



جامعة وهران 2
كلية العلوم الاقتصادية التجارية وعلوم التسيير

أطروحة

للحصول على شهادة دكتوراه "ل م د" في العلوم الاقتصادية
تخصص: الاقتصاد الكمي
بعنوان:

التنبؤ بإنتاج و استهلاك الطاقات المتجددة في الجزائر باستخدام النماذج القياسية

مقدمة ومناقشة علنا من طرف

السيد: سطاح مصطفى

أمام لجنة المناقشة

الاسم و اللقب	الرتبة	المؤسسة الاصلية	الصفة
أ. قنصاب جميلة	أستاذة	جامعة وهران 2	رئيسا
أ. بن رمضان أنيسة	أستاذة محاضرة قسم أ	جامعة وهران 2	مشرف مقرر
أ. عبد الرحمن جوهر	أستاذة محاضرة قسم أ	جامعة وهران 2	عضوا مناقشا
أ. فاندري سهيلة	أستاذة محاضرة قسم أ	جامعة تلمسان	عضوا مناقشا
أ. حمدون أسماء	أستاذة محاضرة قسم أ	جامعة سيدي بلعباس	عضوا مناقشا

السنة الجامعية: 2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ
"وَقُلْ اَعْمَلُوا فَسَيَرَى اللَّهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ"
(التوبة: 105)

الإهداء

أهدي هذا العمل إلى والدي رحمه الله، وأسأل الله أن يجعله في ميزان حسناته.
إلى والدتي العزيزة، ولكل من كان سنداً ودعماً في حياتي.
إلى إخوتي الأعزاء، الذين كانوا دائماً مصدر تشجيع وإلهام.
إلى زملائي الأعزاء، على كل ما قدموه من دعم ومشاركة علمية.
إلى زوجتي الغالية، التي وقفت إلى جانبي في كل شيء وشاركتني رحلة العمل
والاجتهاد.

وأهدي هذا العمل إلى ولدي الحبيب محمد عمران، جعله الله من الذرية الصالحة
ومصدر فخر وسعادة.

سطاح مصطفى

الشكر والعرفان

بعد حمد الله عز وجل على فضله وتوفيقه، الذي به تتم الصالحات، يطيب لي أن أرفع أسمى عبارات

الشكر والعرفان إلى أستاذتي المشرفة، الدكتورة بن رمضان أنيسة، على ما بذلته من جهد كريم،

وتوجيهات سديدة، وملاحظات علمية قيمة، كانت النبراس الذي أنار دربي خلال مختلف مراحل

إعداد هذه الأطروحة. فلها مني كل الامتنان والتقدير.

كما أتوجه بجزيل الشكر إلى كافة أساتذتي الكرام الذين لم يخلوا عليّ بعلمهم ونصحهم، وكان لهم

أثر بالغ في تكويني العلمي والبحثي.

ولا يفوتني أن أعبر عن امتناني لزملائي وأصدقائي على ما قدموه من دعم وتشجيع، سواء من خلال

تبادل الآراء أو عبر الكلمة الطيبة التي كانت دافعاً لمواصلة العمل.

وأخص بالشكر كل من ساعدني من قريب أو بعيد في إنجاز هذه الأطروحة، وأدعو الله أن يجزيهم

خير الجزاء ويجعل ما قدموه في ميزان حسناتهم.

سطاح مصطفى

الملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى التنبؤ بالاستهلاك والإنتاج للطاقة المتجددة في الجزائر، مع التركيز على الطاقة الكهرومائية باعتبارها من المصادر الرئيسية للطاقة المتجددة. وذلك بالاعتماد على بيانات الاستهلاك والإنتاج للطاقة الكهرومائية من سنة 1965 إلى غاية 2024، للتنبؤ بالقيم المستقبلية للفترة الممتدة بين 2025 و 2035 وذلك بالاستعانة بثلاثة نماذج قياسية تتمثل في منهجية Box-Jenkins، التمهيد الأسّي الثلاثي، والشبكات العصبية الاصطناعية ANN. ليتم مقارنة أداء هذه النماذج باستخدام مؤشرات دقة التنبؤ Theil، MAPE، MAE و RMSE.

وقد بينت النتائج المتحصل عليها أن نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) قدمت أفضل أداء من حيث جميع مؤشرات الدقة مقارنة بأسلوب التمهيد الأسّي الثلاثي ومنهجية Box-Jenkins، مما يجعل ANN النموذج الأنسب للتنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية للطاقة الكهرومائية في الجزائر، ويضمن موثوقية أعلى لتقديرات الإنتاج والاستهلاك.

الكلمات المفتاحية: الطاقة المتجددة، الطاقة الكهرومائية، التنبؤ بالاستهلاك، التنبؤ بالإنتاج، نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية، نموذج التمهيد الأسّي الثلاثي.

Abstract:

This study aims to forecast the consumption and production of renewable energy in Algeria, focusing particularly on hydropower as a key source of renewable energy. The analysis uses hydropower consumption and production data from 1965 to 2024 to predict values for the period 2025–2035. Three econometric models were employed for this purpose: the Box–Jenkins methodology, triple exponential smoothing and artificial neural networks (ANN). The performance of these models was evaluated using forecast accuracy indicators such as Theil's U, MAPE, MAE and RMSE.

The results showed that the ANN model outperformed the other two methods in terms of all accuracy indicators, making it the most suitable model for forecasting future hydropower scenarios in Algeria. This ensures a higher level of reliability in the estimation of production and consumption.

Keywords: Renewable energy, hydropower, consumption forecasting, production forecasting, artificial neural networks, triple exponential smoothing model.

Résumé :

Cette étude vise à prévoir la consommation et la production d'énergie renouvelable en Algérie, en se concentrant sur l'énergie hydroélectrique, considérée comme l'une des principales sources d'énergie renouvelable. L'analyse repose sur les données de consommation et de production hydroélectrique de 1965 à 2024, afin de prédire les valeurs pour la période 2025-2035. Trois modèles économétriques ont été appliqués : la méthodologie Box-Jenkins, le lissage exponentiel triple et les réseaux de neurones artificiels (ANN). La performance de ces modèles a été évaluée à l'aide d'indicateurs de précision des prévisions, tels que l'indice de Theil, l'erreur absolue moyenne pondérée (MAPE), l'erreur absolue moyenne (MAE) et l'erreur absolue moyenne racine (RMSE).

Les résultats obtenus montrent que le modèle de réseaux de neurones artificiels (ANN) Offre la meilleure performance selon tous les indicateurs de précision, ce qui en fait le Modèle le plus approprié pour prévoir l'évolution de l'hydroélectricité en Algérie. Cela garantit une fiabilité accrue des estimations de la production et de la consommation.

Mots-clés : énergie renouvelable, hydroélectricité, prévision de la consommation, prévision de la production, réseaux de neurones artificiels, modèle de lissage exponentiel triple.

فهرس المحتويات

الصفحة	العنوان
	الاهداء.....
	شكر و عرفان.....
I	الملخص.....
II	فهرس المحتويات.....
V	قائمة الجداول.....
VII	قائمة الأشكال.....
أز	المقدمة العامة.....
01	الفصل الاول : مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر.....
02	تمهيد.....
03	المبحث الاول: عموميات حول الطاقة المتجددة.....
03	المطلب الاول: مفهوم الطاقات المتجددة وأهميتها.....
10	المطلب الثاني: مصادر الطاقة المتجددة.....
26	المطلب الثالث: مميزات و عيوب استخدام الطاقات المتجددة.....
37	المبحث الثاني: واقع قطاع الطاقات المتجددة في الجزائر.....
37	المطلب الأول: الإطار التشريعي والتنظيمي للطاقة المتجددة في الجزائر.....
50	المطلب الثاني: قدرات الطاقة المتجددة في الجزائر.....
70	المبحث الثالث: خارطة الطريق نحو الطاقات المتجددة في الجزائر آفاق 2030.....

70	المطلب الأول: آفاق إنتاج واستهلاك الطاقات المتجددة في الجزائر.....
88	المطلب الثاني: برنامج الطاقات المتجددة آفاق 2030.....
101	المطلب الثالث: المشاريع الطاقات المتجددة في الجزائر.....
115	خلاصة.....
116	الفصل الثاني : النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة.....
117	تمهيد.....
118	المبحث الأول: الإطار المرجعي للدراسات السابقة.....
118	المطلب الأول: استعراض الأدبيات والدراسات ذات الصلة.....
138	المطلب الثاني: موقع الدراسة الحالية ضمن المجال البحثي.....
140	المبحث الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ.....
141	المطلب الأول: نموذج الانحدار الذاتي المتجه (VAR).....
153	المطلب الثاني: طرق (التمهيد) التلميس الأسّي.....
161	المطلب الثالث: التنبؤ من خلال استخدام منهجية Box and Jenkin.....
180	المبحث الثالث : نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية ونماذج الذكاء الاصطناعي.....
180	المطلب الأول: نماذج الذكاء الاصطناعي AI & Machine Learning Models.....
189	المطلب الثاني: الشبكات العصبية الاصطناعية.....
223	خلاصة.....
224	الفصل الثالث التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقات المتجددة في الجزائر
225	تمهيد.....
226	المبحث الأول: عرض لإنتاج واستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر.....

226	المطلب الأول: تطور انتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر.....
228	المطلب الثاني: تطور استهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر.....
232	المبحث الثاني: التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة الكهرومائية باستخدام النماذج الكمية.....
232	المطلب الأول: دراسة خصائص السلسلة الزمنية محل الدراسة.....
248	المطلب الثاني: تطبيق نموذج بوكس-جنكينز (Box-Jenkins) في التنبؤ بالطاقة الكهرومائية.....
268	المطلب الثالث: اعتماد أسلوب التمهيد الأسّي الثلاثي للتنبؤ بالطاقة الكهرومائية.....
275	المطلب الرابع: الشبكات العصبية الاصطناعية كأداة للتنبؤ بالطاقة الكهرومائية.....
291	المبحث الثالث: عرض وتحليل النتائج.....
291	المطلب الأول: المفاضلة بين النماذج الثلاثة وفق مؤشرات الدقة.....
293	المطلب الثاني: تحليل نتائج التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر.....
295	خلاصة.....
296	خاتمة العامة.....
301	قائمة المراجع.....

