصر هذه الدراسة على الجوانب الآتية:

1. **الحدود المكانية:** تقتصر الدراسة على مدينة الزاوية في ليبيا، ولا تشمل مناطق أخرى، وذلك نظرًا لتوفر البيانات المناخية المتاحة للمدينة، ولرغبة الباحث في التركيز على هذه المنطقة تحديدًا.
2. **الحدود الزمانية:** تعتمد الدراسة على البيانات المناخية المتاحة للفترة الممتدة من عام 2000 إلى عام 2023، بشكل شهري لكل السنوات المذكورة.

3. الحدود المنهجية: تعتمد الدراسة على استخدام ثلاثة نماذج رياضية تجريبية لتقدير الإشعاع الشمسي، وهي: نموذج "هارجريفز" الذي يعتمد على بيانات درجة الحرارة فقط، ونموذج "آلين" الذي يأخذ في الاعتبار درجة الحرارة والضغط الجوي، ونموذج "أنانديل" الذي يعتمد على درجة الحرارة والارتفاع عن سطح البحر، ولا تتناول الدراسة استخدام نماذج أخرى.

4. حدود المتغيرات: تعتمد الدراسة على المتغيرات المناخية المتاحة من المصدر المعتمد، مثل درجات الحرارة (العظمى والصغرى)، والضغط الجوي، والارتفاع عن سطح البحر، ولا تتناول متغيرات أخرى مثل الرطوبة النسبية، أو الغطاء السحابي، أو غيرها من المتغيرات المناخية التي قد تؤثر على الإشعاع الشمسي.

5.1. مصطلحات الدراسة:

الإشعاع الشمسي (Solar Irradiance): هو كمية الطاقة الشمسية التي تصل إلى سطح معين في وحدة زمنية محددة، ويُقاس عادةً بوحدة واط لكل متر مربع (W/m^2)، يشمل الإشعاع الشمسي كلاً من الإشعاع المباشر (الواصل من الشمس مباشرة)، والإشعاع المنتشر (الذي تشتت في الغلاف الجوي)، والإشعاع الكلي، وهو مجموع الإشعاع الشمسي المباشر، والإشعاع الشمسي المنتشر (Iqbal, 1983).

الطاقة الشمسية (Solar Energy): هي الطاقة المستمدة من الإشعاع الشمسي، ويمكن تحويلها إلى أشكال أخرى من الطاقة، مثل الطاقة الكهربائية أو الحرارية، باستخدام تقنيات مختلفة مثل الخلايا الكهروضوئية، أو المجمعات الشمسية الحرارية (Lang, 2006).

النماذج التجريبية (Empirical Models): هي نماذج رياضية تعتمد على البيانات التجريبية والعلاقات الإحصائية لتقدير ظاهرة معينة، مثل الإشعاع الشمسي، تستخدم هذه النماذج متغيرات

مناخية متاحة لتقدير قيم الإشعاع الشمسي، مثل درجة الحرارة، وساعات سطوع الشمس، وتتميز ببساطتها وسهولة استخدامها (Besharat *et al.*, 2013).

التقدير الإحصائي (Statistical Estimation): هو عملية استخدام البيانات والمفاهيم الإحصائية لتقدير قيمة مجهولة أو غير متاحة، مثل قيمة الإشعاع الشمسي في فترة زمنية معينة. تشمل هذه العملية استخدام المؤشرات الإحصائية لتقييم دقة التقديرات، ومدى تطابقها مع البيانات الفعلية، مثل جذر متوسط مربع الخطأ (RMSE)، ومتوسط الخطأ (MBE)، ومعامل الارتباط (R) (Despotovic *et al.*, 2016).

الفصل الثاني: الإطار النظري والدراسات السابقة

- مقدمة
- الطاقة المتجددة والتنمية المستدامة
- الطاقة الشمسية كمورد رئيسي
- طبيعة الإشعاع الشمسي وديناميكية الأرض والشمس
- مفهوم الإشعاع الشمسي
- الإشعاع الشمسي على سطح الأرض
- قياس الإشعاع الشمسي
- تقدير الإشعاع الشمسي باستخدام درجة حرارة الهواء
- الدراسات السابقة
- خلاصة الإطار النظري وتحديد فجوة البحث

Chapter 2: Theoretical) الفصل الثاني: الإطار النظري والدراسات السابقة (

:(Framework and Literature Review

1.2. مقدمة:

يقدم هذا الفصل الأساس النظري الضروري، ويستعرض الأدبيات البحثية ذات الصلة بموضوع الدراسة، والذي يركز على تقدير الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية بليبيا، باستخدام بيانات درجة حرارة الهواء. تكمن أهمية هذا الفصل في توفير الفهم العميق للمفاهيم الأساسية المتعلقة بالطاقة المتجددة بشكل عام، والطاقة الشمسية بشكل خاص، بالإضافة إلى استكشاف طبيعة الإشعاع الشمسي، والعوامل المؤثرة فيه، وطرق قياسه وتقديره، ويهدف هذا الفصل إلى:

- 1- تحديد سياق التحول العالمي نحو الطاقة المتجددة، وأهمية الطاقة الشمسية ضمن هذا التحول.
- 2- شرح الخصائص الفيزيائية والفلكية للإشعاع الشمسي، وتفاعله مع الغلاف الجوي.
- 3- استعراض طرق قياس الإشعاع الشمسي، والحاجة إلى نماذج التقدير.
- 4- تحليل ومناقشة النماذج الرياضية المستخدمة لتقدير الإشعاع الشمسي بالاعتماد على درجة حرارة الهواء.

5- مراجعة الدراسات السابقة ذات الصلة، لتحديد فجوة البحث التي تسعى هذه الدراسة إلى معالجتها.

2.2. الطاقة المتجددة والتنمية المستدامة (Renewable Energy and Sustainable

:(Development

تمثل الطاقة المتجددة والتنمية المستدامة مفهومين مترابطين بشكل وثيق، حيث يشكل التحول نحو مصادر الطاقة النظيفة حجر الزاوية في تحقيق مستقبل مستدام لكوكب الأرض ومجتمعاته. ففي ظل الاعتماد العالمي المستمر على الوقود الأحفوري (Ang et al., 2022)، تتزايد المخاوف بشأن نضوب هذه الموارد المحدودة (Okonkwo & Nwokoye, 2014) ،

وتأثيراتها البيئية السلبية الخطيرة، وفي مقدمتها انبعاثات الغازات الدفيئة، التي تعد المحرك الرئيسي لتغير المناخ (IPCC, 2021). لذلك، يُعد التحول الاستراتيجي من الوقود الأحفوري إلى مصادر طاقة منخفضة الكربون، مثل الطاقة المتجددة التي تستغل موارد طبيعية متجددة كالشمس، والرياح، والمياه، والكتلة الحيوية (Kumler et al., 2025)، ضرورة ملحة للتخفيف من آثار تغير المناخ، وتحقيق الأهداف المناخية العالمية.

على الرغم من التقدم المحرز، فلا تزال غالبية دول العالم تعتمد بشكل كبير على الوقود الأحفوري لتلبية احتياجاتها من الطاقة، وخاصة لتوليد الكهرباء، ويرجع ذلك جزئيًا إلى تحديات تتعلق بتوافر التقنيات والموارد والظروف المواتية؛ للاستفادة الكاملة من مصادر الطاقة المتجددة (Ang et al., 2022). ومع ذلك، فإن القيود المتأصلة في الوقود الأحفوري أصبحت واضحة بشكل متزايد. أولاً: تُعد موارد الوقود الأحفوري محدودة بطبيعتها، وهناك مخاوف جدية من نفادها قريبًا، في ظل تزايد الطلب العالمي على الطاقة. ثانيًا: وهو الأهم، التأثير السلبي العميق لاستخدام الوقود الأحفوري على البيئة، حيث تؤدي الانبعاثات الغازية الناتجة عن حرقه إلى تلوث الهواء وتشكل تهديدًا خطيرًا لصحة الإنسان والمناخ العالمي من خلال مقاومة ظاهرة الاحتباس الحراري.

ونتيجة لذلك، أصبح التحول من الاعتماد على الوقود الأحفوري إلى مصادر طاقة منخفضة الكربون، وعلى رأسها الطاقة المتجددة، استراتيجية ضرورية وحاسمة؛ للتخفيف من آثار تغير المناخ، وتجنب عواقبه الأكثر حدة. تُعد الطاقة المتجددة استراتيجية بارزة لإزالة الكربون من قطاع الطاقة، مستفيدة من موارد طبيعية متجددة مثل ضوء الشمس، والرياح، والكتلة الحيوية، والمياه، والتي تعتمد بطبيعتها على الظروف الجوية والمناخية (Kumler et al., 2025).

1.2.2. مصادر الطاقة المتجددة الرئيسية (Main Renewable Energy Sources):

يشمل مصطلح الطاقة المتجددة مجموعة متنوعة من المصادر التي تتجدد طبيعيًا بمعدل أسرع

من استهلاكها، من أبرز هذه المصادر وأكثرها شيوعًا في الوقت الحالي:

- الطاقة الشمسية (Solar Energy): استغلال الإشعاع الشمسي لتوليد الكهرباء

(كهروضوئية)، أو الحرارة (حرارية).

- طاقة الرياح (Wind Energy): استخدام طاقة حركة الرياح لتدوير توربينات توليد الكهرباء.

- الطاقة المائية (Hydropower): الاستفادة من طاقة حركة المياه (السدود أو الأنهار)

لتوليد الكهرباء.

- طاقة المد والجزر (Tidal Energy): استغلال حركة المد والجزر لتوليد الكهرباء.

- الطاقة الحرارية الأرضية (Geothermal Energy): استخدام الحرارة الكامنة في باطن

الأرض لتوليد الكهرباء أو للتدفئة.

- طاقة الكتلة الحيوية (Biomass Energy): حرق المواد العضوية (النباتية أو

الحيوانية) لتوليد الحرارة أو الكهرباء.

ويشهد قطاع الطاقة المتجددة نموًا متسارعًا، حيث وصلت القدرة العالمية الإجمالية إلى

3.37 تيراواط بحلول عام 2022، وتمثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية والطاقة الكهرومائية قرابة

95% من هذه السعة (Kumler *et al.*, 2025).

2.2.2 الطاقة المتجددة وأهداف التنمية المستدامة (Renewable Energy and)

:(Sustainable Development Goals - SDGs)

يرتبط التحول نحو الطاقة المتجددة ارتباطًا وثيقًا بتحقيق أهداف التنمية المستدامة (SDGs)، التي اعتمدها الأمم المتحدة لعام 2030، ويسهم انتشار استخدام الطاقة المتجددة بشكل مباشر في تحقيق العديد من هذه الأهداف، وأبرزها:

الهدف السابع (SDG 7): ضمان الحصول على الطاقة النظيفة وبأسعار معقولة: توفر مصادر الطاقة المتجددة، وخاصة الشمسية والرياح، حلولاً لتوفير الكهرباء للمجتمعات المحرومة بتكاليف متناقصة، وبأثر بيئي أقل.

الهدف الثالث عشر (SDG 13): اتخاذ إجراءات عاجلة للتصدي لتغير المناخ وآثاره: تُعدّ الطاقة المتجددة أداة رئيسية في مكافحة تغير المناخ، عن طريق تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، وخفض انبعاثات الغازات الدفيئة بشكل كبير.

أهداف أخرى: يساهم التحول إلى الطاقة المتجددة أيضًا في تحقيق أهداف تتعلق بالصحة الجيدة (بتقليل تلوث الهواء) في المدن والمجتمعات المستدامة، والصناعة، والابتكار، والبنية التحتية، والعمل اللائق، والنمو الاقتصادي (من خلال خلق فرص عمل جديدة في قطاع الطاقة النظيفة).

ومن ثم، فإن السعي العالمي نحو الطاقة المتجددة لا يمثل فقط استجابة للتحديات البيئية، بل هو أيضًا محرك أساسي لتحقيق تنمية مستدامة شاملة ومتنوعة (Kuşkaya et al., 2023).

3.2. الطاقة الشمسية كمورد رئيسي (Solar Energy as a Key Resource):

تُعدّ الطاقة الشمسية حجر الزاوية في التحول العالمي نحو مستقبل طاقة مستدام، وذلك بفضل وفرتها الهائلة، ومزاياها المتعددة، مقارنة بمصادر الطاقة التقليدية، فهي ليست مجرد بديل، بل هي المورد الطاقوي الأكثر ديمومة ووفرة على كوكب الأرض (Okonkwo and Nwokoye, 2014).

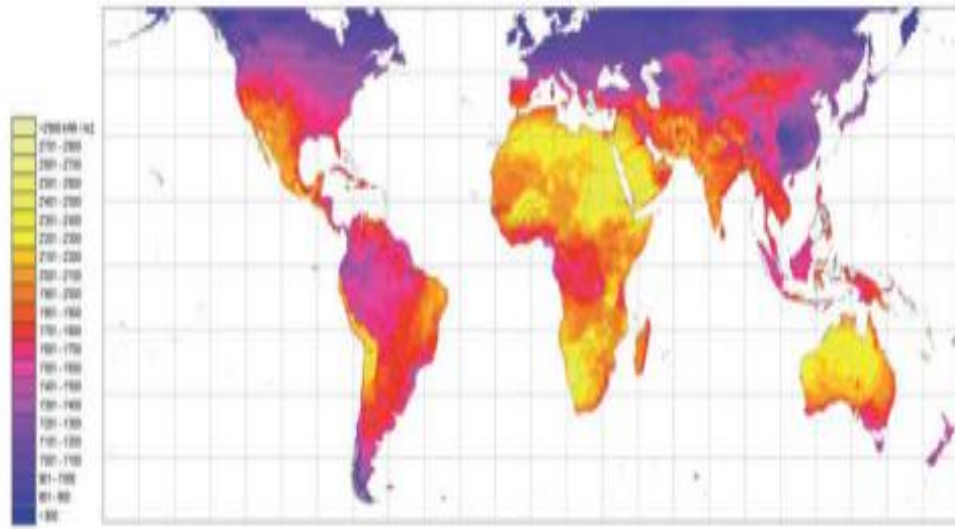
يمتد تاريخ استخدام البشر للطاقة الشمسية لقرون طويلة، حيث تشير الدلائل إلى استخدام المرايا المركزة لأشعة الشمس في القرن السابع الميلادي، إلا أن القفزة النوعية بدأت مع اكتشاف التأثير الكهروضوئي (PV) في عام 1893، وعلى مدى العقود التالية، كرّس العلماء جهودهم لتطوير هذه التقنية، وتحويلها إلى وسيلة عملية لتوليد الكهرباء، ونتيجة لسنوات طويلة من البحث والتطوير المكثف على مستوى العالم، تبلورت تقنيات الطاقة الشمسية الحديثة، وتصنفت في تطبيقين رئيسيين، هما: الطاقة الشمسية الحرارية، والطاقة الشمسية الكهروضوئية (Maka & Alabid, 2022).

1.3.2. وفرة الطاقة الشمسية ومزاياها:

(Abundance and Advantages of Solar Energy)

تتميز الطاقة الشمسية بوفرة استثنائية تجعلها موردًا لا ينضب عمليًا، وهي متاحة للاستخدام بأشكالها المباشرة (الإشعاع الشمسي) وغير المباشرة (الرياح، والكتلة الحيوية، والطاقة الكهرومائية، إلخ) (World Energy Council, 2013). تصدر الشمس كمية هائلة من الطاقة، بمعدل يُقدر بنحو 3.8×10^{23} كيلوواط في الثانية، وعلى الرغم من أن الأرض لا يصلها سوى جزء ضئيل جدًا من هذه الطاقة (حوالي 1.8×10^{14} كيلوواط)، يصل بعد مروره بالغلاف الجوي، إلا أن هذه الطاقة الواصلة بكفاءة متواضعة (10%)، تنتج طاقة تفوق أربعة أضعاف إجمالي قدرة توليد الكهرباء العالمية الحالية. وبمنظرة أشمل، يتجاوز إجمالي الإشعاع الشمسي السنوي الساقط على الأرض ما يزيد على 7500 ضعف إجمالي استهلاك الطاقة الأولية السنوي في العالم (World Energy Council, 2013). هذه الوفرة الهائلة تجعل الطاقة الشمسية الخيار الأكثر تفضيلًا بين مصادر الطاقة النظيفة والمتجددة (Okonkwo and Nwokoye, 2014).

الموارد الشمسية السنوية متوفرة بشكل متجانس نسبيًا في معظم مناطق العالم، وهذا يدعم حقيقة مثبتة، وهي أن التطبيقات الجذابة اقتصاديًا للطاقة الشمسية ليست مقصورة فقط على المناطق الصحراوية أو الأكثر تعرضًا للشمس، بل يمكن تطويرها بنجاح في مناطق متنوعة، كما يتضح من الاستخدام المتزايد للطاقة الشمسية في دول شمال أوروبا (World Energy Council, 2013).



الشكل (1): المجموع السنوي للإشعاع الأفقي العالمي 1986-2005 (المصدر: World Energy Council, 2013).

تتعدد مزايا الطاقة الشمسية لتشمل جوانب بيئية، واقتصادية، وأمنية حيوية، تُعدّ من أنظف أشكال الطاقة، حيث إن توليد الكهرباء منها لا يتسبب في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، أو الغازات السامة الأخرى الملوثة للهواء، مما يساهم بشكل مباشر في التخفيف من حدة تغير المناخ، وتحسين جودة الهواء. كما أنها تساهم في التخفيف من استنزاف الموارد الطبيعية المحدودة، وتحسين جودة الموارد المائية اقتصاديًا، وعلى الرغم من التكاليف الأولية للتركيب، فإن تكاليف تشغيل وصيانة الأنظمة الشمسية منخفضة نسبيًا، وأسعار التقنيات نفسها في انخفاض مستمر، مما يجعلها خيارًا تنافسيًا وموفرًا على المدى الطويل. علاوة على ذلك، توفر

الطاقة الشمسية درجة عالية من استقلالية وأمن الطاقة للدول والمجتمعات، وتقلل الاعتماد على مصادر الوقود الأحفوري المتقلبة الأسعار، والمرتبطة بالتوترات الجيوسياسية. كل هذه المزايا تجعل الطاقة الشمسية بديلاً واعدًا للطاقة غير المتجددة كثيفة الكربون، ومساهمًا رئيسيًا في تحقيق أهداف التنمية المستدامة التي اعتمدها الأمم المتحدة (Kuşkaya *et al.*, 2023).

2.3.2. أنواع تقنيات الطاقة الشمسية (Types of Solar Energy Technologies):

يمكن تصنيف التقنيات الرئيسية لتسخير الطاقة الشمسية إلى نوعين أساسيين (Maka & Alabid, 2022):

أ. **الطاقة الشمسية الكهروضوئية (Photovoltaics - PV):** تعتمد هذه التقنية على "التأثير الكهروضوئي"، الذي يحدث في مواد شبه موصلة معينة (غالبًا السيليكون)، عندما تسقط الفوتونات (جسيمات الضوء) من الشمس على الخلايا الكهروضوئية، فإنها تثير الإلكترونات في المادة، مما يؤدي إلى توليد تيار كهربائي مباشر (DC) (Gardashov, 2022).

يتم تجميع هذه الخلايا في وحدات أو ألواح شمسية، ويمكن دمجها في أنظمة صغيرة (مثل أسطح المنازل)، أو محطات طاقة شمسية واسعة النطاق. شهدت تكنولوجيا الـ (PV) - تطورات هائلة في العقود الأخيرة، مع زيادة كبيرة في كفاءة التحويل، وانخفاض كبير جدًا في تكاليف الإنتاج، مما جعلها تنافسية من حيث التكلفة مع مصادر الطاقة التقليدية في العديد من المناطق.

ب. **الطاقة الشمسية الحرارية (Solar Thermal):** تستخدم هذه التقنية حرارة الشمس مباشرة لتسخين وسيط (عادة ما يكون ماءً أو هواءً أو سائلاً خاصاً)، وتشمل التطبيقات البسيطة سخانات المياه الشمسية المنزلية. أما على نطاق أوسع، فتستخدم تقنيات الطاقة الشمسية المركزة (Concentrating Solar Power - CSP)، حيث تقوم أنظمة المرايا (مثل الأحواض المكافئة، أو الأطباق المكافئة، أو حقول المرايا المسطحة، التي توجه الضوء لبرج مركزي -

الهليوستات)، بتركيز أشعة الشمس المباشرة على مستقبل صغير، مما يؤدي إلى تسخين سائل (مثل الزيت الصناعي أو الملح المصهور) إلى درجات حرارة عالية جداً (Stieglitz & Platzer, 2024). تُستخدم هذه الحرارة العالية بعد ذلك لتوليد البخار، الذي يدير توربينات لإنتاج الكهرباء. تتميز بعض أنظمة CSP بقدرتها على تخزين الطاقة الحرارية (غالبًا في خزانات الملح المصهور)، مما يسمح لها بمواصلة توليد الكهرباء لساعات بعد غروب الشمس، أو في أثناء فترات الغيوم المتقطعة، وهي ميزة تنافسية مهمة.

3.3.2. إمكانات الطاقة الشمسية عالمياً ومحلياً (ليبيا) (Global and Local (Libya)

:(Solar Energy Potential

تتمتع الطاقة الشمسية بإمكانات هائلة على مستوى العالم، تُقدر بحوالي 6500 تيراواط، وهي قادرة على تلبية جزء كبير من الطلب العالمي على الطاقة (Kuşkaya et al., 2023). ومع ذلك، يتفاوت توزيع الإشعاع الشمسي بشكل كبير جغرافياً، فيبلغ المتوسط السنوي للإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي عالمياً حوالي 170 واط/م²، لكن القيم الفعلية تختلف بشكل كبير. فبينما تسجل مناطق مثل منطقة البحر الأحمر أعلى القيم التي قد تصل إلى 300 واط/م²، وأستراليا حوالي 200 واط/م²، والولايات المتحدة حوالي 185 واط/م²، تنخفض هذه القيمة إلى حوالي 105 واط/م² في المملكة المتحدة. على الرغم من هذا التباين، فإن الموارد الشمسية السنوية متوفرة بشكل جيد نسبياً في معظم مناطق العالم، مما يعني أن التطبيقات الاقتصادية للطاقة الشمسية ليست حكرًا على المناطق الصحراوية الأكثر سطوعًا (World Energy Council, 2013).

وفي السياق الليبي، تتمتع ليبيا بإمكانات هائلة من موارد الطاقة المتجددة المتنوعة، والتي يمكن أن تلعب دورًا محوريًا في مزيج الطاقة الوطني كبديل للطاقة التقليدية، ويُعدّ فهم

وتحديد كمية الإشعاع الشمسي الكلي المتاح أمرًا حاسمًا لخطط تطوير الطاقة المتجددة، وذلك نظرًا للإمكانات الشمسية الهائلة التي تتمتع بها البلاد (الصواني، 2019؛ النعاس، 2020؛ المؤسسة الليبية للاستثمار، 2023؛ Elmnifi *et al.*, 2024؛ NSREEE, 2023). هذا المورد الغني يضع ليبيا في موقع متميز للاستفادة من الطاقة الشمسية لتلبية احتياجاتها من الطاقة، وتحقيق أهداف التنمية المستدامة.

ووفقًا لوكالة الطاقة الدولية (IEA)، فقد بلغ استهلاك الكهرباء في ليبيا ما يعادل 2580 كيلو طن من مكافئ النفط (ktoe) أي $10^6 \times 2580$ كجم في عام 2017 -، وهو رقم أكبر من نظيره في عام 2000م، بعامل 2.5 (1032 كيلو طن مكافئ نفطي). وبلغ نصيب الفرد من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في ليبيا 8.73 طن (CO₂) في عام 2018، وهو أعلى من نظيره الوطني الصيني، الذي بلغ مستوى 7.95 (Almaktar and Shaaban, 2021). كما تشير الدراسات إلى أن متوسط درجة الحرارة السنوية المكانية ارتفع بمعدل 0.31 درجة مئوية/عقد خلال العقود الخمسة الماضية، وقد لوحظ اتجاه تنازلي في إجمالي هطول الأمطار السنوي في معظم محطات الأرصاد الجوية في ليبيا (Almaktar and Shaaban, 2021).

تُظهر الدراسات جدوى التحول من نظم توليد الكهرباء التقليدية المعتمدة على الوقود الأحفوري إلى مصادر الطاقة النظيفة والمتجددة في ليبيا. وعلى سبيل المثال، أشارت دراسة (Maka *et al.*, 2021)، إلى أن إنارة الشوارع تستهلك حوالي 19% من إجمالي الطلب على الكهرباء، مما يجعلها مجالًا واعدًا لتطبيق بدائل مثل أنظمة إنارة الشوارع القائمة على الطاقة الشمسية كهروضوئية، أو أنظمة إضاءة LED التي تعمل بالطاقة الشمسية، سواء أكانت مستقلة أم متصلة بالشبكة. وفي سياق متصل، خللت دراسة أخرى إمكانية إنشاء محطة طاقة شمسية كهروضوئية بقدرة 50 ميغاواط، متصلة بالشبكة، ومزودة بنظام تتبع في ليبيا، باستخدام

وحدات عالية الكفاءة (200 واط). وركزت الدراسة على منطقة الجغبوب، مستخدمة بيانات أرصاد جوية طويلة الأمد من الهيئة الليبية للطاقة المتجددة، وأكدت تمتع المنطقة بموارد شمسية ممتازة، تتمثل في مستويات إشعاع شمسي سنوي، ومدة سطوع يومي مرتفعة. وأشارت نتائج الدراسة إلى أن محطة بهذا الحجم، يمكنها إنتاج ما يقرب من 128.5 جيجاواط/ساعة من الكهرباء النظيفة سنوياً.

4.3.2. تطبيقات الطاقة الشمسية في ليبيا (Solar Energy Applications In Libya):

تعد الطاقة الشمسية أحد أهم مصادر الطاقة المتجددة، التي تحظى باهتمام متزايد في جميع أنحاء العالم، وذلك نظرًا لفوائدها البيئية والاقتصادية. ونتيجة للموقع الجغرافي لليبيا، فإنها تتمتع بضوء الشمس طوال العام، وتتزود بلا حدود بالطاقة الشمسية، الأمر الذي يشجع على قيام صناعة الطاقة الشمسية بها، بالإضافة إلى وقوعها ضمن دوائر عرض مهمة، وبهذا فهي تستقبل كميات كبيرة من لإشعاع الشمسي أغلب أوقات السنة، وقد بلغت متوسطات درجات الحرارة خلال الفترة 1970 - 2015 ما بين (25-26.8) درجة مئوية، في حين بلغت متوسطات شدة الإشعاع الشمسي خلال الفترة نفسها ما بين (15-22) درجة (النعاس، 2020).

اتجهت ليبيا نحو إنتاج واستهلاك الطاقة الشمسية كبديل للنفط والغاز الطبيعي، لما يمتاز به هذا المصدر من استمرارية، بالإضافة إلى كونه من مصادر الطاقة النظيفة، خاصة في مجال توليد الطاقة الكهربائية، وإن كان لا يزال في حدود ضيقة، فقد استخدمت الطاقة الشمسية أول مرة في ليبيا في مجال الاتصالات اللاسلكية، فقد قامت الشركة العامة للبريد والاتصالات بتركيب مجموعة من المحطات التجريبية مع بداية العام 1980، لتوليد الطاقة الكهربائية ذات الأحمال الصغيرة للمناطق النائية والبعيدة عن شبكات الكهرباء، بعد ذلك تم تركيب مجموعة من

المنظومات عامي 1996 - 2003 على التوالي، وقد بلغ عدد المحطات التي تم إنشاؤها من العام 1980 حتى العام 2003 قرابة 70 محطة، بقدرة إجمالية بلغت (294.55) كيلو واط.

لم يتوقف الأمر على الشركة العامة للاتصالات في إنشاء المحطات، فقد تلت ذلك العديد من الجهات التي اتخذت المنوال نفسه في إنشاء المحطات في المناطق النائية، ومن بين تلك الجهات، وزارة الداخلية، ومنظمة اتصالات النهر الصناعي، والشركات النفطية، وقد تم إنشاء عدد 48 محطة خلال الأعوام 1994 - 2003، بقدرة إجمالية بلغت (76.74) كيلو واط. وقد تم استخدام الطاقة الشمسية في ليبيا في العديد من المناطق، وإن كانت عبارة عن تركيب منظومات خلايا ضوئية في بعض المناطق النائية، وقد تم استخدامها كتطبيقات مثل التسخين الشمسي، وضخ المياه، والبث اللاسلكي، ولعل مشروع توصيل الكهرباء إلى قريتي بئر مرجان ووادي مرسيت، اللتين تقعان بالقرب من مزدة خير مثال لاستخدام منظومات الخلايا الشمسية، حيث بلغت قدرة تلك الخلايا نحو (29.250) كيلو واط بقرية مرجان، و (67.2) كيلو واط بوادي مرسيت، وكذلك منظومة ضخ المياه ببئر الجف بمنطقة مراده بقدرة (1.2) كيلو واط (النعاس، 2020).

وعلى الرغم من أن هذه المشاريع تعد خطوات أولية في مجال استغلال الطاقة الشمسية في مدينة الزاوية، إلا أنها تشير إلى وجود اهتمام متزايد بهذا القطاع، وإدراك لأهميته في تحقيق التنمية المستدامة.

وفقاً لنتائج ورشة العمل حول الاستثمار في الطاقات المتجددة التي أقامتها المؤسسة الليبية للاستثمار في 12 مايو 2023 في مدينة طرابلس، هناك العديد من الفرص للاستثمار في الطاقة الشمسية في البلاد، ويمكن بناء محطات كهروضوئية كبيرة لتوليد الكهرباء بكميات كبيرة في المناطق الصحراوية الجنوبية للبلاد، حيث تتوفر ساعات الشمس الطويلة، وشدة الإشعاع

الشمسي العالية، ويمكن توجيه الكهرباء المولدة إلى الشبكة العامة لتلبية الطلب المتزايد (المؤسسة الليبية للاستثمار، 2023).

علاوة على ذلك، يمكن تركيب الألواح الشمسية على الأسطح السكنية والتجارية والصناعية في جميع أنحاء المدينة، حيث يمكن استخدام الكهرباء المولدة محلياً لتغطية الاحتياجات الكهربائية للمباني، وبيع الفائض إلى الشبكة العامة، وتعد هذه النظم فرصة جذابة لتوفير الكهرباء وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، كما يمكن استخدام الخلايا الشمسية المحمولة والمنصوبات الشمسية الصغيرة في المناطق النائية والمجتمعات البعيدة عن الشبكة الكهربائية، لتزويد الأجهزة الصغيرة بالكهرباء (المؤسسة الليبية للاستثمار، 2023)، وأخيراً يمكن استخدام الطاقة الشمسية في الصناعة لتشغيل المعدات وتوليد الطاقة الحرارية، وفي القطاع الزراعي لتشغيل أنظمة الري وتوليد الكهرباء لتشغيل المعدات.

5.3.2. إمكانات وتحديات استغلال الطاقة الشمسية (Possibilities And Challenges Of Solar Energy):

تمتلك البلاد إمكانات كبيرة لاستغلال الطاقة الشمسية، ولكنها تواجه أيضاً بعض التحديات التي يجب التغلب عليها لتحقيق الاستفادة القصوى من هذا المورد الطبيعي المتجدد.

أولاً: الإمكانيات:

1. **الموقع الجغرافي المميز:** بحكم الموقع الجغرافي أو الفلكي بين دائرتي عرض 18.45 و 32.57 شمالاً، فإن كمية الأشعة الشمسية تصل إلى 8 كيلو واط/الساعة للمتر المربع الواحد، وساعات السطوع (3200-4000) ساعة في السنة، وتبلغ كمية الطاقة الشمسية الساقطة على مساحة ليبيا خلال سنة واحدة 350 * 10³ واط/ساعة، وهو ما يفوق 100000 مرة للاحتياج الكلي للكهرباء المتوقعة في ليبيا لعام 2040 (قلية، 2017).

2. **توفر الأراضي:** تشكل الصحراء الليبية حوالي 95% من مساحة ليبيا الشاسعة، كما أنها تمتلك كما هائلاً من الإشعاع الشمسي على مدار السنة؛ مما يؤهلها أن تكون في مقدمة الدول المصدرة للطاقة الكهربائية الشمسية (قلية، 2017). ومدينة الزاوية تمتلك مساحات شاسعة من الأراضي غير المستغلة، والتي يمكن استخدامها لإنشاء محطات الطاقة الشمسية الكبيرة، هذه الميزة تجعل من الممكن تنفيذ مشاريع ضخمة لإنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية بتكلفة منخفضة نسبياً.

3. **الحاجة الملحة إلى مصادر طاقة بديلة:** تعاني ليبيا بشكل عام من أزمة الكهرباء، والتي تتفاقم لأسباب عدة، منها تأخر تنفيذ المشاريع لمضاعفة إنتاج الكهرباء (منصور، 2023)، ومدينة الزاوية بشكل خاص، من مشاكل في إمدادات الكهرباء وانقطاعات متكررة في التيار الكهربائي، هذا الوضع يخلق حافزاً قوياً لاستكشاف وتطوير مصادر الطاقة البديلة، وعلى رأسها الطاقة الشمسية.

4. **الدعم الحكومي والدولي:** هناك توجه متزايد من قبل الحكومة الليبية لدعم مشاريع الطاقة المتجددة، بما في ذلك الطاقة الشمسية. كما أن هناك اهتماماً من المنظمات الدولية والدول المانحة لتمويل ودعم مشاريع الطاقة النظيفة في ليبيا (المؤسسة الليبية للاستثمار، 2023).

5. **إمكانية خلق فرص عمل:** يمكن لقطاع الطاقة الشمسية أن يساهم في خلق فرص عمل جديدة في مدينة الزاوية، سواء في مجال تصنيع المكونات أو تركيب وصيانة الأنظمة الشمسية، وهذا الأمر يمكن أن يساعد في معالجة مشكلة البطالة في المدينة.

التحديات:

1. **تحديات تقنية:** تتعلق بطبيعة المعدات المستخدمة في مجال توليد الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية، حيث يتجمع الغبار في أجهزة توليد الطاقة الشمسية، مما يقلل من عملها، حيث

بينت الدراسات أن 50% من فعالية الأجهزة تفقد في حالة عدم تنظيف الجهاز المستقبل لأشعة الشمس لمدة شهر (منصور، 2023).

2. **تحديات مالية:** وتعد من أهم التحديات التي تواجه إنشاء مشاريع الطاقة المتجددة في ليبيا، حيث لا يتوفر صندوق مستقل لتمويل المشروعات، ومعظمها يتم تمويلها من ميزانية الدولة، وعدم إشراك القطاع الخاص وتشجيعه على الاستثمار، وانخفاض الميزانية المخصصة للبحث والتطوير.

3. **تحديات تشريعية:** تعاني ليبيا من نقص القوانين الخاصة بتنظيم الاستثمار في مجالات الطاقة المتجددة، على المستوى المحلي والأجنبي، وكذلك غياب التشريعات المتعلقة بتضمين اتفاقيات شراء الطاقة طويلة الأجل مع منتجي الطاقات المتجددة (منصور، 2023).

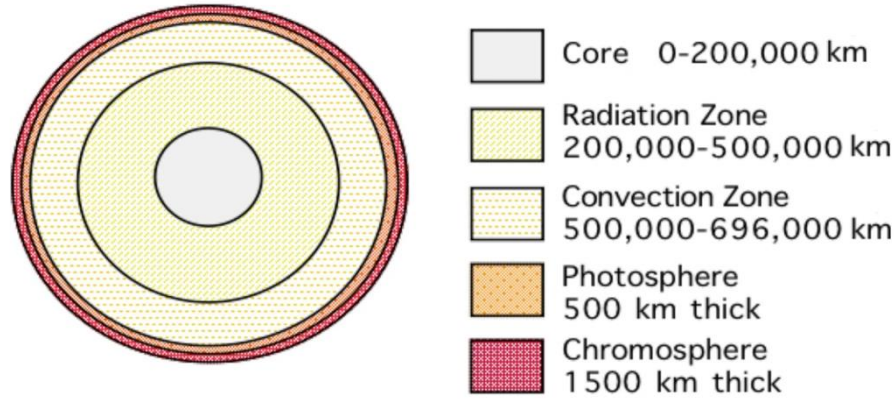
4.2. البنية الداخلية للشمس ومصدر طاقتها (الاندماج النووي) (Internal Structure and Energy Source - Nuclear Fusion):

تتكون الشمس من طبقات عدة تسمح لها بتكوين الضوء والحرارة، حيث تتكون البنية الداخلية للشمس من ثلاث طبقات رئيسية، وهي: النواة، ومنطقة الإشعاع، ومنطقة التوصيل، أما البنية الخارجية للشمس، فتتكون من طبقة الفوتوسفير، وطبقة الكروموسفير، كما هو موضح في الشكل (2) و(3).

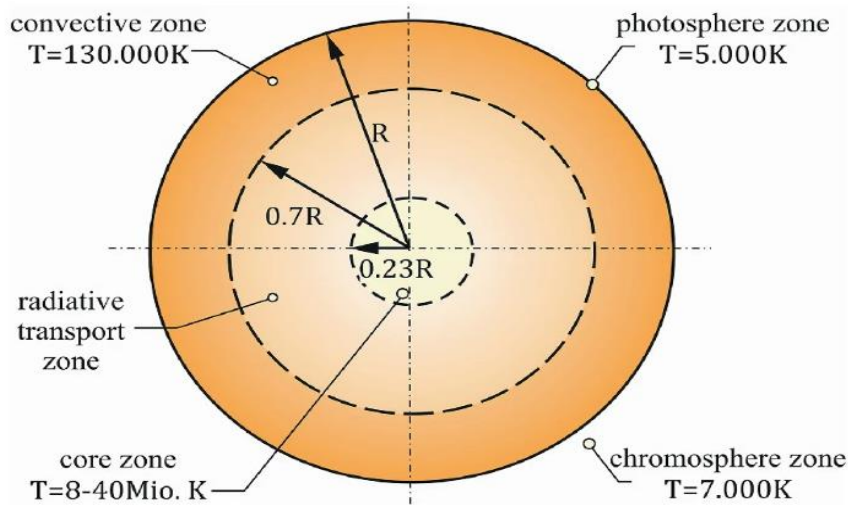
تقع النواة في مركز الشمس، وتعد موقعا لإنتاج الطاقة الشمسية، وتتكون أساسا من عنصري الهيليوم والهيدروجين، موجودين في حالة بلازما، ناتجة من درجة الحرارة والضغط العاليين. تصل درجة حرارتها إلى 15.7 مليون درجة مئوية، والضغط إلى $3.4 \times 10^4 \text{ N/M}^2$. هذه الظروف تؤدي إلى اندماج ذرات الهيدروجين لتكوين الهليوم، وتدعى هذه العملية بالاندماج النووي، حيث يؤدي هذا الاندماج إلى ضخ كميات هائلة من الطاقة إلى سطح

الشمس، وتنتقل هذه الطاقة المتولدة في النواة إلى الخارج عبر طبقات الشمس المختلفة، أولاً عبر المنطقة الإشعاعية، حيث تنتقل الفوتونات ببطء شديد، (قد يستغرق الأمر مئات الآلاف من السنين)، ثم عبر منطقة الحمل الحراري، أو ما يعرف بمنطقة التوصيل، حيث تنقل تيارات البلازما الساخنة الطاقة بسرعة أكبر نحو السطح المرئي للشمس، المسمى الفوتوسفير، وهي الطبقة التي يمكن رؤيتها عند النظر باستخدام معدات مناسبة (Hanslmeier, 2023).