قائمة الجداول

الرقم	العنوان	الصفحة
01	محطات الطاقة الكهرومائية في الجزائر	52
02	توزيع إشعاع الطاقة الشمسية حسب المناطق الجغرافية في الجزائر	59
03	المتوسط السنوي لشدة الإشعاع الشمسي اليومي في مختلف مناطق الوطن	61
04	استعمال المياه الحارة لحوض الماء الألبى	67
05	استهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر	77
06	استهلاك طاقة الرياح في الجزائر	78
07	استهلاك الطاقة الشمسية في الجزائر	79
08	الكلفة الرأسمالية و كلفة وحدة الطاقة المنتجة بواسطة مصادر الطاقة المتجددة في 2011	82
09	القدرات المركبة لإنتاج الطاقة وفق برنامج الطاقات المتجددة 2010-2030	90
10	مستويات تعريفية الشراء للطاقة المنتجة من مصادر متجددة في الجزائر	93
11	موجز لانبعاثات CO2 التي يتعين تجنبها بحلول عام 2030	99
12	قائمة المشاريع المبرمجة خلال الفترة 2011-2020 للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة 343 ميجاوات	106
13	موقع الدراسة الحالية مقارنة بالدراسات السابقة	140
14	تراجع قيمة المعلومة كلما توجهنا نحو الماضي مقارنة بين الوسط الكلاسيكي * وثلاثة قيم لمعامل α	155
15	كيفية تشخيص النموذج	174
16	كمية إنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة 1965 - 2024	226
17	كمية استهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة 1965 - 2024	229
18	اختبار النموذج الملائم حسب معايير المفاضلة	251

252	تقدير النموذج (ARIMA(0.1.1)	19
256	القيم التنبؤية لانتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية 2035	20
261	اختبار النموذج الملائم حسب معايير المفاضلة	21
263	تقدير النموذج (ARIMA(1.1.1)	22
266	القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية 2035	23
269	نتائج تقدير نموذج هولت (Holt-Winters بدون موسمية) لسلسلة LPROD خلال الفترة (1965-2024)	24
270	القيم التنبؤية لانتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية 2035	25
272	نتائج تقدير نموذج هولت (Holt-Winters بدون موسمية) لسلسلة LCONSU خلال الفترة (1965-2024)	26
273	القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية 2035	27
281	القيم التنبؤية لانتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية 2035	28
289	القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية 2035	29
292	مؤشرات قياس الجودة	30
293	مؤشرات قياس الجودة	31

قائمة الأشكال

الرقم	العنوان	الصفحة
1	التوزيع العالمي لإشعاع الطبيعي المباشر	11
2	القدرة الطاقة الشمسية الكهروضوئية و المركزة في جميع أنحاء العالم	13
3	توليد طاقة كهربائية من الطاقة الشمسية في جميع أنحاء العالم 2012-2022	14
4	قدرة الكهرباء من الطاقة الرياح في جميع أنحاء العالم	17
5	توليد طاقة كهربائية من طاقة رياح في جميع أنحاء العالم	18
6	قدرة طاقة كهربائية من طاقة الكهرومائية في جميع أنحاء العالم 2012-2023	21
7	توليد طاقة كهربائية من طاقة الكهرومائية في جميع أنحاء العالم	22
8	يبيّن مقارنة بين تكاليف إنتاج الطاقة	31
9	متوسط الاستثمارات الرأسمالية السنوية في إطار سيناريو صافي الانبعاثات الصفريّة	32
10	تطور القدرات المركبة للطاقة المتجددة في الجزائر (2014-2023)	51
11	قدرات الجزائر من الطاقة الكهرومائية	53
12	خريطة سنوية لمتوسط سرعة الرياح على ارتفاع 10 أمتار من سطح الأرض.	55
13	خريطة سنوية لمتوسط سرعة الرياح على ارتفاع 50 متراً من سطح الأرض.	56
14	خرائط موسمية لسرعة الرياح على ارتفاع 50 متراً من سطح الأرض	57
15	تطور السعة الإجمالية لطاقة الرياح في الجزائر مقارنة بإفريقيا (2014-2023)	57
16	تطور القدرات المركبة للطاقة الشمسية في الجزائر (2010-2023)	59
17	المتوسط السنوي لشدة الإشعاع الشمسي اليومي في مختلف مناطق الوطن	61
18	مقارنة إنتاج الهيدروجين في مواقع مختلفة حول العالم	63
19	مقارنة إنتاج الهيدروجين في مواقع مختلفة حول العالم	63

66	خريطة موارد الطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر.	20
66	المناطق الجيوحرارية الرئيسية في الجزائر	21
68	خريطة التدفق الجيوحراري في الجزائر	22
69	الإمكانات المتوفرة في الجزائر في مجال الطاقة الحيوية	23
70	امكانات التقديرية لإنتاج الكهرباء	24
71	تطور إنتاج الطاقات المتجددة في الجزائر (2014-2022)	25
73	الكميات المنتجة من الطاقة الكهرومائية في الجزائر	26
74	الكميات المنتجة من طاقة الرياح في الجزائر	27
75	الكميات المنتجة من الطاقة الشمسية في الجزائر	28
81	تحليل تطور استهلاك الطاقة المتجددة في الجزائر حسب القطاعات	29
84	العلاقة بين استهلاك الطاقة المتجددة و الناتج المحلي الإجمالي في الجزائر 2010-2023	30
86	أسعار البنزين	31
87	تحليل كايا (Kaya) لنمو انبعاثات الغازات الدفيئة (GHG)	32
88	إنتاج الكهرباء حسب المصدر (تيراواط ساعي)، سنة 2019	33
89	الأهداف الوطنية للجزائر في مجال الطاقات المتجددة (EnR)	34
91	تطور القدرات المركبة لإنتاج الطاقة المتجددة في الجزائر	35
99	الانبعاثات الكربونية التي تم تجنبها (مقدّرة بملايين الأطنان من C02)	36
105	خريطة تبين مواقع محطات توليد الطاقة الكهروضوئية في الجزائر	37
111	خريطة مشروع ديزرتيك	38
155	تراجع قيمة المعلومة كلما توجهنا نحو الماضي مقارنة بين الوسط الكلاسيكي وثلاثة قيم لمعامل α	39
156	نموذج لسلسلة زمنية مستقرة (عشوائية)	40
163	مراحل تطبيق منهجية بوكس جينكنز box-jenkins	41

168	بيان الارتباط الذاتي لمعلومات الارتباط الذاتي البسيط.	42
188	عائلة الذكاء الاصطناعي	43
196	بنية خلية عصبية اصطناعية	44
196	مقارنة بين العصبون البيولوجي والعصبون الاصطناعي	45
198	الشبكات العصبية الاصطناعية ANN	46
202	يُبين نموذج الرياضي للشبكة العصبية الاصطناعية	47
202	مكونات العصبون الاصطناعي	48
204	أنواع دوال تنشيط	49
205	شبكات عصبية ذات الطبقة الوحيدة	50
206	شبكة عصبية متعددة الطبقات	51
207	الشبكات ذات التغذية الأمامية	52
208	الشبكات العصبية الراجعة	53
209	الشبكات التنافسية	54
212	الانحدار التدرجي (Gradient Descent)	55
217	التركيب العام لشبكة ELMAN	56
218	التركيب العام لشبكة (NARX)	57
233	التمثيل البياني لسلسلة إنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر	58
234	التمثيل البياني لسلسلة إنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر بعد ادخال اللوغاريتم LPROD	59
234	البيانات الإحصائية للسلسلة LPROD	60
236	دالة الارتباط الذاتي والجزئي لسلسلة lprod	61
237	اختبار ديكي فولر المطور لسلسلة LPROD	62
237	اختبار فليب بيرون لسلسلة LPROD	63

238	تمثيل البياني لسلسلة DLPROD	64
239	اختبار فليب بيرون لسلسلة dLprod	65
239	اختبار ديكي فولر المطور لسلسلة dLprod	66
241	التمثيل البياني لسلسلة CONSU إستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر 1965-2024	67
242	التمثيل البياني لسلسلة إستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر بعد ادخال اللوغاريتم LCONSU	68
242	البيانات الإحصائية للسلسلة LCONSU	69
243	دالة الارتباط الذاتي والجزئي لسلسلة LCONSU	70
245	اختبار ديكي فولر المطور لسلسلة LCONSU	71
245	اختبار فليب بيرون لسلسلة LCONSU	72
246	تمثيل البياني لسلسلة DLCONSU	73
247	اختبار ديكي فولر المطور لسلسلة DLCONSU	74
248	اختبار فليب بيرون لسلسلة DLCONSU	75
249	البيانات الإحصائية للسلسلة DLPROD	76
250	دالة الارتباط الذاتي والجزئي لسلسلة DLPROD	77
251	المقارنة البيانية بين النماذج وفق قيم معيار أكايكي (AIC)	78
254	دالة الارتباط الذاتي البسيط والجزئي للسلسلة البواقي	79
255	اختبار التوزيع الطبيعي لسلسلة البواقي	80
255	السلسلة الحقيقية والمتوقعة وسلسلة البواقي لكمية المنتجة من الطاقة الكهربائية	81
256	تمثيل البياني للسلسلة المتنبأ به	82
257	القيم التنبؤية لانتاج الطاقة الكهربائية (GW/H)	83
259	البيانات الإحصائية للسلسلة DLCONSU	84
260	دالة الارتباط الذاتي والجزئي لسلسلة DLCONSU	85

262	المقارنة البيانية بين النماذج وفق قيم معيار أكايكي (AIC)	86
264	دالة الارتباط الذاتي البسيط والجزئي للسلسلة البواقي	87
265	اختبار التوزيع الطبيعي لسلسلة البواقي	88
265	السلسلة الحقيقية والمتوقعة وسلسلة البواقي لكمية المستهلكة من الطاقة الكهربائية	89
266	تمثيل البياني للسلسلة المتنبأ به	90
267	القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهربائية (KW/H)	91
270	السلسلة الأصلية والمتوقعة لكمية المنتجة من الطاقة الكهربائية	92
273	السلسلة الأصلية والمتوقعة لكمية المستهلكة من الطاقة الكهربائية	93
277	منحنى أداء التحقق (Performance Plot)	94
278	تطور مؤشرات تدريب الشبكة العصبية باستخدام خوارزمية Levenberg–Marquardt	95
279	التوزيع التكراري لأخطاء النموذج.	96
280	معمارية شبكة العصبية الاصطناعية معتمدة	97
281	المعادلة الانحدارية لنموذج تنبؤ بالانتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر	98
282	القيم التنبؤية لانتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية 2035	99
285	منحنى أداء التحقق (Performance Plot)	100
286	تطور مؤشرات تدريب الشبكة العصبية باستخدام خوارزمية «Levenberg–Marquardt»	101
287	المدرج التكراري للأخطاء Error Histogram with	102
288	معمارية شبكة العصبية الاصطناعية معتمدة	103
289	المعادلة الانحدارية لنموذج تنبؤ بالاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر	104
290	القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية 2035	105

المقدمة العامة

المقدمة العامة:

شهد العالم خلال العقود الأخيرة تحولا متزايدا نحو الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة، أمام التحديات المرتبطة بالتغير المناخي وزيادة الطلب على مصادر الطاقة المستدامة، لذلك تعتبر الطاقة المتجددة خيارًا استراتيجيًا لمواجهة احتياجات النمو السكاني والتوسع الصناعي، كما تقدم حلولًا فعالة للحد من الاعتماد على الوقود الأحفوري والعمل على تقليل الانبعاثات الكربونية والحفاظ على البيئة، خاصة في ظل الاتجاه العالمي نحو تحقيق الأهداف المناخية المنصوص عليها في اتفاقية باريس.

أما في الجزائر، فقد برز هذا التوجه من خلال سياسات تهدف إلى تنويع مزيج الطاقة الوطني وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، حيث تتمتع البلاد بموارد طبيعية غنية، حيث تغطي الصحراء الكبرى أكثر من 80% من مساحتها، مما يمنحها قدرة كبيرة على إنتاج الطاقة الشمسية بفضل معدل الإشعاع الشمسي الذي يتراوح بين 5 و7 كيلوواط ساعة لكل متر مربع يوميًا. بالإضافة إلى ذلك، توفر المناطق الشمالية والساحلية إمكانيات ملائمة لاستغلال طاقة الرياح، وفي ضوء هذه الإمكانيات، اعتمدت الجزائر برامج طموحة مثل برنامج الطاقات المتجددة وكفاءة الطاقة، الذي يهدف إلى إنتاج 22,000 ميغاواط من الطاقة المتجددة بحلول عام 2030، مع تركيز خاص على الطاقة الشمسية، كما أن الطاقة الكهرومائية تمثل بدورها أحد المكونات المهمة في مزيج الطاقة الوطني، حيث يتم استغلال السدود والمنشآت المائية لتوليد الكهرباء، ورغم أن نسبتها تظل محدودة مقارنة بالشمس والرياح، لا أنها تساهم في استقرار الشبكة الكهربائية وتلعب دورًا تكميليًا في تغطية الطلب المتزايد خلال أوقات الاستهلاك المرتفع للكهرباء، مثل فترات الصباح والمساء أو عند استعمال واسع للتبريد والتدفئة.

ولضمان استغلال أمثل لهذه الموارد، يبرز التنبؤ كأداة مهمة لدعم صنع القرار (مسؤولي الدولة و المخططين القطاع الطاقة)، حيث يعتمد على تحليل البيانات التاريخية للكشف عن الاتجاهات المستقبلية وتحديد العوامل المؤثرة في الإنتاج والاستهلاك، كما يساهم التنبؤ الدقيق في تحسين إدارة الموارد الطاقوية وضمان توازن العرض والطلب، بالإضافة إلى تعزيز الاستثمارات في القطاع الطاقوي. وتزداد أهمية هذه العملية في الجزائر نتيجة تأثير العوامل المناخية الموسمية والظروف الاقتصادية التي تنعكس بشكل مباشر على استغلال مصادر الطاقة المتجددة.

ومن هذا المنطلق، يهدف هذا البحث إلى التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر حتى عام 2035، باعتبارها أحد مصادر الطاقة المتجددة التي لا تقتصر أهميتها على حماية البيئة فقط، بل تساهم أيضًا في تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، وتنشيط الاقتصاد من خلال خفض تكاليف استيراد الطاقة وخلق فرص عمل جديدة في مجال إدارة وتشغيل السدود، وتحسين شبكات إنتاج ونقل الكهرباء بما يضمن إمدادات مستقرة، فضلًا عن آثارها الاجتماعية في تلبية

احتياجات السكان وتوفير ظروف معيشية أفضل. كما يسعى هذا البحث إلى تقديم نماذج عملية تدعم السياسات الطاقوية في البلاد، وذلك بالاعتماد على أسلوبين فعالين في دراسة السلاسل الزمنية، وهما: منهجية Box-Jenkins، باعتبارها أسلوبًا قياسيًّا يقوم على دمج عمليات الانحدار الذاتي والمتوسّطات المتحركة لمعالجة البيانات غير المستقرة، وكذلك أسلوب التمهيد الأسّي Holt-Winters في صورته المبسّطة بدون مكوّن موسمي، الذي يعتمد على مستويين فقط هما المستوى والاتجاه. ولإجراء تقييم دقيق للقدرة التنبؤية لهذين الأسلوبين، قمنا بمقارنتهما مع تقنية الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، التي تُعد من الأدوات الأكثر تطورًا في مجال التنبؤ، نظرًا لقدرتها الكبيرة على التعلم من البيانات الضخمة واكتشاف الأنماط غير الخطية، وهو ما يجعلها مناسبة لمعالجة التحديات المرتبطة بتقلبات إنتاج واستهلاك الطاقة الكهربائية. وعليه، فإن المقارنة بين النماذج التنبؤية تهدف إلى تحديد أيهما يقدم أدق النتائج بشأن استهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر حتى عام 2035، سيتم ذلك من خلال تحليل معدلات الخطأ ودقة التنبؤ مما يساهم في تحسين التخطيط الاستراتيجي لقطاع الطاقة وتعزيز الاستدامة الطاقوية في الجزائر.

أ. الإشكالية:

استنادا الى ما تم ذكره سابقا، يمكن صياغة الإشكالية التي يتناولها هذا البحث في سؤال محوري هو:

أي نموذج يكون أكثر دقة وفعالية للتنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر؟

هذه الإشكالية تطرح العديد من التساؤلات الفرعية التي تسعى الدراسة للإجابة عنها:

- 1 ما مدى فعالية منهجية بوكس-جنكينز (Box-Jenkins) في تحقيق جودة التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية؟
- 2 ما مدى قدرة نموذج التمهيد الأسّي الثلاثي لـ Holt-Winters في تحقيق دقة التنبؤ؟
- 3 هل يمكن تقنية الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) أن تقدم توقعات أفضل؟
- 4 كيف يمكن إجراء مقارنة بين منهجية بوكس-جنكينز (Box-Jenkins)، نموذج التمهيد الأسّي الثلاثي لـ Holt-Winters، وتقنية الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) في مجال التنبؤ.

ب. الفرضيات:

للإجابة على إشكالية دراستنا والمختلف التساؤلات المرتبطة بها، تم صياغة الفرضيات التالية بهدف اختبارها:

- ✓ **الفرضية الأولى:** هل يكون لاستخدام كل من منهجية Box-Jenkins والتمهيد الأسّي الثلاثي نتائج دقيقة في التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر؟
- ✓ **الفرضية الثانية:** هل يؤدي تطبيق نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية ANN إلى تحقيق تنبؤات ذات جودة عالية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر؟

ت. حدود الدراسة:

تم تحديد نطاق البحث من حيث المكان والزمان كما يلي:

✓ **الحدود المكانية:** ركزت الدراسة على تحليل استهلاك وإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر.

✓ **الحدود الزمنية:** اعتمدت الدراسة إلى البيانات السنوية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر للفترة من عام 1965 وحتى عام 2024.

ث. مبررات اختيار موضوع:

إن من أهم الأسباب التي دفعتنا لاختيار هذا الموضوع، هو الرغبة في البحث في مجال الطاقة المتجددة، بهدف التعرف أكثر على إمكانيات الجزائر في هذا القطاع، وأيضا لمواكبة التطورات التي شهدتها النمذجة القياسية في التنبؤ بالطاقة".

ج. أهداف الدراسة وأهميتها:

- تسعى هذه الدراسة، التي تتناول موضوع التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة الشمسية في الجزائر حتى آفاق 2035 باستخدام كل من منهجية بوكس-جنكينز (Box-Jenkins)، والتمهيد الأسّي الثلاثي (Holt-Winters)، وتقنية الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، إلى تحقيق مجموعة من الأهداف الرئيسة، من أبرزها:
- ✓ إبراز القدرات والإمكانات التي تمتلكها الجزائر في مجال استغلال الطاقات المتجددة،
 - ✓ تعزيز توظيف الأساليب الكمية وربطها بالتحليل الاقتصادي من أجل الوصول إلى تنبؤات أكثر دقة وموضوعية..
 - ✓ توضيح أهمية ومزايا النماذج الثلاثة (Box-Jenkins، Holt-Winters، ANN) باعتبارها أدوات فعّالة في التنبؤ، مع إبراز أوجه الاختلاف بينها.
 - ✓ اجراء عملية مقارنة بين نتائج تطبيق هذه النماذج الثلاثة على السلسلة الزمنية الخاصة بالاستهلاك والإنتاج السنوي للطاقة الكهرومائية في الجزائر، بغرض تحديد النموذج الأكثر كفاءة وملاءمة للتنبؤات المستقبلية.

ح. الدراسات السابقة:

هناك العديد من الدراسات والأبحاث التي تناولت موضوع التنبؤ في مجالات مختلفة، وتطرق بوجه خاص إلى المقارنة بين منهجية بوكس-جنكينز، والتمهيد الأسّي الثلاثي، والشبكات العصبية الاصطناعية. ومن بين هذه الدراسات نذكر على سبيل المثال لا الحصر ما يلي:

1. قدّمت جباري لطيفة مصطفى (2015-2016) دراسة بعنوان "طرق اتخاذ القرار باستخدام الذكاء الاصطناعي:

دراسة مقارنة للتنبؤ بالطاقة الكهربائية لولاية تلمسان باستعمال الشبكات العصبية الاصطناعية".

وتهدف هذه الدراسة إلى نمذجة الطلب الكلي على الطاقة الكهربائية بولاية تلمسان اعتمادا على بيانات

مؤسسة سونلغاز للفترة الممتدة من 2011/01/01 إلى 2014/12/31 (48 مشاهدة). اعتمدت الباحثة مقاربتين؛ الأولى إحصائية من خلال منهجية Box-Jenkins ، والثانية تقوم على الذكاء الاصطناعي باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية، وذلك بغرض المقارنة بين الطريقتين واختيار النموذج الأكثر كفاءة في التنبؤ.

وأظهرت النتائج أن الشبكات العصبية الاصطناعية قدّمت أداءً أكثر دقة وواقعية مقارنة بالطريقة الإحصائية، مما يساعد على تفادي الانقطاعات المتكررة وتحسين جودة الخدمة. كما أكدت الدراسة إمكانية تعزيز النماذج المستقبلية بإدراج متغيرات إضافية مثل: درجات الحرارة، الرطوبة، المستوى المعيشي، الحالة الاجتماعية والثقافية، عدد الغرف والمكيفات... بما يسمح بزيادة دقة التنبؤات. وخلصت الباحثة إلى أهمية توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي وتفعيل الشراكة بين الأكاديميين وصانعي القرار لضمان التسيير الأمثل للطاقة الكهربائية باعتبارها مورداً استراتيجياً وحيوياً.

2. تُعد دراسة سهاد علي شهيد (2018) الموسومة "دراسة مقارنة للتنبؤ بمعدلات الرطوبة النسبية (RH%) لحافظة نينوى باستخدام نماذج السلاسل الزمنية الموسمية والشبكات العصبية الاصطناعية"، والمنشورة في مجلة الإدارة والاقتصاد، السنة الحادية والأربعون، العدد 115، من الدراسات المهمة التي قارنت بين النماذج الإحصائية (SARMA) والنماذج الذكية (الشبكات العصبية الاصطناعية) في التنبؤ بالمتغيرات المناخية.

وقد أوضحت الدراسة أن أفضل نموذج ضمن الشبكات العصبية كان NN(12,10,1) المكوّن من (12) متغيراً مزاحاً و(10) عقد مخفية، بينما مثل نموذج SARMA(1,0,1)(0,1,1) أفضل نماذج السلاسل الزمنية الموسمية.

واعتمدت المقارنة على مقاييس إحصائية مثل MAD، MAPE، MAE، RMSE، لتبين النتائج أن أسلوب السلاسل الزمنية الموسمية تفوق على الشبكات العصبية في تحقيق أقل القيم لهذه المقاييس، ما جعله الأنسب للتنبؤ بالرطوبة النسبية لمحطة الموصل.

3. أنجزت بختاوي فاطيمة الزهراء (2019) أطروحة دكتوراه بجامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان، بعنوان "تحليل فورييه وتقنية الشبكات العصبية الاصطناعية ونماذج ARIMA للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية - دراسة حالة مؤسسة سونلغاز، مقاطعة سعيدة -"، هدفت إلى التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في ولاية سعيدة خلال الفترة الممتدة من جانفي 2010 إلى ديسمبر 2017، بالاعتماد على 96 مشاهدة شهرية.

اعتمدت الدراسة على ثلاثة أساليب:

✓ تحليل فورييه،

✓ منهجية بوكس-جنكنز (ARIMA) ،

✓ الشبكات العصبية الاصطناعية.

أثبتت النتائج أنّ تحليل فورييه حقق أداءً تنبؤياً أفضل مقارنة بالنموذجين الآخرين، حيث سجّل أصغر

قيمة لجذر متوسط مربع الخطأ (RMSE)، مما يؤكد فعاليته في التنبؤ بالظواهر الاقتصادية والموسمية.

4. أجرى أمير حسين حمد مسمار (2016) دراسة بعنوان "دراسة مقارنة بين الشبكات العصبية الاصطناعية ومنهجية بوكس-جنكنز في التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية - ولاية الخرطوم"، وهي أطروحة دكتوراه بجامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا، كلية العلوم، قسم الإحصاء التطبيقي.