لا تقتصر ديناميكية الشمس على إنتاج الطاقة؛ فهي تمتلك أيضاً مجالاً مغناطيسياً قوياً ومعقدًا، يتولد ويتغير باستمرار بفعل حركة البلازما المشحونة داخلها (تأثير الدينامو الشمسي). هذا النشاط المغناطيسي هو المسؤول عن مجموعة متنوعة من الظواهر الشمسية النشطة، بما في ذلك البقع الشمسية (مناطق أبرد مؤقتًا على الفوتوسفير ترتبط بمجالات مغناطيسية قوية)، والتوهجات الشمسية (انفجارات مفاجئة للطاقة)، والانبعاثات الكتلية الإكليلية (CMEs) مقذوفات ضخمة من البلازما والمجال المغناطيسي من هالة الشمس (Kusserow & Marsch, 2025). يتبع هذا النشاط المغناطيسي دورة تقريبية تبلغ 11 عامًا، تتغير خلالها شدة وعدد هذه الظواهر، تؤثر هذه الانبعاثات والجسيمات عالية الطاقة (الرياح الشمسية) بشكل مباشر على النظام الشمسي بأكمله، بما في ذلك الغلاف المغناطيسي للأرض، مسببةً ظواهر مثل الشفق القطبي والعواصف المغناطيسية الأرضية، التي يمكن أن تؤثر على شبكات الطاقة والاتصالات والأقمار الصناعية (Kusserow & Marsch, 2025).



الشكل (2): يبين ترتيب الطبقات المكونة للشمس.



الشكل (3): الهيكل التخطيطي للشمس (المصدر: Stieglitz and Platzer, 2024).

1.4.2. الخصائص الفيزيائية الرئيسية للشمس (Mass, Key Physical Properties - Mass,)

(Temperature, Composition):

تتميز الشمس بخصائص فيزيائية محددة (انظر الجدول 1). تبلغ كتلتها

1.989×10^{30} كجم، أي ما يقارب 332,000 مرة كتلة الأرض، وقطرها حوالي 1.39 مليون

كيلومتر، أي 109 أضعاف قطر الأرض. تتكون بشكل أساسي من الهيدروجين (نحو 73% من

الكتلة)، والهيليوم (قاربة 25%)، مع نسبة ضئيلة (أقل من 2%) من عناصر أخرى مثل

الكربون، والنيتروجين، والأكسجين (Filippov, 2024)، تبلغ درجة حرارة سطحها المرئي

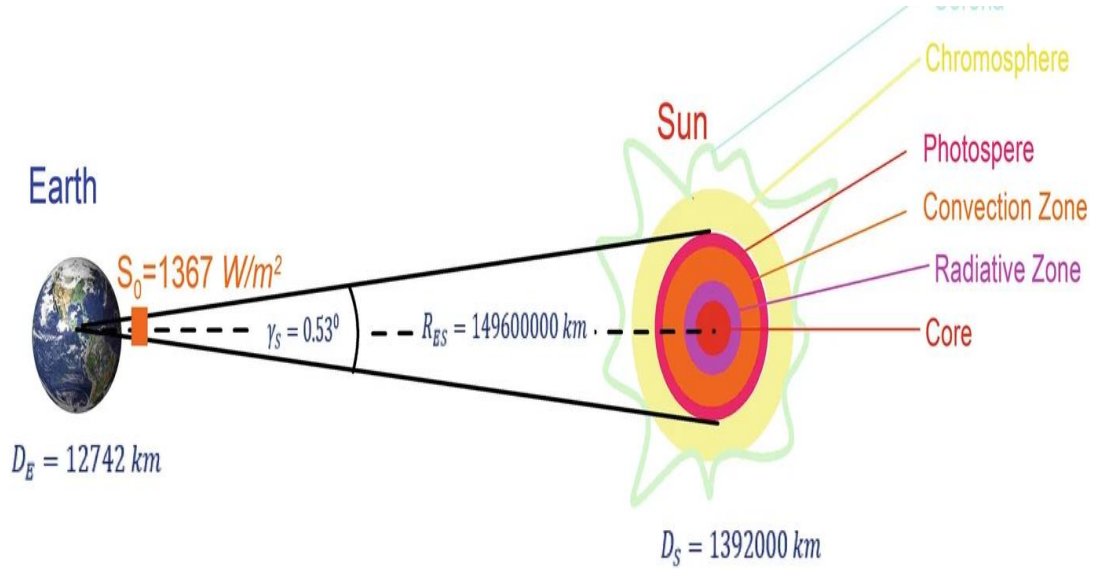
(الفوتوسفير) قرابة 5780 كلفن (Dire, 2024)، أو 5770 كلفن (Hanslmeier, 2023)، وهذه هي درجة الحرارة الفعالة المستخدمة في حسابات الإشعاع. أما السطوع (Luminosity)، وهو إجمالي الطاقة الإشعاعية المنبعثة من الشمس في الثانية، فيبلغ قرابة 3.85×10^{26} واط (Hanslmeier, 2023; Dire, 2024). يمكن حساب كتلة الشمس وسطوعها ودرجة حرارتها الفعالة باستخدام قوانين فيزيائية فلكية مثل قانون كبلر، وقانون ستيفان-بولتزمان (Hanslmeier, 2023).

الجدول (1): خصائص الشمس (المصدر: (Dire, 2024).

ر.م	الخاصية	القيمة مقابل الشمس	المقارنة
1.	الكتلة (Mass)	$1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$	332,000 متر من الأرض.
2.	متوسط القطر (Mean diameter (d))	$1.3927 \times 10^6 \text{ km}$	d 109 الأرض
3.	متوسط الكثافة (Mean density (D))	1.41 g/cm^3	0.255 D _{Earth}
4.	الجاذبية السطحية (جم) (Surface gravity(g))	274 m/s^2	28.0 g _{Earth}
5.	فترة الدوران النجمي (Sidereal rotation period)	متوسط الدوران 25.4 يوماً. 25.1 يوماً عند خط الاستواء. 34.4 يوماً عند القطبين.	
6.	الميلان المحوري (Axial tilt)	7.25°	بالنسبة إلى مسار الشمس.
7.	درجة حرارة السطح (Surface temperature)	5780 K	
8.	السطوع (Luminosity)	$3.85 \times 10^{26} \text{ W}$	1375 واط/م ² تسقط على الأرض.

بالمقارنة مع الطاقة المُستقبَلة من الشمس (1.74×10^{17} واط)، فإن جميع أنواع الطاقة الأخرى (الطاقة الحرارية الأرضية، وتوليد الطاقة البشرية، وانبعاث الأشعة تحت الحمراء من القمر، والإشعاع الشمسي المنعكس من القمر، وإشعاع النجوم، وطاقة المد والجزر، والانحلال

الإشعاعي، إلخ) أقل بأربع مرات أو أكثر. ويبلغ متوسط المسافة بين الشمس والأرض $R_{ES} = 149600000$ كم، وقطر الشمس أكبر بـ 109 مرات من قطر الأرض ($D_S = 1392000$ كم، $D_E = 12742$ كم). (الشكل 4).



الشكل (4): خصائص الشمس والأرض.

أ. كتلة الشمس (Solar Mass):

يمكن حساب كتلة الشمس من الصيغة الدقيقة لقانون كبلر:

$$a^3/P^2 = (G / (4\pi^2)) * (M_1 + M_2) \quad (1)$$

على سبيل المثال، نُدخل: كتلة الشمس (M_1)، كتلة الأرض (M_2)، (P) الفترة المدارية للأرض حول الشمس (سنة واحدة)، (a)، وهي مسافة معروفة بين الأرض والشمس. عندها نحصل على كتلة الشمس مباشرة، يمكن إهمال كتلة الأرض (M_2) هنا (Hanslmeier, 2023).

ب. درجة الحرارة الفعالة (Effective Temperature):

تُعامل النجوم كأجسام سوداء، إذ ينطبق عليها قانون بلانك للإشعاع، في حالة التوازن الديناميكي الحراري (في تجويف درجة حرارته T)، يجب أن يكون انبعاث وامتصاص أي عنصر حتمي متساويين.

يوضح الشكل (5) طيف الشمس. وبالمثل، يُرسم منحنى إشعاع جسم أسود بدرجة حرارة $= 5800$ كلفن. وتشير (أولاد سالم، 2016) إلى أن الشمس تُعدّ كجسم أسود، نصف قطره (R) ، ودرجة حرارته (T) ، تشع استطاعة في وحدة السطح في وحدة الزمن تعطى بقانون ستيفان:

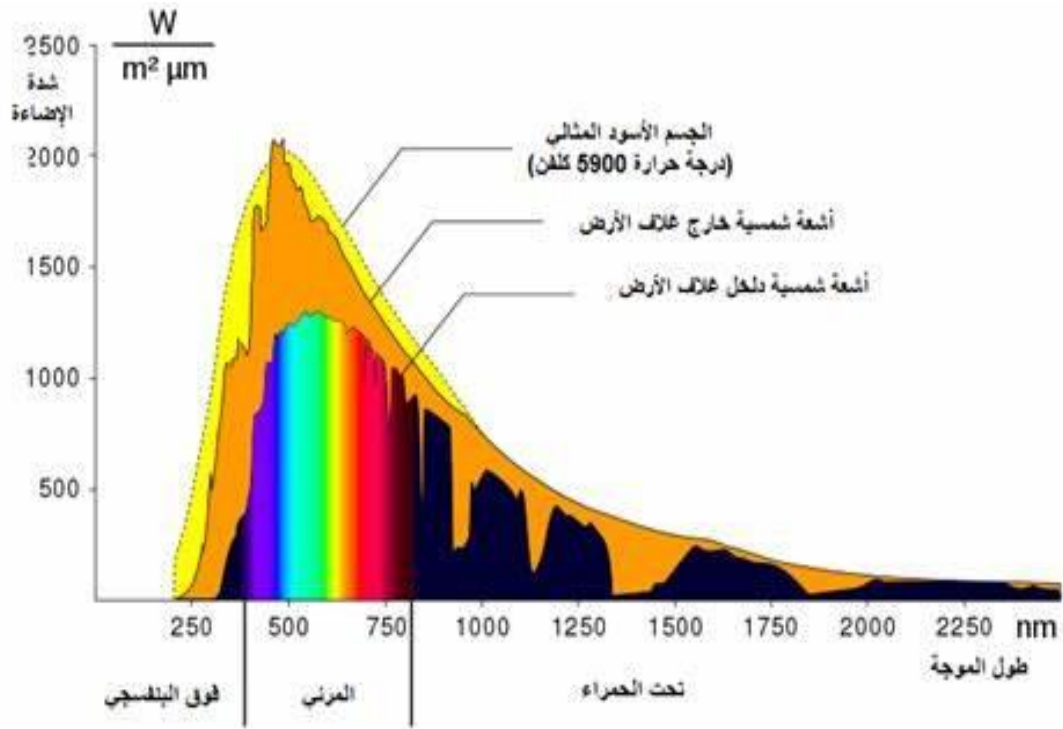
$$W = \sigma T^4 \quad (2)$$

حيث σ يمثل ثابت ستيفان بولتزمان

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{K}^4 \quad (3)$$

ومنه فإن الاستطاعة الكلية المنبعثة من سطح الشمس في الثانية الواحدة Ps

$$P = W (4\pi R^2) = \sigma T^4 \times 4\pi R^2 \quad (4)$$



شكل (5) يوضح طيف الشمس

5.2. مفهوم الإشعاع الشمسي (Concept of Solar Radiation):

الإشعاع الشمسي: هو تدفق الطاقة الكهرومغناطيسية المنبعثة من الشمس نتيجة تفاعلات الاندماج النووي، ويشبه طيفه طيف جسم أسود حرارته تقارب 5800 كلفن، متوزعاً بشكل أساسي بين الضوء المرئي والأشعة تحت الحمراء القريبة، مع جزء أصغر في نطاق الأشعة فوق البنفسجية. (Ahmed *et al.*, 2023) يُعرف متوسط هذا التدفق الطاقى الذي يصل إلى قمة الغلاف الجوى للأرض عند متوسط المسافة بينهما بـ "الثابت الشمسي"، وتبلغ قيمته حوالي 1361 واط لكل متر مربع (Stieglitz & Platzer, 2024) (W/m^2) ، وهي الوحدة الشائعة لقياس شدة هذا الإشعاع. (Ahmed *et al.*, 2023) ومع ذلك، فإن كمية الإشعاع التي تخترق الغلاف الجوى، وتصل فعلياً إلى سطح الأرض (الإشعاع الشمسي العالمى السطحي)، تكون أقل وتتغير بشكل كبير.

1.5.2. طبيعة الإشعاع الكهرومغناطيسي وظيفه (Nature of Electromagnetic

:(Radiation and its Spectrum

تُستمد الطاقة الشمسية أساسًا من الإشعاع الشمسي الذي يصل إلى سطح الأرض، وهو عبارة عن إشعاع كهرومغناطيسي بأطوال موجية متفاوتة، ، وهذا الإشعاع الشمسي حيوي لاستدامة الحياة على كوكبنا وتحديد معالم المناخ، مما يؤكد دور الشمس كمصدر رئيسي للطاقة لنظام مناخ الأرض وتوازنها الطاقوي، حيث تعمل على تدفئة الكوكب، وتحفيز الدورة الهيدرولوجية، وتمكين وجود الحياة عليه (Reddy *et al.*, 2018).

الجزء الأكبر من طاقة الشمس الذي يصل إلى حافة الغلاف الجوي للأرض يتركز في نطاقات الأشعة فوق البنفسجية (قاربة 7-8%)، الضوء المرئي (قاربة 45-47%)، والأشعة تحت الحمراء القريبة (حوالي 46-48%) (Duffie & Beckman, 2013). هذا التوزيع الطيفي مهم؛ لأنه يحدد كيفية تفاعل الإشعاع مع الغلاف الجوي وسطح الأرض.

2.5.2. تفاعل الإشعاع الشمسي مع الغلاف الجوي (Interaction of Solar

:(Radiation with the Atmosphere

يعمل الغلاف الجوي للأرض كمرشح ديناميكي ومعقد، حيث يعدّل بشكل كبير الإشعاع الشمسي في رحلته من الفضاء الخارجي إلى سطح الكوكب، فبمجرد دخول الإشعاع الشمسي إلى الغلاف الجوي، يتعرض لعمليات فيزيائية عدة، تؤدي إلى إضعافه وتغيير طبيعته، وهي العمليات التي تُعرف مجتمعة بالتوهين (Attenuation). إن فهم هذه التفاعلات ضروري لتحديد كمية ونوعية الإشعاع الشمسي المتاح على السطح.

3.5.2. عمليات التوهين الرئيسية (Main Attenuation Processes):

تتمثل عمليات التوهين الرئيسية التي يتعرض لها الإشعاع الشمسي في أثناء عبوره الغلاف الجوي في الامتصاص، والتشتت، والانعكاس، وهي على النحو الآتي:

أ. الامتصاص بواسطة الغازات (Absorption by Gases) (O_3 , H_2O , CO_2 , etc.):

تتضمن عملية الامتصاص تحويل الطاقة الكهرومغناطيسية للإشعاع الشمسي إلى طاقة حرارية بواسطة مكونات الغلاف الجوي، وتقوم بعض الغازات بامتصاص انتقائي لأطوال موجية محددة من الطيف الشمسي، ويُعد الأوزون (O_3)، المتمركز بشكل أساسي في طبقة الستراتوسفير، ممتصًا فعالًا جدًا للأشعة فوق البنفسجية (UV) الضارة، وخاصة نطاقات UV-C و UV-B، مما يوفر درعًا واقياً للحياة على الأرض (El-Nouby, 2010; Iqbal, 1983). كما يمتص بخار الماء (H_2O) بشكل كبير في نطاقات متعددة ضمن الأشعة تحت الحمراء (IR)، وبدرجة أقل في بعض أجزاء الطيف المرئي. ويمتص ثاني أكسيد الكربون (CO_2) بشكل رئيسي في نطاق الأشعة تحت الحمراء، أما الغازات الرئيسية الأخرى مثل الأكسجين (O_2) والنيتروجين (N_2)، فلها قدرة امتصاص أضعف نسبيًا في الطيف الشمسي (Gardashov, 2022; Stieglitz & Platzer, 2024)، ويؤدي هذا الامتصاص إلى تقليل كمية الطاقة الإجمالية الواصلة للسطح.

ب. التشتت (Scattering):

تحدث عملية التشتت عندما تصطدم فوتونات الإشعاع الشمسي بجزيئات الغاز أو الجسيمات العالقة (الهباء الجوي)، مما يؤدي إلى إعادة توجيهها في اتجاهات مختلفة عن مسارها الأصلي، ويُعدّ التشتت مسؤولاً بشكل أساسي عن تكوين الإشعاع الشمسي المنتشر (Diffuse

(Radiation) الذي يصل إلى السطح من جميع أنحاء القبة السماوية، وليس فقط مباشرة من قرص الشمس.

ج. الانعكاس (بواسطة السحب والسطح) (Reflection - by Clouds and Surface):

جزء من الإشعاع الشمسي الوارد ينعكس مباشرة إلى الفضاء، من دون أن يتم امتصاصه أو تشتيته داخل الغلاف الجوي السفلي. تُعدّ السحب من أهم العوامل العاكسة في الغلاف الجوي، حيث يمكن للأسطح العلوية للغيوم الكثيفة أن تعكس نسبة كبيرة من الإشعاع الشمسي الساقط عليها. كما تساهم الجسيمات العالقة (الهباء الجوي) في عملية الانعكاس، بالإضافة إلى ذلك، يعكس سطح الأرض نفسه جزءًا من الإشعاع الشمسي، وتعتمد النسبة المنعكسة على طبيعة السطح، وهو ما يُعرف بـ "الألبيدو" (Albedo)، أو الوضاءة. الأسطح ذات الألبيدو العالي مثل الثلوج والجليد، تعكس نسبة كبيرة من الإشعاع، في حين الأسطح الداكنة، مثل المحيطات والغابات، تمتص نسبة أكبر (IPCC, 2021).

د. تأثير كتلة الهواء (Effect of Air Mass):

تعتمد درجة التوهين الكلية التي يتعرض لها الإشعاع الشمسي بشكل كبير على طول المسار الذي يقطعه عبر الغلاف الجوي، يُستخدم مصطلح "كتلة الهواء" (Air Mass, AM) كمقياس لهذا المسار، تُعرّف كتلة الهواء بأنها نسبة طول المسار الفعلي، الذي يقطعه الإشعاع عبر الغلاف الجوي إلى طول المسار الذي سيقطعه لو كانت الشمس عمودية تمامًا (عند السمّت، Zenith). عندما تكون الشمس عمودية (زاوية السمّت $\theta_z = 0^\circ$)، تكون كتلة الهواء تساوي واحدًا (AM=1). ومع انخفاض الشمس في السماء (زيادة زاوية السمّت θ_z)، يزداد طول المسار الذي يجب أن يقطعه الإشعاع، ومن ثم تزداد قيمة كتلة الهواء، وكلما زادت كتلة الهواء، زادت فرص

تعرض الإشعاع لعمليات الامتصاص والتشتت، مما يؤدي إلى زيادة التوهين وانخفاض شدة الإشعاع المباشر الواصل إلى السطح (Rathod *et al.*, 2016; Iqbal, 1983)، هذا يفسر لماذا يكون الإشعاع الشمسي أضعف في الصباح الباكر وعند الغروب مقارنة بفترة الظهيرة.

إن التفاعل المعقد بين هذه العمليات (الامتصاص، التشتت، الانعكاس) وطول المسار عبر الغلاف الجوي، هو ما يحدد في النهاية كمية ونوعية (التوزيع الطيفي والمكونات المباشرة والمشتتة) الإشعاع الشمسي الذي يصل فعليًا إلى سطح الأرض، ويكون متاحًا للاستخدام في التطبيقات المختلفة.

6.2. الإشعاع الشمسي على سطح الأرض (Solar Radiation at the Earth's Surface):

بعد رحلته عبر الغلاف الجوي، وتعرضه لعمليات الامتصاص والتشتت والانعكاس، يصل الإشعاع الشمسي إلى سطح الأرض في أشكال ومكونات مختلفة، وتعتمد كميته وخصائصه على مجموعة معقدة من العوامل الفلكية والجغرافية والجوية. يُعدّ فهم هذه المكونات والعوامل المؤثرة عليها أمرًا أساسيًا لتقييم موارد الطاقة الشمسية وتصميم تطبيقاتها المختلفة.

1.6.2. مكونات الإشعاع الشمسي السطحي (Components of Surface Solar Radiation):

يُصنف الإشعاع الشمسي الذي يصل فعليًا إلى سطح الأرض (Terrestrial Solar Radiation) عادةً إلى ثلاث مكونات رئيسية، بناءً على مساره وتفاعله مع الغلاف الجوي:

أ. الإشعاع الشمسي المباشر (Direct Solar Radiation - DNI/BHI):

يمثل هذا المكون الجزء من الإشعاع الشمسي الذي يخترق الغلاف الجوي ويصل إلى سطح الأرض مباشرة من قرص الشمس من دون أن يتعرض لأي عملية تشتت في مساره، يمكن اعتباره كحزمة من الأشعة المتوازية القادمة من اتجاه محدد في السماء (Iqbal, 1983; Duffie & Beckman, 2013). يُعرف أيضًا باسم إشعاع الحزمة (Beam Radiation) ويُشار إليه غالبًا بـ Direct Normal Irradiance (DNI) عندما يُقاس على سطح عمودي على اتجاه الأشعة، أو Beam Horizontal Irradiance (BHI) عند الإشارة إلى مسقطه على السطح الأفقي. يُعد الإشعاع المباشر المكون ذا الكثافة الأعلى في الأيام الصافية، وهو حيوي لتشغيل تقنيات الطاقة الشمسية المركزة (CSP)، التي تعتمد على تركيز هذه الأشعة (Duffie & Beckman, 2013). تتأثر شدته بشكل كبير بصفاء الغلاف الجوي؛ فالغيوم والهباء الجوي (الغبار، الدخان) تقلل من شدته بشكل كبير (El-Sebaili *et al.*, 2010; Proutsos *et al.*, 2022; Si *et al.*, 2021).

ب. الإشعاع الشمسي المشتت أو المنتشر (Diffuse Solar Radiation - DI):

هو ذلك الجزء من الإشعاع الشمسي، الذي يصل إلى سطح الأرض بعد أن يكون قد تشتت مرة واحدة على الأقل بواسطة جزيئات الهواء، أو الهباء الجوي، أو قطرات الماء، وبلورات الثلج في السحب (Iqbal, 1983). على عكس الإشعاع المباشر، يأتي الإشعاع المشتت من جميع الاتجاهات في قبة السماء (Collares-Pereira & Rabl, 1979). في الأيام الصافية تمامًا، يكون الإشعاع المشتت قليلًا نسبيًا، (ناتجًا بشكل أساسي عن تشتت رايلي الذي يسبب زرقة السماء)، ولكنه يصبح المكون السائد في الأيام الملبدة بالغيوم الكثيفة، حيث قد ينعدم الإشعاع المباشر تقريبًا (Si *et al.*, 2021)، يُعد الإشعاع المشتت مصدرًا مهمًا للطاقة،

خاصةً لأنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV)، التي يمكنها التقاط الإشعاع القادم من زوايا مختلفة (Jäger *et al.*, 2014).

ج. الإشعاع الشمسي الكلي أو العالمي (Global Solar Radiation - GHI):

يمثل هذا المكون إجمالي الإشعاع الشمسي الساقط على سطح أفقي، وهو ببساطة مجموع الإشعاع الشمسي المباشر (مسقطاً على الأفقي) والإشعاع الشمسي المشتت (Iqbal, 1983; Duffie & Beckman, 2013). يُعبر عنه عادةً كمعدل تدفق للطاقة (Irradiance) بوحدة الواط لكل متر مربع (W/m^2)، وعند تجميعه على مدى فترة زمنية (مثل ساعة أو يوم)، يُسمى التشعيع (Irradiation)، ويُقاس بوحدات الطاقة لكل وحدة مساحة (مثل Wh/m^2 أو MJ/m^2).

يُعد الإشعاع الشمسي الكلي المتغير الأكثر أهمية والأكثر استخداماً في معظم تطبيقات الطاقة الشمسية وتقييم مواردها، بما في ذلك تصميم وحساب إنتاجية أنظمة الطاقة الكهروضوئية، وأنظمة التسخين الشمسي، ونماذج المناخ والأرصاد الجوية، والدراسات الزراعية والهيدرولوجية (Kumar *et al.*, 2022; Nedbálek *et al.*, 2024; IPCC, 2021; Annandale *et al.*, 2002). في السياق الليبي، يُعدّ تحديد وتوفير بيانات دقيقة للإشعاع الشمسي الكلي أمراً بالغ الأهمية لدعم خطط التنمية الطموحة في مجال الطاقة المتجددة، نظراً للإمكانات الكبيرة التي تتمتع بها البلاد في هذا المجال (الصواني، 2019؛ النعاس، 2020؛ المؤسسة الليبية للاستثمار، 2023؛ Elmnifi *et al.*, 2024; NSREEE, 2023).

2.6.2. العوامل المؤثرة على الإشعاع الشمسي السطحي (Factors Affecting Surface

:(Solar Radiation)

تتأثر كمية كل مكون من مكونات الإشعاع الشمسي الواصل للسطح وتوزيعه الزمني والمكاني بمجموعة متفاعلة من العوامل، يمكن تقسيمها على فئتين رئيسيتين:

أ. العوامل الفلكية والجغرافية (Astronomical/Geographical Factors):

تحدد هذه العوامل بشكل أساسي المسار الهندسي لأشعة الشمس، والحد الأقصى النظري للإشعاع الذي يمكن أن يصل إلى موقع معين:

• زاوية السقوط (θ_i , Angle of Incidence): هي الزاوية بين شعاع الشمس الساقط

والخط العمودي على السطح المستقبل، وتحدد هذه الزاوية كثافة الإشعاع المباشر

الساقط على السطح (تقل الكثافة كلما زادت الزاوية عن الصفر). (Iqbal, 1983;)

(Tiwari, 2024). وتعتمد على خط العرض، وميل المستوى (β) بالنسبة إلى مستوى

الأفقي، وزاوية سمت السطح (γ)، والانحراف (δ)، وزاوية الساعة (ω)، ويُعطى تعبيرها

بالمعادلة (5):

$$\cos \theta_i = (\cos \Phi \cos \beta \sin \Phi \sin \beta \cos \gamma) \cos \delta \cos \omega + \cos \delta \sin \omega \sin \beta \sin \gamma + (\sin \Phi \cos \beta - \cos \Phi \sin \beta \cos \gamma) \times \sin \delta \quad (5)$$

بالنسبة إلى السطح المواجه للجنوب، زاوية سمت السطح $\gamma = 0$ ، لتصبح المعادلة (5) كما يلي :

$$\cos \theta_i = [\cos(\Phi - \beta)] \cos \delta \cos \omega + [\sin(\Phi - \beta)] \times \sin \delta \quad (6)$$

بالنسبة إلى المستوى الأفقي المواجه للجنوب مباشرةً، $\gamma = 0$ ، $\beta = 0$ ، تصبح زاوية السقوط

مساوية لزاوية سمت، أي $\theta = \theta_z$ (زاوية سمت). تُختزل المعادلتان السابقتان لجيب التمام

كما في المعادلة (7):

$$\cos \theta_i = \cos \varphi \cos \delta \cos \omega + \sin \delta \sin \varphi \quad (7)$$

• زاوية الانحراف الشمسي (Declination Angle, δ): تُعرّف بأنها الزاوية بين الخط

الواصل بين مركزي الشمس والأرض، وإسقاطه على المستوى الاستوائي. وتتغير

باختلاف عدد أيام السنة. بالنسبة إلى يوم التاسع من السنة، استُخدمت علاقة كوبر

التجريبية لحساب زاوية انحراف الشمس (بالدرجات)، وتُعطى بالمعادلة (8). (Tiwari,)

(2024).

$$\delta = 23.45 \sin \left[(284 + n) \times \frac{360}{365} \right] \quad (8)$$

حيث، n = اليوم من السنة ($n \leq 365/366$).

تتغير زاوية انحراف الشمس (δ) هذه بسبب دوران الأرض حول محورها، وتبلغ قيمتها

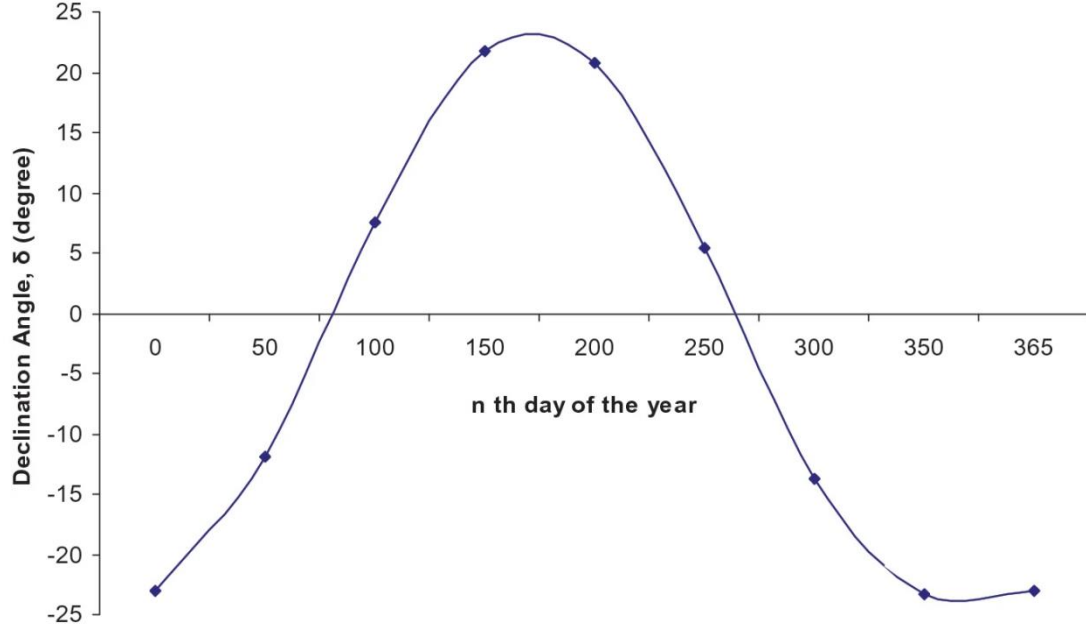
العظمى 23.45 درجة في 21 ديسمبر، وأدنى قيمة لها 23.45 درجة في 21 يونيو، كما هو

موضح في الشكل (6).

إذا تم اعتبار n بمثابة متوسط يومي شهري مع قيمة الانحراف، فإن جميع الحسابات

الخاصة بالإشعاع الشمسي ستكون عبارة عن قيمة متوسطة شهرية، ويتم استخدامها لتقييم الأداء

الشهري لأي نظام شمسي.



الشكل (6): تغير زاوية الانحراف مع اليوم التاسع من السنة (المصدر: Tiwari, 2024).

لتقييم متوسط الإشعاع الشمسي الساعي والشهري، تلعب زاوية الانحراف دوراً مهماً. لذلك يجب مراعاة قيمة "n" على النحو الآتي:

(أ): بالنسبة إلى تغير الإشعاع الشمسي الساعي، بغض النظر عن المنطقة الأرضية أو خارجها، يجب أن تكون قيمة "n" هي اليوم n من السنة، والذي يتراوح من $n = 1$ إلى 366/365.

(ب): بالنسبة إلى تغير الإشعاع الشمسي الشهري، بغض النظر عن المنطقة الأرضية أو خارجها، يجب مراعاة قيمة "n" من كل شهر مذكور في الجدول (2).

الجدول (2): متوسط الأيام الموصى بها للأشهر وقيم n لكل شهر (المصدر: Tiwari, 2024).

الشهر	N لليوم في الشهر	لليوم المتوسط من الشهر		
		التاريخ	يوم للسنة (n)	الانحراف (δ)
يناير	i	17	17	-20.9
فبراير	31+i	16	47	-13.0
مارس	59+i	16	75	-2.4
أبريل	90+i	15	105	9.4

الشهر	N لليوم في الشهر	لليوم المتوسط من الشهر	
		التاريخ	يوم للسنة (n)
مايو	120+i	15	135
يونيو	151+i	11	162
يوليو	181+i	17	198
أغسطس	212+i	16	228
سبتمبر	243+i	15	258
أكتوبر	273+i	15	288
نوفمبر	304+i	14	318
ديسمبر	334+i	10	344

• **خط العرض (ϕ , Latitude):** يحدد الموقع شمال أو جنوب خط الاستواء، ويؤثر

بشكل أساسي على الزوايا الشمسية (مثل زاوية السميت، وزاوية الارتفاع)، وعلى طول

النهار على مدار السنة، ومن ثم على كمية الإشعاع السنوية الإجمالية.

• **الارتفاع عن سطح البحر (Z , Altitude):** يؤثر الارتفاع في سمك الغلاف الجوي الذي

يجب أن يخترقه الإشعاع، ففي الارتفاعات الأعلى، يكون الغلاف الجوي أقل كثافة وأقل

سمكًا، مما يؤدي عمومًا إلى زيادة طفيفة في الإشعاع المباشر (خاصة في الأجواء الصافية)،

بسبب انخفاض التشبث والامتصاص (Duffie & Beckman, 2013).

ب. الظروف المناخية والجوية (Climatic/Atmospheric Conditions):

تعمل هذه العوامل على تعديل وتوهين الإشعاع الشمسي في أثناء مروره عبر

الغلاف الجوي، وهي المسؤولة عن التقلبات الكبيرة في الإشعاع الواصل للسطح من يوم إلى

آخر وحتى من ساعة إلى أخرى:

• **السحب (Clouds):** يُعدّ العامل الأكثر تأثيرًا وتغيرًا على الإشعاع الشمسي السطحي

في معظم المناطق (Si et al., 2021)، وتعمل قطرات الماء أو بلورات الثلج في

السحب كعاكسات ومشتتات قوية، مما يؤدي إلى انخفاض كبير في الإشعاع المباشر (قد ينعدم تمامًا) وانخفاض في الإشعاع الكلي، في حين تزيد من نسبة الإشعاع المشتت، ويعتمد مدى التأثير على نوع السحابة، سماكتها، ارتفاعها، ونسبة تغطيتها للسماء.

- **الرطوبة (Humidity / Water Vapor):** يمتص بخار الماء الموجود في الغلاف الجوي جزءًا من الإشعاع الشمسي، خاصة في نطاقات الأشعة تحت الحمراء، وبعض نطاقات الضوء المرئي، زيادة الرطوبة تؤدي إلى زيادة الامتصاص وتقليل الإشعاع الواصل للسطح (Iqbal, 1983).

- **تعكر الهواء (Atmospheric Turbidity / Aerosols):** يشير إلى وجود جسيمات دقيقة عالقة في الهواء (مثل الغبار، الدخان، الملوثات الصناعية، الأملاح البحرية). تعمل هذه الهباءات الجوية على تشتيت (تشتت بشكل رئيسي)، وامتصاص الإشعاع الشمسي، مما يقلل من شدة الإشعاع المباشر، ويزيد من الإشعاع المشتت، ويمكن أن يغير من التوزيع الطيفي للإشعاع الواصل (Proutsos *et al.*, 2022; Iqbal, 1983)، ويؤثر مستوى التعكر بشكل كبير على جودة مورد الإشعاع المباشر.

- **غاز الأوزون (Ozone):** يمتص طبقة الأوزون في الستراتوسفير معظم الأشعة فوق البنفسجية الضارة (UV-B و UV-C)، مما يؤثر على الجزء فوق البنفسجي من الطيف الشمسي الواصل للسطح (El-Nouby, 2010; Iqbal, 1983).

إن التفاعل المعقد والمستمر بين هذه العوامل الفلكية والجغرافية والجوية، هو ما يحدد في النهاية كمية ونوعية الإشعاع الشمسي المتاح للاستخدام في أي موقع على سطح الأرض، وفي أي وقت محدد.

7.2. قياس الإشعاع الشمسي (Measurement of Solar Radiation):

1.7.2. الحاجة إلى القياس الدقيق (Need for Accurate Measurement):

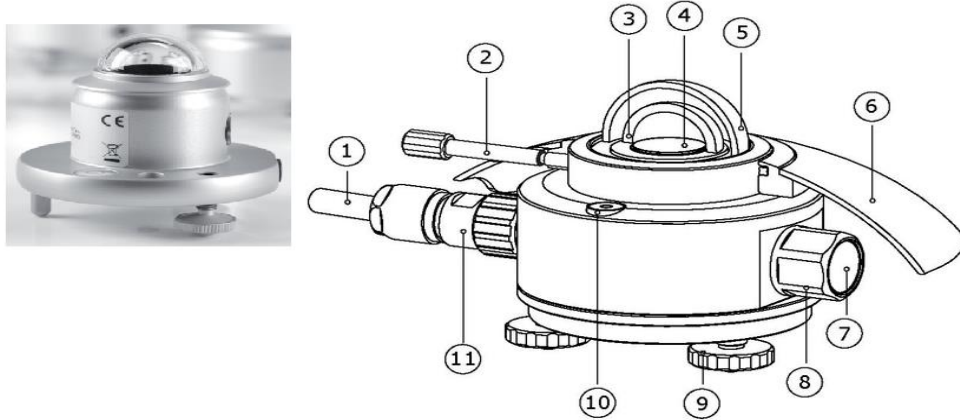
يُعد القياس الدقيق والموثوق للإشعاع الشمسي خطوة أساسية وحاسمة لتحقيق الاستفادة المثلى من هذا المورد الطاقوي الهائل، ففهم كمية ونوعية الإشعاع الشمسي الواصل إلى موقع معين لا غنى عنه لتصميم وتشغيل وتقييم أداء أنظمة الطاقة الشمسية بكفاءة وفعالية (Lang, 2006; Duffie & Beckman, 2013). تتطلب عملية تحديد المواقع الأنسب لإنشاء محطات الطاقة الشمسية، واختيار التقنية المثلى (كهروضوئية، أو حرارية مركزة)، وتقدير الإنتاجية المتوقعة، بيانات إشعاع شمسي دقيقة ومفصلة، تشمل مكوناته المختلفة (المباشر، المنتشر، الكلي). كما أن مقارنة بيانات الإشعاع المقاسة مع تلك المحسوبة أو المقدرة بواسطة النماذج، كما أكد الطباخ (2002) في دراسته لطرابلس، ضرورة لضمان دقة التقديرات المستخدمة في تصميم الأنظمة وتقييم أدائها الفعلي، مما يدعم اتخاذ قرارات مستنيرة في تخطيط مشاريع الطاقة الشمسية.