هدفت الدراسة إلى إبراز أهمية التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية من أجل الاستخدام الأمثل للموارد المتاحة، وذلك من خلال مقارنة منهجيتين مختلفتين في بناء النماذج التنبؤية، هما: منهجية (ARIMA) Box-Jenkins والشبكات العصبية الاصطناعية.

اعتمد الباحث على بيانات الاستهلاك السنوي للكهرباء بولاية الخرطوم خلال الفترة الممتدة من 1982 إلى 2014، وتمت عملية التحليل باستخدام برنامجي SPSS و MATLAB. بالنسبة لمنهجية Box-Jenkins، تم تطبيق المراحل الأربع الأساسية لبناء النموذج (تحديد النموذج، تقدير المعلمات، تشخيص صلاحية النموذج، ثم إجراء التنبؤ)، وأسفر التحليل عن ملاءمة نموذج $ARIMA(1,2,0)$ للبيانات بعد التحقق من جودته باستخدام مؤشرات مثل متوسط مربع الخطأ (MSE) ومتوسط الخطأ المطلق (MAE).

أما في ما يتعلق بالشبكات العصبية الاصطناعية، فقد تم بناء النموذج عبر ست خطوات رئيسية، شملت تقسيم البيانات إلى ثلاث مجموعات: بيانات التدريب (70% من السلسلة الزمنية، أي حوالي 23 مشاهدة)، بيانات التحقق (15%، حوالي 5 مشاهدات)، وبيانات الاختبار (15%، حوالي 5 مشاهدات). جرى تدريب الشبكة عدة مرات بهدف الوصول إلى أقل قيمة لمربع الخطأ، ومن خلال التكرار وإعادة الضبط تمكنت الشبكة من تحديد الأوزان المثلى التي تحقق أفضل دقة للتنبؤ.

وقد تمت المقارنة بين نتائج الطريقتين باستخدام مجموعة من المعايير الإحصائية هي: MSE، MAE، MAD، و MAPE، وأظهرت النتائج تفوق الشبكات العصبية الاصطناعية في دقة التنبؤ مقارنةً بنماذج ARIMA. كما قامت الأطروحة بتوليد تنبؤات باستهلاك الكهرباء للفترة الممتدة من 2015 إلى 2020، وأوصى الباحث في ضوء النتائج بضرورة اعتماد الشبكات العصبية الاصطناعية كخيار فعال للتنبؤ بالسلاسل الزمنية في قطاع الطاقة وغيره من المجالات.

5. أجرى زدون جمال وعشوي نصر الدين (2015) دراسة بعنوان "النموذج القياسي الأمثل للتنبؤ بالطلب على الطاقة الكهربائية في تلمسان"، نُشرت في مجلة التكامل الاقتصادي، المجلد 3، العدد 3، الصفحات 246-265، سبتمبر 2015.

هدفت هذه الدراسة إلى تحديد النموذج القياسي الأكثر دقة وملاءمة للتنبؤ بالطلب على الطاقة الكهربائية في

ولاية تلمسان، وذلك في ظل تزايد استهلاك الطاقة وتوسع الشبكات الكهربائية.

اعتمد الباحثان على تطبيق أربعة نماذج قياسية مختلفة، هي:

✓ نموذج (Box-Jenkins) (ARIMA).

✓ نموذج Holt-Winters للتنبؤ الموسمي،

✓ نموذج الاتجاه العام (Trend Model)،

✓ نموذج الانحدار الخطي البسيط.

أُستُخدمت في التحليل سلسلتان زمنيةتان:

1. استهلاك الطاقة الكهربائية (CE) ،

2. عدد المشتركين في الشبكات الكهربائية (CL) ،

وذلك بالاعتماد على بيانات فصلية تغطي الفترة الممتدة من 2007 إلى 2012.

أظهرت نتائج المقارنة بين النماذج أن نموذج Box-Jenkins هو النموذج الأكثر ملاءمة ودقة للتنبؤ بالطلب

على الطاقة الكهربائية في تلمسان، مقارنة بالنماذج الأخرى. وهو ما يعكس فعالية هذه المنهجية في التعامل مع السلاسل الزمنية القصيرة والمتوسطة المدى.

6. قدّمت عتروس سهيلة (2017-2018) رسالة دكتوراه في علوم التسيير بجامعة محمد خيضر - بسكرة، بعنوان :

"استخدام منهجية بوكس جنكنز والشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية بمؤسسة سونلغاز

— دراسة حالة: ولاية بسكرة."

انطلقت الدراسة من ملاحظة التطور الكبير الذي عرفه قطاع الكهرباء في الجزائر نتيجة للنمو الاقتصادي

والتكنولوجي والديموغرافي، وما نتج عنه من تزايد مستمر في الاستهلاك الطاقوي، مما جعل مسألة التنبؤ بالاستهلاك المستقبلي تحتل أهمية استراتيجية بالنسبة للمؤسسات الطاقوية.

لذلك هدفت الأطروحة إلى اختبار فعالية كل من منهجية بوكس-جنكنز (Box-Jenkins) والشبكات العصبية

الاصطناعية (ANNs) في التنبؤ بالقيم المستقبلية لاستهلاك الطاقة الكهربائية. تجسدت عينة الدراسة في بيانات شهرية

لاستهلاك الكهرباء ذات التوتر المنخفض والمتوسط بولاية بسكرة خلال الفترة الممتدة من جانفي 2014 إلى ديسمبر

2017. وبعد تطبيق المنهجين محل الدراسة ومقارنة نتائجهما، توصلت الباحثة إلى أن منهجية بوكس-جنكنز قدّمت

نتائج أكثر دقة وقرباً من القيم الفعلية، مما يجعلها الأداة الأنسب لمؤسسة سونلغاز في مجال التنبؤ، مقارنةً بنتائج الشبكات العصبية الاصطناعية.

أبرزت هذه النتائج أن المنهجيات الإحصائية التقليدية مثل Box-Jenkins ما تزال تحتفظ بقدرتها التفسيرية والدقة

العالية في التنبؤ، خصوصاً في حالة السلاسل الزمنية المستقرة نسبياً، على الرغم من الإمكانيات الكبيرة للشبكات العصبية الاصطناعية في معالجة البيانات غير الخطية والمعقدة.

7. صاري حسون صلاح الدين، نعمان محمد عبد الجليل، ومليوي عيد الغاني (2023)، "دراسة تنبؤ الاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر باستعمال منهجية بوكس جنكينز وأسلوب التمليس الأسّي"، مجلة الأصيل للبحوث الاقتصادية والإدارية، المجلد 7، العدد 2، الصفحات 379-398، 31 أكتوبر 2023.

تركزت هذه الدراسة على التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة الممتدة بين 1980 و2021، وذلك باستخدام منهجية بوكس-جنكينز (Box-Jenkins) وأسلوب التمليس الأسّي (Exponential Smoothing) وقد تم تطبيق عدة نماذج للتنبؤ:

✓ طريقة التمهيد الأسّي: (Brown) أظهرت النتائج أن الاستهلاك المتوقع بلغ 76.41 مليار TWh سنة 2022، و 79.85 مليار TWh سنة 2023، ثم 83.29 مليار TWh سنة 2024 و 86.73 مليار TWh سنة 2025.

✓ طريقة Holt: أشارت التنبؤات إلى 74.81 مليار TWh سنة 2022، و 78.21 مليار TWh سنة 2023، ثم 81.64 مليار TWh سنة 2024 و 85.04 مليار TWh سنة 2025.

✓ منهجية بوكس-جنكينز: (ARIMA) أظهرت التقديرات أن الاستهلاك بلغ 75.82 مليار TWh سنة 2022، ثم ارتفع إلى 78.99 مليار TWh سنة 2023، ليصل إلى 82.98 مليار TWh سنة 2024 و 87.07 مليار TWh سنة 2025.

خلص الباحثون إلى أن النماذج المستخدمة أثبتت كفاءتها في إعطاء مؤشرات دقيقة حول اتجاهات استهلاك

الكهرباء في الجزائر، مما يوفر أداة مهمة لصانعي القرار في التخطيط لسياسات الطاقة المستقبلية.

8. في مقال بعنوان :

"A comparison of Holt-Winter and Artificial Neural Network approach in forecasting: A case study for tent manufacturing industry"

نُشر في مجلة Results in Engineering (المجلد 21، مارس 2024، ص. 101899)، قام جورج رومي (George Rumbe)، محمد حماسة (Mohammad Hamasha)، وسحر المشاقبة (Sahar Al Mashaqbeh) بدراسة مقارنة بين منهجية Holt-Winters والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) في التنبؤ بالطلب داخل قطاع تصنيع الخيام.

ارتكزت الدراسة على دراسة حالة لشركة تصنيع خيام، حيث تم التركيز على ديناميكيات تذبذب الطلب

تحت تأثير العوامل الموسمية.

أظهرت النتائج أن نموذج ANN قدم دقة تنبؤية أفضل مقارنةً بمنهجية Holt-Winters، خصوصًا في توقع الطلب على خيام Elite و Party Canopy، في حين لوحظ هامش خطأ بنسبة 15% في التنبؤ بخيام Vista. كما تناولت الدراسة السياق الأوسع لسلسلة الإمداد في صناعة الخيام، من خلال استعراض العوامل المؤثرة على مبيعات الخيام التجارية وتحديد أبرز الفاعلين في سلسلة التوريد. خلصت النتائج إلى أن نموذج ANN يتمتع بقدرة عالية على التقاط الأنماط المعقدة في الطلب، مما يجعله أداة واعدة لتطوير ممارسات أكثر دقة في التنبؤ داخل قطاع الصناعات التحويلية.

9. قدم ماريا ماركوفسكا (Marija Markovska)، أنيتا بوتشكوفسكا (Aneta Bučkovska)، وديميتار تاسكوفسكي (Dimitar Taskovski) من جامعة القديسين كيريل وميتودوس – سكوبي، مقدونيا الشمالية، دراسة بعنوان:

"Comparative study of ARIMA and Holt-Winters statistical models for prediction of "energy consumption"

تناولت مقارنة بين نموذج ARIMA ونموذج Holt-Winters للتنبؤ باستهلاك الطاقة. اعتمدت الدراسة على بيانات استهلاك الطاقة الفعلية الخاصة بكلية الهندسة الكهربائية وتكنولوجيا المعلومات في سكوبي خلال الفترة من 01-01-2014 إلى 31-05-2016. تم تطبيق النماذج على بيانات زمنية يومية، أسبوعية وشهرية للفترة من يناير إلى مايو 2016، مع تقييم الدقة باستخدام مؤشرات RMSE و MAE. أظهرت النتائج أن نموذج ARIMA أكثر دقة عند التعامل مع السلاسل الزمنية اليومية، بينما قدم نموذج Holt-Winters أداءً أفضل على المستويات الأسبوعية والشهرية. وتبرز أهمية هذه النتائج في كونها تقدم رؤية عملية لاختيار النموذج الإحصائي المناسب بحسب طبيعة البيانات الزمنية المستخدمة في التنبؤ باستهلاك الطاقة.

10. في ورقة بحثية بعنوان:

"Comparison between ARIMA and ANN models used in short-term wind speed forecasting"

قدمت في المؤتمر الآسيوي-الهادئ لهندسة الطاقة والطاقة (Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference – APPEEC 2011) المنعقد في ووهان، الصين خلال شهر مارس 2011، ونُشرت لاحقًا على منصة IEEE Xplore بتاريخ 11 أبريل 2011، قام الباحثان لينغ تشين (Ling Chen) وشو لاي (Xu Lai) بدراسة مقارنة بين النماذج الإحصائية والذكاء الاصطناعي في التنبؤ قصير المدى بسرعة الرياح.