2.7.2. أجهزة القياس الرئيسية (Main Measurement Instruments):

يُعد قياس طاقة الشمس الساقطة على سطح الأرض عملية قياس ميدانية صعبة، وتعتمد تقنية القياس المطبقة اليوم على تحويل الطاقة الإشعاعية الكهرومغناطيسية إلى حرارة أو كهرباء. ومن أجهزة القياس هذه -على سبيل المثال- الثنائيات الضوئية والأعمدة الحرارية. يستخدم النوع الأول التأثير الكهروضوئي لتحويل ضوء الشمس المباشر، في حين يستخدم النوع الثاني التأثير الكهروضوئي لتحويل فروق درجات الحرارة المتولدة إلى تيار كهربائي، والذي يمكن قياسه بعد ذلك (Stieglitz and Platzner, 2024). يمكن تلخيص الأجهزة الرئيسية في الأنواع الآتية:

أ. البيرانومتر (Pyranometer) (لقياس الإشعاع الكلي):

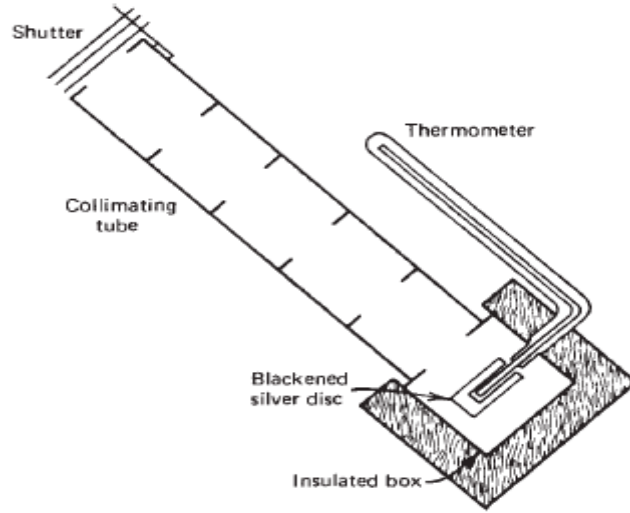
هو جهاز لقياس الإشعاع الشمسي الكلي نصف الكروي (الشعاع المباشر بالإضافة إلى الإشعاع المنتشر)، وعادةً ما يُركب على سطح أفقي (الشكل 7)، ويعتمد هذا الجهاز لقياس الإشعاع الشمسي على مبدأ قياس الفرق في درجة الحرارة بين سطح أسود ماص للإشعاع، وسطح أبيض عاكس (أو مقارنة سطح معرض للإشعاع بآخر معزول)، محولاً هذا الفرق الحراري إلى إشارة كهربائية (جهد عادةً)، تتناسب طردياً مع شدة الإشعاع الساقط. يمكن أيضاً وضعه مائلاً لمحاكاة زاوية الألواح الشمسية. يتميز الجهاز عادةً بنطاق قياس يمتد من 0 إلى 2000 واط/متر مربع، ودقة تتراوح بين $\pm 2\%$ و $\pm 10\%$ بحسب جودته وتصنيفه، وزمن استجابة يتفاوت من بضع ثوانٍ إلى دقائق، وتشمل استخداماته الرئيسية مجالات الطاقة الشمسية (خاصة الكهروضوئية)، والدراسات المناخية والأرصاد الجوية، والبحوث الزراعية، وتقييم أداء الألواح الشمسية. ومن تحديات استخدامه تأثره بدرجة حرارة المحيط (يتطلب بعض الأنواع تعويضاً لدرجة الحرارة)، وحساسيته للرطوبة (تكتف داخل القبة) والأتربة (تتطلب تنظيفاً دورياً للقبة)، وحاجته إلى المعايير الدورية لضمان دقة القياسات (Iqbal, 1983).



الشكل (7): رسم خطي لمقياس الإشعاع الشمسي، يوضح الأجزاء الأساسية: (1) الكابل، (2) مقبض (3) مقياس الإشعاع الشمسي و(4) سطح الكاشف الأسود، (5) القباب الزجاجية، (6) واقي الشمس، (7) مؤشر المجفف، (9) أقدام التسوية، (10) مستوى الفقاعة، (11) الموصل

ب. البيرهيليومتر (Pyreheliometer) (لقياس الإشعاع المباشر):

هو أداة دقيقة تُستخدم لقياس الإشعاع الشمسي المباشر (DNI أو BHI)، الواصل عمودياً من قرص الشمس، وجزء صغير جداً من السماء المحيطة به (بنحو 5 درجات)، مُستبعداً الإشعاع المنتشر، ويُعبر عن قياساته بوحدة الواط لكل متر مربع (W/m^2) (الشكل 8). يعتمد مبدأ عمله على استخدام أنبوب ضيق ذي زاوية رؤية محدودة يُوجه باستمرار ومباشرة نحو الشمس بواسطة جهاز تتبع شمسي دقيق، وهو أمر ضروري لضمان جودة البيانات، نظراً لأهمية قياس DNI بدقة في تصميم وتقييم أنظمة الطاقة الشمسية المركزة (CSP)، وفي الدراسات المناخية والغلاف الجوي، وتقييم المواقع الشمسية، وضعت المنظمة العالمية للأرصاد الجوية (WMO) معايير صارمة لهذه الأجهزة، مصنفة إياها إلى فئتي المعيار الأساسي (الأعلى دقة، وحساسية، واستقراراً) والمعيار الثانوي (دقة عالية، مُعايرة وفقاً للمعيار الأساسي). يتميز البيرهيليومتر بنطاق قياس نموذجي من 0 إلى $1500 W/m^2$ (قد يصل إلى $4000 W/m^2$)، ودقة عالية جداً، قد تصل إلى $\pm 0.5\%$ للأجهزة عالية الجودة. وعلى الرغم من أهميته وتطوراته المستمرة لتحسين الأداء (Delibasic, 2019; Duffie & Beckman, 2013)، يواجه استخدامه تحديات تشمل التكلفة المرتفعة مقارنة بالبيرانومتر، ومتطلبات التركيب والتشغيل (الحاجة إلى نظام تتبع دقيق)، والصيانة، والمعايرة الأكثر تعقيداً، وحساسيته للغبار والرطوبة على نافذة الدخول (العدسة أو الكوارتز).



الشكل (8): يبين مقطع تخطيطي لجهاز قياس الحرارة بالقرص الفضي (Pyrheliometer).

ج. مقياس الإشعاع المنتشر (Diffusometer) (لقياس الإشعاع المنتشر):

هو أداة مُصممة لقياس الإشعاع الشمسي المنتشر (DI)، وهو الإشعاع الذي يصل إلى سطح الأرض بعد تشتته في الغلاف الجوي من جميع الاتجاهات، باستثناء الإشعاع المباشر من الشمس، ويُقاس بوحدة الواط لكل متر مربع (W/m^2) (الشكل 9)، يعتمد مبدأ عمله في الغالب على استخدام بيرانومتر قياسي، مع إضافة حاجب أو حلقة تظليل (Shading Ring/Disk) لمنع الإشعاع الشمسي المباشر من الوصول إلى المستشعر بشكل مستمر، مما يسمح فقط بقياس المكون المنتشر (Iqbal, 1983)، قد تكون حلقة التظليل ثابتة وتحتاج لتعديل يدوي دوري؛ لمواكبة تغير مسار الشمس على مدار الفصول، أو قد يكون الحاجب عبارة عن قرص صغير متحرك، يتم التحكم فيه بواسطة نظام تتبع لضمان تظليل المستشعر من قرص الشمس فقط وبشكل مستمر، يتميز هذا الجهاز عادةً بنطاق قياس يصل إلى حوالي 600 W/m^2 (أو بحسب البيرانومتر المستخدم)، وتعتمد دقته بشكل كبير على دقة البيرانومتر الأصلي، ودقة نظام التظليل (يجب تطبيق معاملات تصحيح لحساب الجزء من السماء الذي

تحجبه الحلقة نفسها)، يُعد قياس الإشعاع المنتشر مهماً لفهم تأثير الغلاف الجوي والتلوث، وتقييم أداء الألواح الشمسية في الظروف الغائمة، وفي دراسات المناخ والتغير المناخي، وله استخدامات في تصميم أنظمة الطاقة الشمسية، والبحوث الزراعية المتعلقة بتأثير الضوء المنتشر على النباتات، تشمل التحديات الحاجة إلى تعديل يدوي للحلقات الثابتة، وتطبيق معاملات التصحيح بدقة، وتكلفة أنظمة التظليل الآلية، بالإضافة إلى تحديات صيانة البيرانومتر نفسه.



الشكل (9): يبين حلقة الظل مع مقياس الإشعاع الشمسي Hukseflux SR300-D1 لقياس الإشعاع المنتشر.

3.7.2. تحديات القياس الميداني (Challenges of Field Measurement):

على الرغم من توفر أجهزة دقيقة لقياس الإشعاع الشمسي، إلا أن عملية القياس الميداني المستمرة تواجه مجموعة من التحديات العملية واللوجستية، وتشمل هذه التحديات التكلفة الأولية المرتفعة للأجهزة عالية الجودة، خاصة البيرهيليومترات وأنظمة التتبع الشمسي المرتبطة بها. بالإضافة إلى ذلك، تتطلب هذه الأجهزة صيانة دورية، أهمها التنظيف المنتظم للقبب والنوافذ؛ لضمان عدم تأثر القياسات بالأتربة والملوثات، وهو أمر بالغ الأهمية في البيئات

الصحراوية أو الملوثة، والتحدي الأكبر ربما يكمن في الحاجة إلى معايرة دورية ودقيقة (عادة كل سنة أو سنتين) مقابل أجهزة مرجعية لضمان استمرارية دقة القياسات، وهي عملية تتطلب مختبرات متخصصة وخبرة فنية. كما يتطلب تشغيل وصيانة محطات القياس كادرًا فنيًا مدربًا. علاوة على ذلك، فإن إنشاء وتشغيل شبكة قياس كثيفة تغطي مناطق جغرافية واسعة (مثل دولة ليبيا) يمثل تحديًا لوجستيًا وماليًا كبيرًا، فكل هذه العوامل مجتمعة تجعل الحصول على بيانات إشعاع شمسي مقاسة عالية الجودة ومستمرة وموزعة جغرافيًا أمرًا صعبًا ومكلفًا، مما يعزز أهمية تطوير واستخدام نماذج تقدير موثوقة كبديل أو مكمل للقياسات المباشرة.

هذه التحديات، وخاصة التكلفة والحاجة إلى الخبرة والصيانة المستمرة، تجعل من الصعب إنشاء شبكات قياس كثيفة تغطي جميع المواقع ذات الأهمية، وهذا يبرز الحاجة الماسة إلى تطوير واستخدام طرق بديلة لتقدير الإشعاع الشمسي، خاصة في المناطق التي تقتصر إلى القياسات الميدانية، وهو ما سيتم تناوله في القسم الآتي.

8.2. مبررات الحاجة إلى نماذج التقدير (Justification for Estimation Models)

:(Data Scarcity, Cost

كما نوقش في القسم السابق، فإن التكلفة العالية، والصعوبات اللوجستية والفنية المرتبطة بإنشاء وصيانة شبكات قياس إشعاع شمسي كثيفة وموثوقة باستخدام أجهزة مثل البيرومترات، والبيروهيلومترات، تجعل بيانات الإشعاع الشمسي المقاسة غير متوفرة في العديد من المواقع حول العالم، وخاصة في المناطق النامية أو النائية، التي تُعرف غالبًا بالمناطق ذات البيانات المحدودة (Besharat *et al.*, 2013) (Data-Scarce Regions). ونظرًا إلى الحاجة الماسة إلى بيانات الإشعاع الشمسي في مجالات متنوعة، تتراوح من تطبيقات الطاقة المتجددة إلى الزراعة وإدارة الموارد المائية، ودراسات المناخ، فقد تم توجيه جهود بحثية كبيرة نحو تطوير واستخدام

نماذج رياضية لتقدير الإشعاع الشمسي بشكل غير مباشر (Gürel *et al.*, 2020; Meenal *et al.*, 2023). تعتمد هذه النماذج على متغيرات مناخية أخرى، يتم قياسها بشكل دوري في أكبر عدد من محطات الأرصاد الجوية، وتكون قياساتها أسهل وأقل تكلفة، ومن بين هذه المتغيرات، برزت درجة حرارة الهواء كمدخل شائع ومفيد للغاية، نظرًا لتوفر بيانات درجات الحرارة العظمى (T_{max}) والصغرى (T_{min}) اليومية على نطاق واسع جدًا، حتى في المواقع التي قد تكون فيها هي البيانات المناخية الوحيدة المتاحة (Besharat *et al.*, 2013).

1.8.2. العلاقة الفيزيائية بين درجة حرارة الهواء والإشعاع الشمسي (Physical

:(Relationship between Air Temperature and Solar Radiation

تستند نماذج تقدير الإشعاع الشمسي المعتمدة على درجة الحرارة إلى علاقة فيزيائية أساسية ومفهومة جيدًا بين هذين المتغيرين، ويُعد الإشعاع الشمسي الكلي (G) الواصل إلى سطح الأرض هو المحرك الرئيسي لتوازن الطاقة عند السطح، والمصدر الأساسي للطاقة، الذي يسخن هذا السطح خلال النهار، وبدوره، يقوم السطح الساخن بتسخين طبقة الهواء الملاصقة له عن طريق عمليات التوصيل والحمل الحراري، بالإضافة إلى إطلاق إشعاع حراري طويل الموجة (Iqbal, 1983; Duffie & Beckman, 2013). نتيجة لهذه الآلية، يوجد ارتباط قوي ومتوقع بين كمية الإشعاع الشمسي التي يتلقاها السطح، والتغيرات التي تحدث في درجة حرارة الهواء القريب منه، وهذا الارتباط يكون واضحًا بشكل خاص على المقاييس الزمنية اليومية والموسمية.

أحد المؤشرات المشتقة من درجة الحرارة، والذي يظهر حساسية خاصة لظروف الإشعاع هو النطاق الحراري اليومي (ΔT , Diurnal Temperature Range)، والذي يُحسب ببساطة كالفرق بين درجة الحرارة العظمى والصغرى خلال يوم واحد ($\Delta T = T_{max} - T_{min}$). ففي الأيام الصافية والمشمسة، يكون اكتساب الطاقة من الإشعاع الشمسي خلال النهار كبيرًا، مما يؤدي إلى ارتفاع

ملحوظ في T_{max} . وفي الليل، وفي غياب الغطاء السحابي الذي يعمل كعازل، يكون فقدان الحرارة من السطح عن طريق الإشعاع طويل الموجة فعالاً، مما يؤدي إلى انخفاض كبير في T_{min} . ومن ثم ينتج عن هذه الظروف نطاق حراري يومي ΔT كبير، على العكس من ذلك، في الأيام الملبدة بالغيوم، تقلل السحب بشكل كبير من كمية الإشعاع الشمسي الواصلة إلى السطح نهائياً، مما يحد من ارتفاع T_{max} . وفي الليل، تعمل نفس السحب كغطاء يقلل من الفقد الإشعاعي، مما يبقي T_{min} أعلى مما ستكون عليه في ليلة صافية، والنتيجة هي نطاق حراري يومي ΔT أصغر بكثير في الأيام الغائمة مقارنة بالأيام الصافية (Allen, 1997; Hargreaves & Samani, 1982). هذا الارتباط القوي والمفهوم فيزيائياً بين النطاق الحراري اليومي (ΔT) ومدى صفاء السماء (ومن ثم كمية الإشعاع الشمسي الكلي الواصل للسطح)، يشكل الأساس المنطقي الذي بُنيت عليه العديد من النماذج التجريبية لتقدير الإشعاع الشمسي باستخدام بيانات درجة الحرارة فقط.

2.8.2 نماذج قياس تأثير العوامل المؤثرة على الإشعاع الشمسي (Models To Measure

:The Impact Of Factors Affecting Solar Radiation)

يُعد تقدير طاقة الإشعاع الشمسي باستخدام بيانات درجة حرارة الهواء جانباً مهماً للتنبؤ بالطاقة الشمسية وإدارتها، وقد ركزت دراسات مختلفة على تطوير نماذج لتقدير الإشعاع الشمسي بدقة، بناءً على معايير الأرصاد الجوية، بما في ذلك درجة حرارة الهواء، على سبيل المثال اقترح "Boottarat" وآخرون نموذجاً محسناً، يدمج بيانات الأرصاد الجوية المحلية ومؤشر جودة الهواء لتقدير دقيق للإشعاع الشمسي (Boottarat et al., 2024)، في حين طور "Qiu" وآخرون نموذج (N1-4)، تتنبأ بنجاح بالإشعاع الشمسي العالمي اليومي باستخدام بيانات درجة الحرارة فقط، مما يُظهر دقة عالية عبر مناطق درجات الحرارة المختلفة في الصين

(Qiu *et al.*, 2022)، بالإضافة إلى ذلك استخدم الباحثان "Thallapalli & Prasanna" المتغيرات المناخية، بما في ذلك درجة حرارة الهواء، لتطوير نماذج تعتمد على البيانات مثل الشبكات العصبية الاصطناعية، والبرمجة متعددة الجينات لتقدير الإشعاع الشمسي، مما يدل على نتائج إيجابية وموثوقة عالية (Thallapalli, & Prasanna, 2022)، وتناولت دراسة (Tidjani *et al.*, 2022) العديد من النماذج التي يمكن استخدامها لقياس تأثير العوامل المؤثرة على الإشعاع الشمسي، بما في ذلك النماذج شبه التجريبية، التي تعتمد على بيانات موجودة، والنماذج التجريبية التي تعتمد على نتائج التجارب، وركزت هذه النماذج على عوامل مثل زاوية خط العرض، زاوية الارتفاع، السحب، البخار، الأوزون، والانعكاس من الأرض، كما قدمت الدراسة نموذجًا جديدًا للتنبؤ بالإشعاع الشمسي في منطقة سوق أهراس بالجزائر، والذي يعتمد على درجة الحرارة والرطوبة النسبية.

تسلط هذه الدراسات بشكل عام الضوء على أهمية درجة حرارة الهواء في التنبؤ بقوة الإشعاع الشمسي بدقة، وتُظهر تنوعًا في نماذج تقدير الإشعاع الشمسي، بدءًا من نماذج بسيطة تعتمد على بيانات درجة الحرارة فقط، إلى نماذج متقدمة تدمج مجموعة متنوعة من العوامل، مثل جودة الهواء، والرطوبة، وخصائص السطح، كما تُسلط هذه النماذج الضوء على أهمية دراسة العوامل المؤثرة على الإشعاع الشمسي بشكل شامل، لتحسين دقة التنبؤ بالطاقة الشمسية، وتطوير استراتيجيات إدارة فعالة.

3.8.2. تصنيف نماذج التقدير المعتمدة على درجة الحرارة (Classification of)

:(Temperature-Based Estimation Models)

يمكن تصنيف النماذج التي تُستخدم لتقدير الإشعاع الشمسي الكلي بالاعتماد على

بيانات درجة حرارة الهواء (T_{max} , T_{min} , T_{avg}) بشكل عام كنماذج تجريبية (Empirical)

(Models)، وهذا يعني أن صيغها الرياضية ومعاملاتها غالباً ما يتم اشتقاقها من خلال تحليل البيانات الإحصائية، والعلاقات التي لوحظت بين المتغيرات في مواقع معينة، بدلاً من اشتقاقها بالكامل من المبادئ الفيزيائية الأولى، ومع ذلك، فإن هذه النماذج التجريبية ليست عشوائية، بل تستند إلى الفهم الفيزيائي للعلاقة بين الإشعاع ودرجة الحرارة الموضحة أعلاه.

تأخذ العديد من هذه النماذج صيغة عامة تربط بين مؤشر الصفاء (Clearness Index, $K_t = H/H_o$)، وهو نسبة الإشعاع الشمسي الكلي اليومي على سطح أفقي (H)، إلى الإشعاع الشمسي اليومي خارج الغلاف الجوي على نفس السطح (H_o)، وبين النطاق الحراري اليومي (ΔT) أو متغيرات درجة حرارة أخرى. يمكن أن تتخذ هذه العلاقة أشكالاً رياضية مختلفة، مثل علاقات خطية، أو أسية، أو متعددة الحدود (Prieto and García, 2022).

4.8.2. استعراض أهم النماذج التجريبية الرئيسية (Review of Key Empirical Models):

تم تطوير العديد من النماذج التجريبية لتقدير الإشعاع الشمسي الكلي اليومي (H) باستخدام بيانات درجة الحرارة، غالباً ما تتطلب هذه النماذج حساب الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي (H_o) كخطوة أولى، وهو أمر يمكن القيام به بدقة باستخدام معادلات فلكية تعتمد على خط العرض، والموقع، واليوم من السنة (Iqbal, 1983; Duffie & Beckman, 2013). فيما يأتي استعراض لبعض النماذج الأكثر شيوعاً واستخداماً:

1. النموذج 1: نموذج هارجريفز-ساماني (Hargreaves-Samani Model):

يُعد هذا النموذج من أوائل النماذج وأكثرها استخداماً وشهرة؛ نظراً لبساطته، وقلة متطلباته من البيانات، اقترح هارجريفز وساماني (1982، 1985) الصيغة العامة الآتية:

$$H/H_o = \alpha (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (9)$$

حيث:

(H): هو الإشعاع الشمسي اليومي المقدر، وحدته عادةً تكون (MJ/m²/day).

(H_o): الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي.

(α): هو معامل تجريبي (0.19)

(T_{max}): هي درجة الحرارة العظمى اليومية (°C)

(T_{min}): هي درجة الحرارة الصغرى اليومية (°C)

(T_{avg}): هي متوسط درجة الحرارة اليومية، وتُحسب $\leq (T_{max} + T_{min})/2$.

يُعد هارجريفز وساماني (H-S) وريتشاردسون من أوائل من اقترحوا إمكانية تقدير مؤشر الوضوح بشكل غير مباشر من بيانات $\Delta T = (T_{max} - T_{min})$ ، كما قدّم بريستو وكامبل (B-C) نموذجًا يوميًا لـ GSR، بمصطلح أسي يكون فيه للمتغير ΔT تعريف مختلف، لأنه يجب حساب T_{min} ليوم عام كمتوسط القيم المقاسة في أيام متتالية، في حين يجب تقليله بنسبة 25% للأيام الممطرة.

2. النموذج 2: نموذج بريستو-كامبل (Bristow-Campbell Model):

طور بريستو وكامبل (1984) نموذجًا ببنية مختلفة، يعتمد على علاقة أسية بين مؤشر الصفاء والنطاق الحراري اليومي:

$$H/H_o = a [1 - e^{(-b\Delta T)}] \quad (10)$$

حيث DT هو فرق درجة الحرارة، على الرغم من أن المعاملات a و b و c تجريبية، إلا أن لها دلالة فيزيائية، يمثل المعامل a أقصى إشعاع يمكن توقعه في يوم صافٍ، يتحكم المعاملان b و c في معدل الاقتراب من a مع تزايد فرق درجة الحرارة.

3. النموذج 3: نموذج آلين (Allen Model):

تم تطوير العديد من التعديلات والتحسينات على هذا النموذج الأساسي والنماذج المماثلة الأخرى، فعلى سبيل المثال، اقترح Allen (1997) طرقاً لمعايرة معامل (k) باستخدام بيانات الارتفاع، أو بيانات مناخية إضافية محدودة.

يعتمد هذا النموذج على الفرق بين درجات الحرارة العظمى والصغرى، بالإضافة إلى معامل تصحيح يعتمد على الضغط الجوي (Allen, 1997)، وتستخدم المعادلات الآتية:

$$H/H_o = K_r \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (11)$$

$$H = K_r \times H_o \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (12)$$

حيث إن:

(K_r): معامل تجريبي يعتمد على الضغط الجوي ويساوي (0.20).

بالنسبة إلى معامل K_r التجريبي، اقترح آلين قيمة قدرها 0.17 للمناطق الداخلية، و0.20 للمناطق الساحلية، وأفاد آلين بأن أداء المعادلة ضعيف للمواقع التي يزيد ارتفاعها على 1500 متر (Besharat et al., 2013).

(P_s): معامل الضغط الجوي للموقع، ويساوي:

$$P_s = P_0 * \left(1 - \frac{0.0065 * h}{288.15}\right)^{5.255} \quad (13)$$

حيث إن :-

P_0 الضغط الجوي عند مستوى سطح البحر ويساوي 101.3kPa

h الارتفاع عن سطح البحر (بالمتر)

ولحساب قيمة K_r نستخدم المعادلة التالية:

$$K_r = 0.18 * (P_s / P_0)^{0.5} \quad (14)$$

4. النموذج 4: نموذج أنانديل (Annandale model):

قام (Annandale *et al.*, 2002) بتعديل نموذج Hargreaves and Samani،

بإدخال عامل تصحيح للمعامل a ، لمراعاة تأثيرات انخفاض الارتفاع وسمك الغلاف الجوي على

H كما هو موضح في المعادلة (14):

$$H/H_o = a * (1 + 2.7 \times 10^{-5} * Z * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (15)$$

حيث Z هو الارتفاع فوق مستوى سطح البحر (م)، استخدم بيات وميرلاتفي هذا النموذج مع

معامل $a = 0.15$ ؛ لتقدير الإشعاع الشمسي العالمي اليومي في شيراز، إيران، كما في المعادلة

(16):

$$H/H_o = 0.15 * (1 + 2.7 \times 10^{-5} * Z * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (16)$$

5. النموذج 5: نموذج دوناتيلي وكامبل (Donatelli and Campbell model):

تختلف خوارزمية دوناتيلي وكامبل في بنيتها عن نموذج بريستو وكامبل، باستثناء مراعاة

دالتين تصحيحتين لمتوسط وأدنى درجة حرارة للهواء، يتخذ النموذج الأشكال الآتية:

$$(a) H/H_o = a \left[1 - e^{-bf(T_{avg})\Delta T^2 f(T_{min})} \right] \quad (17)$$

$$T_{avg} = (T_{max} - T_{min})/2$$

$$f(T_{avg}) = 0.017 e^{-0.053T_{avg}}$$

$$f(T_{min}) = e^{T_{min}/c}$$

$$(b) H/H_o = a \left[1 - e^{-b \Delta T^c / \Delta T_m} \right] \quad (18)$$

$$H/H_o = a \left[1 - e^{-bf(T_{avg})\Delta T^c} \right]$$

$$f(T_{avg}) = 0.017 e^{-0.053T_{avg}\Delta T^c} \quad (19)$$

6. النموذج 6: نموذج هانت وآخرين (Hunt *et al.* model):

اقترحوا النموذج التالي، بإضافة معامل آخر (b) إلى نموذج هارجريفز وساماني، كما في المعادلة (19):

$$H = a * (T_{max} - T_{min})^{0.5} * H_o + b \quad (20)$$

7. النموذج 7: نموذج وينسلو (Winslow model): (Besharat et al., 2013)

تم تصنيف الطريقة التي اقترحها وينسلو كنموذج قابل للتطبيق عالمياً، ومعادلة التنبؤ هي:

$$H / H_o = \tau DI \left[1 - a \frac{e_s(T_{min})}{e_s(T_{max})} \right] \quad (21)$$

حيث $e_s(T_{min})$ و $e_s(T_{max})$ هما ضغطا بخار التشبع min و max، على التوالي، يُمثل المتغير t نفاذية الغلاف الجوي، ويُقدر بناءً على خط عرض الموقع وارتفاعه ومتوسط درجة الحرارة السنوية، وتُصحح الدالة DI تأثير اختلافات الموقع في طول اليوم، مما يُسبب تبايناً بين وقت أقصى درجة حرارة (وأدنى رطوبة)، وغروب الشمس. يُقرب تصحيح طول اليوم (DI) بواسطة:

$$DI = \left[1 - H_{day} - \frac{(\pi / 4)^2}{2H_{day}^2} \right] - 1 \quad (22)$$

8. النماذج المتقدمة (الهجينة وتعلم الآلة) - Mention of Advanced Models

:(Hybrid, Machine Learning

إلى جانب النماذج التجريبية التقليدية، تتجه الأبحاث الحديثة بشكل متزايد نحو استخدام تقنيات نمذجة أكثر تقدمًا لتقدير الإشعاع الشمسي، بما في ذلك تلك التي تعتمد على درجة حرارة الهواء كأحد المدخلات، تشمل هذه التقنيات الآتي:

الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks - ANN).

آلات المتجهات الداعمة (Support Vector Machines - SVM).

نماذج الانحدار الهجين (Hybrid Regression Models).

خوارزميات تعلم الآلة الأخرى (Other Machine Learning Algorithms): مثل الأشجار

العشوائية (Random Forests)، أو التعزيز المتدرج (Gradient Boosting).

تتميز هذه النماذج بقدرتها على تعلم الأنماط المعقدة وغير الخطية في البيانات من دون الحاجة إلى افتراض صيغة رياضية محددة مسبقًا، للعلاقة بين المتغيرات المدخلة (مثل T_{max} , T_{min} , H_o) والمتغير المخرج (H). غالبًا ما تُظهر هذه النماذج دقة تقدير أعلى مقارنة بالنماذج التجريبية التقليدية، خاصة إذا توفرت مجموعة بيانات كبيرة ومتنوعة لتدريبها وتقييمها (e.g., Comert *et al.*, 2023; Gevorgian *et al.*, 2023; Boottarat *et al.*, 2024;) (Erten & Aydilek, 2022). ومع ذلك، قد تكون هذه النماذج أكثر تعقيدًا في تطويرها وتفسير نتائجها ("نماذج الصندوق الأسود")، وقد تتطلب قوة حاسوبية أكبر، وخبرة متخصصة في علم البيانات.

على الرغم من التطور في النماذج المتقدمة، تظل النماذج التجريبية المعتمدة على درجة الحرارة، مثل نموذج هارجرافز-ساماني وتعديلاته، أدوات ذات قيمة عملية كبيرة، نظرًا لبساطتها، وسهولة تطبيقها، وقلة متطلباتها من البيانات، مما يجعلها خيارًا جذابًا وفعالًا في العديد من

السيناريوهات، وخصوصًا لتقدير الإشعاع الشمسي في مناطق تفتقر إلى قياسات مباشرة مثل مدينة الزاوية، وهو ما تسعى هذه الدراسة إلى المساهمة فيه.

9.2. الدراسات السابقة (Previous Studies):

لتحديد مدى الحاجة إلى تطوير وتقييم نماذج تقدير الإشعاع الشمسي باستخدام درجة حرارة الهواء في مدينة الزاوية، تم استعراض الأدبيات البحثية ذات الصلة، مع التركيز على الدراسات التي تناولت تطوير وتقييم هذه النماذج عالميًا وإقليميًا، والدراسات المتعلقة بتقدير الإشعاع الشمسي في السياق الليبي.

1.9.2. الدراسات السابقة حول تطوير وتقييم نماذج تقدير الإشعاع الشمسي باستخدام درجة

الحرارة (Previous studies on developing and evaluating temperature-

based solar radiation estimation models):

حظيت العلاقة بين درجة حرارة الهواء والإشعاع الشمسي باهتمام بحثي كبير، مما أدى إلى تطوير وتقييم العديد من النماذج التجريبية، التي تهدف إلى تقدير الإشعاع الشمسي باستخدام بيانات درجة الحرارة المتاحة بسهولة.

التأسيس والتطوير المبكر: يُعدّ العمل الرائد الذي قام به (Hargreaves & Samani (1982,

1985 نقطة انطلاق أساسية، حيث أظهروا بوضوح إمكانية تقدير الإشعاع الشمسي بشكل

معقول، بالاعتماد فقط على بيانات درجات الحرارة العظمى والصغرى، وطوروا نموذجًا بسيطًا

وواسع الانتشار، لا يزال يُستخدم ويُشار إليه حتى اليوم، ثم تبع ذلك جهو (Allen (1997

وآخرون في سياق توحيد طرق حساب التبخر-النتح (مثل مشروع FAO-56)، حيث قدموا

إرشادات مهمة حول كيفية تطبيق ومعايرة نماذج درجة الحرارة، مقترحين قيمًا لمعاملات النموذج بناءً على الظروف المناخية (ساحلية أو قارية)، أو الارتفاع.

تطوير نماذج جديدة ومقارنتها: سعت دراسات أحدث إلى تطوير نماذج جديدة أو تحسين النماذج القائمة، فعلى سبيل المثال في مصر، قام (Hassan et al., 2016) و (Ali et al., 2024) بإجراء تطوير وتقييم شامل لنماذج متعددة تعتمد على درجات الحرارة، ومقارنة أدائها مع النماذج الكلاسيكية، ومع نماذج أخرى تعتمد على مدة سطوع الشمس، غالبًا ما خلصت مثل هذه الدراسات إلى أن النماذج التي يتم تطويرها أو معايرتها محليًا باستخدام بيانات الموقع المحددة، يمكن أن تحقق دقة أفضل من تطبيق النماذج بمعاملاتها الأصلية، وأن دمج متغيرات درجة حرارة إضافية (مثل متوسط درجة الحرارة T_{avg}) قد يؤدي أحيانًا إلى تحسين طفيف في الأداء.

التقييم في مناطق جغرافية وظروف مناخية متنوعة: تم اختبار وتقييم أداء نماذج تقدير الإشعاع الشمسي المعتمدة على درجة الحرارة في العديد من المواقع حول العالم، وظروف مناخية متباينة، فعلى سبيل المثال، قام (Reddy et al. 2018) بتقييمها في الهند، و (Salisu, 2017) في نيجيريا، و (Thallapalli & Prasanna, 2022) أيضًا في سياق هندي، في حين أجرى (El-Metwally, 2005) تقييمًا في مصر، وأكدت هذه الدراسات بشكل عام على أهمية التحقق المحلي والمعايرة (Local Validation and Calibration)، حيث إن العلاقة الدقيقة بين درجة الحرارة والإشعاع يمكن أن تختلف من منطقة إلى أخرى بسبب الاختلافات في خطوط العرض، الارتفاع، القرب من المسطحات المائية، أنماط الغطاء السحابي السائدة، ومستويات تعكر الهواء.

المراجعات الشاملة: قدمت العديد من الدراسات المرجعية نظرة عامة شاملة، ومقارنة نقدية لمختلف فئات نماذج تقدير الإشعاع الشمسي، فعلى سبيل المثال، استعرضت دراسات مثل

(Besharat et al. 2013)، و (Gürel et al. 2020)، و (Meenal et al. 2023)، مجموعة واسعة من النماذج، بما في ذلك تلك المعتمدة على درجة الحرارة، وأبرزت بشكل منهجي مزاياها الرئيسية (مثل بساطة البيانات المطلوبة، وتوفرها على نطاق واسع)، وعيوبها (مثل دقتها التي تكون عادةً أقل مقارنة بالنماذج التي تستخدم بيانات مدة سطوع الشمس، أو بيانات الغطاء السحابي، والحاجة الماسة إلى المعايرة المحلية لتحقيق نتائج موثوقة).

النتائج والمقارنات الرئيسية: يتفق الباحثون بشكل عام على أن نماذج درجة الحرارة يمكن أن توفر تقديرات "معقولة" للإشعاع الشمسي الكلي، خاصة للمتوسطات الشهرية أو الطويلة الأجل، ومع ذلك، فإن دقتها على المقياس اليومي قد تكون محدودة، وتعتمد بشكل كبير على مدى قوة الارتباط المحلي بين النطاق الحراري وصفاء السماء، فغالبًا ما يُظهر نموذج هارجريفز-ساماني (مع معامل معاير محليًا) أداءً جيدًا مقارنة ببساطته، وتتباين نتائج المقارنات بين النماذج المختلفة من دراسة لأخرى، مما يعزز فكرة عدم وجود نموذج واحد "أفضل" عالميًا، وأن الاختيار والتقييم يجب أن يتم بناءً على الظروف المحلية والبيانات المتاحة.

2.9.2. الدراسات السابقة ذات الصلة بالسياق الليبي (Previous studies relevant to the Libyan context):

على الرغم من الإمكانات الشمسية الكبيرة التي تتمتع بها ليبيا، إلا أن الدراسات المنشورة التي تركز بشكل خاص على تقدير الإشعاع الشمسي باستخدام نماذج رياضية، وخاصة تلك المعتمدة على درجة الحرارة، تبدو محدودة نسبيًا. أشارت دراسات مثل دراسة الصواني (2019)، والنعاس (2020)، إلى الإمكانات الواعدة للطاقة الشمسية في ليبيا، وأكدت على أهمية التقييم الدقيق لهذه الموارد؛ لوضع خطط فعالة للاعتماد على الطاقة المتجددة.

أجرى الطباخ (2002) دراسة مبكرة في طرابلس، قارنت فيها بين قيم الإشعاع الشمسي المقاسة وقيم محسوبة باستخدام نماذج (قد لا تكون بالضرورة معتمدة حصرياً على درجة الحرارة)، مما يسلط الضوء على الاهتمام المبكر بمسألة دقة تقديرات الإشعاع في ليبيا.

دراسات أخرى أُشير إليها سابقاً (مثل Maka & Alabid, 2022; NSREEE, 2023; Elmnifi *et al.*, 2024)، ركزت بشكل أكبر على جوانب التنمية المستدامة، أو السياسات، أو الإمكانات العامة للطاقة المتجددة في ليبيا.

تحديد مدى تطبيق نماذج درجة الحرارة في ليبيا/الزاوية: بناءً على مراجعة البيانات المتاحة، لا يبدو أن هناك دراسات منشورة قد قامت بتقييم أو تطبيق أو معايرة نماذج تقدير الإشعاع الشمسي المعتمدة حصرياً على درجة حرارة الهواء بشكل خاص لمدينة الزاوية، أو حتى لمناطق أخرى محددة داخل ليبيا بشكل منهجي ومفصل، وتركز معظم الجهود إما على عرض الإمكانات العامة، أو استخدام بيانات من مصادر عالمية (مثل بيانات الأقمار الصناعية أو إعادة التحليل) من دون تقييم دقة النماذج التجريبية البسيطة المعتمدة على متغيرات مناخية أرضية متوفرة مثل درجة الحرارة.

10.2. خلاصة الإطار النظري وتحديد فجوة البحث (Summary of Theoretical)

:(Framework and Identification of Research Gap)

خلاصة الإطار النظري: استعرض هذا الفصل المفاهيم الأساسية المتعلقة بالطاقة المتجددة، وأهمية الطاقة الشمسية كمورد وفير ونظيف. تم تفصيل طبيعة الشمس كمصدر للطاقة، وخصائص الإشعاع الشمسي، وتفاعلاته المعقدة مع الغلاف الجوي، مما يؤدي إلى وصول مكوناته المختلفة (المباشر، المنتشر، الكلي) إلى سطح الأرض. كما تم استعراض طرق وأجهزة

قياس هذه المكونات والتحديات المرتبطة بها. ونظرًا لصعوبة وتكلفة القياس المباشر في كل مكان، تم التركيز على طرق تقدير الإشعاع الشمسي، وخاصة النماذج التجريبية التي تعتمد على بيانات درجة حرارة الهواء (T_{max} , T_{min})، مبررين ذلك بالعلاقة الفيزيائية بين درجة الحرارة والإشعاع، وتوفر بيانات درجة الحرارة. تم استعراض أهم هذه النماذج (مثل هارجريفز-ساماني، بريستو-كامبل، آلين) ومبادئها الأساسية، مع الإشارة إلى النماذج الأكثر تقدمًا. وأخيرًا، تم تلخيص نتائج الدراسات السابقة التي قيمت أداء هذه النماذج عالميًا وإقليميًا، مع التأكيد على فائدتها العملية، وحاجتها إلى المعايرة والتحقق المحلي.

تحديد فجوة البحث: على الرغم من الاعتراف العالمي بالإمكانيات الشمسية الهائلة لليبيا، والحاجة الماسة إلى بيانات إشعاع شمسي موثوقة؛ لدعم تطوير مشاريع الطاقة المتجددة، وتحقيق أهداف التنمية المستدامة، تظهر مراجعة الأدبيات فجوة معرفية واضحة، تتمثل في النقص الملحوظ في الدراسات التي تُقيّم وتُطبّق بشكل خاص، نماذج تقدير الإشعاع الشمسي الكلي باستخدام بيانات درجة حرارة الهواء المتوفرة لمدينة الزاوية بليبيا. فبينما توجد نماذج تجريبية بسيطة ومثبتة الفائدة عالميًا لهذا الغرض، لم يتم التحقق من مدى دقتها وملاءمتها للظروف المناخية المحلية في الزاوية، ولم يتم معايرة معاملاتها لتعكس هذه الظروف بشكل أفضل. إن ندرة محطات القياس المباشر للإشعاع الشمسي في المنطقة، تجعل من الضروري سد هذه الفجوة، من خلال تقييم أداء هذه النماذج العملية، باستخدام بيانات درجة الحرارة المتاحة. ومن ثم تهدف هذه الدراسة إلى معالجة هذه الفجوة، من خلال تقييم وتطبيق نماذج مختارة لتقدير الإشعاع الشمسي الكلي في مدينة الزاوية، بالاعتماد على بيانات درجات الحرارة العظمى والصغرى، بهدف توفير تقديرات موثوقة للإشعاع الشمسي، يمكن استخدامها في التطبيقات المختلفة للطاقة الشمسية في المنطقة.

الفصل الثالث: المواد وطرق الدراسة والمنهجية

- البيانات المستخدمة
- موقع الدراسة وبيانات المجال
- المنهجية المتبعة
- حساب الإشعاعي الشمسي
- تحليل التباين السنوي
- تحليل الانحدار الخطي والمتعدد
- تقييم أداء النماذج (المؤشرات الإحصائية المستخدمة)
- المقارنة بين تقديرات النماذج الأصلية والمعدلة والبيانات الفعلية للإشعاع الشمسي

الفصل الثالث: المواد وطرق الدراسة والمنهجية (Chapter 3: Materials, Study)

(Methods and Methodology)

يهدف هذا الفصل إلى توضيح المواد والمنهجية التي استخدمت في هذه الدراسة لتقدير الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية بليبيا، وتقييم أداء النماذج المختلفة المستخدمة. ويشمل هذا الفصل وصفاً للبيانات المستخدمة، وموقع الدراسة، والمنهجية المتبعة في تحليل البيانات، بالإضافة إلى المؤشرات الإحصائية المستخدمة لتقييم أداء النماذج.

1.3. البيانات المستخدمة:

تم الحصول على البيانات المستخدمة في هذه الدراسة من مجموعة بيانات TerraClimate، المتوفرة عبر موقع مختبر علم المناخ (Climatology Lab) على الرابط (<https://climatetoolbox.org/tool/data-download>)، وهي عبارة عن مصدر بيانات عالمي شبكي عالي الدقة، يقدم معلومات عن المناخ التاريخي، ومتغيرات التوازن المائي (مثل درجات الحرارة، هطول الأمطار، التبخر النتحي، وغيرها)، على أساس شهري للفترة من 1958م، حتى الوقت الحاضر، مما يجعلها مورداً قيماً لتحليل الاتجاهات المناخية والمدخلات للعديد من النماذج البيئية والزراعية.

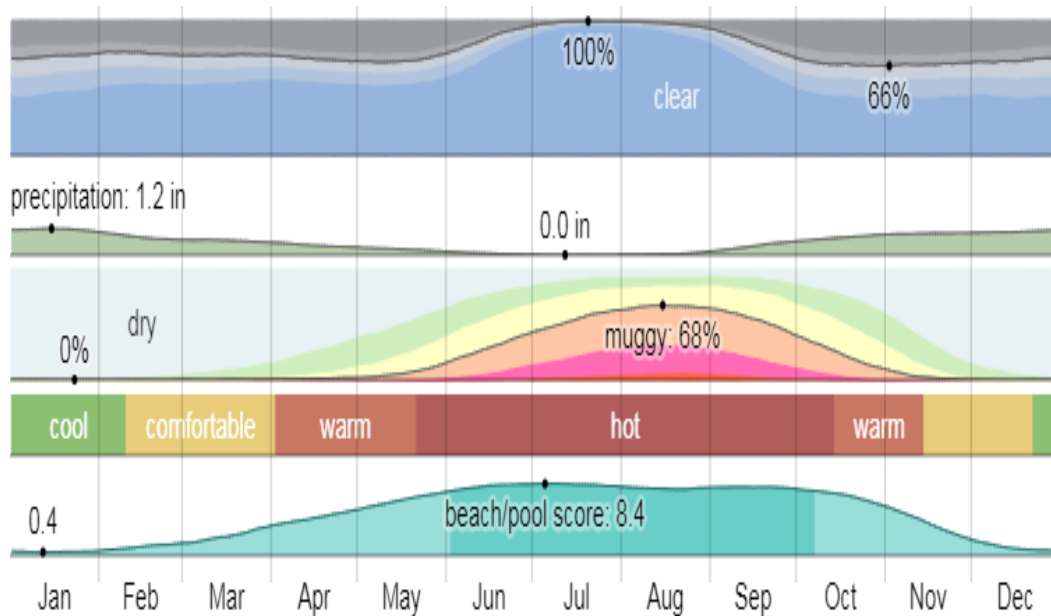
الشكل (10): يبين الموقع (<https://climatetoolbox.org/tool/data-download>) الخاص بتجميع البيانات الشهرية للمناخ.

تم جمع بيانات مناخية طويلة الأجل لمدة 23 عامًا (2000–2023) لمدينة الزاوية في ليبيا، وقد شملت هذه البيانات درجات الحرارة القصوى والدنيا للهواء المحيط، الملحق (1). وقد تم استخدام هذه البيانات لحساب المتوسطات الشهرية للإشعاع الشمسي ودرجات الحرارة، والتي تم استخدامها لتقييم النماذج المستخدمة في الدراسة. بالإضافة إلى ذلك، تم تجميع بيانات متوسط قيم الإشعاع الشمسي الفعلية لمدينة الزاوية، الملحق (2)، وذلك لإتمام عملية مقارنة النتائج الفعلية بالنتائج المحسوبة بواسطة النماذج المستخدمة في الدراسة.

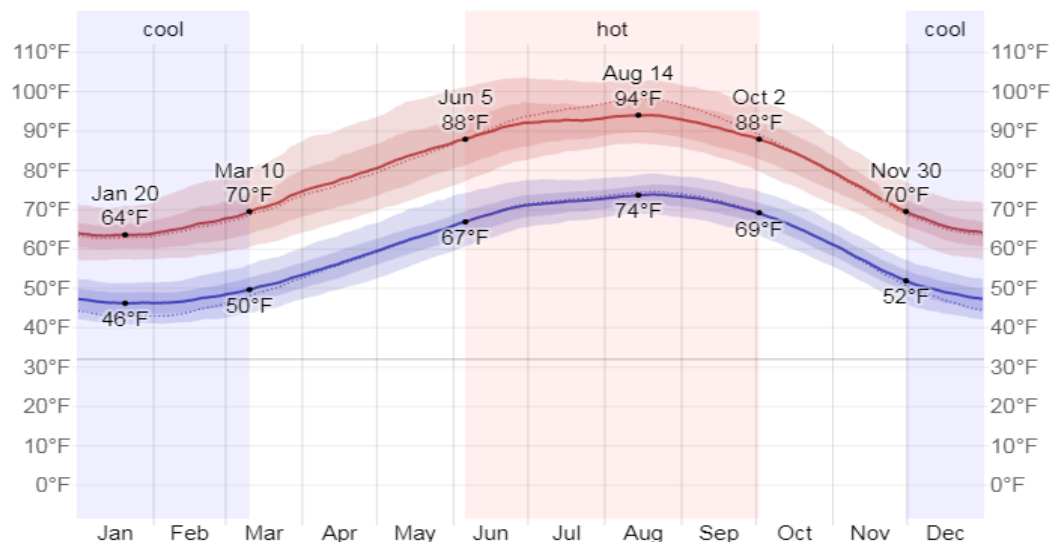
2.3. موقع الدراسة وبيانات المجال:

تقع مدينة الزاوية على الساحل الغربي لليبيا، غرب العاصمة طرابلس بحوالي 48 كم، على خط طول 12.72 شرقاً، وعلى خط عرض 32.75 شمالاً، تطل على البحر المتوسط، وتحدها غرباً مدينة صرمان، وشرقاً قرية صياد، ومن الجنوب سلسلة جبال نفوسة. وهي تقع ضمن مناخ إقليم البحر الأبيض المتوسط، ويتميز هذا المناخ بصيف حار، ورطب، وجاف، وصافٍ، وشتاء بارد، وعاصف، وصافٍ في الغالب، تظهر بيانات درجات الحرارة العظمى

والصغرى أن درجات الحرارة تتراوح عادةً بين 46 و94 درجة فهرنهايت على مدار العام، ونادرًا ما تقل عن 41 درجة فهرنهايت، أو تزيد على 104 درجة فهرنهايت، الشكل (11، 12). هذه الخصائص المناخية تجعل مدينة الزاوية موقعًا مناسبًا لتقييم أداء نماذج تقدير الإشعاع الشمسي.



الشكل (11): المناخ في مدينة الزاوية (المصدر: <https://weatherspark.com/y 2024>).



الشكل (12): متوسط درجات الحرارة العظمى والصغرى في الزاوية (المصدر:

<https://weatherspark.com/y 2024>).

3.3. المنهجية المتبعة:

لتحقيق أهداف الدراسة، تم اتباع المنهجية الآتية:

تم دراسة ثلاثة نماذج تجريبية لتقدير الإشعاع الشمسي اليومي، وهي: نموذج "هارجريفز" (Hargreaves, 1982)، الذي يعتمد على بيانات درجة الحرارة فقط؛ ونموذج "أنانديل" (Annandale et al., 2002)، الذي يعتمد على الارتفاع عن سطح البحر بالإضافة إلى درجة الحرارة، وأخيرًا، نموذج "آلين" (Allen, 1997)، الذي تم فيه تعديل قيمة المعامل التجريبي 'Kr' لتكون ثابتة تساوي 0.2216، وذلك بعد أن كانت تعتمد في الأصل على الضغط الجوي، مع الإبقاء على اعتماده على بيانات درجة الحرارة، وقد تم اختيار هذه النماذج نظرًا لشيوع استخدامها في الدراسات السابقة، وسهولة التعامل مع مدخلاتها، ثم بعد ذلك تطبيق هذه النماذج لتقدير الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية.

1.3.3. نموذج هارجريفز (Hargreaves model):

يعتمد هذا النموذج على الفرق بين درجات الحرارة العظمى والصغرى لتقدير الإشعاع الشمسي (Hargreaves, 1982):

$$H/H_o = \alpha(T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (23)$$

(H): هو الإشعاع الشمسي اليومي المقدر، وحدته عادةً تكون (MJ/m²/day).

(H_o): الإشعاع الشمسي خارج الغلاف الجوي.

(α): هو معامل تجريبي (0.19).

(T_{max}): هي درجة الحرارة العظمى اليومية (°C).

(T_{min}): هي درجة الحرارة الصغرى اليومية (°C).

(T_{avg}): هي متوسط درجة الحرارة اليومية، وتُحسب كـ $(T_{max} + T_{min}) / 2$.

2.3.3. نموذج آلين (Allen model):

يعتمد هذا النموذج على الفرق بين درجات الحرارة العظمى والصغرى، بالإضافة إلى

معامل تصحيح يعتمد على الضغط الجوي وبالتالي يعتمد على الارتفاع (Allen, 1997) .

$$H/H_o = K_r * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (24)$$

$$H = K_r * H_o * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (25)$$

حيث إن:

(Kr): معامل تجريبي يعتمد على الضغط الجوي ويساوي (0.20) .

3.3.3. نموذج أنانديل (Annandale model):

يُعدّ هذا النموذج تعديلاً لنموذج هارجريفز، حيث يتم إدخال معامل تصحيح (a) الذي

يعتمد على الارتفاع عن سطح البحر. (Annandale et al., 2002) .

$$H/H_o = a * (1 + 2.7 \times 10^{-5} * Z) * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (26)$$

حيث إن:

(a): معامل تجريبي يعتمد على الارتفاع ويساوي (0.15)

(Z): هو الارتفاع عن سطح البحر ويساوي (28م).

4.3.3. تعديل وتطوير معادلة نموذج آلين لتحديد قيمة معامل تجريبي (Kr) جديدة:

تم في هذا الجزء من الدراسة الحالية تعديل معادلة نموذج آلين لتحديد قيمة معامل

تجريبي (Kr) جديدة، بحيث تعطي بيانات تقديرية للإشعاع الشمسي أقرب للبيانات الفعلية في

مدينة الزاوية، سنوضح التعديل في المعادلة، والعمليات الحسابية التي قام بها الباحث للوصول

إلى هذه القيمة.

التعديل المقترح:

من الناحية العلمية لا يعد معامل إلين k_r ثابتاً عالمياً ، بل هو معامل تجريبي في الاصل بقيمة تقريبية وهي 0.20 ، بناءً على ظروف مناخية محددة، وقد بينت العديد من الدراسات السابقة في مناطق مختلفة أن القيمة تتراوح غالباً بين (0.16-0.25) تبعاً للظروف المحلية. سنقوم بإيجاد قيمة جديدة لـ K_r ، تعتمد على بيانات الإشعاع الشمسي الفعلية المتحصل عليها من الموقع (TerraClimate)، للفترة الزمنية (2000-2015) كعملية معايرة، وذلك من خلال المعادلة التالية (27):

$$K_{r-modified} = (1/n) * \sum (H_{actual} / [H_o * (T_{max} - T_{min})^{0.5}]) \quad (27)$$

حيث:

• H_{actual} : هو متوسط الإشعاع الشمسي الفعلي السنوي من بيانات TerraClimate

• n : عدد السنوات المدروسة (15)

سيتم حساب متوسط قيم H_o و $T_{max} - T_{min}$ السنوية؛ ليكون المتوسط هو نفس متوسط الإشعاع الشمسي الفعلي لسنوات الدراسة.

الخطوات الحسابية لتطوير المعادلة:

1. حساب H_o و $(T_{max} - T_{min})$ السنوي:

أولاً: حساب الإشعاع الشمسي الخارجي اليومي (H_o):

قبل أن نبدأ في إدخال البيانات للنماذج المدروسة، يجب علينا إيجاد قيم الإشعاع الشمسي الخارجي (H_o). حيث تمثل هذه القيم مقدار الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض خارج الغلاف الجوي، ولحساب هذه القيمة، يمكن استخدام معادلة "بيكمان ودفي" (Beckman and Duffie & Beckman, 2013) (Duffie)، والتي تعتمد على الخطوات الآتية:

1. حساب زاوية الميل الشمسي (δ): تحدد زاوية الميل الشمسي موقع الشمس في السماء، ويمكن حسابها باستخدام المعادلة الآتية:

$$\delta = 23.45 * \sin(360 * [284 + n]/365) \quad (28)$$

حيث n هو رقم اليوم في السنة (1-365).

2. حساب زاوية الغروب (ω_s): تحدد زاوية الغروب طول النهار في موقع معين، ويمكن حسابها باستخدام المعادلة الآتية:

$$\omega_s = \arccos [-\tan(\varphi) * \tan(\delta)] \quad (29)$$

حيث φ هو خط العرض للموقع.

3. حساب H_o باستخدام المعادلة الرئيسية: بعد حساب زاوية الميل الشمسي وزاوية الغروب، يمكن حساب الإشعاع الشمسي الخارجي اليومي (H_o) باستخدام المعادلة الآتية:

$$H_o = (24 * 3600 * G_{sc}/\pi) * \left(1 + 0.033 * \cos\left(\frac{360n}{365}\right)\right) * (\cos(\varphi) * \cos(\delta) * \sin(\omega_s) + \left(\pi * \frac{\omega_s}{180}\right) \sin(\varphi) * \sin(\delta)) \quad (30)$$

حيث:

* G_{sc} هو ثابت الإشعاع الشمسي (1367 W/m^2).

* π هو 3.14159.

* زوايا φ ، δ ، ω_s تكون بالراديان.

تعطي هذه المعادلة قيمة H_o بوحدة ($\text{J/m}^2/\text{day}$)، وللتحويل إلى وحدة ($\text{kWh/m}^2/\text{day}$)، يتم قسمة النتيجة على 3,600,000.

وبالتعويض في المعادلة رقم (27) عن جميع القيم ومعايرة النموذج عن طريق البيانات الفعلية

من Terraclimate أعطت النتائج قيمة محلية محسنة للثابت k_r حيث وجد أن

$K_r=0.2216$ وهذه القيمة تقع ضمن النطاق المذكور في الدراسات السابقة، مما يؤكد سلامة

المنهجية المتبعة علمياً، ويعكس ملائمة هذا التعديل للظروف المناخية في مدينة الزاوية، كما ساهم في تحسين أداء النموذج وتقليل الانحراف بين القيم المحسوبة والمرصودة.

وبالتعويض عن قيمة k_r في المعادلة (31)

$$H = K_{r-modified} * H_o * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (31)$$

نتحصل على المعادلة المعدلة التالية:

$$H = 0.2216 H_o * (T_{max} - T_{min})^{0.5} \quad (32)$$

والتي ستكون معادلة التحقق بعد حساب قيم الإشعاع الشمسي المتحصل عليها ومقارنتها

بالقيم الفعلية للفترة الزمنية (2000-2023)

4.3. حساب الإشعاع الشمسي:

تم حساب الإشعاع الشمسي اليومي باستخدام كل نموذج من النماذج الثلاثة، والنموذج المعدل، ثم تم حساب المتوسطات الشهرية للإشعاع الشمسي لكل نموذج، للفترة الزمنية (2000-2023) وقد تم تطبيق المعادلات الرياضية المستخدمة في كل نموذج .

5.3. تحليل التباين السنوي:

تم إجراء تحليل للتباين السنوي لتقييم استقرار تقديرات النماذج على مدى السنوات المدروسة (2000-2023)، وقد تم حساب المتوسط السنوي للإشعاع الشمسي لكل نموذج، ثم تم حساب التباين السنوي، والانحراف المعياري للتباين السنوي، ثم تم استخدام هذه المؤشرات لتقييم مدى تشتت القيم السنوية للإشعاع الشمسي المقدر حول المتوسط العام لكل نموذج.

حساب المتوسط السنوي (Annual Mean):

لكل سنة (i) ولكل نموذج، يتم حساب المتوسط السنوي للإشعاع الشمسي المقدر

باستخدام المعادلة الآتية:

$$H_i = (\sum H_{ij})/12 \quad (33)$$

حيث:

(H_i) : هو المتوسط السنوي للإشعاع الشمسي المقدر في السنة (i).

(H_{ij}) : هي قيمة الإشعاع الشمسي المقدرة في الشهر j من السنة (i).

$(\sum)$: تشير إلى جمع قيم H_{ij} على مدى الأشهر الـ 12 في السنة.

6.3. تحليل الانحدار الخطي والمتعدد:

تم إجراء تحليل انحدار خطي بسيط لتقييم العلاقة بين تقديرات النماذج المختلفة، وتحليل انحدار متعدد لتقييم تأثير نموذجي "هار جريفز" و"آلين" على تقديرات نموذج "أناندل". ثم تم استخدام معاملات الانحدار، ومؤشر معامل التحديد (R-squared) لتقييم قوة العلاقة بين النماذج. ولكل النماذج سيتم حساب معادلة الانحدار الخطي على الصورة الآتية :

$$Y = b x + a \quad (34)$$

حيث إن:

- 'Y' هو قيمة الإشعاع الشمسي المقدرة من النموذج التابع.
- 'X' هو قيمة الإشعاع الشمسي المقدرة من النموذج المستقل.
- 'b' هو ميل الخط (معامل الانحدار).
- 'a' هو الجزء المقطوع من محور الصادات (الحد الثابت).

7.3. تقييم أداء النماذج (المؤشرات الإحصائية المستخدمة):

تم تقييم أداء النماذج باستخدام مجموعة من المؤشرات الإحصائية، التي شملت: جذر متوسط مربع الخطأ (RMSE)، ومتوسط الخطأ (MBE)، ومتوسط الخطأ المطلق (MABE)، ومتوسط الخطأ النسبي (MPE)، ومعامل الارتباط (R) ومعامل التحديد (R^2).

وقد تم حساب هذه المؤشرات لكل نموذج ولكل سنة، ثم تم حساب المتوسطات العامة لهذه المؤشرات لتقييم أداء النماذج بشكل شامل، ثم استخدمت مجموعة من المؤشرات الإحصائية لتقييم أداء النماذج، وهي:

(RMSE): جذر متوسط مربع الخطأ، ويعكس متوسط حجم الخطأ في التنبؤات.

(MBE): متوسط الخطأ، ويعكس اتجاه الخطأ في التنبؤات (تقدير زائد أو ناقص).

(MAE): متوسط الخطأ المطلق، يعكس متوسط حجم الخطأ بغض النظر عن الاتجاه.

(MPE): متوسط الخطأ النسبي، ويعكس النسبة المئوية للخطأ في التنبؤات.

(R): معامل الارتباط، ويعكس قوة العلاقة الخطية بين القيم المقدرة والقيم الفعلية.

(Despotovic *et al.*, 2016; Wong & Chow, 2001)

ويتم تعريف مؤشرات الخطأ هذه على النحو الآتي، :

$$MBE = 1/n \sum_{i=1}^n (H_{sim} - H_{obs}) \quad (35)$$

$$MPE = 1/n \sum_{i=1}^n [(H_{sim} - H_{obs})/H_{obs}] \times 100 \quad (36)$$

$$MAE = 1/n \sum_{i=1}^n |H_{sim} - H_{obs}| \quad (37)$$

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (H_{sim} - H_{obs})^2} \quad (38)$$

8.3. المقارنة بين تقديرات النماذج الأصلية والمعدلة والبيانات الفعلية للإشعاع الشمسي:

لإجراء مقارنة شاملة، سيتم تحليل تقديرات الإشعاع الشمسي الناتجة عن النماذج الثلاثة الأصلية، ومقارنتها ببيانات الإشعاع الشمسي الفعلية المتاحة من TerraClimate، بالإضافة إلى مقارنة التقديرات الناتجة عن النموذج المعدل (آلين) مع البيانات الفعلية نفسها. وتم تحليل النتائج كمياً وإحصائياً باستخدام مجموعة من مؤشرات الخطأ (RMSE, MBE, MAE, MPE) لتقييم دقة كل نموذج، وذلك لتحديد أي النماذج يقدم تقديرات أقرب للواقع.

المراجع الداعمة للدراسة العملية:

(Khali, 2022), (Reddy *et al.*, 2018), (Despotovic *et al.*, 2016), (El-Sebaili *et al.*, 2010), (Annandale *et al.*, 2002), (Wong & Chow, 2001), (Allen, 1997), & (Hargreaves, 1982).

الفصل الرابع: النتائج والمناقشة

- تقدير الإشعاع الشمسي اليومي الشهرية لمدينة الزاوية باستخدام نموذج هارجريفز
- تقدير الإشعاع الشمسي باستخدام نموذج آلين
- تقدير الإشعاع الشمسي باستخدام نموذج آنانديل
- تقدير الإشعاع الشمسي اليومي لمدينة الزاوية باستخدام المعادلة المعدلة لنموذج آلين
- تحليل التباين السنوي للإشعاع الشمسي المقدر
- نتائج تحليل الانحدار لتقييم العلاقات بين النماذج
- نتائج تحليل ومقارنة مؤشرات الخطأ ومؤشر الارتباط لنماذج الدراسة
- تطوير وتقييم معادلة آلين المعدلة وأثرها على نتائج التقدير
- مقارنة الإشعاع الشمسي المقدر بالنماذج مع بيانات TerraClimate
- مقارنة النمط الموسمي للإشعاع الشمسي المقدر والفعلي
- دقة النماذج في تقدير الإشعاع الشمسي (مقارنة بـ TerraClimate)
- مناقشة النتائج

تكتسب البيانات الموثوقة للإشعاع الشمسي أهمية بالغة في دعم التنمية المستدامة، إلا أن محدودية محطات الأرصاد الجوية التي تقيس الإشعاع الشمسي بشكل مباشر، دفعت إلى الاعتماد على النماذج لتقدير الإشعاع الشمسي العالمي بالاستعانة بمتغيرات مناخية أخرى. وقد شهدت السنوات الأخيرة تطوراً ملحوظاً في النماذج التجريبية التي تحسب الإشعاع الشمسي العالمي باستخدام معلمات مناخية متنوعة، تشمل: الإشعاع خارج الغلاف الجوي، وساعات سطوع الشمس، ومتوسط درجة الحرارة، ودرجات الحرارة القصوى، ودرجة حرارة التربة، والرطوبة النسبية، وعدد الأيام الممطرة، والارتفاع، وخط العرض، وإجمالي هطول الأمطار، والغطاء السحابي، ومعدلات التبخر.

تهدف هذه الدراسة إلى تطوير وتقييم نماذج رياضية لتقدير الإشعاع الشمسي العالمي في منطقة الزاوية بليبيا، وهي منطقة تفتقر إلى البيانات المباشرة للإشعاع الشمسي، وتعتمد الدراسة على استخدام بيانات مناخية متاحة، مثل درجة حرارة الهواء، ومن ثم تقييم أداء هذه النماذج من خلال مقارنة تقديراتها مع البيانات المقاسة للإشعاع الشمسي في منطقة الزاوية، وذلك لتحديد أي النماذج يقدم تقديرات أكثر دقة وموثوقية؛ لأن الهدف النهائي هو تحديد نموذج أو مجموعة نماذج يمكن استخدامها لتقدير الإشعاع الشمسي في المنطقة بشكل موثوق، مما يساهم في تطبيقات الطاقة المتجددة والتخطيط المستدام.

لذا سنعرض نتائج تقدير الإشعاع الشمسي لمدينة الزاوية باستخدام نماذج مختلفة، وذلك من خلال جداول تفصيلية تلخص قيم الإشعاع المقدرة لكل شهر وسنة، ستوفر هذه الجداول نظرة شاملة عن التغيرات الزمنية للإشعاع الشمسي، مما يسمح لنا بتحليل أنماطه الموسمية والسنية. بالإضافة إلى ذلك، سنقوم بمناقشة هذه النتائج، وتفسيرها في ضوء الخصائص المناخية

للمنطقة، وكفاءة النماذج المستخدمة، مع التركيز على أبرز الاتجاهات والفروقات بين قيم الإشعاع المقدر"، وقد نتج عن تطبيق هذه النماذج الآتي:

1.4. تقديرات الإشعاع الشمسي اليومي الشهرية لمدينة الزاوية باستخدام نموذج هارجريفز (Hargreaves model) وبيانات درجات الحرارة الصغرى والعظمى:

في هذه الدراسة قامت الباحثة بتقدير الإشعاع الشمسي اليومي لمدينة الزاوية باستخدام نموذج هارجريفز، الذي يعتمد على بيانات درجات الحرارة الصغرى والعظمى، ثم تم إجراء هذه الحسابات باستخدام لغة البرمجة والبرامج الإحصائية (لغة الإكسل وبرنامج SPSS الإحصائي لتحليل البيانات)، مع اتباع الخطوات المنهجية الموصوفة في فصل المواد، وطرق الدراسة والمنهجية، ثم بعد ذلك، تم حساب المتوسطات الشهرية للإشعاع الشمسي اليومي المقدر للحصول على بيانات شهرية.

الجدول (3): يوضح قيم الإشعاع الشمسي الشهري (بوحدة ميغا جول لكل متر مربع في اليوم، MJ/m²/day) في مدينة الزاوية خلال الفترة من 2000 إلى 2023، وذلك بناءً على تقديرات نموذج هارجريفز.

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	9.92	12.06	15.41	19.64	24.51	27.48	26.97	27.45	26.06	21.09	15.69	11.27
2001	9.23	11.14	15.02	19.44	24.98	26.86	27.71	27.25	25.15	19.5	15.11	10.36
2002	12.42	12.23	17.62	17.13	25.04	22.58	24.91	25.55	25.88	20.97	15.9	10.87
2003	10.69	13.23	17.07	18.16	25.83	24.46	26.9	25.59	23.76	19.6	14.76	10.34
2004	10.79	11.09	12.7	17.5	21.81	24.31	28.16	28.78	25.85	20.51	15.33	10.94
2005	11.48	14.47	15.56	19.3	21.44	22.32	25.52	25.57	22.63	21.33	15.11	9.82
2006	10.08	11.96	17.2	17.55	21.75	24.93	28.3	25.47	24.56	18.82	14.59	10.36
2007	11.2	11.91	15.18	19.67	24.08	24.86	28.59	27.14	24.62	19.65	15.36	10.95
2008	11.76	13.29	15.36	19.71	24.21	28.11	27.16	27.35	24.17	17.69	14.04	10.38
2009	10.89	11.91	15.13	19.16	24.89	26.55	26.43	27.32	24.65	20.34	14.95	10.41
2010	10.97	11.89	15.71	18.65	22.31	26.49	27.98	28.6	24.13	19.62	15.16	11.17
2011	13.36	15.78	16.52	18.15	22.96	23.67	25.73	25.87	22.8	19.04	14.73	11.8
2012	12.13	12.69	14.26	16.16	22	25.49	25.76	25.87	23.01	18.53	15.88	10.86
2013	9.6	10.04	14.87	19.97	23.4	25.32	28.53	27.53	24.5	18.37	14.92	10.77
2014	11.37	12.08	17.55	18.78	22.57	22.51	24.83	27.72	26.32	20.97	15.32	10.65
2015	11.8	13.95	15.2	16.24	22.25	26.65	29.01	27.99	26.11	20.51	14.88	9.55
2016	10.76	11.7	14.55	19.49	24.18	24.57	26.18	29.37	25.04	19.92	14.53	10.15

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2017	12.07	14.31	15.61	20.29	22.9	25.89	26.1	26.77	25.39	21.09	15.98	10.97
2018	12.29	14.22	16.88	18.36	23.64	25.91	26.68	26.89	22.88	19.04	14.08	10.38
2019	11.62	11.27	16.36	17.79	21.95	26.7	27.14	26.98	23.79	19.01	14.92	10.55
2020	11.33	11.54	14.33	17.46	20.96	21.89	27.47	27.4	24.54	20.77	14.84	10.86
2021	11.49	13.79	16.77	20.32	24.68	25.39	26	28.04	26.28	20.71	15.37	10.43
2022	13.57	13.84	17.16	17.1	25.59	26.61	29.91	29.18	27.56	21.48	15.34	10.97
2023	11.64	12.36	15.97	17.13	22.24	27.58	28.88	28.77	24.41	20.23	15.92	12.16

1.1.4. النمط الموسمي للإشعاع الشمسي (نموذج هار جريفز):

تُظهر نتائج التحليل في (الجدول 3 والشكل 13)، أن الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية يتبع نمطاً موسميًا واضحًا وقويًا، فتتصاعد قيم الإشعاع الشمسي بشكل ملحوظ خلال أشهر الصيف، وخاصةً في يونيو ويوليو، حيث تتراوح المتوسطات الشهرية بين 22.58 و 29.91 ميغا جول، لكل متر مربع في اليوم ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$). وقد سجلت أعلى قيمة للإشعاع الشمسي في يوليو 2022 بمتوسط $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ 29.91، وفي المقابل، تشهد الأشهر الشتوية وتحديدًا ديسمبر ويناير، انخفاضًا ملحوظًا في قيم الإشعاع، حيث تتراوح المتوسطات الشهرية بين 9.55 و $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ 13.57، مع تسجيل أدنى متوسط في ديسمبر 2015 بقيمة 9.55 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ ، ويُعزى هذا التباين الموسمي بشكل رئيسي إلى زاوية ميل الشمس وتغيرها على مدار العام، حيث تكون الأشعة الشمسية أكثر عمودية على سطح الأرض خلال الصيف، مما يزيد من كمية الطاقة الشمسية الواصلة. بالإضافة إلى هذا النمط الموسمي الواضح، تظهر بعض التباينات الطفيفة بين السنوات المختلفة في قيم الإشعاع الشمسي، فمثلاً تتراوح قيم الإشعاع في شهر يوليو بين $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ 24.91 عام 2002، و $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ 29.91 عام 2022، ويرجع ذلك إلى اختلاف الظروف الجوية المحلية، والتغيرات في درجات الحرارة اليومية من إلى آخر، وذلك بسبب اعتماد نموذج Hargreaves بشكل كبير على درجات الحرارة. ومن

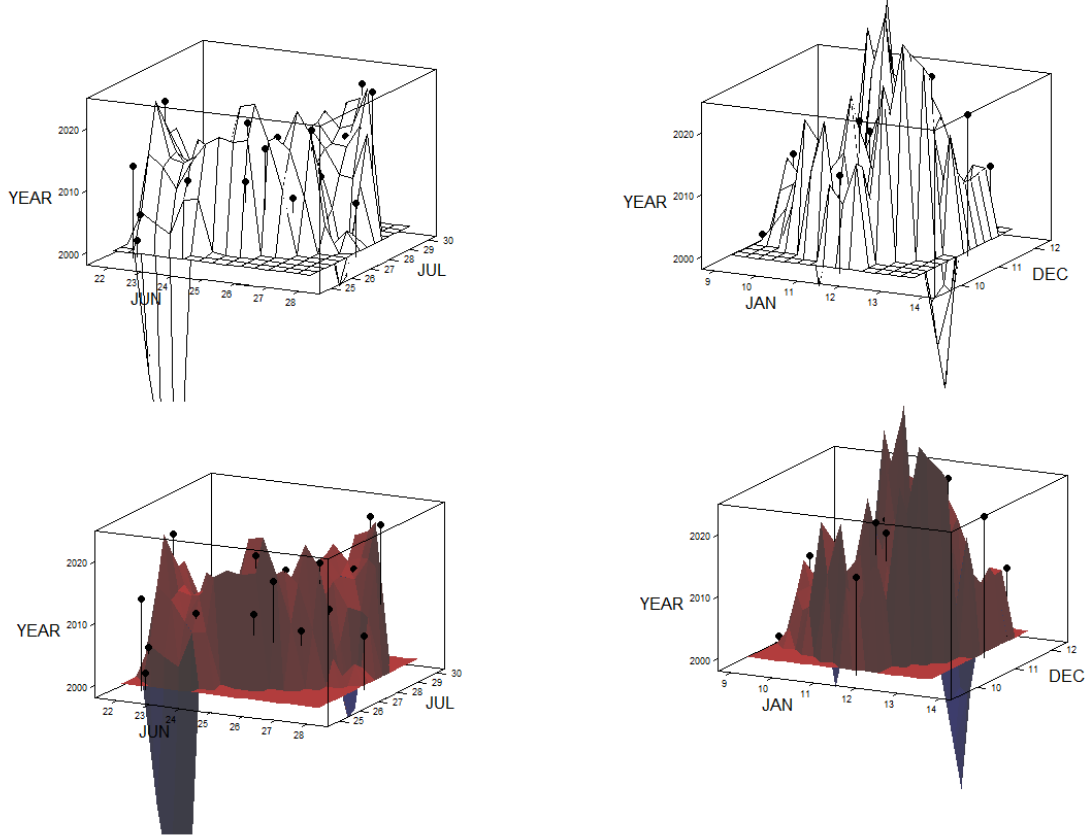
أمثلة ذلك، فقد سجلت متوسطات شهرية للإشعاع الشمسي في شهر يوليو 26.68 MJ/m²/day عام 2018، و27.14 MJ/m²/day عام 2019، من جهة أخرى، تزداد قيم الإشعاع الشمسي تدريجياً خلال فصل الربيع (مارس، وأبريل، ومايو) حيث تتراوح المتوسطات الشهرية بين 12.70 و25.83 MJ/m²/day، في حين تتخفض تدريجياً خلال الخريف (سبتمبر، وأكتوبر، ونوفمبر)، حيث تتراوح المتوسطات الشهرية بين 14.04 و27.56 MJ/m²/day. وتعكس هذه التغيرات اختلاف زاوية ميل الشمس وطول النهار خلال الفصول المختلفة، ومن أمثلة ذلك، فقد سجل متوسط الإشعاع الشمسي 15.97 MJ/m²/day في شهر مارس من عام 2023، وارتفع إلى 17.13 MJ/m²/day في شهر أبريل، ليصل إلى ذروته قبل الصيف بمتوسط 22.24 MJ/m²/day في مايو.