تُبرز الدراسة أهمية طاقة الرياح كأحد أهم البدائل لمواجهة أزمة الطاقة العالمية، لكنها في الوقت ذاته تعاني

من عدم الاستقرار والتقلبات مما يخلق تحديات تشغيلية لشبكات الطاقة المتصلة بها. اعتمد الباحثان على نموذجين للتنبؤ:

✓ النموذج الإحصائي. (ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average)

✓ النموذج الذكي. (ANN (Artificial Neural Network)

تم تطبيق النماذج على بيانات سرعة الرياح المسجلة في حديقة رياح بمقاطعة هوي - الصين، وذلك للتنبؤ بسرعة الرياح على المدى القصير (من ساعة واحدة حتى أربع ساعات مسبقاً)، مع تقسيم البيانات شهرياً لتحليل الأداء. أظهرت النتائج أن كلا النموذجين يحققان توافقاً جيداً مع القيم المقاسة، غير أن النموذج العصبي ANN تفوق بوضوح على ARIMA في دقة التنبؤ بالرياح على المدى القصير. وأكدت الدراسة أن السلاسل الزمنية ذات التباين المرتفع تستلزم بناء نماذج خاصة بها، وفي الحالات التي يكون فيها التباين كبيراً جداً، يصبح من الضروري اللجوء إلى نماذج هجينة أو التنبؤ العددي بالطقس لتحقيق نتائج أكثر موثوقية.

خ. منهج البحث:

في الفصلين الأول والثاني تم الاعتماد على المنهج الوصفي لشرح المفاهيم الأساسية وتوضيح الإطار النظري للدراسة، بينما في الفصل الثالث تم استخدام المنهج الكمي التحليلي لاختبار الفرضيات. كما جرى معالجة البيانات المجمعة وتحليلها بالاستعانة بأدوات إحصائية تتناسب مع طبيعة الموضوع قيد الدراسة.

د. هيكل الدراسة:

بغية الإلمام بالموضوع محلّ البحث، وعلى ضوء الإشكالية المطروحة، تم تقسيم البحث إلى ثلاثة فصول بالإضافة إلى مقدمة وخاتمة، وذلك على النحو التالي:

✓ الفصل الأول: بعنوان مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر.

"في هذا الفصل تم التطرق إلى أهم المفاهيم الخاصة بالطاقة المتجددة من حيث استعمالاتها، أنواعها وأهميتها في مختلف القطاعات، مع إبراز الإمكانيات المتاحة للطاقات المتجددة في الجزائر. كما تم عرض واقع وآفاق إنتاج واستهلاك هذه الطاقات في الجزائر وسبل ترشيدها باعتبارها من أهم الموارد الضرورية في حياتنا اليومية".

✓ الفصل الثاني: بعنوان النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة.

"يتضمن هذا الفصل تحليلاً نظرياً مفصلاً للنماذج القياسية المستعملة في التنبؤ، حيث يبدأ بعرض الأدبيات والدراسات السابقة ذات الصلة، سواء العربية أو الأجنبية، ثم تحديد موقع الدراسة الحالية ضمن المجال البحثي، ثم شرح أهم أنواع النماذج القياسية المعتمدة. كما تم التطرق إلى منهجية بوكس-جنكينز (Box-Jenkins) بمراحلها المختلفة، وأسلوب

التمهيد الأساسي الثلاثي (Holt-Winters) في تحليل السلاسل الزمنية من جهة، وتقنية الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) وفلسفتها وأهم المفاهيم المتعلقة بها من جهة أخرى، مع بيان كيفية استخدام كل منها كأداة للتنبؤ".

✓ الفصل الثالث: بعنوان التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر.

"يتناول هذا الفصل الجانب القياسي التطبيقي للدراسة، من خلال تحليل السلسلة السنوية لاستهلاك وإنتاج الطاقة المتجددة في الجزائر، وذلك عبر دراسة أولية لطبيعة هذه السلسلة. كما تم اعتماد الأدوات المعروضة في الفصلين السابقين للتنبؤ بقيمتها المستقبلية، مع إجراء المفاضلة بين نتائج النماذج المختلفة بالاعتماد على مؤشرات جودة التنبؤ.

وأخيراً، جاءت الخاتمة لتتضمن مجموعة من النتائج التي تم التوصل إليها، بالإضافة إلى نتائج اختبار الفرضيات المطروحة، فضلاً عن تقديم جملة من التوصيات والاقتراحات.

ذ. صعوبات الدراسة:

تتمثل الصعوبة الأساسية لهذه الدراسة في غياب قاعدة بيانات شاملة تخص مختلف مصادر الطاقات المتجددة في الجزائر. ولهذا تم اختيار الطاقة الكهربائية فقط، لكونها المصدر الذي تتوفر بشأنه معطيات إحصائية منتظمة وموثوقة، مما أتاح إمكانية تطبيق النماذج القياسية المختارة للتنبؤ باستهلاكها وإنتاجها خلال الفترة الممتدة من 2025 إلى 2035، والحصول على نتائج أكثر دقة.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

تمهيد:

أصبح موضوع الطاقات المتجددة في السنوات الأخيرة من أبرز القضايا المطروحة على الصعيدين الدولي والوطني، نظرا لما يشهده العالم من تحديات متزايدة ترتبط بندرة الموارد الأحفورية، وتفاقم الأضرار البيئية الناتجة عن الاستغلال المفرط للطاقات التقليدية. ففي ظل هذه التحديات، أصبحت الحاجة ملحة لإعادة النظر في السياسات الطاقوية المتبعة، وتوجيه الجهود نحو مصادر بديلة، نظيفة ومستدامة، قادرة على تلبية حاجيات الحاضر دون الإضرار بحقوق الأجيال القادمة. تُعد الجزائر من بين الدول التي تمتلك إمكانات هامة في مجال الطاقات المتجددة، لا سيما الطاقة الشمسية، التي تمثل أحد أبرز الموارد الطبيعية غير المستغلة بالشكل الكافي حتى الآن. كما تزخر البلاد بمؤهلات أخرى كطاقة الرياح، والكتلة الحيوية، والطاقة الحرارية الجوفية، مما يجعل من تطوير هذا القطاع خيارًا استراتيجيًا لتحقيق الأمن الطاقوي وتنويع الاقتصاد الوطني.

وبناءً على ما سبق، يأتي هذا الفصل ليسلط الضوء على الإطار المفاهيمي والتطبيقي للطاقات المتجددة، من خلال التطرق إلى مفهومها وأهميتها، واستعراض مختلف مصادرها، مع التوقف عند أبرز المميزات التي تقدمها والتحديات التي تعيق استغلالها الكامل. كما يتناول واقع قطاع الطاقات المتجددة في الجزائر من منظور تشريعي وتنظيمي، إضافة إلى تقييم القدرات الوطنية في هذا المجال، مع إبراز التوجهات الاستراتيجية التي اعتمدها الدولة ضمن رؤيتها المستقبلية الممتدة حتى عام 2030.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

المبحث الاول: عموميات حول الطاقة المتجددة.

تُعتبر الطاقة المتجددة خيارًا استراتيجيًا لتحقيق التنمية المستدامة، نظرًا لقدرتها على توفير بدائل نظيفة وآمنة للطاقة التقليدية، في ظل التحديات البيئية والاقتصادية العالمية. يفرض التغير المناخي ونفاذ الموارد الأحفورية على الدول إعادة تشكيل سياساتها الطاقوية نحو نماذج أكثر استدامة. وفي الجزائر، جاء هذا التحول استجابة لتراجع احتياطات المحروقات وتذبذب إيراداتها، ما دفع إلى تبني رؤية تقوم على تنويع مصادر الطاقة وتعزيز دور الطاقات النظيفة. يستعرض هذا المبحث الإطار المفاهيمي للطاقة المتجددة من خلال التعريف بها، وخصائصها، وأنواعها، إلى جانب تطرق لمميزات و عيوب استخدامها.

المطلب الاول: مفهوم الطاقات المتجددة وأهميتها

يمثل مفهوم الطاقة المتجددة ركيزة أساسية في التحول الطاقوي المعاصر، نظرًا لدورها في مواجهة التحديات البيئية والاقتصادية، لا سيما في ظل نزوب الموارد الأحفورية. وتستند هذه الطاقة إلى مصادر طبيعية دائمة كالرياح والشمس والكتلة الحيوية، مما يمنحها طابعًا استراتيجيًا في سياسات التنمية المستدامة. رغم تنوع التعريفات حسب السياقات، إلا أن الطاقة المتجددة تُجمع على كونها نابعة من موارد طبيعية متجددة بفعل الظواهر البيئية. وقد أضحت عنصرًا محوريًا في استراتيجيات الانتقال الطاقوي عالميًا بفضل مزاياها البيئية والاقتصادية، وهو ما يعزز الحاجة إلى تقديم إطار مفاهيمي دقيق لهذا المفهوم في ضوء التجارب الدولية والواقع الطاقوي الوطني.

الفرع الأول: تعريف الطاقات المتجددة:

نظرا للأهمية المتزايدة التي تحظى بها الطاقات المتجددة في السياسات الطاقوية والبيئية على الصعيدين الوطني والدولي، فقد تعددت التعاريف المرتبطة بها واختلفت باختلاف السياقات المؤسسية والعلمية التي صيغت ضمنها. فقد ساهمت المنظمات الدولية المتخصصة، على غرار الوكالة الدولية للطاقة (IEA) والوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA)، إلى جانب الباحثين والأكاديميين، في إثراء المفهوم وتقديم رؤى متنوعة تعكس الأبعاد التقنية والاقتصادية والبيئية لهذا النوع من الطاقة.

وفي هذا الإطار، يُخصص هذا الفرع لاستعراض مجموعة مختارة من التعاريف التي توضح ماهية الطاقة المتجددة، مع إبراز القواسم المشتركة والاختلافات فيما بينها، بما يسمح ببناء فهم شامل ومتوازن لهذا المفهوم المحوري في التحول الطاقوي المعاصر.

- ✓ الطاقة المتجددة هي الطاقة المستمدة من الموارد الطبيعية التي تتجدد أي التي لا تنفذ , تختلف جوهرياً عن الوقود الاحفوري من البترول والفحم والغاز الطبيعي لذلك يمكن تعريف الطاقة المتجددة بانها:
- هي تلك الموارد التي نحصل عليها من خلال تيارات الطاقة التي يتكرر وجودها في الطبيعة علي نحو تلقائي ودوري.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

- وايضاً الطاقة المتجددة هي عبارة عن مصادر طبيعية دائمة وغير ناضبة ومتوفرة في الطبيعة سواء كانت محدودة وغير محدودة ولكنها متجددة باستمرار , وهي نظيفة لا ينتج عنها تلوث بيئي نسبياً¹.

✓ **تعريف وكالة الطاقة العالمية (IEA):** "تشكل الطاقة المتجددة من مصادر الطاقة الناتجة عن مسارات الطبيعة التلقائية كأشعة الشمس والرياح، والتي تتجدد في الطبيعة بوتيرة أعلى من وتيرة استهلاكها"².