الشكل (13): يبين النمط الموسمي للإشعاع الشمسي المقدر (بحسب نموذج هارجريفز) للسنوات (2000، 2010، 2015، 2023 كمثال).

بمقارنة الأشهر المختلفة (الشكل 14)، يتضح أن يوليو هو الشهر الذي يسجل أعلى قيم الإشعاع الشمسي في معظم السنوات، حيث تصل القيم إلى أكثر من 29 MJ/m²/day في

بعض السنوات. في حين يُعد ديسمبر ويناير هما الأقل في قيم الإشعاع الشمسي، حيث تنخفض القيم إلى أقل من 10 MJ/m²/day في بعض السنوات. فمثلا في عام 2005 في شهر يناير، كان المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي 11.48 MJ/m²/day في حين في شهر يوليو من نفس العام كان 25.52 MJ/m²/day.



الشكل (14): يبين مقارنة للإشعاع الشمسي المقدّر (بحسب نموذج هارجريفز) بين شهري (يونيو ويوليو) وشهري (يناير وديسمبر) للسنوات (2000-2023).

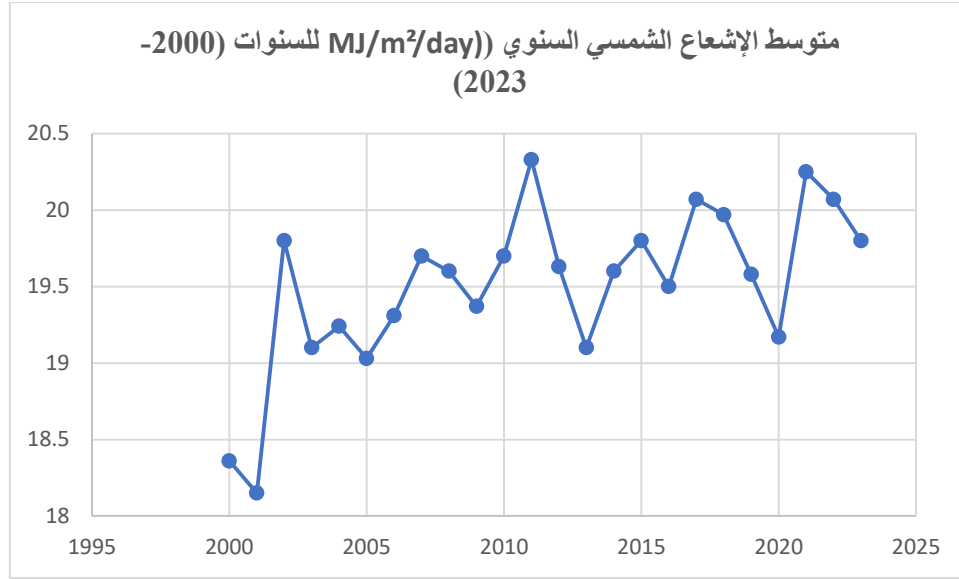
2.1.4. متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية (نموذج هارجريفز):

يُظهر تحليل نتائج نموذج هارجريفز (الجدول 4 والشكل 15) أن متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية يتراوح بين 18.15 و 20.33 ميغا جول لكل متر مربع في اليوم (MJ/m²/day)، خلال الفترة الممتدة من عام 2000م إلى 2023م، ويمكن ملاحظة هذا التذبذب السنوي من خلال الجدول الذي يلخص المتوسطات السنوية المقدرة للإشعاع الشمسي

باستخدام نموذج هارجريفز. ففي عام 2000م، كان المتوسط السنوي $18.36 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، وانخفض قليلاً في عام 2001م ليصبح $18.15 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، ثم ارتفع تدريجياً ليبلغ $20.33 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ في عام 2011م، وشهدت السنوات اللاحقة تذبذباً طفيفاً، حيث وصل المتوسط السنوي إلى $20.07 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ في عامي 2017 و2022م، ثم استقر عند 19.8 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ في عام 2023. ويؤكد الشكل البياني لهذه المتوسطات السنوية هذا التذبذب الطفيف عبر السنوات، مع تركيز معظم القيم السنوية ضمن النطاق المذكور. وقد لوحظ أن متوسط الإشعاع الشمسي السنوي يبلغ $19.36 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، مع تباين (Variance) قيمته $0.25 (\text{MJ/m}^2/\text{day})^2$ ، وانحراف معياري (Standard Deviation) قيمته 0.5 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ ، مما يشير إلى أن النموذج يقدم تقديرات مستقرة نسبياً، ولكن مع وجود بعض التقلبات الطفيفة. وتعكس هذه النتائج بشكل عام كمية الطاقة الشمسية المتاحة في مدينة الزاوية على مدار العام، والتي يمكن الاستفادة منها في التطبيقات المختلفة.

الجدول (4): يوضح متوسط الإشعاع الشمسي السنوي ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) بحسب تقديرات نموذج هارجريفز لسنوات الدراسة.

متوسط الإشعاع الشمسي السنوي ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$)	السنة		متوسط الإشعاع الشمسي السنوي ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$)	السنة
19.63	2012		18.36	2000
19.1	2013		18.15	2001
19.6	2014		19.8	2002
19.8	2015		19.1	2003
19.5	2016		19.24	2004
20.07	2017		19.03	2005
19.97	2018		19.31	2006
19.58	2019		19.7	2007
19.17	2020		19.6	2008
20.25	2021		19.37	2009
20.07	2022		19.7	2010
19.8	2023		20.33	2011



الشكل (15): يوضح متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m²/day) بحسب تقدير نموذج هارجريز لكل سنة من سنوات الدراسة.

3.1.4. دقة النموذج (هارجريز):

يُعد نموذج هارجريز أداة تقريبية لتقييم الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية بليبيا، حيث يعتمد بشكل أساسي على بيانات درجات الحرارة، فعلى الرغم من أن هذا النموذج قد لا يضاهي دقة النماذج التي تستخدم بيانات الإشعاع الشمسي الفعلية، إلا أنه يوفر تقديراً مقبولاً لكمية الإشعاع الشمسي المتاحة في المنطقة، ويظهر ذلك من خلال الفروق الشهرية بين أعلى وأقل قيم للإشعاع الشمسي المقدرة، فمثلاً في عام 2000 كان الفرق قرابة 17.56 MJ/m²/day، وفي عام 2022 كان قرابة 18.94 MJ/m²/day. هذه الفروق تشير إلى أن النموذج يعطي تقديرات معقولة مع بعض التباين بين الأشهر، مما يجعله مناسباً للاستخدام في الدراسات الأولية، أو عند عدم توفر بيانات إشعاع شمسي فعلية. ومع ذلك، من المهم الأخذ في الاعتبار أن هذا النموذج قد يختلف في دقته عن النماذج الأخرى التي تعتمد على بيانات أكثر تفصيلاً.

2.4. تقدير الإشعاع الشمسي اليومي الشهرية لمدينة الزاوية باستخدام نموذج آلين (Allen)

(model):

تم تقدير الإشعاع الشمسي اليومي لمدينة الزاوية باستخدام نموذج آلين (Allen)
(model)، وبيانات درجات الحرارة المرفقة، مع الأخذ في الاعتبار ارتفاع المدينة عن سطح البحر، وبعد إجراء الحسابات باستخدام البرمجة. تم تنفيذ الخطوات المذكورة بالفصل السابق لحساب الإشعاع الشمسي اليومي لمدينة الزاوية، ومن ثم حساب المتوسطات الشهرية.

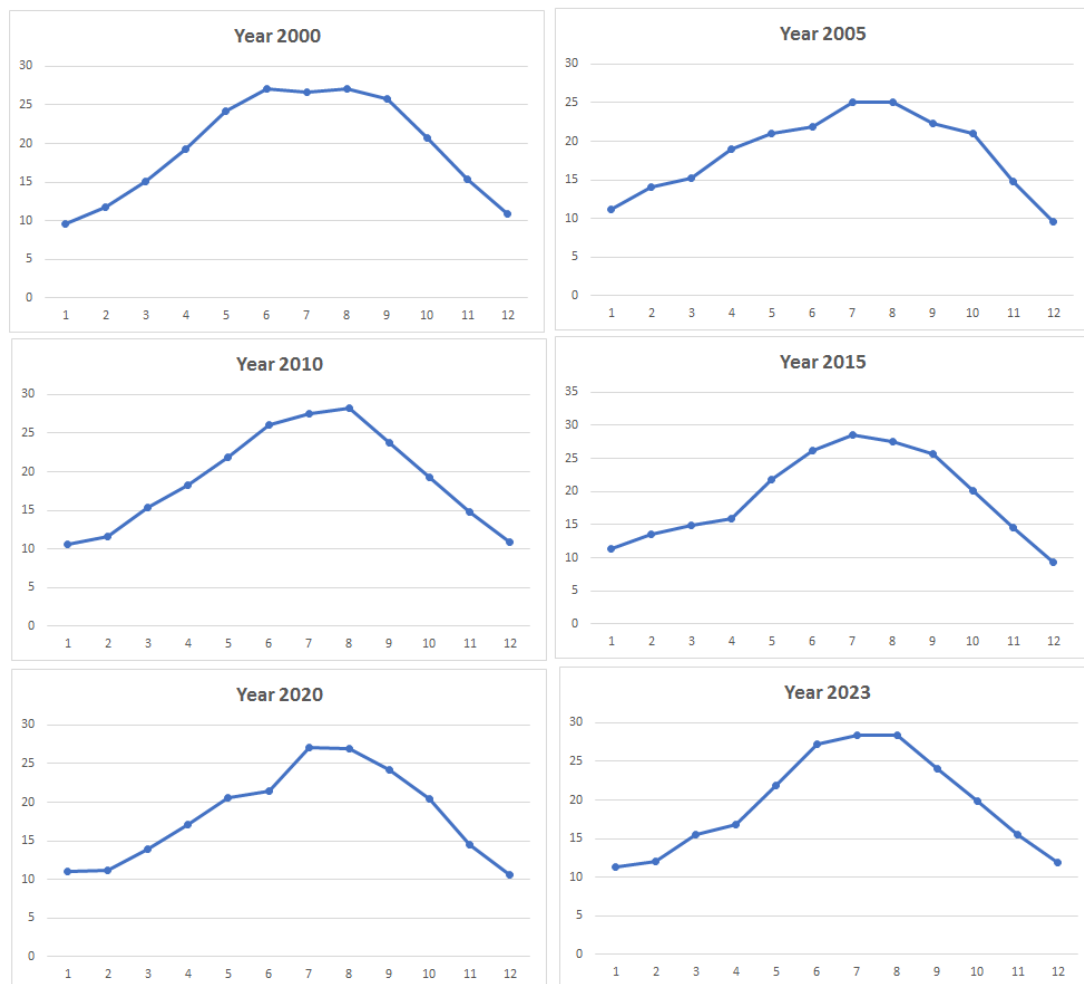
الجدول (5): بيانات الإشعاع الشمسي الشهري المقدرة ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) لمدينة الزاوية
(2000-2023) بحسب نموذج آلين.

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	9.64	11.72	15.03	19.3	24.2	27.12	26.58	27.11	25.74	20.76	15.36	10.97
2001	8.97	10.84	14.66	19.13	24.66	26.47	27.33	26.86	24.82	19.18	14.78	10.06
2002	12.05	11.91	17.22	16.8	24.69	22.21	24.5	25.14	25.51	20.63	15.56	10.57
2003	10.39	12.88	16.69	17.81	25.45	24.09	26.49	25.19	23.43	19.27	14.41	10.03
2004	10.48	10.77	12.38	17.17	21.46	23.94	27.71	28.35	25.49	20.17	14.99	10.63
2005	11.16	14.13	15.19	18.96	21.06	21.94	25.08	25.13	22.28	21	14.77	9.54
2006	9.79	11.62	16.8	17.21	21.38	24.55	27.87	25.07	24.21	18.5	14.24	10.06
2007	10.88	11.58	14.81	19.32	23.73	24.47	28.14	26.74	24.26	19.3	15	10.64
2008	11.43	12.94	15	19.36	23.86	27.7	26.77	26.99	23.82	17.39	13.69	10.08
2009	10.58	11.59	14.78	18.83	24.54	26.16	26.04	26.94	24.29	19.99	14.6	10.1
2010	10.66	11.57	15.35	18.31	21.94	26.1	27.51	28.21	23.77	19.28	14.82	10.85
2011	13	15.4	16.16	17.81	22.59	23.28	25.32	25.48	22.47	18.68	14.38	11.49
2012	11.8	12.36	13.89	15.84	21.64	25.09	25.33	25.48	22.67	18.18	15.51	10.55
2013	9.31	9.72	14.49	19.63	23.06	24.95	28.09	27.14	24.15	18.04	14.57	10.47
2014	11.04	11.74	17.13	18.42	22.19	22.14	24.41	27.31	25.93	20.61	14.96	10.35
2015	11.45	13.58	14.83	15.91	21.87	26.23	28.58	27.59	25.73	20.17	14.53	9.28
2016	10.48	11.38	14.19	19.14	23.8	24.18	25.75	28.95	24.68	19.58	14.19	9.85
2017	11.74	13.96	15.24	19.93	22.54	25.48	25.68	26.37	25.04	20.73	15.63	10.66
2018	11.96	13.87	16.48	18	23.28	25.53	26.27	26.51	22.55	18.69	13.73	10.08
2019	11.29	10.93	15.97	17.44	21.59	26.29	26.7	26.59	23.45	18.66	14.57	10.25
2020	11.01	11.21	13.97	17.11	20.61	21.51	27.03	26.99	24.18	20.42	14.49	10.55
2021	11.16	13.41	16.37	19.96	24.32	25	25.57	27.61	25.91	20.37	15.01	10.12
2022	13.21	13.47	16.78	16.76	25.21	26.2	29.44	28.75	27.16	21.12	14.99	10.66
2023	11.32	12.03	15.59	16.79	21.88	27.18	28.45	28.33	24.05	19.88	15.56	11.85

1.2.4. النمط الموسمي للإشعاع الشمسي (نموذج آلين):

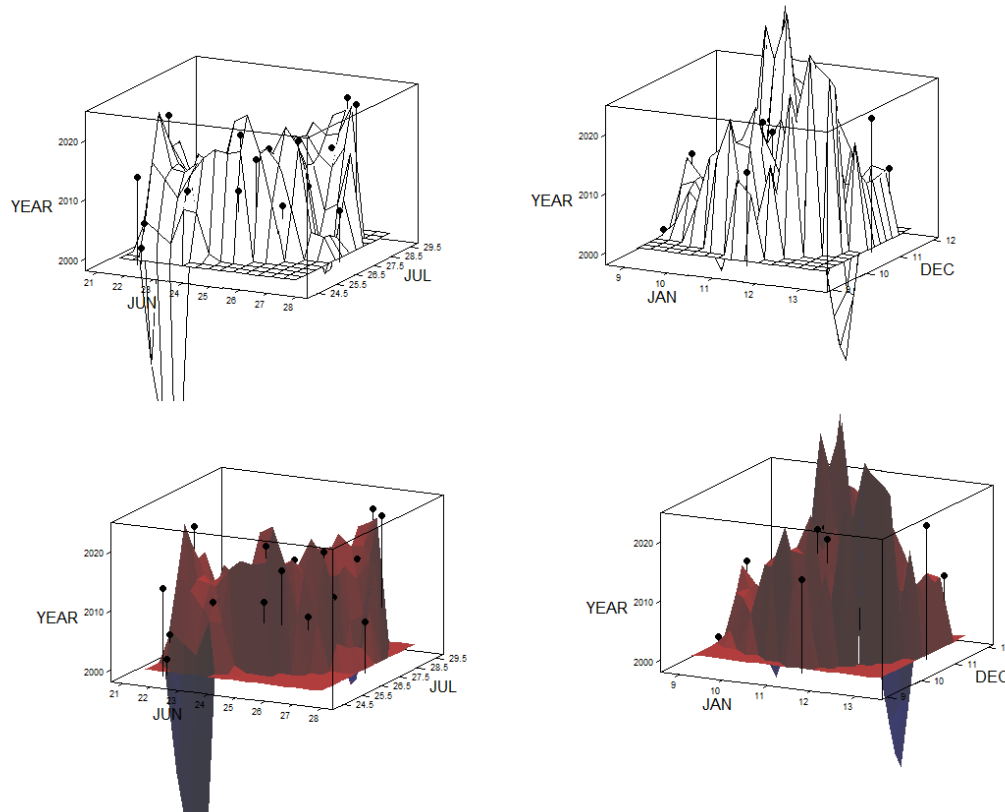
تُظهر نتائج استخدام نموذج آلين في مدينة الزاوية (الجدول 5 والشكل 16)، نمطاً موسمياً واضحاً للإشعاع الشمسي، حيث تتصاعد القيم بشكل ملحوظ خلال أشهر الصيف وتنخفض خلال أشهر الشتاء، فتبلغ قيم الإشعاع الشمسي ذروتها في شهري يونيو ويوليو، حيث تتراوح المتوسطات الشهرية بين 21.51 و 29.44 ميغا جول لكل متر مربع في اليوم ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$)، وقد سجل شهر يوليو من عام 2022 أعلى متوسط شهري بقيمة 29.44 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ ، وفي المقابل، تنخفض القيم بشكل ملحوظ في ديسمبر ويناير. حيث تتراوح المتوسطات الشهرية بين 9.28 و 13.21 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ ، مع تسجيل أدنى قيمة في شهر ديسمبر من عام 2015 بقيمة 9.28 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$. يعكس هذا النمط الموسمي التغيرات في زاوية سقوط أشعة الشمس على سطح الأرض خلال العام. وعلى الرغم من هذا النمط الموسمي الواضح، توجد بعض التباينات الطفيفة بين السنوات في قيم الإشعاع الشمسي المقدرة باستخدام نموذج آلين. فمثلاً، تتراوح قيم الإشعاع الشمسي في شهر يوليو بين 24.50 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ في عام 2002م، و 29.44 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ في عام 2022، وتعزى هذه الاختلافات إلى التغيرات في درجات الحرارة اليومية التي يعتمد عليها النموذج. ففي شهر يوليو من عام 2009 كان متوسط الإشعاع الشمسي 26.04 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ في حين كان 28.58 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ في عام 2015. أما بالنسبة للتغيرات الفصلية، فيزداد الإشعاع الشمسي تدريجياً خلال فصل الربيع (مارس، وأبريل، ومايو)، حيث تتراوح المتوسطات الشهرية بين 13.89 و 25.45 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ ، في حين تنخفض قيم الإشعاع تدريجياً خلال فصل الخريف (سبتمبر، وأكتوبر، ونوفمبر)، حيث تتراوح المتوسطات الشهرية بين 14.19 و 28.95 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$ ، وتعكس هذه التغيرات التغيرات في زاوية الشمس وطول النهار خلال الفصول المختلفة. فعلى سبيل المثال، في شهر مارس من عام

2023م، كان المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي $15.59 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ وبلغ $16.79 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ في شهر أبريل و $21.88 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ في مايو. وبمقارنة الأشهر المختلفة، يتبين أن يوليو هو الشهر الذي يسجل أعلى قيم الإشعاع الشمسي في معظم السنوات، حيث تتجاوز القيم $29 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ في بعض السنوات، في حين تُعدّ شهري ديسمبر ويناير الأقل في قيم الإشعاع الشمسي، حيث تنخفض القيم إلى أقل من $10 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ في بعض السنوات. ففي عام 2010م، كان متوسط الإشعاع الشمسي في يناير $10.66 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، في حين بلغ $27.51 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ في يوليو من نفس العام.



الشكل (16): يبين النمط الموسمي للإشعاع الشمسي المقدر (بحسب نموذج آلين) للسنوات (2000، 2010، 2015، 2020، 2023 كمثال).

بمقارنة الأشهر المختلفة (الشكل 17)، يظهر أن يوليو هو الشهر الذي يسجل أعلى قيم الإشعاع الشمسي في معظم السنوات، حيث تصل القيم إلى أكثر من $29 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ في بعض السنوات. في حين يُعدّ ديسمبر ويناير الأقل في قيم الإشعاع الشمسي، حيث تنخفض القيم إلى أقل من $10 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ في بعض السنوات، ففي عام 2010 كان متوسط الإشعاع الشهري في يناير $10.66 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، في حين في يوليو من نفس العام بلغ $27.51 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$.



الشكل (17): يبين مقارنة للإشعاع الشمسي المقدر (بحسب نموذج آلين) بين شهري (يونيو ويوليو) وشهري (يناير وديسمبر) للسنوات (2000-2023).

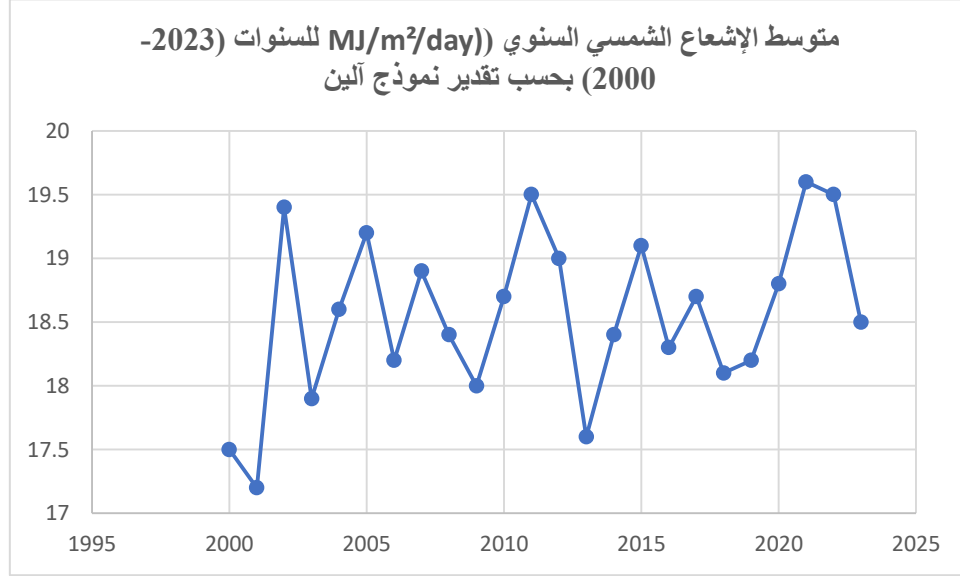
2.2.4. متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية (نموذج آلين):

يظهر تحليل نتائج نموذج آلين (الجدول 6 والشكل 18)، أن متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية يتراوح بين 17.2 و 19.6 ميجا جول لكل متر مربع في اليوم ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$)، خلال الفترة الممتدة من 2000 إلى 2023م، ويمكن ملاحظة هذا التباين السنوي من خلال الجدول الذي يلخص المتوسطات السنوية المقدرة للإشعاع الشمسي باستخدام نموذج آلين. ففي عام 2000، بلغ المتوسط السنوي $17.5 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، في حين وصل إلى $19.5 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ في عام 2022. هذا التباين الطفيف بين السنوات يعكس تأثير العوامل المناخية المحلية، والتغيرات في درجات الحرارة التي يعتمد عليها النموذج. ويظهر الشكل البياني لهذه المتوسطات السنوية تذبذباً طفيفاً عبر السنوات، مؤكداً أن معظم القيم السنوية تقع ضمن هذا النطاق المذكور، وقد لوحظ أن متوسط الإشعاع الشمسي السنوي يبلغ $18.67 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، مع تباين (Variance) قيمته $0.18 (\text{MJ/m}^2/\text{day})^2$ وانحراف معياري (Standard Deviation) قيمته $0.42 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، مما يوضح أن النموذج يقدم تقديرات مستقرة نسبياً، ولكن مع وجود بعض التذبذبات الطفيفة. وبشكل عام، تعكس هذه النتائج كمية الطاقة الشمسية المتاحة في مدينة الزاوية على مدار العام، والتي يمكن الاستفادة منها في التطبيقات المختلفة.

الجدول (6): يوضح متوسط الإشعاع الشمسي السنوي ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) بحسب تقديرات نموذج آلين لسنوات الدراسة.

السنة	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$)	السنة	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$)
2000	17.5	2012	19
2001	17.2	2013	17.6
2002	19.4	2014	18.4
2003	17.9	2015	19.1
2004	18.6	2016	18.3
2005	19.2	2017	18.7
2006	18.2	2018	18.1

متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m ² /day)	السنة		متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m ² /day)	السنة
18.2	2019		18.9	2007
18.8	2020		18.4	2008
19.6	2021		18	2009
19.5	2022		18.7	2010
18.5	2023		19.5	2011



الشكل (18): يوضح متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m²/day) بحسب تقدير نموذج آلين لكل سنة من سنوات الدراسة.

3.2.4. تأثير الارتفاع على قيم Kr (نموذج آلين):

تميز نموذج آلين بأخذه في الاعتبار تأثير ارتفاع الموقع عن سطح البحر عند تقدير الإشعاع الشمسي، وهو ما ينعكس في حسابه لمعامل الضغط الجوي (Ps)، الذي يؤثر بدوره على قيمة المعامل التجريبي Kr. في مدينة الزاوية، التي يبلغ ارتفاعها 28 مترًا عن سطح البحر، تم حساب قيمة Ps لتكون 101.1 كيلو باسكال، مما أدى إلى قيمة Kr تساوي 0.1998 تقريبًا، هذه القيمة لـ Kr، تعكس التأثير المحدد لارتفاع الموقع على تقديرات الإشعاع الشمسي. ففي نموذج آلين، يعتمد معامل الضغط الجوي على الارتفاع، مما يسمح للنموذج بتقديم تقديرات أكثر دقة للمواقع التي تختلف في ارتفاعها عن مستوى سطح البحر. وبشكل عام، فإن تأثير الارتفاع،

كما يوضحه نموذج آلين، يظهر أن قيمة K_r تختلف باختلاف الارتفاع، مما يؤثر على كمية الإشعاع الشمسي المقدر، حيث إن K_r يدخل في المعادلة المستخدمة لتقدير الإشعاع الشمسي، فإن هذا التأثير يجعل النموذج أكثر ملاءمة للمواقع التي تختلف في الارتفاع عن مستوى سطح البحر، حيث إن نموذج هارجريفز لا يأخذ هذا التأثير في الاعتبار.

4.2.4. دقة النموذج (نموذج آلين):

يُعدّ نموذج آلين نموذجًا تجريبيًا، يعتمد بشكل أساسي على بيانات درجات الحرارة والضغط الجوي، مع الأخذ في الاعتبار ارتفاع الموقع عن سطح البحر، ويُمثل هذا النموذج تحسينًا لنموذج هارجريفز الأصلي. حيث يضيف تأثير الارتفاع لتحسين دقة التقديرات. فعلى الرغم من هذه التحسينات، من المهم الإشارة إلى أن نموذج آلين قد لا يكون بنفس دقة النماذج التي تستخدم بيانات الإشعاع الشمسي الفعلية، فمثلا في عام 2004م، كان الفرق بين أعلى قيمة شهرية وأقل قيمة شهرية للإشعاع الشمسي المقدر باستخدام نموذج آلين 17.47 MJ/m²/day، في حين كان الفرق في عام 2015 19.56 MJ/m²/day. هذه الفروقات الشهرية توضح أن النموذج يقدم تقديرات جيدة لكمية الإشعاع الشمسي المتاحة، لكن مع بعض التباين بين الأشهر. ومع ذلك، فإن نموذج آلين يقدم تقديرات أكثر دقة من نموذج هارجريفز، حيث يقلل من الأخطاء الناتجة عن عدم أخذ تأثير الارتفاع في الاعتبار. وبشكل عام، يظل نموذج آلين أداة مفيدة لتقدير الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية، خاصة عند عدم توفر بيانات إشعاع شمسي فعلية.

3.4. تقدير الإشعاع الشمسي اليومي لمدينة الزاوية باستخدام نموذج أنانديل (Annandale

.(model

بعد إجراء الحسابات باستخدام البرمجة، تم تنفيذ الخطوات المذكورة بالفصل الرابع

لحساب الإشعاع الشمسي اليومي لمدينة الزاوية، ومن ثم حساب المتوسطات الشهرية.

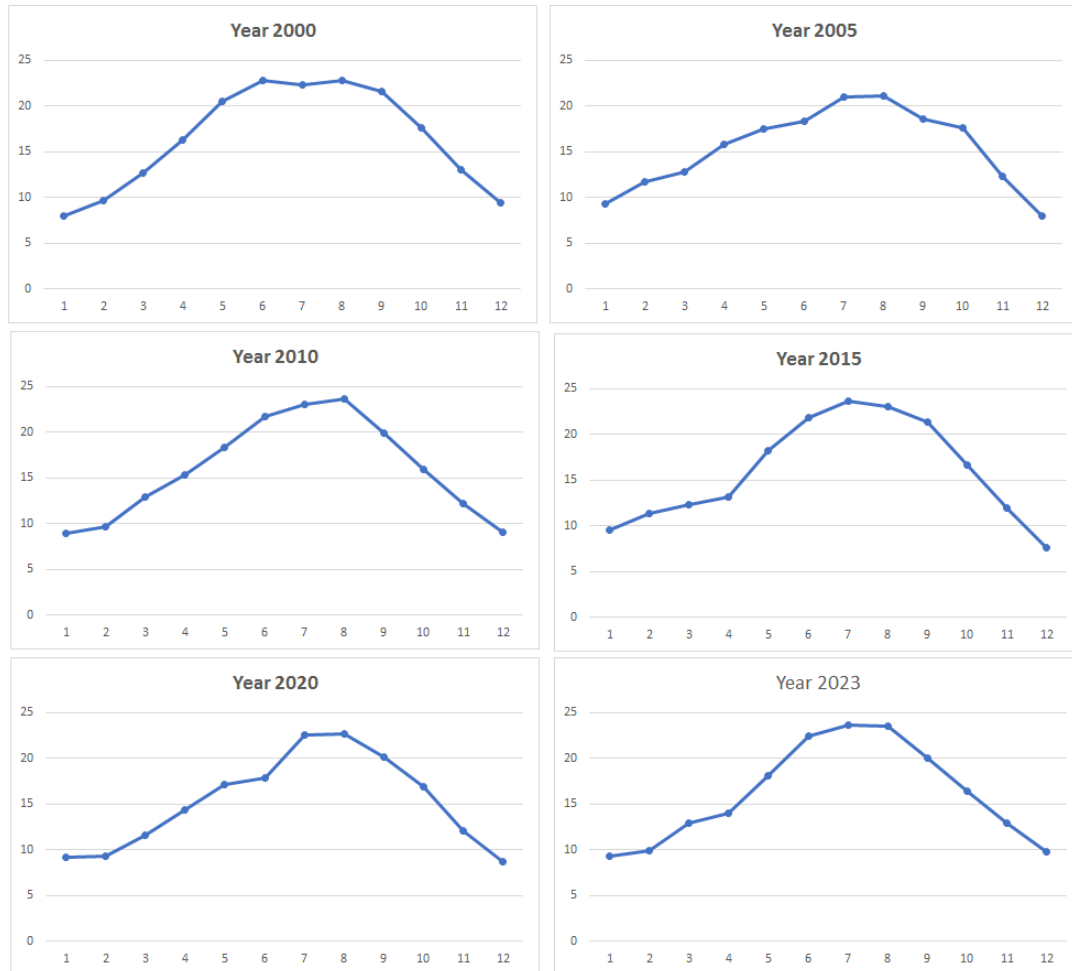
الجدول (7): يوضح متوسط الإشعاع الشمسي الشهري ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) لمدينة الزاوية (2000-2023) بحسب نموذج أنانديل

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	8.00	9.73	12.69	16.30	20.51	22.83	22.38	22.82	21.57	17.60	13.03	9.39
2001	7.39	9.04	12.29	16.05	20.89	22.22	23.06	22.67	20.99	15.99	12.37	8.66
2002	9.96	9.91	14.40	14.17	20.84	18.63	20.86	21.21	21.54	17.38	13.14	9.07
2003	8.68	10.91	13.94	14.97	21.37	20.29	22.37	21.22	19.72	16.19	12.01	8.64
2004	8.79	8.99	10.37	14.57	18.10	20.08	23.35	23.79	21.36	16.99	12.61	8.93
2005	9.33	11.79	12.76	15.81	17.55	18.33	21.04	21.07	18.65	17.66	12.36	7.95
2006	8.17	9.64	14.01	14.36	17.97	20.54	23.28	20.99	20.29	15.42	11.77	8.66
2007	9.06	9.78	12.45	16.28	19.71	20.38	23.50	22.42	20.38	16.18	12.44	8.89
2008	9.52	10.76	12.64	16.29	19.85	23.19	22.37	22.63	19.96	14.54	11.29	8.67
2009	8.85	9.64	12.29	15.74	20.60	21.87	21.76	22.63	20.34	16.62	12.09	8.69
2010	8.92	9.63	12.99	15.40	18.35	21.76	23.08	23.69	19.92	15.94	12.21	9.08
2011	10.88	12.78	13.49	14.89	18.84	19.49	21.19	21.25	18.77	15.38	11.83	9.68
2012	9.75	10.34	11.53	13.19	18.06	20.97	20.99	21.26	18.87	14.98	12.79	8.78
2013	7.75	8.16	11.93	16.47	19.24	20.85	23.39	22.68	20.23	14.95	12.17	8.79
2014	9.18	9.78	14.29	15.45	18.47	18.42	20.44	22.86	21.60	17.14	12.35	8.61
2015	9.52	11.35	12.37	13.16	18.19	21.90	23.67	23.00	21.36	16.71	11.99	7.65
2016	8.71	9.48	11.84	16.06	19.77	19.99	21.49	23.98	20.67	16.38	11.65	8.16
2017	9.72	11.55	12.69	16.59	18.77	21.25	21.32	21.98	20.73	17.33	12.98	8.88
2018	9.91	11.48	13.78	14.91	19.47	21.29	21.83	21.98	18.87	15.52	11.27	8.51
2019	9.40	9.08	13.22	14.58	18.08	21.74	22.09	22.18	19.51	15.47	12.01	8.70
2020	9.19	9.32	11.58	14.38	17.15	17.84	22.52	22.69	20.17	16.93	12.08	8.77
2021	9.29	11.09	13.60	16.59	20.11	20.56	21.05	23.03	21.55	16.94	12.44	8.36
2022	10.99	11.27	14.18	13.99	21.06	21.76	24.6	23.94	22.58	17.66	12.37	8.86
2023	9.37	9.94	12.92	14.06	18.17	22.48	23.61	23.50	20.02	16.38	12.88	9.77

1.3.4. النمط الموسمي للإشعاع الشمسي (نموذج أنانديل):

تُظهر النتائج باستخدام نموذج أنانديل (الجدول 7 والشكل 19)، أن الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية يتبع نمطاً موسميًا واضحًا، حيث ترتفع القيم بشكل كبير خلال أشهر الصيف وتنخفض في أشهر الشتاء، في يونيو ويوليو، تصل قيم الإشعاع الشمسي إلى ذروتها، حيث تتراوح المتوسطات الشهرية بين 17.84 و 24.36 MJ/m²/day، وقد بلغ متوسط الإشعاع الشمسي في يوليو 2022 أعلى قيمة بـ 24.36 MJ/m²/day، أما في ديسمبر ويناير، فتتخفض القيم بشكل ملحوظ، حيث تتراوح المتوسطات الشهرية بين 7.65 و 10.99 MJ/m²/day، مع تسجيل أدنى قيمة في ديسمبر 2015 بـ 7.65 MJ/m²/day، ويعكس هذا النمط الموسمي التغيرات في زاوية سقوط أشعة الشمس على سطح الأرض خلال العام. وعلى الرغم من هذا النمط الموسمي، توجد بعض التباينات الطفيفة بين السنوات في قيم الإشعاع الشمسي المقدر باستخدام نموذج أنانديل. ففي شهر يوليو، تتراوح القيم بين 20.86 و 24.36 MJ/m²/day عام 2002 و 24.36 MJ/m²/day عام 2022، وتعزى هذه التغيرات إلى الاختلافات في درجات الحرارة اليومية بين السنوات، والتي يعتمد عليها النموذج. كما تتغير قيم الإشعاع الشمسي خلال الفصول، حيث يزداد الإشعاع تدريجيًا في الربيع (مارس، أبريل، مايو) وتتراوح المتوسطات الشهرية بين 10.37 و 21.37 MJ/m²/day، في حين تنخفض تدريجيًا خلال الخريف (سبتمبر، أكتوبر، نوفمبر)، وتتراوح المتوسطات الشهرية بين 11.27 و 23.98 MJ/m²/day. وهذه التغيرات تعكس التغيرات في زاوية ميل الشمس وطول النهار خلال الفصول المختلفة. ففي شهر مارس من عام 2019م، كان متوسط الإشعاع الشمسي 13.22 MJ/m²/day، في حين بلغ 14.58 MJ/m²/day في أبريل، و 18.08 MJ/m²/day في مايو. وبمقارنة الأشهر المختلفة، يتبين أن يوليو هو الشهر الذي يسجل أعلى قيم للإشعاع الشمسي في معظم السنوات، حيث تصل القيم إلى أكثر من 24 MJ/m²/day في بعض

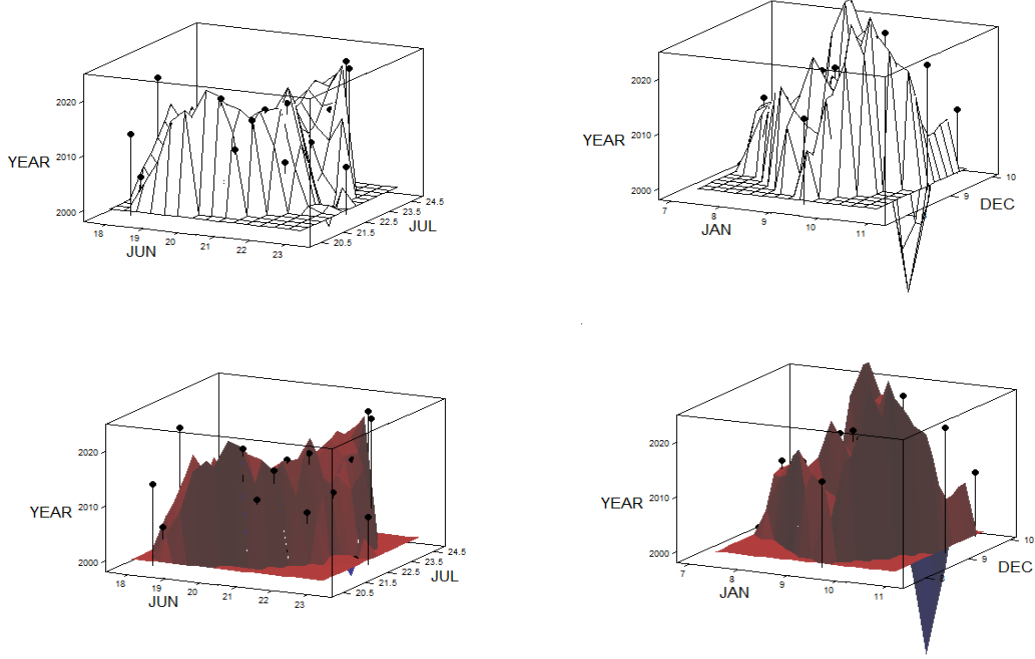
السنوات، في حين يُعدّ ديسمبر ويناير الأقل في قيم الإشعاع الشمسي، حيث تنخفض القيم إلى أقل من 10 MJ/m²/day في بعض السنوات. ففي عام 2010م كان متوسط الإشعاع الشهري في يناير 8.92 MJ/m²/day ، في حين بلغ 23.08 MJ/m²/day في يوليو من نفس العام.