✓ **تعريف برنامج الأمم المتحدة (UN):** تُعرّف الطاقة المتجددة على أنها الطاقة المستمدة من مصادر طبيعية قادرة على التجدد بشكل مستمر وبمعدل يفوق استهلاكها من قبل الإنسان. وتُعد كل من أشعة الشمس وحركة الرياح من أبرز هذه المصادر التي تتوفر بوفرة في مختلف أنحاء العالم، دون أن يؤدي استغلالها إلى نضوبها أو استنزافها على المدى الطويل. وتتميز مصادر الطاقة المتجددة بكونها موزعة جغرافياً ومتاحة محلياً، ما يجعلها خياراً استراتيجياً لتأمين إمدادات الطاقة المستدامة.

في المقابل، يعتمد النظام الطاقوي التقليدي على الوقود الأحفوري، كالنفط، الفحم، والغاز الطبيعي، وهي موارد غير متجددة نشأت عبر عمليات جيولوجية استغرقت مئات الملايين من السنين. ويؤدي الاعتماد المكثف على هذه المصادر إلى آثار بيئية خطيرة، حيث يسهم احتراقها في إطلاق كميات كبيرة من غازات الدفيئة، وعلى رأسها غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، مما يُفاقم ظاهرة الاحتباس الحراري ويهدد التوازن البيئي العالمي³. أما الانبعاثات الناتجة عن إنتاج الطاقة من المصادر المتجددة منخفضة بشكل ملحوظ مقارنة بتلك المنبعثة من احتراق الوقود الأحفوري، الذي يُعد المصدر الرئيسي لانبعاثات غازات الدفيئة عالمياً. ومن هذا المنطلق، فإن الانتقال من نظام طاقي قائم على الوقود الأحفوري إلى نظام يعتمد على مصادر الطاقة المتجددة يُعتبر خياراً ضرورياً لمعالجة أزمة المناخ والتقليل من آثار التغيرات المناخية المتسارعة.

علاوة على ذلك، أظهرت المؤشرات الاقتصادية الحديثة أن تكلفة إنتاج الطاقة المتجددة قد أصبحت، في معظم دول العالم، أقل من تكلفة الطاقة المولدة من مصادر تقليدية. ولا يقتصر الأمر على الجانب البيئي والاقتصادي فحسب، بل يتعداه إلى البُعد الاجتماعي، حيث تشير الدراسات إلى أن قطاع الطاقة المتجددة يوفر فرص عمل تفوق بثلاثة أضعاف ما يوفره قطاع الوقود الأحفوري، ما يجعله رافعة هامة لتحقيق التحول الطاقوي العادل والتنمية المستدامة⁴.

¹ المركز الديمقراطي العربي للدراسات الاستراتيجية، الاقتصادية و السياسية، الطاقة المتجددة ودورها في تحقيق التنمية المستدامة في ضوء التجارب الدولية دراسة حالة

“مصر ”، على الموقع الالكتروني: <https://democraticac.de/?p=55341>

² موقع وكالة الطاقة الدولية ، على الموقع الالكتروني: <https://www.iea.org>

³ United Nations, Economic and Social Council, Economic Commission for Europe Committee on Sustainable Energy ,Specifications for the application of the United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Reserves and Resources 2009 to Renewable Energy Resources, 19 July 2016,p4

⁴ UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources, UNITED NATIONS GENEVA, 2022,p6

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

- ✓ تعرف الطاقة المتجددة (Renewable Energy) بأنها الطاقة التي يتم الحصول عليها من مصادر بمعدل اقل من أو يساوي إعادة سد النقص في المصدر¹.
- ✓ الطاقات المتجددة هي الطاقات التي يتم الحصول عليها من خلال تدفقات الطاقة المتكررة والدورية في الطبيعة، وتختلف عن الطاقات غير المتجددة التي عادة ما تكون مخزنة في الأرض بشكل صلب ولا يمكن الاستفادة منها إلا بتدخل الإنسان لاستخراجها².
- ✓ تُعرف الطاقة المتجددة بأنها شكل من أشكال الطاقة التي تُنتج من مصادر طبيعية تتجدد باستمرار، وتستخدم الطاقة المتجددة في ثلاثة أشكال رئيسية³:
- توليد الكهرباء، حيث يُستغل الموارد المتجددة لتوليد الكهرباء وتوزيعها للاستخدامات المنزلية والتجارية والصناعية؛
 - التدفئة، سواء كانت مركزية أو غير مركزية في المباني الفردية، حيث يمكن استخدام مصادر الطاقة المتجددة لتسخين المباني مباشرة، مثل استخدام الطاقة الشمسية لتسخين الماء؛
 - والنقل، حيث يمكن توليد وقود المركبات الخاصة ووسائل النقل العام ووقود وسائل النقل الصناعية والتجارية، مثل القطارات والسفن والطائرات، من مصادر الطاقة المتجددة.
- ✓ الطاقة المتجددة هي "الطاقة التي تنشأ من مصادر غير مستنفدة اقتصاديا، وتتجدد باستمرار طالما توجد حياة على سطح الأرض"⁴.
- ✓ تعريف الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC): تُعرف الطاقة المتجددة بأنها شكل من أشكال الطاقة التي تستمد من مصادر طبيعية دائمة أو دورية التجدد، سواء كانت ذات أصل شمسي أو جيوفيزيائي أو بيولوجي، وتتميز بقدرتها على التجدد بمعدل يساوي أو يفوق معدل استهلاكها. وتنشأ هذه الطاقة عن الظواهر الطبيعية المستمرة، مثل الإشعاع الشمسي، الرياح، حركة المياه، حرارة باطن الأرض، والكتلة الحيوية. وتُمثل هذه المصادر قاعدة أساسية لتوليد الطاقة الأولية، التي يمكن تحويلها إلى طاقة كهربائية، حرارية، أو حركية، وذلك من خلال تقنيات متطورة تمكّن من تسخيرها بشكل فعال لتلبية الاحتياجات المتزايدة لخدمات الطاقة.
- وقد أسهم التقدم التكنولوجي في تحسين كفاءة هذه العمليات التحويلية، مما عزز من جدوى الطاقة المتجددة

¹ جون ر. فانشي، الطاقة التقنية والتوجهات للمستقبل، ترجمة (د. عبد الباسط علي صالح كرماني)، سلسلة كتب التقنيات الإستراتيجية والمتقدمة، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية، المنظمة العربية للترجمة، مركز دراسات الوحدة العربية، ط 1، بيروت، 2011، ص 297.

² زاوي أحلام، دور اقتصاديات الطاقة المتجددة في تحقيق التنمية المستدامة في الدول المغاربية، مذكرة ماجستير في الاقتصاد الدولي والتنمية المستدامة، جامعة سطيف، الجزائر، 2012-2013، ص 59.

³ حمزة جعفر، آليات تمويل و تنمية مشاريع الطاقة المتجددة لتحقيق التنمية المستدامة في الجزائر، أطروحة مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم الاقتصادية تخصص الاقتصاد الدولي و التنمية المستدامة، جامعة فرحات عباس سطيف 2017-2018، ص 59.

⁴ هشام حريز، دور إنتاج الطاقة المتجددة في إعادة هيكلة سوق الطاقة، دار الوفاء، الطبعة الأولى، مصر، 2014، ص 102.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

كمصدر مستدام وموثوق في مختلف القطاعات الإنتاجية والخدمية. ويمثل هذا التنوع في مصادر الطاقة المتجددة وإمكانيات تحويلها ركيزة أساسية لتحقيق أمن طاقي قائم على الاستدامة والابتكار¹.

انطلاقاً مما سبق، يمكن التأكيد على أن كافة مصادر الطاقة المتجددة تستند إلى مصادر طبيعية غير أحفورية لا تنضب، وتشمل بالأساس: الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، طاقة الكتلة الحيوية، الطاقة الكهرومائية، الطاقة الحرارية الجوفية، بالإضافة إلى طاقتي الأمواج والمد والجزر. وتتميز هذه الموارد بقدرتها على التجدد التلقائي ضمن دورات طبيعية مستمرة، وبمعدل يساوي أو يفوق معدل استهلاكها البشري، مما يجعلها خياراً استراتيجياً لتحقيق أمن طاقي مستدام.

وبناء على ذلك، يُمكن تعريف الطاقة المتجددة بأنها تلك الموارد الطاقوية المتوفرة في الطبيعة، والتي تتجدد بشكل طبيعي دون أن يؤدي استخدامها إلى نضوبها أو استنزافها. وتُجدر الإشارة إلى أن مفهوم الطاقة المتجددة ليس مفهوماً حديث النشأة، بل هو امتداد تاريخي لاستخدامات بشرية قديمة لمصادر الطاقة الطبيعية، والتي كانت تعتمد على الشمس، الرياح، والمياه قبل أن يتم استبدالها تدريجياً بمصادر الطاقة الأحفورية مع بروز الثورة الصناعية وتطور التكنولوجيا².

الفرع الثاني: أهمية الطاقات المتجددة

تُعد الطاقة المتجددة عنصراً محورياً في التحولات الكبرى التي يشهدها العالم في مجالات التنمية والاقتصاد والطاقة، إذ أدى الارتفاع المتزايد في معدلات الاستثمار فيها إلى توسع نطاق استخدامها وانتشارها على الصعيدين الإقليمي والدولي. وقد أضحت الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة ضرورة حتمية لتحقيق متطلبات التنمية المستدامة، لكونها تمثل بديلاً نظيفاً ومستداماً عن مصادر الطاقة التقليدية، وتوفّر حلولاً متعددة لمواجهة التحديات البيئية والاقتصادية الراهنة.

ولم يعد تبني هذه المصادر مقتصرًا على الدول المتقدمة ذات الإمكانيات التكنولوجية والعلمية العالية، بل أصبحت الدول النامية قادرة هي الأخرى على الانخراط في مسار التحول الطاقوي. بل إن بعض الدول النامية تمتلك إمكانات طبيعية تؤهلها للاستفادة من الطاقة المتجددة بشكل يفوق نظيراتها من الدول الصناعية، خصوصاً تلك التي تعاني من ندرة الموارد الأحفورية. وقد أتاح هذا الواقع آفاقاً جديدة لهذه الدول لتأمين احتياجاتها الطاقوية بوسائل أكثر كفاءة، وأقل تكلفة، وأكثر مراعاة للبيئة، مما يعزز فرص النمو ويقلص الفجوة الطاقوية.

ومن جهة أخرى، فإن وفرة مصادر الطاقة المتجددة وتوزعها الجغرافي يسهم في تعزيز أمن الطاقة على المدى الطويل، ويحد من الصراعات الجيوسياسية المرتبطة بالتحكم في الموارد الطاقوية التقليدية. كما تُعد الطاقة المتجددة أداة فعالة في الحد من تغير المناخ، لما توفره من بدائل منخفضة الانبعاثات الكربونية، تسهم في بناء اقتصادات منخفضة الكربون وأكثر استدامة.

¹Edenhofer Ottmar, Ramon Pichs Madruga, Youba Sokona and others, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, CAMBRIDGE University Press, USA, First published 2012, P 178

² Andexer Thomas, A Hypothetical Enhanced Renewable Energy Utilization (EREU) Model for Electricity Generation in Thailand, Der Deutschen Bibliothek, Norderstedt Germany, 2008, P 16

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

واستناداً إلى ما تقدم، يمكن استخلاص الأهمية المتزايدة للطاقة المتجددة في النقاط الآتية¹:

أولاً: الأهمية البيئية للطاقة المتجددة

تُعد الاعتبارات البيئية من أبرز الدوافع التي تبرر التوجه المتزايد نحو الطاقة المتجددة، لاسيما في ظل تصاعد التحديات المناخية العالمية. فمن المعروف أن أحد أخطر الآثار البيئية المرتبطة باستخدام مصادر الطاقة التقليدية، خاصة الوقود الأحفوري، يتمثل في ظاهرة الاحتباس الحراري الناتجة عن الانبعاثات الكثيفة لغازات الدفيئة. وفي المقابل، تبرز الطاقة المتجددة كخيار بيئي مستدام، لما تحقّقه من تخفيض ملموس في هذه الانبعاثات، مما يساهم في الحد من التغير المناخي واحتواء ارتفاع درجات الحرارة على المستوى الكوكبي².

وقد شكلت هذه القضية محور اهتمام القمم المناخية الدولية، وعلى رأسها مؤتمر الأطراف الحادي والعشرون (COP21) الذي انعقد في باريس سنة 2015، والذي أفضى إلى اتفاقية باريس التاريخية. وقد تم خلال هذا المؤتمر التوافق على ضرورة الإبقاء على مستوى الاحترار العالمي دون 2 درجة مئوية، مع السعي الحثيث إلى حصره عند 1.5 درجة مئوية مقارنة بعصر ما قبل الثورة الصناعية³. ورغم أن هذه القمة جاءت بعد مئات المؤتمرات والمبادرات السابقة، إلا أن معظمها لم يُحقق اختراقاً فعلياً في مسار خفض الانبعاثات.

وفي تطور لاحق، شهد مؤتمر الأطراف التاسع والعشرون (COP29) المنعقد في أذربيجان تقدماً ملموساً، حيث تم التوصل إلى اتفاق حول تفعيل أسواق الكربون، وهو إنجاز لم تتمكن مؤتمرات سابقة من تحقيقه. وقد مثّل هذا الاتفاق خطوة مهمة نحو بلوغ هدف خفض الانبعاثات العالمية إلى النصف بحلول نهاية هذا العقد، باعتباره شرطاً ضرورياً للحد من الاحترار عند عتبة 1.5 درجة مئوية⁴.

ومن الجدير بالذكر أن تحقيق هذا الهدف المناخي الطموح لا بد أن يتم في ظل واقع عالمي يتسم بارتفاع متزايد في عدد السكان، وتزايد مستمر في الطلب على خدمات الطاقة والبنية التحتية المرتبطة بها. ولذلك، فإن الانتقال نحو مصادر طاقة جديدة ونظيفة لا يُعد خياراً بيئياً فحسب، بل ضرورة إستراتيجية لتأمين مستقبل الأجيال القادمة، من خلال تلبية الحاجيات الطاقوية دون الإضرار بالنظم البيئية⁵. وعليه، يتبين بوضوح أن الطاقة المتجددة تكتسي أهمية بالغة في حماية البيئة،

¹ عماد تكواشت، دور الطاقة المتجددة في مواجهة الطلب على الطاقة في الجزائر، أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه في علوم العلوم الاقتصادية، جامعة الجزائر 03، 2018-2019، ص 07.

² محمد مداحي، فعالية الاستثمار في الطاقات المتجددة في ظل التوجه الحديث للاقتصاد الأخضر، التوجه الجزائري على ضوء بعض التجارب الدولية، أطروحة مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم الاقتصادية، جامعة يحي فارس بالمدينة، 2015-2016، ص 94.

³ Find out more about COP21, Available on: <http://www.cop21paris.org>

⁴ Find out more about cop 29, Available on <https://unfccc.int/ar/news/cop29>

⁵ جميلة منيجل، دور البدائل الاستثمارية في هيكلة جديدة لتمويل الاقتصاد الجزائري دراسة حالة الطاقات المتجددة في الجزائر، أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه الطور الثالث في العلوم الاقتصادية، جامعة فرحات عباس سطيف-2018، 2019-1، ص 95.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

وذلك لكونها طاقة غير ناضبة من جهة، ولأنها تمثل عاملاً أساسياً في تعزيز الأمان البيئي وضمان استدامة الموارد من جهة أخرى.¹

ثانياً: مواجهة نضوب مصادر الطاقة التقليدية

نتيجة لاعتماد العالم على الطاقات الأحفورية (النفط و الغاز) في عملية الانتاج، و مع إمكانية نضوب هذه الطاقة غير مستدامة، كان لا بد من إيجاد مصادر جديدة للطاقة المستقبلية و لعل أهمها الطاقة المتجددة² التي تتمتع بالديمومة و التجدد.³

ثالثاً: الاستقرار السعري النسبي والطابع الاستراتيجي للطاقة المتجددة

تُعد الطاقة المتجددة خياراً استراتيجياً نظراً لما تتسم به أسعارها من قدر نسبي من الثبات والاستقرار، مقارنة بالتقلبات الحادة التي تعرفها أسواق الطاقة التقليدية. وعلى الرغم من أن تكاليف إنتاج الطاقة المتجددة قد شهدت في مراحل سابقة ارتفاعاً نسبياً نتيجة لتكاليف التكنولوجيا والتجهيزات، فإن التقدم التكنولوجي المستمر ساهم في تقليص هذه التكاليف بشكل ملحوظ، مما عزز من قدرتها التنافسية.

وفي المقابل، شهدت أسواق الطاقة الأحفورية خلال السنوات الأخيرة اضطرابات كبيرة، حيث بلغ سعر برميل النفط الخام في بعض الفترات حدود 140 دولاراً، وهو ما شكّل ضغطاً كبيراً على الاقتصادات المستوردة للطاقة، ودفع بالعديد من الدول إلى إعادة النظر في سياساتها الطاقوية. وقد مثّل هذا الواقع حافزاً قوياً للانتقال نحو مصادر الطاقة المتجددة⁴، التي باتت تُعد من الأسواق الصاعدة والمزدهرة على المستوى العالمي⁵، لا سيما بالنسبة للدول التي تسعى إلى تقليص تبعيتها للخارج وضمان أمنها الطاقوي.⁶

ومن هذا المنطلق، أصبحت الطاقة المتجددة تشكل ركيزة أساسية في استراتيجية الإمداد الطاقوي للدول الصناعية والنامية على حد سواء، باعتبارها وسيلة فعالة لتحقيق استدامة التزود بالطاقة بعيداً عن تقلبات الأسواق وتقلبات الجغرافيا السياسية.⁷

¹ محمد طالي، محمد ساحل، أهمية الطاقة المتجددة في حماية البيئة لأجل التنمية المستدامة-عرض تجربة ألمانيا-، مجلة الباحث، العدد 06، الجزائر، 2008، ص 205

² حمّاش وليد، التكنولوجيات النظيفة كآلية للحد من التلوث الصناعي لتحجيد التنمية الصناعية دراسة حالة الطاقة النظيفة في الجزائر، أطروحة مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه علوم في العلوم الاقتصادية، جامعة فرحات عباس سطيف 1، 2019-2020، ص 145.

³ موساوي رفيقة، موساوي زهية، دور الطاقات المتجددة في تحقيق التنمية المستدامة، مجلة المالية و الأسواق، المجلد 04 العدد 01، 2017، ص 394

⁴ حمّاش وليد، نفس المرجع السابق، ص 145

⁵ شين خثير، مزراق وردة، الاستثمار في الطاقات المتجددة كأداة لتحقيق التنمية المستدامة (استعراض لبعض تجارب الدول العربية النفطية في مجال الاستثمار في

الطاقات المتجددة)، مجلة إيليزا للبحوث و الدراسات، المجلد 06/العدد: الخاص (2021)، ص 16

⁶ حمّاش وليد، نفس المرجع السابق، ص 145

⁷ محمد مغنم، سفيان أبحري، دور الطاقات المتجددة في تحقيق التنمية المستدامة بالوطن العربي: البرنامج الوطني للطاقات المتجددة 2016-2030 بالملكة

السعودية أمودجا، مجلة الإبداع، المجلد 13 / العدد 01 (2023)، ص 295.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

رابعا: الأهمية الاستراتيجية للدول المصدرة للطاقة وتعزيز أمن التزود

لا تقتصر أهمية الطاقة المتجددة على الدول المستوردة للطاقة فحسب، بل تمتد كذلك إلى الدول المصدرة، حيث يُمكن أن تساهم هذه المصادر في تحقيق مكاسب اقتصادية واستراتيجية مزدوجة. إذ يُمكن الاعتماد المتزايد على الطاقات المتجددة في تغطية الطلب المحلي من إعادة توجيه جزء معتبر من الإنتاج التقليدي نحو التصدير، ما يُوفر مداخل مالية إضافية يمكن توظيفها في تمويل مشاريع الطاقات النظيفة وتعزيز الاستثمارات المستدامة.

من جهة أخرى، تُعتبر الطاقة المتجددة أكثر سهولة في الحصول عليها مقارنة بالطاقة الأحفورية التي ترتبط وفتها بعدة عوامل معقدة، من بينها التوترات الجيوسياسية بين الدول المنتجة والمستهلكة، إضافة إلى ما تشهده الأسواق من اضطرابات خلال فترات النزاعات المسلحة أو الأزمات الدولية. وتبرز الطاقة المتجددة في هذا السياق كبديل آمن ومستقر، يقلل من هشاشة المنظومات الطاقوية ويُعزز من سيادة الدول على مواردها¹.

خامسا: دعم العدالة الطاقوية وتحسين مستوى المعيشة في المناطق النائية

تُساهم الطاقة المتجددة، ولا سيما الطاقة الشمسية، بدور جوهري في توسيع نطاق تغطية خدمات الطاقة لتشمل المناطق البعيدة والقرى النائية ذات الكثافة السكانية المنخفضة والاستهلاك الضعيف، والتي غالباً ما تكون خارج شبكات الكهرباء الوطنية أو تعاني من ضعف التغطية. وبفضل المرونة التي توفرها تقنيات الطاقة المتجددة، يمكن تلبية الحاجيات الأساسية للسكان في هذه المناطق، سواء في مجالات الطبخ، أو تسخين المياه، أو الإنارة، دون الحاجة إلى بنية تحتية معقدة ومكلفة كما هو الحال في الطاقات التقليدية.

ومن هذا المنطلق، تُعد الطاقة المتجددة أداة فعالة لتعزيز العدالة الطاقوية وتقليص الفجوة بين المناطق الحضرية والريفية، مما يساهم في تحسين نوعية الحياة والارتقاء بالمستوى المعيشي للفئات المهمشة. كما يفتح ذلك آفاقاً للتنمية الاجتماعية والاقتصادية المستدامة، من خلال دعم الأنشطة اليومية، والتعليم، والخدمات الصحية في المناطق المعزولة.

سادساً: تعزيز الاستقلال الطاقوي وخلق فرص العمل

يمثل التوجه نحو استغلال مصادر الطاقة المتجددة خياراً استراتيجياً لتعزيز الاعتماد على الموارد المحلية، بما يُساهم في تقليص التبعية للأسواق العالمية وتقليل الضغط على الطلب الدولي على الطاقات التقليدية. هذا التحول يُعزز من سيادة الدول على خياراتها الطاقوية، ويحد من تعرض اقتصاداتها للتقلبات الحادة في أسعار الوقود الأحفوري المرتبطة بالعوامل الجيوسياسية والاضطرابات السوقية.