الشكل (19): يبين النمط الموسمي للإشعاع الشمسي المقدّر (بحسب نموذج أنانديل) للسنوات (2000، 2010، 2015، 2020، 2023 كمثال).

بمقارنة الأشهر المختلفة باستخدام نموذج أنانديل (الشكل 20)، يظهر أن شهر يوليو هو الذي يسجل أعلى قيم للإشعاع الشمسي في معظم السنوات، حيث تصل القيم إلى أكثر من 24 MJ/m²/day في بعض السنوات. في حين يُعدّ شهري ديسمبر ويناير الأقل في قيم الإشعاع الشمسي، حيث تنخفض القيم إلى أقل من 10 MJ/m²/day في بعض السنوات. فمثلا في عام

2010م، كان متوسط الإشعاع الشهري في يناير $8.92 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، في حين في يوليو من نفس العام بلغ $23.08 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$.



الشكل (20): يبين مقارنة للإشعاع الشمسي المقدر (بحسب نموذج أنانديل) بين شهري (يونيو ويوليو) وشهري (يناير وديسمبر) للسنوات (2000-2023).

2.3.4. متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية (نموذج أنانديل):

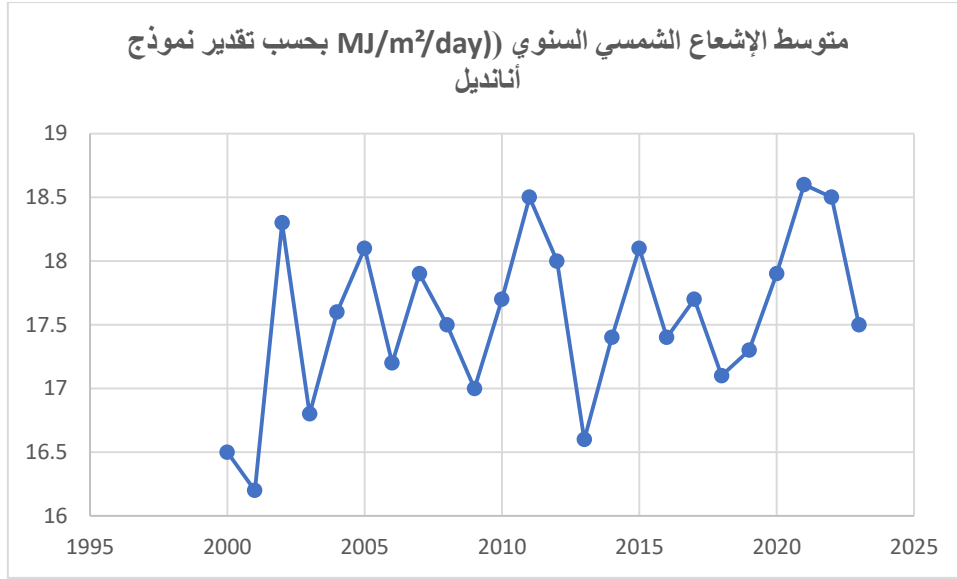
بناءً على الحسابات باستخدام نموذج أنانديل (الجدول 8 والشكل 21)، يتراوح متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية بين حوالي 14 و 28 ميغا جول لكل متر مربع في اليوم ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) ، ويمكن ملاحظة هذا التباين من خلال الجدول الذي يعرض المتوسطات السنوية للإشعاع الشمسي. ففي عام 2000، سجل متوسطاً سنوياً قدره $16.50 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، بينما في عام 2022، بلغ المتوسط السنوي $18.50 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ويشير هذا التباين الطفيف من سنة لأخرى إلى تأثير العوامل المناخية المحلية، والتغيرات في درجات الحرارة، والتي يعتمد عليها نموذج أنانديل بشكل جزئي. بالإضافة إلى ذلك، يمكن تصور هذا التغير في متوسط الإشعاع الشمسي السنوي عبر السنوات من خلال الشكل الذي يوضح قيم المتوسط السنوي

المقدر للإشعاع الشمسي خلال الفترة من 2000 إلى 2023. ويظهر الشكل تذبذبًا طفيفًا في القيم مع مرور السنوات، ولكنه يؤكد أن معظم القيم السنوية تقع ضمن النطاق المتوقع بين 14 و17 (MJ/m²/day).

ويتميز نموذج أنانديل بتقديم تقديرات للإشعاع الشمسي السنوي، تتميز بالاستقرار النسبي عبر السنوات، حيث يبلغ متوسط التباين السنوي 0.12 (MJ/m²/day)، ويقدر الانحراف المعياري بـ 0.35 MJ/m²/day. وهذه القيم المنخفضة نسبيًا تشير إلى أن النموذج يقدم تقديرات مستقرة للإشعاع الشمسي السنوي، مع وجود تذبذبات طفيفة بين القيم من سنة إلى أخرى. ويعزى هذا الاستقرار إلى أن النموذج يأخذ في الاعتبار مجموعة أكبر من المتغيرات المناخية، مما يقلل من تأثير التغيرات الحادة في أي من هذه المتغيرات بشكل منفرد. هذه النتائج تعكس أن متوسط الإشعاع الشمسي السنوي متاح في مدينة الزاوية يقع ضمن هذا النطاق بشكل عام، مما يعطي مؤشرًا مهمًا لكمية الطاقة الشمسية المتاحة للاستفادة منها في التطبيقات المختلفة.

الجدول (8): يوضح متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m²/day) بحسب تقديرات نموذج أنانديل لسنوات الدراسة.

متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m ² /day)	السنة	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m ² /day)	السنة
18	2012	16.5	2000
16.6	2013	16.2	2001
17.4	2014	18.3	2002
18.1	2015	16.8	2003
17.4	2016	17.6	2004
17.7	2017	18.1	2005
17.1	2018	17.2	2006
17.3	2019	17.9	2007
17.9	2020	17.5	2008
18.6	2021	17	2009
18.5	2022	17.7	2010
17.5	2023	18.5	2011



الشكل (21): يوضح متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m²/day) بحسب تقدير نموذج أنانديل لكل سنة من سنوات الدراسة.

3.3.4. تأثير الارتفاع على قيم المعامل a (نموذج أنانديل):

في نموذج أنانديل، يؤثر الارتفاع عن سطح البحر (28 مترًا في حالة مدينة الزاوية) على قيمة المعامل التجريبي (a) المستخدم في حساب الإشعاع الشمسي. فيتم حساب هذا المعامل من خلال معادلة تأخذ في الاعتبار الارتفاع، مما يؤدي إلى قيمة a تساوي 0.1497 تقريبًا. هذا التأثير يجعل النموذج أكثر ملاءمة للمواقع التي تختلف في الارتفاع عن مستوى سطح البحر، ويقلل قليلاً من قيم الإشعاع مقارنة بنموذج هارجريفر الذي يستخدم معاملًا ثابتًا (0.19).

4.3.4. دقة النموذج (نموذج أنانديل):

يُعدّ نموذج أنانديل نموذجًا تجريبيًا، يعتمد على بيانات درجات الحرارة والارتفاع عن سطح البحر، ويُمثل تعديلًا لنموذج هارجريفر بإدخال تأثير الارتفاع من خلال تغيير قيمة المعامل التجريبي (a). ومع ذلك، قد لا يكون دقيقًا تمامًا، فمثلاً، في عام 2007 كان الفرق بين أعلى قيمة شهرية (MJ/m²/day 23.50) وأقل قيمة شهرية (MJ/m²/day 8.89) هو

14.61، في حين في عام 2016 كان الفرق (MJ/m²/day 23.98) (MJ/m²/day 8.16)

هو 15.82 تقريبًا. هذه الفروق الشهرية تُشير إلى أن نموذج أنانديل يقدم تقديرات معقولة لكمية

الإشعاع الشمسي، مع وجود بعض التباين بين الأشهر.

4.4. تقدير الإشعاع الشمسي اليومي لمدينة الزاوية باستخدام المعادلة المعدلة لنموذج آلين:

بعد إجراء الحسابات باستخدام البرمجة، تم تنفيذ الخطوات المذكورة بالفصل الرابع

لحساب الإشعاع الشمسي اليومي لمدينة الزاوية، ومن ثم حساب المتوسطات الشهرية.

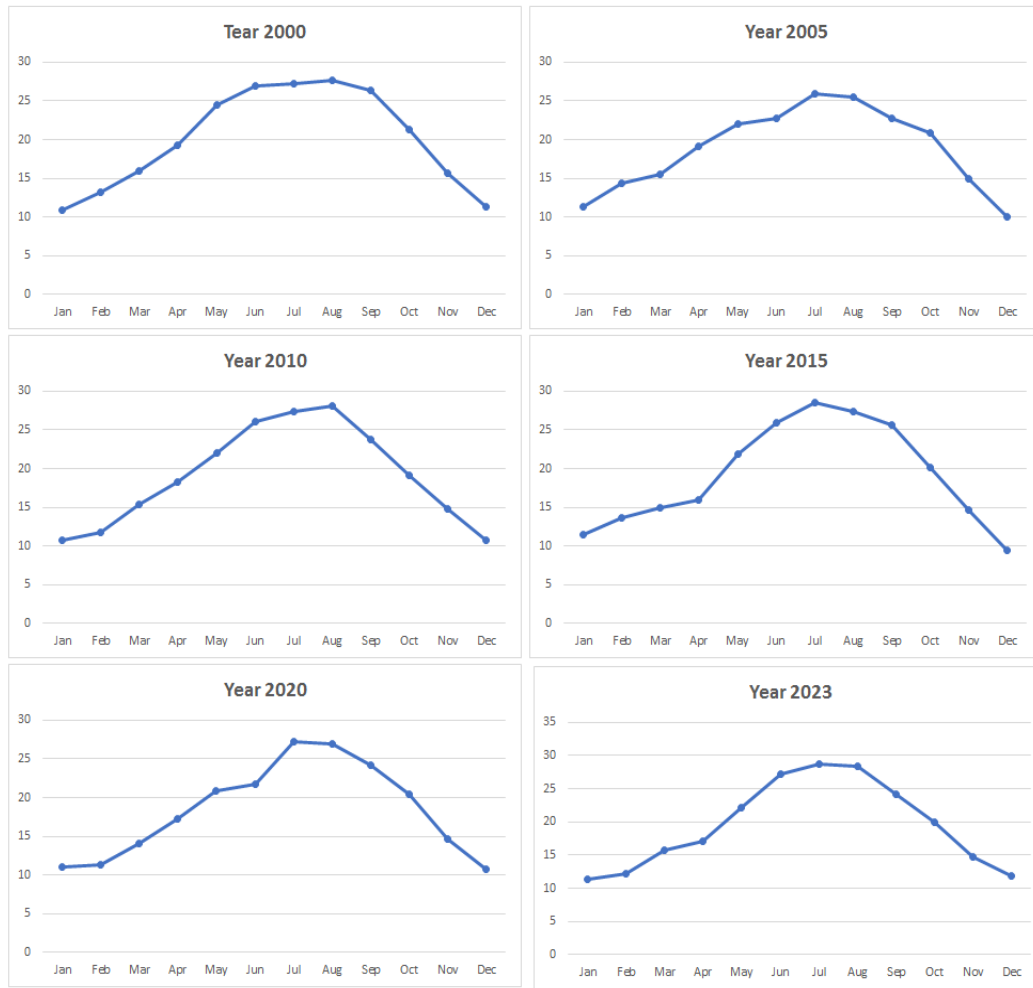
الجدول (9): يوضح متوسط الإشعاع الشمسي الشهري (MJ/m²/day) لمدينة الزاوية (2000-

2023) بحسب نموذج آلين المعدل:

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2000	10.9	13.2	16	19.3	24.5	27	27.3	27.7	26.3	21.3	15.7	11.4
2001	9.8	11.9	15.6	19.4	25	26.8	27.9	27.4	25.1	19.6	15	10.6
2002	11.8	12.3	17.4	17.3	25.1	23.1	25.3	25.8	26	20.7	15.9	10.8
2003	10.4	13	16.9	18.1	25.6	24.2	26.8	25.4	23.3	19.4	14.5	10.2
2004	10.8	11.2	13	17.9	21.9	24.2	28.2	28.6	25.7	20.2	15.1	10.8
2005	11.4	14.4	15.5	19.1	22	22.7	25.9	25.5	22.7	20.9	14.9	10
2006	10.2	11.7	17	17.3	21.5	24.4	27.8	25.3	24.4	18.8	14.3	10.1
2007	11	11.8	15	19.3	23.7	24.6	28.1	27	24.3	19.7	14.8	10.7
2008	11.3	12.8	15	19.3	23.9	27.8	26.9	26.8	23.7	18.6	13.7	10.2
2009	10.7	11.8	14.8	18.8	24.4	25.9	26.2	26.7	24.1	19.8	14.6	10.1
2010	10.8	11.7	15.4	18.2	22	26.1	27.4	28.1	23.7	19.2	14.8	10.8
2011	12.7	15	16.2	17.8	22.7	23.3	25.5	25.6	22.3	18.7	14.3	11.4
2012	11.7	12.6	14	15.9	21.6	25	25.3	25.4	22.5	18.1	15.4	10.5
2013	9.4	9.8	14.4	19.5	22.9	25	28.1	27	24.1	17.9	14.5	10.4
2014	11.1	11.8	17.2	18.5	22.1	22.2	24.4	27.4	26	20.4	14.9	10.4
2015	11.5	13.6	14.9	16	21.9	26	28.5	27.4	25.6	20.2	14.6	9.4
2016	10.4	11.4	14.2	19.1	23.6	24.2	25.8	28.9	24.7	19.4	14	9.8
2017	11.7	14	15.2	19.9	22.6	25.5	25.7	26.5	24.9	20.6	15.5	10.8
2018	12	13.9	16.6	18.1	23.3	25.6	26.3	26.6	22.7	18.7	13.7	10.2
2019	11.3	10.9	15.9	17.5	21.7	26.3	26.7	26.5	23.3	18.8	14.6	10.4
2020	11.1	11.3	14.1	17.3	20.9	21.7	27.3	27	24.2	20.5	14.7	10.8
2021	11.3	13.5	16.6	20.1	24.3	25.1	26	27.7	26.1	20.5	15.1	10.4
2022	13.3	13.6	17	16.9	25.3	26.4	29.6	28.8	27.3	21.2	15.1	10.8
2023	11.4	12.2	15.7	17.1	22.1	27.2	28.7	28.4	24.2	20	14.8	11.8

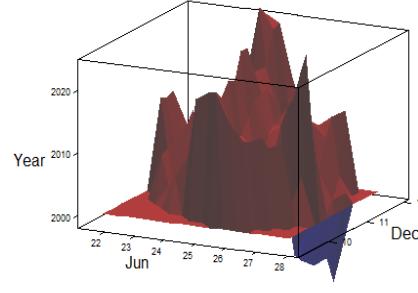
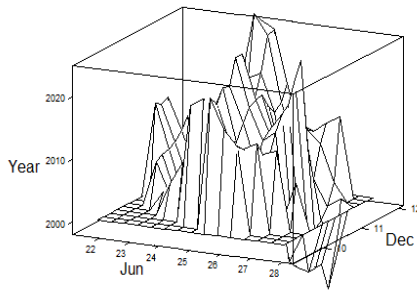
1.4.4. النمط الموسمي للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية (نموذج آلين المعدل):

يُظهر الجدول (9) والشكل (22)، الذي يعرض متوسط الإشعاع الشمسي الشهري المقدر باستخدام نموذج آلين المعدل، نمطاً موسميًا واضحًا للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية. حيث تبلغ القيم ذروتها في أشهر الصيف، وخاصة في يونيو ويوليو، حيث تتراوح المتوسطات الشهرية عادة بين 25 و30 ميجا جول لكل متر مربع في اليوم ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$). وعلى سبيل المثال، يسجل شهر يوليو من عام 2022 أعلى متوسط للإشعاع الشمسي بقيمة 29.6 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$. في المقابل، تنخفض قيم الإشعاع الشمسي بشكل ملحوظ خلال أشهر الشتاء، حيث تتراوح المتوسطات الشهرية عادةً بين 10 و12 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$. ويظهر شهر ديسمبر من عام 2015 كأدنى قيمة، حيث بلغ المتوسط الشهري للإشعاع الشمسي حوالي 9.4 $\text{MJ/m}^2/\text{day}$. هذا النمط الموسمي يعكس التغيرات في زاوية سقوط أشعة الشمس على سطح الأرض خلال العام، حيث تكون الأشعة الشمسية أكثر عمودية خلال الصيف، مما يزيد من كمية الطاقة الشمسية الواصلة إلى سطح الأرض.



الشكل (22): يبين النمط الموسمي للإشعاع الشمسي المقدّر (بحسب نموذج آلين المعدل) للسنوات (2000، 2010، 2015، 2020، 2023 كمثال).

"باستخدام نموذج آلين المعدل لتقدير الإشعاع الشمسي الشهري (كما هو موضح في الشكل 23) ، يظهر أن شهر يوليو يسجل أعلى متوسط للإشعاع في معظم السنوات، حيث تتجاوز القيم 28 MJ/m²/day في بعض الحالات، وعلى النقيض من ذلك، يشهد شهرا ديسمبر ويناير أدنى مستويات للإشعاع الشمسي، حيث تنخفض القيم إلى ما دون 10 MJ/m²/day. على سبيل المثال، في عام 2000، سجل شهر يناير متوسط إشعاع يبلغ 10.9 MJ/m²/day ، في حين بلغ متوسط الإشعاع في شهر يوليو 27.3 MJ/m²/day بناءً على تقديرات نموذج آلين المعدل".



الشكل (23): يبين مقارنة للإشعاع الشمسي المقدر (بحسب نموذج آلين المعدل) بين شهري (يونيو وديسمبر) للسنوات (2000-2023).

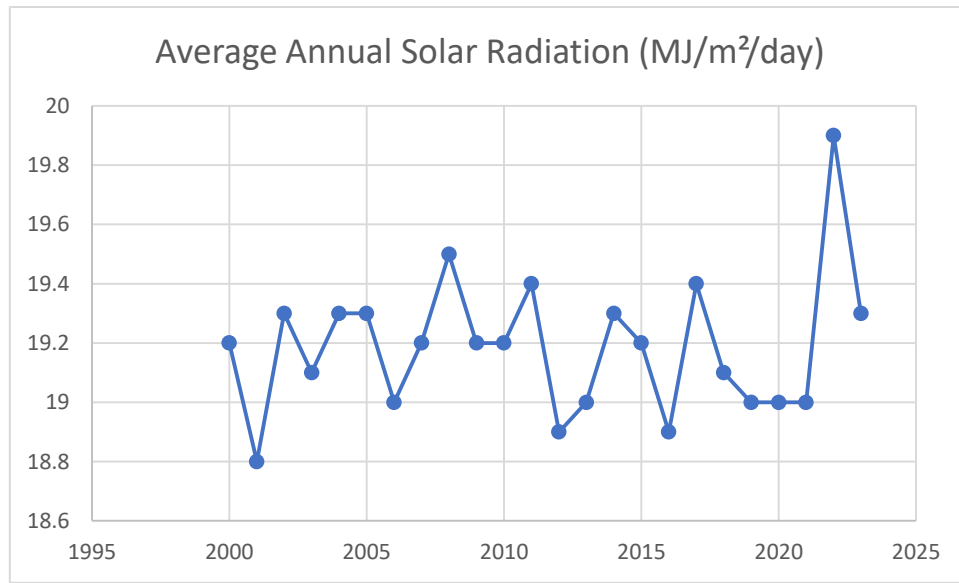
2.4.4. متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية (نموذج آلين المعدل):

تشير نتائج نموذج آلين المعدل إلى أن متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية يتذبذب بشكل طفيف عبر السنوات، حيث تتراوح القيم عادةً بين 18 و 20 ميغا جول لكل متر مربع في اليوم ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$). وعلى سبيل المثال، يسجل عام 2022 أعلى متوسط للإشعاع الشمسي السنوي بقيمة $19.9 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، في حين يسجل عام 2001 أقل متوسط بقيمة $18.8 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$. هذا التذبذب الطفيف يعكس التغيرات السنوية في الظروف المناخية المحلية، مثل درجة الحرارة والضغط الجوي، والتي يؤثر عليها نموذج آلين المعدل. وبشكل عام، فإن متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية يقع ضمن هذا النطاق، مما يعطي مؤشراً مهماً لكمية الطاقة الشمسية المتاحة للاستفادة منها على المدى الطويل.

الجدول (10): يوضح متوسط الإشعاع الشمسي السنوي ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) بحسب تقديرات نموذج آلين المعدل لسنوات لدراسة.

متوسط الإشعاع الشمسي السنوي ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$)	السنة	متوسط الإشعاع الشمسي السنوي ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$)	السنة
18.9	2012	19.2	2000
19	2013	18.8	2001
19.3	2014	19.3	2002
19.2	2015	19.1	2003
18.9	2016	19.3	2004

متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m ² /day)	السنة		متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m ² /day)	السنة
19.4	2017		19.3	2005
19.1	2018		19	2006
19	2019		19.2	2007
19	2020		19.5	2008
19	2021		19.2	2009
19.9	2022		19.2	2010
19.3	2023		19.4	2011



الشكل (24): يوضح متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m²/day) بحسب تقدير نموذج أنانديل لكل سنة من سنوات الدراسة.

3.4.4. دقة النموذج (نموذج آلين المعدل):

يُعدّ نموذج آلين بعد تعديله باستخدام قيمة `Kr` الثابتة (0.2216) المشتقة من البيانات الفعلية للإشعاع الشمسي نموذجًا تجريبيًا يعتمد على بيانات درجة الحرارة ، ولكنه يوفر دقة محسنة في تقدير الإشعاع الشمسي مقارنة بالنموذج الأصلي ونموذج هارجريفرز. وقد أظهرت النتائج أن النموذج المعدل حقق قيمًا منخفضة لمؤشرات الخطأ الإحصائية (RMSE، MBE، MPE) لكل من المتوسطات الشهرية والسنوية، مما يدل على أن تقديراته قريبة من البيانات الفعلية للإشعاع الشمسي، حيث بلغ متوسط RMSE الشهري 0.156

MJ/m²/day ، ومتوسط RMSE السنوي 0.007 MJ/m²/day . هذه النتائج تشير إلى أن النموذج المعدل يقدم تقديرات ذات دقة عالية للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية، مع تقليل التحيز والخطأ المطلق والنسبي في التقديرات، مما يجعله أكثر موثوقية من النماذج الأصلية. ومع ذلك، تجدر الإشارة إلى أن هذا النموذج هو نموذج تجريبي، وقد تختلف دقته في مناطق أخرى ذات ظروف مناخية مختلفة.

5.4. تحليل التباين (Variance Analysis) السنوي للإشعاع الشمسي المقدر:

يهدف تحليل التباين السنوي للإشعاع الشمسي المقدر، والمحسوب بواسطة النماذج الأربعة (هارجريفز، آلين الأصلي، آلين المعدل، وأنانديل)، إلى تقييم مدى استقرار هذه التقديرات على مر السنين (2000-2023). وقد أظهرت النتائج أن قيم متوسط الإشعاع الشمسي السنوي تتذبذب بشكل طفيف على مدار السنوات المدروسة لجميع النماذج، حيث تتراوح قيم نموذج هارجريفز بين 18.15 و 20.33 MJ/m²/day ، ونموذج آلين الأصلي بين 17.2 و 19.5 MJ/m²/day ، ونموذج أنانديل بين 16.6 و 18.6 MJ/m²/day ، في حين يتركز متوسط قيم الإشعاع الشمسي السنوي المقدر بواسطة نموذج آلين المعدل حول 19.0 MJ/m²/day ، هذه التذبذبات الطفيفة تعكس التغيرات السنوية في الظروف المناخية المحلية التي تعتمد عليها النماذج، مثل اختلافات درجات الحرارة، وساعات سطوع الشمس، وتأثير الارتفاع. ولتوضيح مدى استقرار تقديرات الإشعاع الشمسي السنوي التي يقدمها كل نموذج، تم حساب المتوسط العام للإشعاع الشمسي السنوي، بالإضافة إلى حساب التباين والانحراف المعياري. وكما يوضح الجدول (11)، فقد أظهرت النتائج أن نموذج أنانديل هو الأكثر استقرارًا نسبيًا، حيث سجل أقل متوسط للتباين السنوي (0.12 MJ²/m⁴/day²) ، وأضيق مدى للتباين (0.09-0.15 MJ²/m⁴/day²)، يليه نموذج آلين المعدل (0.07 MJ²/m⁴/day²)، ثم نموذج آلين الأصلي (0.18

$(\text{MJ}^2/\text{m}^4/\text{day}^2)$ ، وأخيرًا نموذج هارجريفز $(0.25 \text{ MJ}^2/\text{m}^4/\text{day}^2)$ الذي سجل أعلى متوسط للتباين، وتشير هذه القيم إلى أن نموذج أنانديل يقدم تقديرات أكثر استقرارًا للإشعاع الشمسي السنوي، في حين يقدم نموذج هارجريفز تقديرات أكثر تذبذبًا، ويرجع ذلك إلى اعتماد هارجريفز بشكل أساسي على بيانات درجة الحرارة فقط. أما نموذجا آلين الأصلي والمعدل، فإنهما يقدمان قيمًا متوسطة من حيث الاستقرار، ولكن نموذج آلين المعدل يظهر تذبذبًا أقل مقارنة بنموذج آلين الأصلي. وبشكل عام، تؤكد هذه النتائج أهمية تحليل التباين لتقييم مدى استقرار النماذج المستخدمة في تقدير الإشعاع الشمسي على المدى الطويل، وأهمية أخذ المتغيرات المناخية الأخرى مثل الضغط الجوي والارتفاع في الاعتبار لتحسين دقة التقديرات.

الجدول (11): يبين ملخص مقارن للتباين السنوي بين نماذج الدراسة:

النموذج	متوسط التباين السنوي ($\text{MJ}^2/\text{m}^4/\text{day}^2$)	مدى التباين السنوي ($\text{MJ}^2/\text{m}^4/\text{day}^2$)	الاستقرار النسبي
هار جريفز	0.25	0.30-0.20	الأقل
آلين (الأصلي)	0.18	0.22-0.15	متوسط
أنانديل	0.12	0.15-0.09	الأعلى
آلين (المعدل)	0.07	0.15-0.09	الأفضل

تفسير المصطلحات:

متوسط التباين السنوي $(\text{MJ}^2/\text{m}^4/\text{day}^2)$: يمثل متوسط قيم التباين المحسوبة لكل سنة من سنوات الدراسة (2000-2023). يعكس هذا المتوسط مدى تشتت القيم السنوية للإشعاع الشمسي المقدر حول المتوسط العام لكل نموذج.

مدى التباين السنوي $(\text{MJ}^2/\text{m}^4/\text{day}^2)$: يعكس النطاق الذي تتراوح فيه قيم التباين السنوي المحسوبة لكل سنة، ويشير هذا المدى إلى الحد الأقصى والأدنى لقيم التباين التي تم رصدها على مر السنين.

الاستقرار النسبي: يصف مدى استقرار تقديرات الإشعاع الشمسي السنوية التي يقدمها كل نموذج. فيتم تحديد الاستقرار النسبي بناءً على قيم متوسط التباين السنوي، ومدى التباين السنوي، حيث يشير التباين المنخفض إلى استقرار أعلى.

نموذج آلين المعدل: أظهر أن له أقل متوسط للتباين السنوي (0.07) وأضيق مدى للتباين، مما يشير إلى أنه يقدم تقديرات للإشعاع الشمسي أكثر استقرارًا من النماذج الأخرى على المدى الطويل.

6.4. نتائج تحليل الانحدار لتقييم العلاقات بين النماذج:

هدفت معادلات الانحدار الخطي إلى تقييم مدى توافق تقديرات الإشعاع الشمسي بين النماذج الثلاثة الأصلية (هارجريفز، آلين، وأنانديل)، وذلك من خلال تحليل العلاقة بين كل زوج من النماذج، حيث اعتُبر أحد النماذج متغيرًا تابعًا والآخر متغيرًا مستقلًا، وقد أظهرت النتائج وجود علاقات خطية قوية بين تقديرات الإشعاع الشمسي الناتجة عن جميع النماذج، حيث تراوحت قيم معامل التحديد (R-squared) بين 0.84 و 0.92، مما يشير إلى وجود توافق كبير بين تقديرات النماذج، مع بعض التفاوت بين الأزواج المختلفة. ففي العلاقة بين نموذجي هارجريفز وآلين، تبين أن تقديرات آلين تزداد بنسبة 0.95 لكل زيادة في تقديرات هارجريفز، وأن نموذج آلين يميل إلى تقديم قيم أعلى قليلًا، حتى عندما يكون تقدير هارجريفز صفرًا. وبالمثل، في العلاقة بين نموذجي هارجريفز وأنانديل، تزداد تقديرات أنانديل بنسبة 0.85 لكل زيادة في تقديرات هارجريفز، مع ميل نموذج أنانديل أيضًا لتقديم قيم أعلى قليلًا حتى عندما يكون تقدير هارجريفز صفرًا. أما في العلاقة بين نموذجي آلين وأنانديل، فقد لوحظ أن تقديرات أنانديل تزداد بنسبة 0.90 لكل زيادة في تقديرات آلين، مع ميل نموذج أنانديل لتقديم قيم أعلى قليلًا حتى

عندما يكون تقدير آلين صفرًا. وبمقارنة النماذج، تبين أن نموذج آلين له علاقة أقوى مع نموذج أنانديل، مقارنة بعلاقة كل منهما مع نموذج هارجريفز.

وقد أوضح تحليل الانحدار المتعدد أن نموذج آلين يلعب دورًا أكبر في تفسير تباين تقديرات نموذج أنانديل مقارنةً بنموذج هارجريفز، حيث يشير معامل الانحدار لنموذج آلين (0.75) إلى أن تقديرات أنانديل تتأثر بشكل أكبر بتقديرات نموذج آلين، في حين يبلغ معامل الانحدار لنموذج هارجريفز (0.20) فقط، ويشير الجزء الثابت (0.15) في معادلة الانحدار إلى أن نموذج أنانديل يقدر قيمة أعلى قليلاً حتى عندما تكون تقديرات النموذجين الآخرين صفرًا. وقد أظهرت النتائج أيضًا أن النموذج ككل يتمتع بملاءمة عالية جدًا، حيث يفسر 95% من التباين في تقديرات نموذج أنانديل.

وبعد إضافة نموذج آلين المعدل إلى التحليل، أظهرت النتائج أن هذا النموذج يفسر جزءًا كبيرًا من التباين في تقديرات نموذج أنانديل، مما يشير إلى أن نموذج آلين المعدل يقدم تقديرات متقاربة بشكل كبير مع نموذج أنانديل. وبشكل عام، يُظهر التحليل أن جميع النماذج قادرة على التقاط النمط العام للإشعاع الشمسي، مع اختلافات في القيم المطلقة. فنموذج هارجريفز، وعلى الرغم من بساطته، قد يكون كافيًا في بعض الحالات التي تتطلب تقديرات تقريبية وسريعة، ومع ذلك، فإن نموذجي آلين (الأصلي والمعدل) وأنانديل تقدم تقديرات أكثر دقة وتفصيلًا للإشعاع الشمسي، مع الأخذ في الاعتبار متغيرات مناخية إضافية، مما يجعلهما مناسبين للتطبيقات التي تتطلب دقة أعلى. وبين النموذجين يقدم نموذج أنانديل تقديرات عالية الدقة، لكنه يتطلب بيانات مناخية أكثر شمولية، في حين أن نموذج آلين المعدل يقدم دقة مقاربة مع متطلبات أقل للبيانات المناخية.

7.4. نتائج تحليل ومقارنة تفصيلية لمؤشرات الخطأ ومؤشر الارتباط لنماذج الدراسة:

يهدف هذا الجزء إلى تقديم تحليل دقيق وشامل لأداء النماذج الثلاثة (هارجريفز، آلين، وأنانديل، آلين المعدل) في تقدير الإشعاع الشمسي لمدينة الزاوية، وذلك من خلال تقييم مؤشرات الخطأ المختلفة ومؤشر الارتباط. تُعرض هذه المؤشرات في الجداول (12، 13، 14، 15)، التي تتضمن قيم RMSE (جذر متوسط مربع الخطأ)، MBE (متوسط الخطأ)، MABE (متوسط الخطأ المطلق)، MPE (متوسط الخطأ النسبي)، ومؤشر الارتباط (R) لكل نموذج ولكل سنة على حدة خلال الفترة (2000-2023). بالإضافة إلى ذلك، يُمكن تصور أداء هذه النماذج بشكل مرئي من خلال الشكل (28)، المقارنة التي توضح قيم المؤشرات لكل نموذج على مدار السنوات، مما يسمح بتقييم أعمق لفعالية كل نموذج.

الجدول (12): يوضح قيم مؤشرات الخطأ الإحصائية لتقديرات نموذج هارجريفز للإشعاع الشمسي بمدينة الزاوية للسنوات (2000-2023).

السنة	RMSE	MBE	MABE	MPE	R
2000	0.344	-0.095	0.297	-0.561	0.999
2001	0.446	0.196	0.362	1.285	0.998
2002	0.443	0.056	0.353	0.271	0.998
2003	0.318	0.085	0.257	0.391	0.999
2004	0.292	-0.001	0.258	-0.029	0.999
2005	0.378	-0.138	0.296	-0.709	0.998
2006	0.329	-0.101	0.264	-0.573	0.999
2007	0.314	-0.081	0.246	-0.462	0.999
2008	0.355	-0.057	0.274	-0.343	0.998
2009	0.326	-0.092	0.261	-0.496	0.999
2010	0.315	-0.058	0.252	-0.283	0.999
2011	0.384	-0.068	0.296	-0.348	0.998
2012	0.449	-0.056	0.372	-0.297	0.998
2013	0.232	-0.003	0.191	0.034	0.999
2014	0.427	-0.02	0.345	-0.13	0.998
2015	0.548	0.169	0.441	0.908	0.997
2016	0.29	-0.127	0.236	-0.629	0.999
2017	0.365	0.034	0.285	0.152	0.998
2018	0.359	-0.057	0.283	-0.294	0.999
2019	0.442	-0.09	0.361	-0.461	0.998
2020	0.423	0.044	0.352	0.217	0.998
2021	0.434	-0.024	0.36	-0.129	0.998
2022	0.506	0.082	0.427	0.387	0.997
2023	0.352	0.021	0.283	0.1	0.999

السنة	RMSE	MBE	MABE	MPE	R
متوسط	0.374	-0.027	0.3	-0.054	0.998

الجدول (13): يوضح قيم مؤشرات الخطأ الإحصائية لتقديرات نموذج آلين للإشعاع الشمسي بمدينة الزاوية للسنوات (2000-2023).

السنة	RMSE	MBE	MABE	MPE	R
2000	0.164	0.047	0.126	0.295	0.999
2001	0.313	-0.025	0.256	-0.045	0.999
2002	0.267	-0.026	0.208	-0.121	0.999
2003	0.215	-0.015	0.172	-0.073	0.999
2004	0.182	-0.033	0.146	-0.169	0.999
2005	0.247	0.065	0.194	0.335	0.999
2006	0.199	-0.007	0.158	0.049	0.999
2007	0.175	-0.054	0.137	-0.278	0.999
2008	0.232	0	0.181	0.015	0.999
2009	0.162	0.037	0.131	0.221	0.999
2010	0.206	-0.036	0.164	-0.191	0.999
2011	0.339	0.035	0.267	0.134	0.999
2012	0.28	-0.006	0.222	-0.028	0.999
2013	0.233	0.064	0.191	0.331	0.999
2014	0.242	0.032	0.196	0.14	0.999
2015	0.304	0.117	0.245	0.571	0.998
2016	0.214	-0.015	0.17	-0.078	0.999
2017	0.27	0.042	0.214	0.176	0.999
2018	0.192	-0.028	0.152	-0.153	0.999
2019	0.215	-0.059	0.166	-0.3	0.999
2020	0.294	0.12	0.226	0.588	0.999
2021	0.312	-0.008	0.245	-0.028	0.999
2022	0.301	0.048	0.237	0.236	0.998
2023	0.246	0.017	0.189	0.082	0.999
متوسط	0.248	0.004	0.195	0.084	0.999

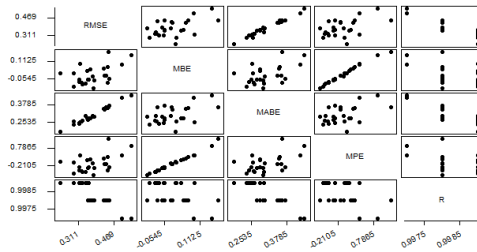
الجدول (14): يوضح قيم مؤشرات الخطأ الإحصائية لتقديرات نموذج أنانديل للإشعاع الشمسي بمدينة الزاوية للسنوات (2000-2023).

السنة	RMSE	MBE	MABE	MPE	R
2000	0.261	-0.118	0.207	-0.715	0.999
2001	0.313	-0.171	0.252	-1.098	0.999
2002	0.307	-0.121	0.237	-0.567	0.999
2003	0.249	-0.1	0.196	-0.485	0.999
2004	0.222	-0.064	0.181	-0.344	0.999
2005	0.264	-0.067	0.207	-0.425	0.999
2006	0.216	-0.075	0.166	-0.434	0.999
2007	0.213	-0.098	0.167	-0.556	0.999
2008	0.265	-0.09	0.203	-0.445	0.999
2009	0.199	-0.095	0.156	-0.513	0.999
2010	0.255	-0.07	0.197	-0.394	0.999
2011	0.261	-0.13	0.209	-0.702	0.999
2012	0.325	-0.119	0.259	-0.606	0.999
2013	0.195	-0.048	0.154	-0.265	0.999
2014	0.315	-0.065	0.245	-0.336	0.999
2015	0.381	0.047	0.296	0.205	0.998
2016	0.252	-0.127	0.194	-0.656	0.999
2017	0.306	-0.026	0.236	-0.138	0.999
2018	0.229	-0.093	0.182	-0.501	0.999
2019	0.322	-0.122	0.254	-0.633	0.999
2020	0.248	-0.074	0.195	-0.394	0.999
2021	0.317	-0.069	0.247	-0.373	0.999
2022	0.388	-0.061	0.311	-0.342	0.998
2023	0.248	-0.073	0.199	-0.39	0.999
متوسط	0.278	-0.088	0.214	-0.419	0.999

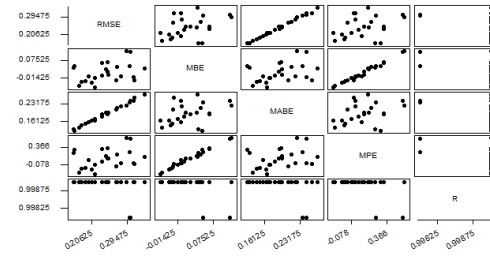
الجدول (15): يوضح قيم مؤشرات الخطأ الإحصائية لتقديرات نموذج آلين المعدل للإشعاع الشمسي بمدينة الزاوية للسنوات (2000-2023).

Year	RMSE (MJ/m ² /day)	MBE (MJ/m ² /day)	MABE (MJ/m ² /day)	MPE (%)	R
2000	0.159	0.001	0.125	0.011	0.999
2001	0.155	-0.002	0.123	-0.015	0.999
2002	0.149	0.004	0.119	0.027	0.999
2003	0.155	-0.003	0.124	-0.021	0.999
2004	0.161	0.002	0.13	0.007	0.999
2005	0.176	0.009	0.137	0.048	0.998
2006	0.152	-0.001	0.123	-0.005	0.999
2007	0.155	-0.002	0.124	-0.015	0.999
2008	0.154	-0.001	0.124	-0.003	0.999
2009	0.157	-0.005	0.127	-0.029	0.999

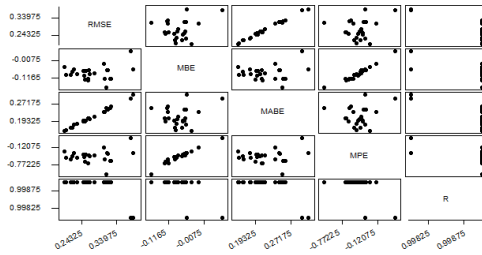
Year	RMSE (MJ/m ² /day)	MBE (MJ/m ² /day)	MABE (MJ/m ² /day)	MPE (%)	R
2010	0.156	-0.002	0.125	-0.01	0.999
2011	0.188	0.005	0.151	0.026	0.999
2012	0.169	0	0.134	-0.001	0.999
2013	0.17	0.001	0.133	0.007	0.999
2014	0.168	0.001	0.132	0.007	0.999
2015	0.171	0.002	0.135	0.014	0.999
2016	0.166	-0.001	0.13	-0.009	0.999
2017	0.152	0.003	0.122	0.014	0.999
2018	0.166	-0.001	0.127	-0.007	0.999
2019	0.168	0.001	0.133	0.004	0.999
2020	0.165	0	0.131	0.001	0.999
2021	0.167	0.003	0.132	0.014	0.999
2022	0.18	-0.006	0.143	-0.031	0.999
2023	0.171	0	0.138	-0.002	0.999



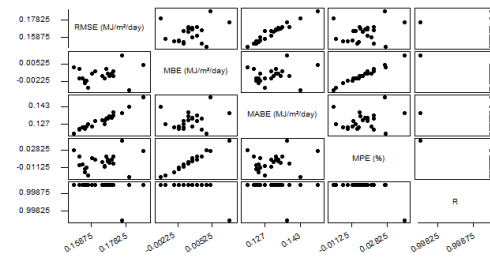
Hargreaves Model



Allen Model



Annandale Model



Modified Allen Model

الشكل (25): يبين توزيع قيم مؤشرات الخطأ الإحصائية لتقديرات نماذج الدراسة للإشعاع الشمسي بمدينة الزاوية للسنوات (2000-2023).

يُعد تحليل مؤشرات الخطأ ومعامل الارتباط أساسياً لتقييم دقة وموثوقية نماذج تقدير الإشعاع الشمسي. فبالنسبة إلى جذر متوسط مربع الخطأ (RMSE)، وهو مقياس لمدى انتشار الأخطاء حول القيم الفعلية، فقد أظهرت الجداول أن نموذج آلين يحقق أقل متوسط لـ RMSE

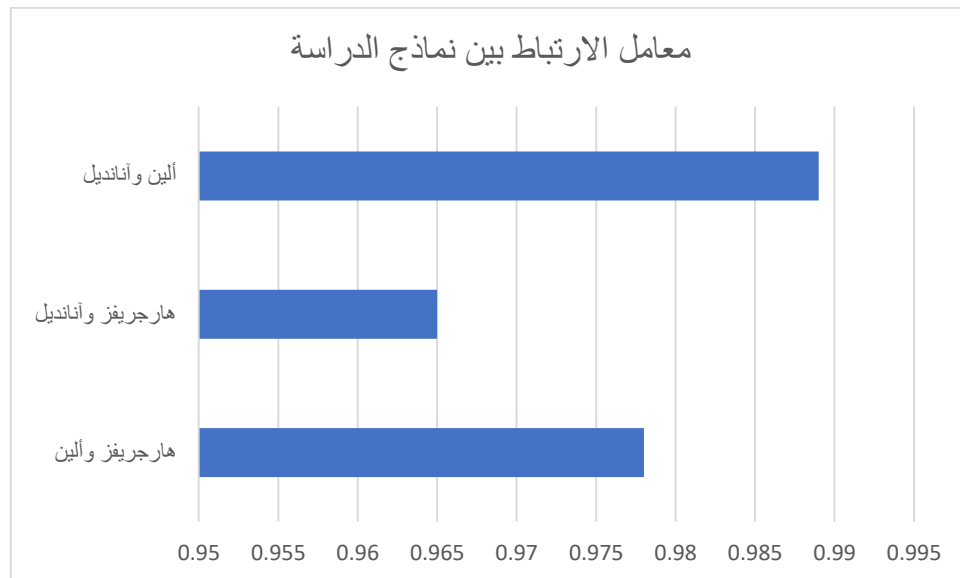
0.278 MJ/m²/day)) مما يجعله الأفضل من حيث الدقة الكلية، يليه نموذج أنانديل (0.278 MJ/m²/day)، في حين يحقق نموذج هارجريفز أعلى متوسط (0.374 MJ/m²/day).

أما متوسط الخطأ (MBE)، الذي يوضح مدى ميل النموذج إلى التقدير الزائد أو الناقص، فقد أظهر أن نموذج آلين يحقق متوسط MBE قريباً من الصفر (0.004 MJ/m²/day)، مما يدل على أنه لا يميل بشكل كبير إلى التقدير الزائد أو الناقص، في حين يميل نموذج هارجريفز إلى التقدير الناقص (-0.027 MJ/m²/day)، ويميل نموذج أنانديل أيضاً إلى التقدير الناقص ولكن بنسبة أكبر (-0.088 MJ/m²/day).

ويعدّ متوسط الخطأ المطلق (MABE) مقياساً لمتوسط حجم الخطأ في التقديرات بغض النظر عن اتجاهه، وقد أظهر أن نموذج آلين يحقق أقل متوسط لـ (0.195 MJ/m²/day)، يليه نموذج أنانديل (0.214 MJ/m²/day)، في حين يحقق نموذج هارجريفز أعلى متوسط لـ (0.300 MJ/m²/day). وبالنسبة إلى متوسط الخطأ النسبي (MPE)، الذي يعكس نسبة الخطأ في التقديرات، فقد أظهر نموذج آلين أنه يحقق متوسط MPE قريباً من الصفر (0.084%)، في حين حقق نموذج هارجريفز متوسط MPE سلبياً (-0.054%)، وميل أكبر للتقدير الناقص في نموذج أنانديل (-0.419%).

أما معامل الارتباط (R)، الذي يقيس قوة العلاقة الخطية بين القيم المقدرة والفعلية، فقد أظهرت جميع النماذج قيماً عالية لـ R (تتراوح بين 0.998 و 0.999)، مما يدل على وجود ارتباط خطي إيجابي قوي بين القيم المقدرة والفعلية لجميع النماذج، ومن ثم، فإن هذا المؤشر لا يعد معياراً حاسماً للمقارنة بين النماذج؛ نظراً لتقارب القيم. وبعد إضافة نموذج آلين المعدل، أظهر التحليل أن هذا النموذج يحقق قيماً منخفضة لمؤشرات الخطأ (MABE، RMSE، MBE، MPE) وقيم معامل ارتباط (R) عالية، مما يؤكد تحسين دقة النموذج. كما أظهر تحليل معامل التحديد (R²) أن جميع النماذج تحقق قيم R² عالية، مما يدل على قدرة النماذج

على تمثيل النمط العام للإشعاع الشمسي، ولكن نموذج آلين المعدل سجل أعلى متوسط لـ R^2 (0.999)، مما يشير إلى أنه يقدم أفضل ملاءمة للبيانات الفعلية. وبشكل عام، فإن تحليل مؤشرات الخطأ ومعامل الارتباط يدعم الاستنتاج بأن نموذج آلين المعدل هو الأفضل في تقديم تقديرات دقيقة وموثوقة للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية.

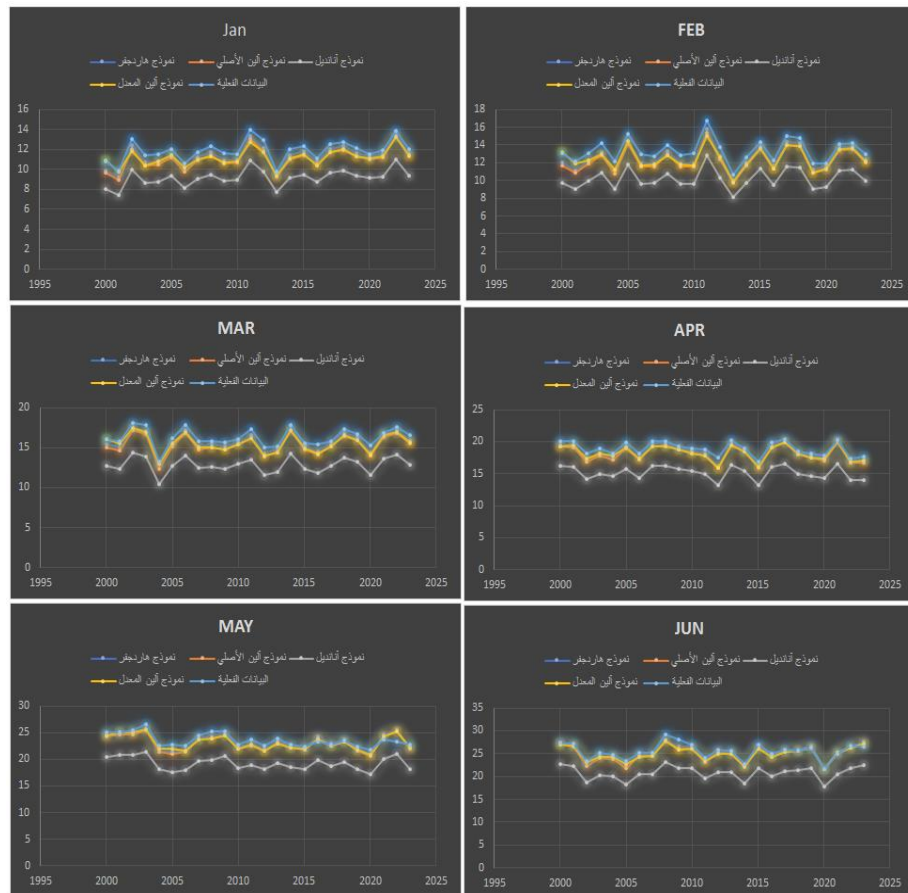


الشكل (26): يبين قيم الارتباط (R^2) بين نماذج تقدير الإشعاع الشمسي الخاصة بالدراسة.

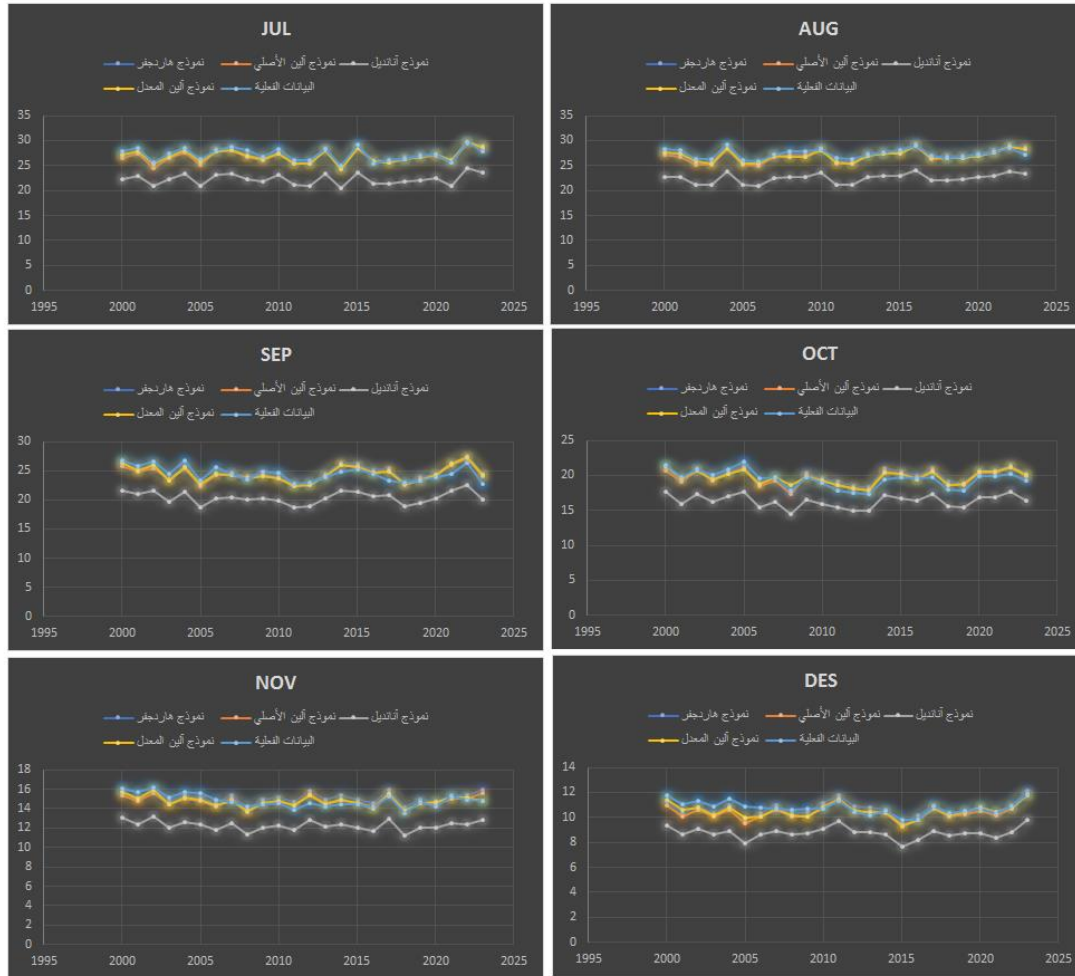
8.4. مقارنة تفصيلية بين النماذج في تقدير الإشعاع الشمسي لمدينة الزاوية:

أظهرت النتائج (الشكل 27، 28)، أن نموذج هارجريفز يميل إلى إعطاء قيم أعلى للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية مقارنة بالنماذج الأخرى، حيث بلغ متوسط الإشعاع الشمسي السنوي المقدر باستخدام نموذج هارجريفز قرابة $18.36 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ في عام 2000م، و $20.07 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ في عام 2022، وبلغت الذروة الشهرية في يوليو 2022 قرابة $29.91 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، وكانت القيم الدنيا في ديسمبر 2015 قرابة $9.55 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، أما نموذج آلين الأصلي، فقد قدم قيمًا متوسطة بين النموذجين الآخرين للإشعاع الشمسي، حيث بلغ متوسط الإشعاع الشمسي السنوي المقدر باستخدام هذا النموذج حوالي $18.08 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ في عام 2022م، وبلغت الذروة الشهرية في يوليو 2022 قرابة $29.44 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، أما القيم الدنيا فقد سجلت في ديسمبر 2015 حيث بلغت $9.28 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ، في حين أظهر نموذج

أنانديل أنه يميل إلى إعطاء قيم أقل للإشعاع الشمسي بشكل عام مقارنة بالنموذجين الآخرين، حيث بلغ متوسط الإشعاع الشمسي السنوي المقدر باستخدام هذا النموذج قرابة 15.21 MJ/m²/day في عام 2000م، و16.56 MJ/m²/day في عام 2022، وسجلت أعلى قيمة شهرية في يوليو 2022 قرابة 24.36 MJ/m²/day ، وأقل قيمة شهرية سجلت في ديسمبر 2015م، حيث بلغت 7.65 MJ/m²/day ، وفي المقابل، قدم نموذج آلين المعدل قيماً أكثر تقارباً مع البيانات الفعلية، حيث تراوح المتوسط السنوي المقدر به حول 19.0 MJ/m²/day ، هذه الأرقام توضح أن هناك فروقاً واضحة في القيم المطلقة بين النماذج، حيث يعطي نموذج هارجريفز القيم الأعلى، ونموذج أنانديل القيم الأقل، ونموذج آلين الأصلي قيماً متوسطة. أما نموذج آلين المعدل فإنه يقدم قيماً أقرب للبيانات الفعلية.



الشكل (27): يبين مقارنة بين تقديرات الإشعاع الشمسي الشهري بمدينة الزاوية للأشهر (من يناير إلى يونيو) بحسب نماذج الدراسة هارجريفز وآلين وأنانديل وآلين المعدل للسنوات (2000-2023).



الشكل (28): يبين مقارنة بين تقديرات الإشعاع الشمسي الشهري بمدينة الزاوية للأشهر (من يوليو إلى ديسمبر) بحسب نماذج هارجريفز وآلين وأنانديل وآلين المعدل للسنوات (2000-2023).

وعلى الرغم من هذه الاختلافات في القيم المطلقة، اتفقت النماذج الأربعة على النمط الموسمي العام للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية، حيث ترتفع القيم تدريجياً خلال فصلي الربيع والصيف لتصل إلى ذروتها في شهري يونيو ويوليو، ثم تنخفض تدريجياً خلال فصلي الخريف والشتاء لتصل إلى أدنى مستوياتها في شهري ديسمبر ويناير. كما أظهرت الدراسة بعض التباينات السنوية الطفيفة في قيم الإشعاع الشمسي المقدرة بين السنوات المختلفة باستخدام النماذج الأربعة، إلا أن هذا التباين لم يكن كبيراً مقارنة بالتباين الموسمي. وقد لوحظ أن القيم السنوية المقدرة باستخدام نموذج أنانديل هي الأقل تذبذباً. وبالإضافة إلى ذلك، بينت الدراسة أن الارتفاع عن سطح البحر يؤثر على قيم الإشعاع الشمسي في نموذجي آلين وأنانديل. ففي

نموذج آلين، يتم حساب معامل تجريبي (Kr) يعتمد على الضغط الجوي المحسوب باستخدام الارتفاع، مما يؤدي إلى قيم متوسطة للإشعاع الشمسي. وفي نموذج أنانديل، يتم حساب معامل تجريبي (a) يعتمد مباشرة على الارتفاع، مما يؤدي إلى قيم أقل للإشعاع الشمسي بشكل عام مقارنة بنموذج هارجريفرز الذي لا يأخذ في الاعتبار الارتفاع. بشكل عام، تؤكد هذه النتائج على الاختلافات بين النماذج الأربعة، وأن نموذج آلين المعدل يقدم تقديرات أقرب إلى القيم الفعلية، مع الأخذ في الاعتبار العوامل المناخية المختلفة.

توضح هذه النتائج وجود اختلافات في القيم المطلقة بين النماذج الأربعة (هارجريفرز، آلين الأصلي، آلين المعدل، وأنانديل) في تقدير الإشعاع الشمسي، مع التأكيد على اتفاقها في النمط الموسمي العام للإشعاع الشمسي. كما تظهر أهمية أخذ الارتفاع في الحسبان عند تقدير الإشعاع الشمسي، حيث إن النماذج التي تأخذ في الحسبان الارتفاع والضغط الجوي (آلين الأصلي والمعدل)، أو الارتفاع فقط (أنانديل)، قد تعطي قيمًا مختلفة مقارنة بنموذج هارجريفرز، الذي لا يأخذ في الاعتبار هذه العوامل، وأن نموذج آلين المعدل يقدم تقديرات أقرب للقيم الفعلية للإشعاع الشمسي.

الجدول (16): يبين مقارنة تفصيلية بين النماذج الثلاثة (هارجريفرز، آلين، وأنانديل) في تقدير الإشعاع الشمسي لمدينة الزاوية.

الجانب	نموذج هارجريفرز	نموذج آلين (الأصلي)	نموذج أنانديل	نموذج آلين (المعدل)
الأساس النظري	يعتمد على الفرق بين درجة الحرارة العظمى والصغرى، معامل تجريبي ثابت (0.19)	يعتمد على الفرق بين درجة الحرارة العظمى والصغرى، معامل تجريبي (Kr) والضغط الجوي	يعتمد على الفرق بين درجة الحرارة العظمى والصغرى، معامل تجريبي (a) والارتفاع	يعتمد على الفرق بين درجة الحرارة العظمى والصغرى، ومعامل تجريبي ثابت (0.2216)
البيانات المدخلة	درجة الحرارة العظمى والصغرى	درجة الحرارة العظمى والصغرى، الارتفاع	درجة الحرارة العظمى والصغرى، الارتفاع	درجة الحرارة العظمى والصغرى
البساطة	بسيط جدًا	متوسط	متوسط	متوسط
الدقة	دقة محدودة، قد لا تكون دقيقة في المناطق ذات الظروف المتغيرة	دقة متوسطة، أكثر دقة من نموذج هارجريفرز بفضل أخذ الضغط الجوي في الحسبان	دقة متوسطة، قد تكون أكثر دقة في المناطق ذات الارتفاعات المختلفة	دقة عالية، قريبة للبيانات الفعلية

الجانب	نموذج هارجريفز	نموذج آلين (الأصلي)	نموذج أنانديل	نموذج آلين (المعدل)
مراعاة العوامل الأخرى	لا يأخذ في الاعتبار العوامل الأخرى (الرطوبة، الغيوم، الخ).	لا يأخذ في الاعتبار العوامل الأخرى (الرطوبة، الغيوم، الخ).	لا يأخذ في الاعتبار العوامل الأخرى (الرطوبة، الغيوم، الخ).	لا يأخذ في الاعتبار العوامل الأخرى (الرطوبة، الغيوم، الخ).
القيم المطلقة	يميل إلى إعطاء قيم أعلى للإشعاع الشمسي بشكل عام	يعطي قيمًا متوسطة بين النموذجين الآخرين	يميل إلى إعطاء قيم أقل للإشعاع الشمسي بشكل عام	يقدم قيمًا أقرب إلى القيم الفعلية
النمط الموسمي	يتفق مع النماذج الأخرى على النمط الموسمي العام (ذروة في الصيف، انخفاض في الشتاء)	يتفق مع النماذج الأخرى على النمط الموسمي العام (ذروة في الصيف، انخفاض في الشتاء)	يتفق مع النماذج الأخرى على النمط الموسمي العام (ذروة في الصيف، انخفاض في الشتاء)	يتفق مع النماذج الأخرى على النمط الموسمي العام (ذروة في الصيف، انخفاض في الشتاء)
التباين السنوي	يظهر تباينًا سنويًا طفيفًا	يظهر تباينًا سنويًا طفيفًا	يظهر تباينًا سنويًا طفيفًا	يظهر تباينًا سنويًا طفيفًا
تأثير الارتفاع	لا يأخذ في الاعتبار تأثير الارتفاع	يأخذ في الاعتبار تأثير الارتفاع باستخدام الضغط الجوي	يأخذ في الاعتبار تأثير الارتفاع بشكل مباشر	يأخذ في الاعتبار تأثير الارتفاع
المتوسط السنوي للإشعاع الشمسي (MJ/m ² /day)	تتراوح المتوسطات بين 17 - 20	تتراوح المتوسطات بين 17 - 20	تتراوح المتوسطات بين 14 - 17	يتركز حول 19.0
الاستخدامات المناسبة	تقديرات أولية، بيانات درجة الحرارة فقط	مناطق ذات ارتفاعات مختلفة، بيانات درجة الحرارة والارتفاع	مناطق ذات ارتفاعات مختلفة، بيانات درجة الحرارة والارتفاع	تقديرات أكثر دقة وقربًا للبيانات الفعلية

9.4. تطوير وتقييم معادلة آلين المعدلة وأثرها على نتائج التقدير:

هدفت هذه الدراسة إلى تطوير وتقييم أداء ثلاثة نماذج تجريبية لتقدير الإشعاع الشمسي اليومي في مدينة الزاوية، وهي: نموذج "هارجريفز" الذي يعتمد على بيانات درجة الحرارة فقط، ونموذج "أنانديل" الذي يعتمد على الارتفاع عن سطح البحر بالإضافة إلى درجة الحرارة، ونموذج "آلين" الذي تم تعديله في هذه الدراسة باستخدام قيمة ثابتة (0.2216) للمعامل التجريبي

Kr ، مع الإبقاء على اعتماده على بيانات درجة الحرارة. وبعد تطبيق هذه النماذج على البيانات المناخية لمدينة الزاوية للفترة (2000-2023) وإجراء تحليل إحصائي لتقييم دقة كل نموذج، أظهرت النتائج أن نموذج آلين المعدل، باستخدام قيمة Kr المعدلة، قدم أفضل أداء من حيث الدقة والاستقرار، حيث سجل أقل قيم لمؤشرات الخطأ (RMSE، MABE، MBE)، وكان متوسط الخطأ النسبي (MPE) قريباً من الصفر، مما يشير إلى أن تقديراته قريبة من البيانات الفعلية، وتقلل من التحيز والأخطاء. كما أظهر تحليل التباين السنوي أن نموذج آلين المعدل يتميز بتقديم تقديرات أكثر استقراراً للإشعاع الشمسي، مع تذبذب أقل في القيم المقدرة على المدى الطويل مقارنة بالنماذج الأخرى، كما أكدت قيم معامل التحديد R^2 العالية أن النموذج المعدل يقدم ملاءمة ممتازة للبيانات الفعلية، وأن استخدام قيمة ثابتة لـ Kr (0.2216) أدى إلى تحسين دقة النموذج في تمثيل التغيرات السنوية للإشعاع الشمسي. وعلى الرغم من أن النماذج الثلاثة الأصلية أظهرت توافقاً مع النمط الموسمي للإشعاع الشمسي، إلا أن نموذج آلين المعدل تميز بأدائه المتفوق في تقديم تقديرات أقرب للبيانات الفعلية للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية.

10.4. مقارنة الإشعاع الشمسي المقدر بالنماذج مع بيانات TerraClimate:

1.10.4. مقارنة النمط الموسمي للإشعاع الشمسي المقدر والفعلي:

أظهرت النماذج الثلاثة الأصلية (هارجريفز، آلين، وأنانديل) توافقاً واضحاً مع بيانات TerraClimate في النمط الموسمي للإشعاع الشمسي بمدينة الزاوية، فجميعها تُظهر أن القيم تبلغ ذروتها في أشهر الصيف (يونيو ويوليو)، وتنخفض إلى أدنى مستوياتها في أشهر الشتاء (ديسمبر ويناير)، وهذا التوافق يؤكد أن النماذج الثلاثة قادرة على التقاط الاتجاه الموسمي العام للإشعاع الشمسي، حيث تعكس البيانات الفعلية من TerraClimate نمطاً مشابهاً، إذ تبلغ فيها قيم الإشعاع الشمسي ذروتها في الصيف وتنخفض في الشتاء. وبعد إجراء تعديل على نموذج آلين باستخدام قيمة ثابتة جديدة للمعامل التجريبي Kr، أظهر النموذج المعدل أيضاً هذا النمط

الموسمي، مع الحفاظ على التوافق مع البيانات الفعلية، بل وتحسين دقة القيم المقدرة للإشعاع الشمسي خلال العام.

2.10.4. مقارنة القيم المقدرة للإشعاع الشمسي بين النماذج والبيانات الفعلية:

تختلف النماذج الثلاثة الأصلية (هارجريفز، آلين، وأنانديل) في القيم المطلقة التي تقدرها للإشعاع الشمسي، فـنموذج هارجريفز يميل إلى تقدير قيم أعلى بشكل عام، حيث يتراوح متوسط الإشعاع الشمسي السنوي المقدر به بين 18.15 و 20.33 MJ/m²/day، في حين يقدم نموذج أنانديل قيمًا أقل، تتراوح بين 14 و 17 MJ/m²/day، في حين يقدم نموذج آلين الأصلي قيمًا متوسطة تتراوح بين 17 و 20 MJ/m²/day. أما بالنسبة إلى نموذج آلين المعدل، فإنه يقدم قيمًا مقدرة أقرب للقيم الفعلية بعد تعديل قيمة المعامل التجريبي Kr، حيث يتراوح متوسط الإشعاع الشمسي السنوي المقدر به حول قيمة 19.0 MJ/m²/day، وهي قريبة من متوسط البيانات الفعلية من TerraClimate، والتي يبلغ متوسطها السنوي قرابة 19.3 MJ/m²/day، وعند مقارنة القيم الشهرية، يتضح أن نموذج هارجريفز يميل إلى تقديم قيم أعلى في المتوسط خلال جميع الأشهر، وخاصة في الصيف، وأن نموذج أنانديل يميل إلى تقديم قيم أقل بشكل عام، في حين نموذج آلين الأصلي يقدم قيمًا متوسطة. أما نموذج آلين المعدل، فإنه يعطي قيمًا أقرب إلى القيم الفعلية، ويظهر تقاربًا أكبر مع البيانات الفعلية في جميع الأشهر.

3.10.4. التغيرات السنوية:

النماذج: تظهر اختلافات طفيفة بين السنوات المختلفة في قيم الإشعاع الشمسي. بيانات TerraClimate: تظهر اختلافات مماثلة بين السنوات في البيانات الفعلية. وهذا يشير إلى أن النماذج قادرة على التقاط بعض التباينات السنوية للإشعاع الشمسي.

4.10.4. التغيرات السنوية في الإشعاع الشمسي:

تُظهر النماذج الثلاثة الأصلية (هارجريفز، آلين، وأنانديل) اختلافات طفيفة في قيم الإشعاع الشمسي المقدرة بين السنوات المختلفة، وتعكس بيانات TerraClimate الفعلية اختلافات مماثلة بين السنوات في البيانات الفعلية، هذا يشير إلى أن النماذج الثلاثة قادرة على التقاط بعض التباينات السنوية للإشعاع الشمسي. وبالإضافة إلى ذلك، أظهر نموذج آلين المعدل، بعد تعديل قيمة المعامل التجريبي K_r ، اختلافات طفيفة مماثلة بين السنوات في قيم الإشعاع الشمسي المقدرة، مما يدل على قدرة هذا النموذج أيضًا على التقاط التباينات السنوية في الإشعاع الشمسي، مع الحفاظ على دقة قريبة من البيانات الفعلية.

5.10.4. المتوسط السنوي للإشعاع الشمسي:

تتراوح تقديرات المتوسط السنوي للإشعاع الشمسي بين النماذج الثلاثة الأصلية، حيث يقدر نموذج هارجريفز متوسطًا سنويًا يتراوح بين 17 و 20 ميجا جول/متر مربع/يوم، ويقدر نموذج آلين متوسطًا سنويًا يتراوح بين 17 و 20 ميجا جول/متر مربع/يوم، في حين يقدر نموذج أنانديل متوسطًا سنويًا يتراوح بين 14 و 28 ميجا جول/متر مربع/يوم. أما البيانات الفعلية من TerraClimate، فتشير إلى متوسط سنوي يقارب 19.3 ميجا جول/متر مربع/يوم. وبعد التعديل، يقدم نموذج آلين قيمًا أقرب إلى المتوسط الفعلي، حيث يتراوح متوسطه السنوي حول 19 MJ/m²/day. وهذا يشير إلى أن نموذجي هارجريفز وآلين الأصليين يعطيان متوسطات سنوية قريبة من قيم البيانات الفعلية، في حين يميل نموذج أنانديل إلى تقدير قيم أقل. أما نموذج آلين المعدل، فإنه يقدم متوسطات سنوية أكثر قربًا إلى القيم الفعلية.

6.10.4. دقة النماذج في تقدير الإشعاع الشمسي:

يُعدّ نموذج آلين بعد تعديله باستخدام قيمة ثابتة لـ K_r هو الأدق من بين النماذج المستخدمة، مما يساهم في تقديم تقديرات أكثر دقة، كما أنه أظهر القيم الأقرب للبيانات الفعلية بعد التعديل. في حين يُعدّ نموذج هارجريز الأقل دقة، ولكنه يظل مناسبًا لتقديم تقدير سريع للإشعاع الشمسي. أما نموذج أنانديل، فهو جيد في تقدير الإشعاع الشمسي، ولكنه يميل إلى تقديم قيم أقل من القيم الفعلية. وتجدر الإشارة إلى أن جميع النماذج هي نماذج تقريبية، وقد تختلف دقتها في مناطق أخرى.

11.4. مناقشة النتائج:

أظهرت نتائج الدراسة توافقًا ملحوظًا بين النماذج الثلاثة (هار جريز، آلين، وأنانديل) في تحديد النمط الموسمي العام للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية، فقد اتفقت جميع النماذج على أن قيم الإشعاع الشمسي ترتفع تدريجيًا خلال فصلي الربيع والصيف، لتصل إلى ذروتها في شهري يونيو ويوليو، ثم تنخفض تدريجيًا خلال فصلي الخريف والشتاء؛ لتسجل أدنى مستوياتها في شهري ديسمبر ويناير. هذا التوافق يعزز من ثقة الباحث في قدرة النماذج على تمثيل التغيرات الموسمية للإشعاع الشمسي في المنطقة بدقة، ويعزى هذا النمط الموسمي بشكل أساسي إلى التغيرات الدورية في زاوية ميل الشمس وطول النهار خلال العام، مما يؤثر بشكل مباشر على كمية الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض (Iqbal, 1983). ويتفق هذا النمط مع دراسات سابقة أجريت في مناطق مماثلة مناخيًا، وأشارت إلى أن كمية الإشعاع الشمسي الواصل إلى سطح الأرض تبلغ ذروتها خلال أشهر الصيف وتنخفض خلال أشهر الشتاء (Duffie & Beckman, 2013; النعاس، 2020). وقد أظهرت دراسات أخرى في مناطق مختلفة نتائج مماثلة، ففي شمال السودان، رصدت دراسة Mohamme & Guo (2016) نمطًا موسميًا مشابهًا للإشعاع الشمسي، حيث بلغت قيمته القصوى خلال أشهر

الصيف، وانخفضت بشكل ملحوظ في الشتاء. وفي مصر، توصلت دراسة El-Metwally (2005) إلى نفس النمط الموسمي للإشعاع الشمسي. هذه النتائج المتعددة تؤكد على أن زاوية سقوط الشمس وطول النهار هما العاملان الرئيسيان اللذان يؤثران على التباين الموسمي للإشعاع الشمسي، وهذا الاختلاف الكبير بين قيم الإشعاع الشمسي خلال فصول السنة يؤكد على أهمية أخذ هذا التباين الموسمي في الاعتبار عند تصميم أنظمة الطاقة الشمسية، وذلك لضمان استدامة الإمداد بالطاقة، وتقليل الحاجة إلى المصادر الاحتياطية خلال أشهر الشتاء.

تشير نتائج هذه الدراسة إلى أن نموذج "أنانديل" يقدم تقديرات أكثر اتساقًا وثباتًا للإشعاع الشمسي السنوي في مدينة الزاوية مقارنة بنموذج هارجريفز، مما يجعله موثوقًا به بشكل خاص للتطبيقات التي تتطلب دقة عالية على المدى الطويل، مثل تصميم محطات الطاقة الشمسية. ويعزى هذا الاستقرار النسبي في نموذج "أنانديل" إلى أنه يأخذ في الاعتبار عوامل مناخية إضافية، مثل الارتفاع عن سطح البحر، إلى جانب درجة الحرارة، مما يقلل من تأثير التقلبات في درجة الحرارة على التقديرات النهائية. وبالمقابل، فقد أظهر نموذج آلين المعدل استقرارًا كبيرًا أيضًا مع قيم تباين منخفضة، مما يؤكد على أن تعديل قيمة المعامل التجريبي K_r ساهم في تحسين استقراره على المدى الطويل. وتتفق هذه النتائج مع دراسات سابقة أكدت على أهمية تضمين متغيرات مناخية إضافية لتحسين دقة تقديرات الإشعاع الشمسي (Thallapalli & Prasanna., 2022)، حيث أظهرت تلك الدراسات أن النماذج التي تعتمد على متغيرات مناخية متعددة، مثل الارتفاع أو الضغط الجوي، تميل إلى تقديم تقديرات أكثر استقرارًا. وعلاوة على ذلك، فقد أشارت دراسة (Prieto & García (2022 إلى أن نموذج Prieto يقدم أفضل النتائج في المنطقة الساحلية شمال إسبانيا، يليه نموذج Hargreaves and Samani، ثم

نموذج Annandale، وجميعها تتفوق على النماذج الأخرى التي تمت دراستها، مما يؤكد أهمية اختيار النموذج المناسب الذي يتلائم مع الظروف المناخية للمنطقة.

يُعد التباين في دقة النماذج ليس مجرد اختلاف رقمي، بل له آثار عملية كبيرة على تصميم أنظمة الطاقة الشمسية وكفاءتها. فالاعتماد على نموذج يقلل من تقدير الإشعاع الشمسي، كما يفعل نموذج أنانديل، قد يؤدي إلى تصميم أنظمة طاقة شمسية غير كافية لتلبية الاحتياجات الفعلية، مما يؤكد على ضرورة اختيار النموذج المناسب بناءً على دقة البيانات المطلوبة والتطبيق العملي. أما الاعتماد على نموذج يقدم تقديرات زائدة، كما يفعل نموذج هارجريفز، فقد يؤدي إلى تصميم أنظمة أكبر من اللازم، ومن ثم زيادة التكلفة من دون فائدة حقيقية. وقد أظهرت النتائج أن نموذج آلين المعدل، بعد تعديل قيمة المعامل التجريبي K_r ، يقدم تقديرات أقرب للقيم الفعلية، مما يجعله خيارًا أكثر موثوقية في تصميم أنظمة الطاقة الشمسية في مدينة الزاوية. هذه الاختلافات في دقة النماذج تتفق مع نتائج دراسات سابقة قارنت بين نماذج مختلفة، كما في دراسة (Tidjani et al. (2022)، التي شددت على أهمية قياس وتقدير الطاقة الشمسية بدقة لتصميم وتنفيذ مشاريع الطاقة الشمسية، وأهمية تحديد إمكاناتها في مختلف المناطق. كما تدعمها دراسات حديثة مثل دراسة (Zhang et al. (2021) التي أوضحت أن النماذج التي تأخذ في الاعتبار العوامل المناخية المتعددة تعطي تقديرات أكثر دقة، مقارنة بالنماذج التي تعتمد على متغير واحد، كما أن الدراسات التي أجراها (El-Metwally (2005 و (Hassan et al. (2016 أشارت إلى أهمية النماذج التي تأخذ في الاعتبار متغيرات متعددة مثل درجة الحرارة والرطوبة لتقدير الإشعاع الشمسي بشكل دقيق.

وبينت نتائج الدراسة الحالية أن معالجة تأثير الارتفاع عن سطح البحر ميزة مهمة في نمذجي "آلين" (الأصلي والمعدل) و"أنانديل" مقارنة بنموذج "هارجريفز"، حيث أظهرت الدراسة

أن قيم المعاملات التجريبية في نموذجي "آلين" (الأصلي) و"أنانديل" تتغير بسبب تأثير الارتفاع عن سطح البحر. مما يعكس واقعية أكبر في تقدير الإشعاع الشمسي في المناطق ذات الارتفاعات المختلفة. فنموذج "آلين" الأصلي يستخدم معاملًا تجريبيًا (K_r)، يعتمد على الضغط الجوي المحسوب باستخدام الارتفاع، مما يؤدي إلى قيم أكثر دقة للإشعاع الشمسي في المناطق ذات الارتفاعات المتباينة. وبعد تعديل قيمة المعامل التجريبي (K_r) في نموذج آلين ليصبح ثابتًا (0.2216) استنادًا إلى البيانات الفعلية للإشعاع الشمسي، استمر النموذج المعدل في تقديم تقديرات جيدة. أما نموذج "أنانديل"، فيستخدم معاملًا تجريبيًا (a)، يعتمد بشكل مباشر على الارتفاع، مما يقلل من قيم الإشعاع الشمسي المقدرة بشكل عام مقارنة بنموذج "هارجريفز". وتؤكد هذه النتائج على أهمية أخذ الارتفاع في الحسبان عند تقدير الإشعاع الشمسي، خاصة في المناطق التي تتفاوت فيها التضاريس، كما هو الحال في مدينة الزاوية. وتتفق هذه النتيجة مع دراسات سابقة أشارت إلى أن الارتفاع عن سطح البحر يؤثر على دقة نماذج تقدير الإشعاع الشمسي (Jahani et al., 2017; El-Sebaei et al., 2010). وقد أيدت دراسة حديثة أجراها Ali et al. (2024) هذه النتيجة، حيث أكدت على ضرورة تضمين تأثير الارتفاع في النماذج لزيادة دقتها. كما دعمت دراسات سابقة استخدام الضغط الجوي في نماذج تقدير الإشعاع الشمسي (مثل نموذج آلين الأصلي)، وذلك لتحسين دقتها (Reddy et al., 2018; Hassan et al., 2016).

وأخيراً، أظهرت مقارنة تقديرات النماذج الثلاثة الأصلية (هارجريفز، آلين، وأنانديل) مع البيانات الفعلية من TerraClimate اتفاقاً عاماً في النمط الموسمي للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية. بالإضافة إلى ذلك، أظهر تحليل مؤشرات الخطأ أن نموذج آلين المعدل حقق أفضل أداء في تقدير الإشعاع الشمسي، حيث سجل أقل قيم لمؤشرات الخطأ

(MPE, MBE, MABE, RMSE)، مما يشير إلى أن تقديراته أقرب إلى القيم الفعلية مع تقليل التحيز والأخطاء. (Jahani *et al.*, 2017; El-Nouby, 2010). وفيما يخص تحليل الارتباط، فقد أظهرت جميع النماذج قيمًا عالية لمعامل التحديد (R^2)، مما يدل على وجود علاقة خطية قوية بين التقديرات والبيانات الفعلية (كما ذكر في تحليل نتائج معادلات الانحدار للمقارنة بين النماذج)، ولكن نموذج آلين المعدل سجل أعلى متوسط لـ (R^2 0.999)، مؤكدًا بذلك أنه الأقرب لتمثيل العلاقة بين القيم المقدرة والفعلية للإشعاع الشمسي، وهذا يتفق مع دراسات أخرى أكدت أهمية معامل الارتباط R^2 في تقييم دقة نماذج الإشعاع الشمسي (Despotovic *et al.*, 2016; Wong & Chow, 2001; Thallapalli & Prasanna, 2022). وبشكل عام، فإن هذه المؤشرات تدعم الاستنتاج بأن نموذج آلين المعدل هو الأفضل في تمثيل البيانات الفعلية للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية من بين النماذج الثلاثة الأصلية والنموذج المعدل.

الفصل الخامس

الاستنتاجات والتوصيات

5. الاستنتاجات والتوصيات (Chapter 5: Conclusions and Recommendations)

1.5. الاستنتاجات:

هدفت هذه الدراسة إلى تقدير الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية الليبية وتقييم أداء ثلاثة نماذج رياضية تجريبية شائعة هي: "هارجريفز"، و"آلين"، و"أنانديل". وقد تم تطبيق هذه النماذج إلى جانب نموذج آلين المعدل على بيانات مناخية شهرية للمدينة للفترة (2000-2023)، مع إجراء تحليل إحصائي لتقييم دقة كل نموذج، وذلك في ظل تزايد الاهتمام بالطاقة الشمسية كمصدر متجدد ومستدام. أظهرت النتائج أن جميع النماذج الأربعة قادرة على التقاط النمط الموسمي العام للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية، حيث تتذبذب القيم بشكل واضح مع ارتفاعها في أشهر الصيف، وانخفاضها في أشهر الشتاء. إلا أن النماذج اختلفت في تقدير القيم المطلقة، حيث أعطى نموذج "هارجريفز" قيمًا أعلى بشكل عام، في حين أعطى نموذج "أنانديل" قيمًا أقل، وقدم نموذج "آلين" الأصلي قيمًا متوسطة بينهما. أما بعد تعديل نموذج "آلين" باستخدام قيمة ثابتة للمعامل التجريبي K_r ، فقد قدم النموذج المعدل تقديرات أقرب إلى البيانات الفعلية. ومن حيث الدقة والاستقرار، فقد أظهر نموذج "آلين" المعدل أفضل أداء، حيث سجل أقل قيم لمؤشرات الخطأ ($RMSE$ ، $MABE$ ، MBE)، وكان متوسط الخطأ النسبي (MPE) قريبًا من الصفر، في حين أظهر نموذج "أنانديل" استقرارًا نسبيًا في التقديرات السنوية للإشعاع الشمسي، وأظهر نموذج "هارجريفز" أقل استقرارية. وقد أظهر تحليل الانحدار المتعدد أن نموذج "آلين" يساهم بنسبة أكبر (0.75) في تفسير تباين تقديرات نموذج "أنانديل" مقارنة بنموذج "هارجريفز" (0.20). وبناءً على هذه النتائج، يمكن استنتاج أن نموذج "آلين" المعدل يُعدّ الأفضل لتقدير الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية، بالنظر إلى دقة تقديراته وقدرته على تمثيل التغيرات الموسمية والسنوية للإشعاع الشمسي بشكل دقيق، وقربه من البيانات الفعلية. وعلى الرغم من

ذلك، فإن النماذج الثلاثة الأصلية يُعدّ أدوات مفيدة لتقدير الإشعاع الشمسي في المناطق التي تقتقر إلى البيانات المباشرة، مع التأكيد على أهمية اختيار النموذج الأنسب للظروف المناخية المحلية، وعلى أهمية استخدام المؤشرات الإحصائية لتقييم دقة النماذج المستخدمة.

2.5. التوصيات:

بناءً على نتائج هذه الدراسة وتحليلها، يوصي الباحث بما يأتي:

1. استنادًا إلى نتائج الدراسة، يُوصى باعتماد نموذج "آلين" المعدل، كنموذج أساسي لتقدير الإشعاع الشمسي اليومي في مدينة الزاوية، وذلك نظرًا لأدائه الأفضل من حيث الدقة والاستقرار، مقارنةً بنموذجي "هارجريفز" و"أنانديل" والنموذج الأصلي لـ"آلين"، مع الأخذ في الاعتبار أن النموذج المعدل قدم تقديرات أكثر قربًا للبيانات الفعلية. ويجب أن يراعي المستخدمون قيم المتوسطات السنوية والشهرية التي يقدمها النموذج في تخطيط وتنفيذ مشاريع الطاقة الشمسية.
2. تضمين متغيرات مناخية إضافية في النماذج: لتحسين دقة التقديرات، يُوصى بإضافة متغيرات مناخية أخرى إلى النماذج المستخدمة، مثل الرطوبة النسبية، والغطاء السحابي، خاصة عند توفر هذه البيانات. كما أن استخدام نماذج تأخذ في الاعتبار تأثير الأيروسولات والغازات الجوية قد يحسن من دقة التقديرات.
3. إجراء دراسات مستقبلية باستخدام نماذج أكثر تعقيدًا: يُوصى بإجراء دراسات مستقبلية باستخدام نماذج رياضية أكثر تعقيدًا، مثل النماذج التي تعتمد على بيانات الأقمار الصناعية أو تقنيات الذكاء الاصطناعي، وذلك لتقييم أداء هذه النماذج في تقدير الإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية، ومقارنتها بالنماذج التجريبية المستخدمة في هذه الدراسة.
4. إنشاء محطات قياس للإشعاع الشمسي: يُوصى بإنشاء محطات قياس مباشرة للإشعاع الشمسي في مدينة الزاوية والمناطق المجاورة، وذلك لتوفير بيانات دقيقة وموثوقة للإشعاع

الشمسي، والتي يمكن استخدامها لتقييم النماذج الرياضية وتطويرها، ولتحسين التخطيط لمشاريع الطاقة الشمسية في المنطقة.

5. تطوير دليل إرشادي لاختيار النماذج: يُوصى بتطوير دليل إرشادي للمهندسين والمخططين في قطاع الطاقة الشمسية، وذلك لمساعدتهم على اختيار النماذج المناسبة لتقدير الإشعاع الشمسي، بناءً على الظروف المحلية والبيانات المتاحة، مع الأخذ في الاعتبار دقة النماذج ومتطلبات التطبيق المحدد.

جدول (17): يعرض مقارنة بين متوسط قيم الاشعاع الشمسي السنوي لكل نموذج (هارجيرفز-انانديل-الين-الين المعدل) بوحدة (ميغا جول لكل متر مربع في اليوم) وقيم

متوسط الاشعاع الشمسي السنوي الفعليه من بيانات TERRACLIMATE لمدينة
الزاوية من العام 2000 الى 2023:-

الاشعاع الشمسي السنوي الفعلي	نموذج الين المعدل	نموذج الين	نموذج انانديل	نموذج هارجيرفز	السنة
19.2	19.2	17.5	16.5	18.36	2000
18.8	18.8	17.2	16.2	18.15	2001
19.4	19.3	19.4	18.3	19.8	2002
19.1	19.1	17.9	16.8	19.1	2003
19.3	19.3	18.6	17.6	19.24	2004
19.4	19.3	19.2	18.1	19.03	2005
19	19	18.2	17.2	19.31	2006
19.3	19.2	18.9	17.9	19.7	2007
19.5	19.5	18.4	17.5	19.6	2008
19.3	19.2	18	17	19.37	2009
19.2	19.2	18.7	17.7	19.7	2010
19.5	19.4	19.5	18.5	20.33	2011
19	18.9	19	18	19.63	2012
19.1	19	17.6	16.6	19.1	2013
19.4	19.3	18.4	17.4	19.6	2014
19.2	19.2	19.1	18.1	19.8	2015
19	18.9	18.3	17.4	19.5	2016
19.4	19.4	18.7	17.7	20.07	2017
19.1	19.1	18.1	17.1	19.97	2018
19	19	18.2	17.3	19.58	2019
19	19	18.8	17.9	19.17	2020
19	19	19.6	18.6	20.25	2021
19.9	19.9	19.5	18.5	20.07	2022
19.4	19.3	18.5	17.5	19.8	2023

المراجع:

- المراجع العربية
- المراجع الأجنبية
- المواقع الالكترونية

6. المراجع (Chapter 6: References)

1.6. المراجع العربية:

الصواني، سهيلة الطاهر جمعة. (2019). الطاقة الشمسية في ليبيا. مجلة كليات التربية، العدد

14، ص 268-280. <https://dspace.zu.edu.ly/handle/1/364>

الطباخ، يوسف أبوعيسى عبد الحميد. (2002). مقارنة الإشعاع الشمسي المقاس مع المحسوب

لسطح أفقي وآخر مائل لمدينة طرابلس، رسالة ماجستير في الفيزياء، جامعة طرابلس.

قلية، منصور علي. (2017). إمكانية استخدام الطاقة الشمسية في ليبيا دراسة في جغرافية

الخدمات. مجلة كليات التربية، كلية التربية بجامعة الزاوية، العدد التاسع، ص 231-239.

منصور، فتحية أبوراوي إشتيوي (2023). مقومات تنمية الطاقة الخضراء في ليبيا وتحدياتها.

مجلة ليبيا للدراسات الجغرافية، العدد الرابع. ص 247-278.

المؤسسة الليبية للاستثمار. (2023). تقييم الفرص المتاحة في مجال الطاقات المتجددة. بوابة

الوسط.

النعاس، جمال سالم (2020). الطاقات المتجددة في ليبيا دراسة للطاقة الشمسية، مجلة جامعة

سرت العلمية (العلوم الإنسانية)، المجلد 10، العدد 1، ص 193-225.

2.6. المراجع الأجنبية:

Ahmad, L., Biswas, A., Warland, J., & Anjum, I. (2023). Atmospheric

Pressure and Solar Radiation. In Climate Change and

Agrometeorology (pp 37-50). Springer,

Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-4863-5_3

Ali, M. A., Elsayed, A., Elkabani, I., Youssef, M. E., & Hassan, G. E.

(2024). Modeling global solar radiation using ambient

- temperature. *Cleaner Energy Systems*, 7, 100101. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100101>
- Allen, R. G. (1997).** Self-calibrating method for estimating solar radiation from air temperature. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2(2), 56–67. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(1997\)2:2\(56\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(1997)2:2(56))
- Almaktar, M., & Shaaban, M. (2021).** Prospects of renewable energy as a non-rivalry energy alternative in Libya. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110852. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110852>
- Almaktar, M., & Shaaban, M. (2021).** Prospects of renewable energy as a non-rivalry energy alternative in Libya. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 143, 110852. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110852>
- Alsamamra, H. (2019).** Estimation of global solar radiation from temperature extremes: A case study of Hebron City, Palestine. *Journal of Energy and Natural Resources*, 8(1), 1-5.
- Ang, T.-Z., Salem, M., Kamarol, M., Das, H. S., Nazari, M. A., & Prabakaran, N. (2022).** A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43, 100939. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>
- Ang, T.-Z., Salem, M., Kamarol, M., Das, H. S., Nazari, M. A., & Prabakaran, N. (2022).** A comprehensive study of renewable energy sources: Classifications, challenges and suggestions. *Energy Strategy Reviews*, 43, 100939. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100939>
- Annandale, J. G., Jovanic, N. Z., Benade, N., & Allen, R. G. (2002).** Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Irrigation Science*, 21(2), 57–67. <https://doi.org/10.1007/s002710100047>
- Besharat, F., Dehghan, A. A., & Faghieh, A. R. (2013).** Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case

- study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21, 798–821. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.009>
- Boottarat, T., Wuttiornpun, T., & Suthisrisawat, W. (2024).** Enhancement of solar radiation prediction using air quality data based on machine learning algorithms. *Energy Reports*, 10, 1416-1430. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.12.120>
- Bowditch, N. (2011).** The American practical navigator: An epitome of navigation. National Imagery and Mapping Agency.
- Bremner, S. (2009).** ELEG620: Solar Electric Systems [Lecture notes]. University of Delaware, ECE.
- Bristow, K. L., & Campbell, G. S. (1984).** On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 31(2), 159-166.
- Collares-Pereira, M., & Rabl, A. (1979).** The Average Distribution of Solar Radiation: Correlations between Diffuse and Hemispherical and between Daily and Hourly Insolation Values. *Solar Energy*, 22(2), 155-164. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(79\)90100-2](https://doi.org/10.1016/0038-092X(79)90100-2)
- Comert, M. M., Adem, K., & Erdogan, M. (2023).** Comparative analysis of estimated solar radiation with different learning methods and empirical models. *Atmósfera*, 37(1), 273–284. <https://doi.org/10.20937/ATM.53084>
- Delibasic, T. (2019).** Estimating beam and diffuse solar irradiance components using multiple solar irradiance meters [Master's thesis, University of Applied Sciences Technikum Wien]. UAS Technikum Wien.
- Despotovic, M., Nedic, V., Despotovic, D., & Cvetanovic, S. (2016).** Evaluation of empirical models for predicting monthly mean horizontal diffuse solar radiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 246-260. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.058>

- Dire, J. (2024).** The Sun. In Exploring the Universe (The Patrick Moore Practical Astronomy Series). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-65346-9_7
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013).** Solar engineering of thermal processes (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Ekici, C., & Teke, I. (2018).** Developing a new solar radiation estimation model based on Buckingham theorem. Results in Physics, 9, 263-269. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.02.044>
- El-Metwally, M. (2005).** Sunshine and global solar radiation estimation at different sites in Egypt. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 67(14), 1331-1342. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2005.04.012>
- Elmnifi, M., Khaleel, M., Vambol, S., & Yeremenko, S. (2024).** Ensuring sustainability in Libya with renewable energy and pumped hydro storage. Ecological Questions, 35(2), 1-17. <https://doi.org/10.12775/EQ.2024.036>
- El-Nouby, A. M. (2010).** Effect of stratospheric ozone in UVB solar radiation reaching the Earth's surface at Qena, Egypt. Atmospheric Pollution Research, 1(3), 155-160. <https://doi.org/10.5094/APR.2010.020>
- Elsayed, A., Ali, M. A., Youssef, M. E., Elkabani, I., & Hassan, G. E. (2021).** Comparison of multiple linear regression and artificial neural network models for global solar radiation estimation in Egypt. Ain Shams Engineering Journal, 12(4), 3777-3789. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.03.011>
- El-Sebaili, A. A., & Trabea, A. A. (2003).** Estimation of horizontal diffuse solar radiation in Egypt. Energy Conversion and Management, 44(15), 2471-2482. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(03\)00018-9](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(03)00018-9)

- El-Sebaili, A. A., Al-Hazmi, F. S., Al-Ghamdi, A. A., & Yaghmour, S. J. (2010).** Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia. *Applied Energy*, 87(2), 568-576. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.032>
- Erten, M. Y., & Aydilek, H. (2022).** Solar power prediction using regression models. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(3), 333-342. <https://dergipark.org.tr/en/pub/ijer/issue/72986/1133514>
- European Space Agency (ESA). (n.d.).** The Sun. Retrieved from https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Our_Sun
- Filippov, B. (2024).** General Characteristics of the Sun. In *Eruptions on the Sun (Astrophysics and Space Science Library, vol. 471, pp. 7-34)*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-58177-9_2
- Gardashov, R. H. (2022).** Solar Radiation and Solar Panels. In M. Lackner, B. Sajjadi, & W. Y. Chen (Eds.), *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation* (pp. 1-34). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72579-2_11
- Geraldi, E., Romano, F., & Ricciardelli, E. (2012).** An advanced model for the estimation of the surface solar irradiance under all atmospheric conditions using MSG/SEVIRI data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(8), 2934-2953. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2011.2178855>
- Gevorgian, A., Pernigotto, G., & Gasparella, A. (2023).** Machine learning techniques and 3D GIS building model for accurate solar radiation prediction on building facades in mountainous and urban regions. In *Proceedings of Building Simulation 2023: 18th Conference of IBPSA* (pp. 1635-1642). Free University of Bozen - Bolzano. <https://doi.org/10.26868/25222708.2023.1300>

- Gürel, A. E., Ağbulut, Ü., Bakır, H., Ergün, A., & Yıldız, G. (2020).** A state of art review on estimation of solar radiation with various models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 131, 109966. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109966>
- Hanslmeier, A. (2023).** The Sun. In *Introduction to Astronomy and Astrophysics* (pp. 141-175). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-64637-3_7
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1982).** Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 223-230.
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985).** Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99.
- Hassan, G. E., Youssef, M. E., Mohamed, Z. E., Ali, M. A., & Hanafy, A. A. (2016).** New temperature-based models for predicting global solar radiation. *Applied Energy*, 179, 437-450. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.006>
- Ibrahim, S., Daut, I., Irwan, Y. M., Irwanto, M., Gomes, N., & Farhana, Z. (2012).** Linear regression model in estimating solar radiation in Perlis. *Energy Procedia*, 18, 1402-1412. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.156>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021).** **Climate Change 2021: The Physical Science Basis.** Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, & B. Zhou, Eds.). Cambridge University Press. <

- Iqbal, M. (1983).** An Introduction to Solar Radiation*. Academic Press, Toronto.
- Jäger, K., Isabella, O., Smets, A. H. M., van Swaaij, R. A. C. M. M., & Zeman, M. (2014).** Solar energy: Fundamentals, technology, and systems. Delft University of Technology.
- Jahani, B., Dinpashoh, Y., & Raisi Nafchi, A. (2017).** Evaluation and development of empirical models for estimating daily solar radiation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 878-891. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.124>
- Khali, S. A. (2022).** Performance Evaluation and Statistical Analysis of Solar Energy Modeling: A Review and Case Study. *Journal of the Nigerian Society of Physical Sciences*, 4 (4), 911
- Kiziltan, Ö., & Şahin, M. (2016).** Calculation of solar radiation by using regression methods. *Journal of Physics Conference Series*, 707 (1), 1-6. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/707/1/012049>
- Kumar, B., Garg, D., Kurella, S., & Kumar, P. (2022).** Clean energy production using solar energy resources. In *Sustainable and clean energy production technologies* (pp. 269-288). Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9135-5_12
- Kumler, A., Kravitz, B., Draxl, C., Vimmerstedt, L., Benton, B., Lundquist, J. K., Martin, M., Buck, H. J., Wang, H., Lennard, C., & Tao, L. (2025).** Potential effects of climate change and solar radiation modification on renewable energy resources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 207, 114934. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114934>

- Kuşkaya, Sevda Faik Bilgili, Erhan Muğaloğlu, Kamran Khan, Mohammad Enamul Hoque, Nurhan Toguç, (2023):** The role of solar energy usage in environmental sustainability: Fresh evidence through time-frequency analyses, *Renewable Energy*, Volume 206, 2023, Pages 858-871, ISSN 0960-1481, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.02.063>.
- Kusserow, v. U and Marsch, E. (2025).** The Active Magnetic Sun. In: *The Magnetic Solar System* . Springer Praxis Books(). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-70566-7_3
- Lang, K. R. (2006).** Sun, Earth, and Sky. Springer.
- Maka A. M, Alabid, J. M, (2022):** Solar energy technology and its roles in sustainable development, *Clean Energy*, Volume 6, Issue 3, June 2022, Pages 476–483, <https://doi.org/10.1093/ce/zkac023>
- Maka, A. O. M., Salem, S., & Mehmood, M. (2021).** Solar photovoltaic (PV) applications in Libya: Challenges, potential, opportunities and future perspectives. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 100267. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100267>
- Meenal, R., Selvakumar, A. I., & Rajasekaran, E. (2023).** Review on mathematical models for the prediction of solar radiation. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 15 (1), 56-61. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v15.i1.pp56-61>
- Meeus, J. (1998).** Astronomical algorithms (2nd ed.). Richmond: Willmann-Bell Inc.
- Mohamme, Y. M. A. and Guo, Y., 2016.** Study of solar global radiation in Khartoum, Sudan. *Energy*, 101, 106-114

- Nedbálek, B., Dudić, B., Kovač, P., Savković, B., Ješić, D. (2024).** Global Solar Energy. In: Karabegovic, I., Kovačević, A., Mandzuka, S. (eds) New Technologies, Development and Application VII. NT 2024. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1069. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-66268-3_75
- NSREEE; State of Libya, Government of National Unity, Ministry of Planning. (2023).** National Strategy for Renewable Energies and Energy Efficiency (NSREEE) 2023 – 2035.
- Okonkwo, G. N., & Nwokoye, A. O. C. (2014).** Estimating global solar radiation from temperature data in Minna location. European Scientific Journal, 10(15), 1-10. <https://doi.org/10.19044/esj.2014.v10n15p1>
- Prieto, J.-I., & García, D. (2022).** Modified temperature-based global solar radiation models for estimation in regions with scarce experimental data. *Energy Conversion and Management, 268, 115950. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115950>
- Proutsos, N., Liakatas, A., Alexandris, S. G., & Tsiros, I. X. (2022).** Atmospheric factors affecting global solar and photosynthetically active radiation relationship in a Mediterranean forest site. Atmosphere, 13 (8), 1207. <https://doi.org/10.3390/atmos13081207>
- Rathod, A. P. S., Mittal, P., & Kumar, B. (2016).** Analysis of factors affecting the solar radiation received by any region. In *Proceedings of the 2016 International Conference on Emerging Trends in Communication Technologies (ETCT). <https://doi.org/10.1109/ETCT.2016.7882980>
- Reddy, M., Padma Suvarana, R., Pavan Kumari, S., Balakrishnaiah, G., & Rama Gopal, K. (2018).** Estimation of global solar radiation using sunshine and temperature based models over Anantapur region. International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT), 6(2), 607-618. <https://www.ijcrt.org/papers/IJCRT1892434.pdf>

- Salisu, S. (2017).** New model for solar radiation estimation from measured air temperature and relative humidity in Nigeria. *Nigerian Journal of Technology*, 36 (3), 917-922. <https://doi.org/10.4314/njt.v36i3.35>
- Si, Y., Wang, H., & Zheng, N. (2021).** Effects of single-layer low clouds on the surface solar radiation in East Asia. **Solar Energy*, 224, 1099-1106. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.047>
- Stieglitz, R., Platzer, W. (2024).** Solar Radiation. In: *Solar Thermal Energy Systems*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43173-9_2
- Thallapalli, A., & Prasanna, T. S. (2022).** Development of a Simple Temperature-Based Model for Estimating Global Solar Radiation. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 12 (1), 123-133
- Tidjani, A. T., Abdennebi, S., & Khenna, R. A. (2022).** Experimental Study of Solar Radiation using a Developed Automatic Acquisition System for Photovoltaic Applications in a Remote Site. *International Journal of Sustainable and Green Energy*, 11 (1), 1-11.
- Tiwari, G.N. (2024).** Renewable Energy. In: *Energy, Ecology and Environment*. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3997-8_3
- Wong, L. T., & Chow, W. K. (2001).** Solar radiation model. *Applied Energy*, 69 (3), 191-224. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(01\)00012-5](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(01)00012-5)
- World Energy Council. (2013).** World energy resources: Solar., 8.2-8.28.
- 3.6. المواقع الالكترونية:
- <https://weatherspark.com/y/71727/Average-Weather-in-Zawiya-Libya-Year-Round>. (2024).
- <https://climatetoolbox.org/tool/data-download>. (2024).

الملاحق:

- بيانات درجات الحرارة الصغرى والعظمى لمدينة الزاوية للفترة (2000-2023)
- جدول متوسط الإشعاع الشمسي الشهري (MJ/m²/day) من بيانات TerraClimate

الملاحق (Appendices)

الملحق (1): بيانات درجات الحرارة الصغرى والعظمى لمدينة الزاوية للفترة (2000-2023).

1. درجة الحرارة الصغرى لمدينة الزاوية للفترة (2000-2023).

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	9.95	9.81	11.3	13.65	17.97	22.45	23.49	25.18	24.11	22.23	15.19	9.83
2001	11.05	10.89	10.89	15.24	16.79	20.37	22.13	23.98	23.33	19.55	15.69	13.37
2002	11.52	10.16	12	13.76	16.3	20.14	22.36	24.41	24.33	21.26	16.23	11.09
2003	11.06	11.18	12.92	13.83	17.48	19.38	23.34	24.38	22.35	20.05	15.13	12.4
2004	9.13	8.21	11.45	11.72	17.56	20.17	24.25	25.84	23.91	21.35	16.76	10.58
2005	10.67	10.29	11.58	14.08	16.33	18.14	23.06	24.18	22.07	21.89	15.87	10.36
2006	8.15	9.23	10.24	12.31	15.93	19.89	23.34	25.06	23.39	21.26	13.4	11.52
2007	10.02	10.39	11.33	13.71	16.26	18.54	23.98	25.34	23.61	20.2	16.62	12.2
2008	12.91	12.02	11.16	14.39	17.06	19.42	22.91	24.93	24.19	18.21	15.11	12
2009	10.44	9.86	11.09	13.23	17.36	19.9	23.28	24.76	23.22	21.58	15.72	11.6
2010	10.12	10.57	11.23	14.37	14.73	20.19	23.63	25.7	23.69	20.27	15.27	12.9
2011	10.76	11.05	12.29	15.29	16.96	19.48	22.95	24.17	22.58	19.08	15.63	9.98
2012	12.39	11.25	11.08	14.05	16.12	20.05	22.71	23.58	24	19.86	16.22	11.74
2013	9.31	7.25	11.55	14.09	16.87	19.45	24.78	24.99	24.07	19.42	14.92	13.09
2014	10.23	9.55	12.5	14.48	17.35	18.65	21.62	24.77	24.16	21.59	14.71	12.95
2015	11.33	10.79	11.3	13.97	16.07	20.04	23.56	24.8	24.12	20.79	14.97	8.29
2016	9.21	9.33	10.66	12.32	17.48	18.94	22.38	25.5	23.58	20.64	13.66	13.9
2017	11.59	11.18	11.38	14.94	15.92	20.15	23.04	24.26	23.44	21.7	16.66	13.58
2018	9.61	10.73	12.82	13.55	16.9	19.89	23.09	24.85	22.94	19.7	14.52	12.06
2019	10.73	10.08	11.31	13.82	15.84	20.38	23.42	25.27	23.14	19.95	17.12	12.38
2020	9.65	9.55	10.74	13.08	15.57	17.57	23.55	25.46	23.92	21.09	14.21	12.5
2021	10.94	11.8	12.66	14.34	18.25	20.02	22.76	25.45	24.05	20.06	15.51	10.36
2022	10.28	10.17	13	13.61	17.94	20.05	24.81	26.88	25.19	20.37	13.4	12.16
2023	10.66	10.98	10.15	14.38	16.26	22.66	24.75	26.46	24.11	21.42	16.44	14.56

2. درجة الحرارة العظمى لمدينة الزاوية للفترة (2000-2023).

YEAR	JAN	FEB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AUG	SEP	OCT	NOV	DEC
2000	19.15	20.65	24.96	33.2	32.24	35.09	30.73	34.98	36.17	33.79	26.1	21.01
2001	16.73	18.02	23.8	28.33	34.48	33.22	38.29	37.51	36.27	30.95	26.73	21.93
2002	21.4	20.19	30.44	26.8	35.39	28.99	35.94	33.08	36.93	32.8	28.53	21.26
2003	18.9	24.24	27.6	29.73	36.65	33.3	36.42	33.85	34.01	28.73	27.77	20.43
2004	20.54	18.54	19.34	25.66	27.44	36.52	31.99	32.15	34.69	33.28	31.19	25.73
2005	18.51	25.06	25.8	29.41	28.2	30.33	31.79	32.05	32.05	30.57	30.69	23.48
2006	18.03	19.52	29.37	28.14	30.83	33.65	37.44	33.37	36.17	29.84	27.37	19.76
2007	20.23	20.4	24.9	29.19	36.35	34.29	30.68	33.23	30.62	31.73	24.85	21.45
2008	19.79	21.7	21.69	27.08	30.05	39.23	30.73	39.36	32.4	31.07	25.11	20.53
2009	19.41	20.77	22.69	28.88	34.01	34.37	33.31	31.08	34.85	29.96	27	21.76
2010	19.97	21.51	24.55	28.63	26.48	31.4	31.25	34.26	33.48	33.1	25.39	23.47
2011	21.41	28.08	26.77	25.71	32.28	34.3	30.09	34.23	33.4	31.55	26.22	25.26
2012	21.46	22.37	21.87	25.84	25.5	30.62	36.98	32.69	36.07	26.21	27.59	20.98
2013	17.55	18.27	20.12	28.1	33.27	28.62	31.58	33.88	35.77	31.14	28.12	20.06
2014	20.9	20.46	26.6	28.65	30.58	32.83	34.17	32.56	35.56	33.68	25.49	19.57
2015	20.69	23.65	23.03	25.65	31.69	36.24	35.09	37.87	39.15	34.62	27.58	23.1
2016	19.98	20.72	22.65	28.84	32.75	38.13	31.75	35.01	34.9	31.9	23.33	19.01
2017	21.26	21.42	25.62	30.06	34.33	40.72	37.94	30.52	35.49	32.26	26.44	21.08
2018	19.19	23.73	26.69	27.96	35.5	38.7	34.19	33.18	34.49	26.56	24.83	19.69
2019	20.3	20.2	26.73	25.75	33.69	33.33	39	31.38	34.8	29.01	24.35	19.09
2020	18.91	21.36	22.37	25.72	30.26	37.94	36.21	35.65	30.97	30.16	26.15	23.81
2021	18.52	21.32	23.38	27.5	32.55	33.39	31.65	37.06	33.33	34.33	24.11	21.56
2022	24.68	23.15	24.75	30.12	28.18	40.58	34.36	40.32	34.8	32.51	29.76	20.58
2023	18.96	20.37	25.73	25.45	30.32	38.9	31.47	40.8	34.91	29	26.57	24.85

ملحق (2): البيانات الفعلية للإشعاع الشمسي لمدينة الزاوية

1. جدول متوسط الإشعاع الشمسي الشهري ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) من بيانات TerraClimate :

الجدول يعرض متوسط قيم الإشعاع الشمسي الشهري (بوحدة ميغا جول لكل متر مربع في اليوم) لمدينة

الزاوية بناءً على بيانات TerraClimate من العام 2000 إلى 2023:

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2000	10.8	13.1	16.1	20.1	25.1	27.5	27.8	28.3	26.8	21.5	16.1	11.8
2001	9.9	12.1	15.8	20	25.1	27.1	28.5	28	25.8	19.8	15.7	11.1
2002	13	13.1	18.1	18.1	25.5	23.4	25.6	26.2	26.6	20.8	16.2	11.3
2003	11.4	14.2	17.9	19	26.5	25.2	27.5	26.2	24.5	20.1	15.1	10.9
2004	11.5	12.1	13.3	18.1	22.6	24.8	28.5	29.1	26.8	20.8	15.7	11.5
2005	12	15.2	16.2	19.9	22.8	23.5	26.2	26.1	23.4	22	15.6	10.9
2006	10.6	12.9	17.8	18.2	22.5	25.1	28.2	25.8	25.7	19.6	14.9	10.8
2007	11.7	12.7	15.8	20	24.5	25.1	28.7	27.3	24.4	19.8	14.7	10.7
2008	12.3	14	15.8	20	25.3	29.1	28	27.8	23.5	17.8	14.2	10.6
2009	11.6	12.8	15.7	19.3	25.2	28	26.8	27.8	24.9	19.8	14.4	10.7
2010	11.5	13.1	16.1	18.9	22.7	27	28.3	28.3	24.7	18.9	14.6	10.7
2011	14	16.7	17.3	18.8	23.6	24	26.1	26.6	22.7	17.9	13.9	11.3
2012	12.9	13.7	15	17.5	22.6	25.9	26.1	26.2	22.9	17.5	14.6	10.4
2013	9.8	10.6	15.2	20.2	23.9	25.6	28.4	27.2	23.8	17.3	14.2	10.2
2014	12	12.6	17.9	18.9	22.7	22.7	25	27.6	24.8	19.5	14.5	10.5
2015	12.3	14.3	15.6	16.9	22.4	27	29.1	28.2	25.3	19.7	14.5	9.8
2016	11.1	12.3	15.4	19.9	23.3	24.9	25.5	28.9	24.5	19.6	14.1	9.8
2017	12.5	15	15.8	20.4	22.8	25.8	26.1	27	23.4	19.8	15.3	10.9
2018	12.7	14.8	17.3	18.5	23.5	25.7	26.4	26.5	22.9	18	13.5	10.3
2019	12.1	11.9	16.7	18.1	22.4	26.4	26.9	26.7	23.4	17.9	14.7	10.5
2020	11.5	11.9	15.3	17.9	21.7	21.6	27.3	27.1	23.8	19.9	14.2	10.7
2021	11.9	14.1	16.8	20.3	23.7	24.9	25.7	27.6	24.5	19.9	15.2	10.3
2022	13.9	14.2	17.6	17.4	23.4	26.7	29.6	28.6	26.4	20.3	14.9	10.9
2023	12	13	16.5	17.7	22.7	26.6	27.8	27.3	22.7	19.3	14.8	11.9

2. جدول متوسط الإشعاع الشمسي السنوي (MJ/m²/day) من بيانات TerraClimate :

الجدول يعرض متوسط قيم الإشعاع الشمسي السنوي (بوحدة ميغا جول لكل متر مربع في اليوم) لمدينة

الزاوية بناءً على بيانات TerraClimate من العام 2000 إلى 2023 :

Year	Average Annual Solar Radiation (MJ/m ² /day)
2000	19.2
2001	18.8
2002	19.4
2003	19.1
2004	19.3
2005	19.4
2006	19
2007	19.3
2008	19.5
2009	19.3
2010	19.2
2011	19.5
2012	19
2013	19.1
2014	19.4
2015	19.2
2016	19
2017	19.4
2018	19.1
2019	19
2020	19
2021	19
2022	19.9
2023	19.4