إلى جانب ذلك، يُعد قطاع الطاقة المتجددة من القطاعات الصاعدة التي تتيح إمكانيات واسعة لخلق فرص عمل

¹ حمّاش وليد، نفس المرجع السابق، ص 145

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

جديدة، سواء في مراحل تركيب وصيانة البنى التحتية أو في أنشطة البحث والتطوير والخدمات اللوجستية المرتبطة بها. ويؤدي هذا بدوره إلى دعم النشاط الاقتصادي المحلي، والمساهمة في رفع مستوى الدخل القومي، وتحقيق أهداف التنمية المستدامة من خلال مزج الأبعاد البيئية بالاقتصادية والاجتماعية في آن واحد.¹

المطلب الثاني: مصادر الطاقة المتجددة

تتعدد مصادر الطاقة المتجددة وتختلف من حيث طبيعتها ومجالات استخدامها، لكنها تشترك جميعاً في كونها موارد مستدامة وصديقة للبيئة. ويُعد فهم خصائص هذه المصادر أمراً جوهرياً لتحديد إمكانات توظيفها في إطار التحول الطاقوي. وعليه، يستعرض هذا المطلب أهم هذه المصادر مع التركيز على خصوصيات كل منها.

الفرع الأول: الطاقة الشمسية

أولاً: مفهوم الطاقة الشمسية

تُعد الطاقة الشمسية من أكثر مصادر الطاقة المتجددة وفرة على سطح الأرض، حيث يفوق الإشعاع الشمسي الذي تستقبله الكرة الأرضية بأكثر من عشرة آلاف مرة إجمالي الاستهلاك البشري للطاقة.² وتمتاز هذه الطاقة بإمكانية استغلالها حتى في الظروف المناخية غير المثالية، كالأيام الغائمة، مما يعزز من موثوقيتها كمصدر مستدام للطاقة. تُوظف تقنيات الطاقة الشمسية في مجموعة واسعة من التطبيقات، تشمل إنتاج الكهرباء، التدفئة، التبريد، الإضاءة الطبيعية، بل وحتى توليد أنواع معينة من الوقود. وتعتمد هذه التقنيات في الأساس على تحويل الأشعة الشمسية إلى طاقة كهربائية، إما من خلال الخلايا الكهروضوئية (Photovoltaics) أو باستخدام المرايا العاكسة لتركيز الإشعاع الشمسي في أنظمة الطاقة الشمسية المركزة (CSP).

وعلى الرغم من تفاوت مستويات الإشعاع الشمسي بين الدول والمناطق، إلا أن كل بلد يمتلك إمكانية دمج الطاقة الشمسية بشكل فعال في مزيج الطاقوي. وتجدد الإشارة إلى أن التقدم التكنولوجي خلال العقد الماضي ساهم بشكل كبير في خفض تكلفة إنتاج الألواح الشمسية، مما جعل الطاقة الشمسية من بين الخيارات الطاقوية الأرخص والأكثر انتشاراً. كما أن العمر الافتراضي للألواح الشمسية يبلغ في المتوسط ثلاثين سنة، مع اختلاف كفاءتها حسب نوع المواد المستخدمة في التصنيع، الأمر الذي يعزز من جدواها الاقتصادية والبيئية على المدى الطويل.³

ثانياً: استخدامات الطاقة الشمسية

تتسم الطاقة الشمسية بتعدد مجالات توظيفها، مما يجعلها مورداً طاقوياً مرناً وقادراً على الاستجابة لمتطلبات

¹ محمد مداحي، نفس المرجع السابق، ص 95

² Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs Madruga, Youba Sokona, Kristin Seyboth, Patrick Eickemeier, Patrick Matschoss, Gerrit Hansen, Susanne Kadner, Steffen Schlömer, Timm Zwickel, Christoph von Stechow, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012, Chapter 3 Direct Solar Energy, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p337

³ irena, Solar energy, Available on: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy>

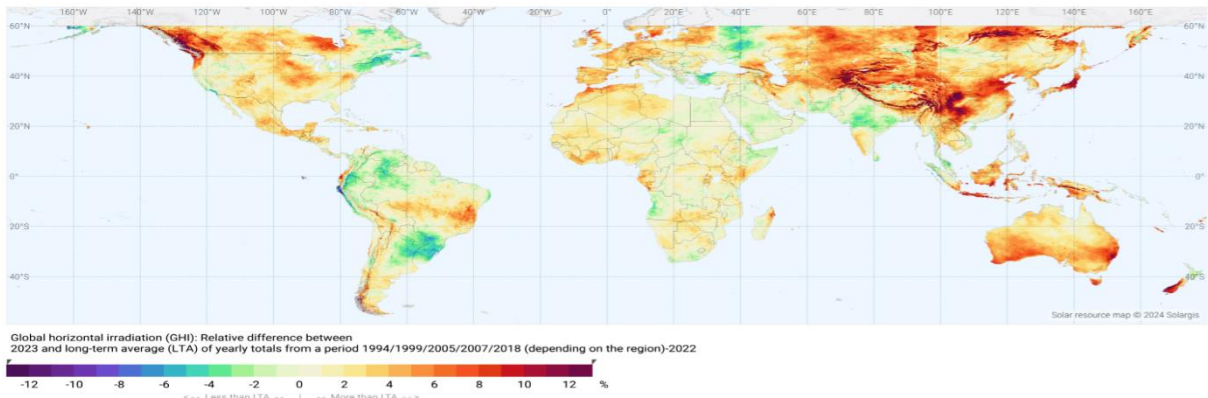
الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

متنوعة في القطاعات السكنية والصناعية والزراعية والخدمية. ويمكن تلخيص أبرز استخداماتها فيما يلي:¹

- ✓ **إنتاج الكهرباء:** يتم ذلك من خلال تقنيتين رئيسيتين؛ الأولى تعتمد على استغلال الحرارة الشمسية في تشغيل أنظمة حرارية لإنتاج الطاقة، بينما تقوم الثانية على استخدام الخلايا الكهروضوئية (Photovoltaic Cells) التي تحول الإشعاع الشمسي مباشرة إلى تيار كهربائي بفعالية عالية، دون الحاجة إلى آلات ميكانيكية وسيطة.
- ✓ **تحلية المياه والتقطير الشمسي:** تُعد تقنيات التقطير بالطاقة الشمسية من الأساليب الاقتصادية والمستدامة لتحلية مياه البحر والمياه المالحة، نظراً لاعتمادها على حرارة الشمس دون الحاجة إلى وقود أحفوري، مما يساهم في تقليص التكاليف التشغيلية والانبعاثات الكربونية.
- ✓ **التدفئة والطهي:** تُستخدم الطاقة الشمسية كذلك في تدفئة المباني السكنية من خلال أنظمة تسخين المياه أو الهواء، إضافة إلى تشغيل أجهزة الطهي الشمسية، التي باتت تمثل حلاً بيئياً وصحياً خاصة في المناطق الريفية.
- ✓ **التبريد وتكييف الهواء:** تم تطوير أنظمة متقدمة تعتمد على الطاقة الشمسية لتوفير التبريد والتكييف، إضافة إلى تسخين المياه، ما يُقلل من استهلاك الطاقة التقليدية، خصوصاً في المناطق ذات الإشعاع الشمسي العالي.
- ✓ **تجفيف المنتجات الزراعية:** تستعمل مجففات تعمل بالطاقة الشمسية في تجفيف الخضر والفواكه، وهي تقنية فعالة تساعد على حفظ المنتجات لفترات أطول، مما يدعم سلسلة القيمة الزراعية ويساهم في تعزيز صادرات المنتجات الفلاحية، لا سيما في الدول النامية.

ثالثاً: القدرة العالمية للطاقة الشمسية: تظهر الخريطة المولية الإشعاع الطبيعي المباشر و توزيعه في العالم و الذي يقصد به مقدار الإشعاع على السطح الذي يتم الاحتفاظ به بشكل عمودي عادي كشعاع الشمس المباشر.

الشكل رقم (01): التوزيع العالمي لإشعاع الطبيعي المباشر



source : solargis solar maps, Understand the impact of GHI variability on the PV performance, Available on: <https://solargis.com/resources/solar-performance-maps>

يبين الشكل الخريطة العالمية للاختلاف النسبي في الإشعاع الشمسي الأفقي العالمي (GHI) خلال

¹ محمد رأفت إسماعيل رمضان، علي جمعان الشكيل، الطاقة المتجددة، الطبعة الثانية، دار الشروق، بيروت، 1988، ص ص 62-65

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

سنة 2023 مقارنةً بالمتوسط طويل الأمد (LTA) للفترات المرجعية ما بين 1994 و2018 حسب المنطقة. تمثل الألوان في الخريطة مدى هذا التغير، حيث تشير الألوان الزرقاء والبنفسجية إلى انخفاض في الإشعاع، بينما تدل الألوان الحمراء والبرتقالية على ارتفاعه. يظهر من التحليل أن عدة مناطق في أوروبا وآسيا وأمريكا الشمالية شهدت انخفاضاً ملحوظاً في GHI، ما قد ينعكس سلباً على أداء محطات الطاقة الشمسية. في المقابل، سجلت مناطق مثل شمال إفريقيا والشرق الأوسط وجنوب آسيا زيادات إيجابية في الإشعاع. الجزائر تحديداً تبدو ضمن المناطق التي شهدت تحسناً طفيفاً إلى متوسط في القيم السنوية، ما يُعد مؤشراً واعدًا لتحسين مردودية مشاريع الطاقة الشمسية خلال عام 2023. هذا التغير الإشعاعي يبرز أهمية المتابعة السنوية لموارد الطاقة الشمسية لتقييم الأداء بدقة. ويمكن أن يدعم نتائج هذا الشكل قرارات استراتيجية تتعلق بالتخطيط والتمويل وتحديد مواقع المحطات الشمسية المستقبلية.

في سياق التحولات المناخية وتغيرات الإشعاع الشمسي المسجلة على المستوى العالمي، تبرز الطاقة الشمسية كمورد استراتيجي واعد لتعزيز أمن الطاقة وتحقيق الانتقال نحو أنظمة طاقة منخفضة الكربون. ويُعد استغلال الإشعاع الشمسي من بين الحلول المجدية، حتى في ظل الظروف الجوية المتقلبة، مثل الطقس الغائم، بالنظر إلى تطور تقنيات التحويل وارتفاع كفاءتها التشغيلية. وتتوفر الطاقة الشمسية على شكلين رئيسيين للاستغلال، يمثلان معاً ركيزتين أساسيتين للسياسات الطاقوية المستدامة:

1- الطاقة الشمسية الكهروضوئية (Photovoltaic - PV) :

وهي تقنية تعتمد على تحويل مباشر لأشعة الشمس إلى طاقة كهربائية باستخدام الخلايا الشمسية. وقد شهد هذا القطاع نمواً استثنائياً خلال العقد الأخير، حيث بلغت القدرة العالمية المركبة نحو 710 غيغاواط مع نهاية عام 2020، منها 125 غيغاواط تمت إضافتها خلال تلك السنة وحدها، مما يمثل أعلى زيادة تسجلها أي تكنولوجيا طاقوية متجددة. وتمتاز هذه التقنية بمرونة واسعة من حيث النطاقات التطبيقية، إذ تشمل أنظمة صغيرة للاستخدام المنزلي (3 إلى 20 كيلوواط) وأنظمة متوسطة مثبتة على الأسطح، وصولاً إلى مشاريع كبيرة الحجم تتعدى مئات الميغاواط. ومن أبرز التحولات التي شهدتها هذا المجال الانخفاض الحاد في تكلفة الإنتاج، حيث تراجعت أسعار الوحدات الشمسية بنسبة تفوق 90% بين عامي 2010 و2020، مما جعل الطاقة الكهروضوئية خياراً اقتصادياً تنافسياً، لا سيما في الدول المشمسة. كما أسهم هذا التطور في تعزيز ما يُعرف بـ "دمقرطة الطاقة"، من خلال تمكين الأفراد والمجتمعات من إنتاج الكهرباء ذاتياً وتقليل الاعتماد على الشبكات التقليدية.

2- الطاقة الشمسية المركزة (Concentrated Solar Power - CSP) :

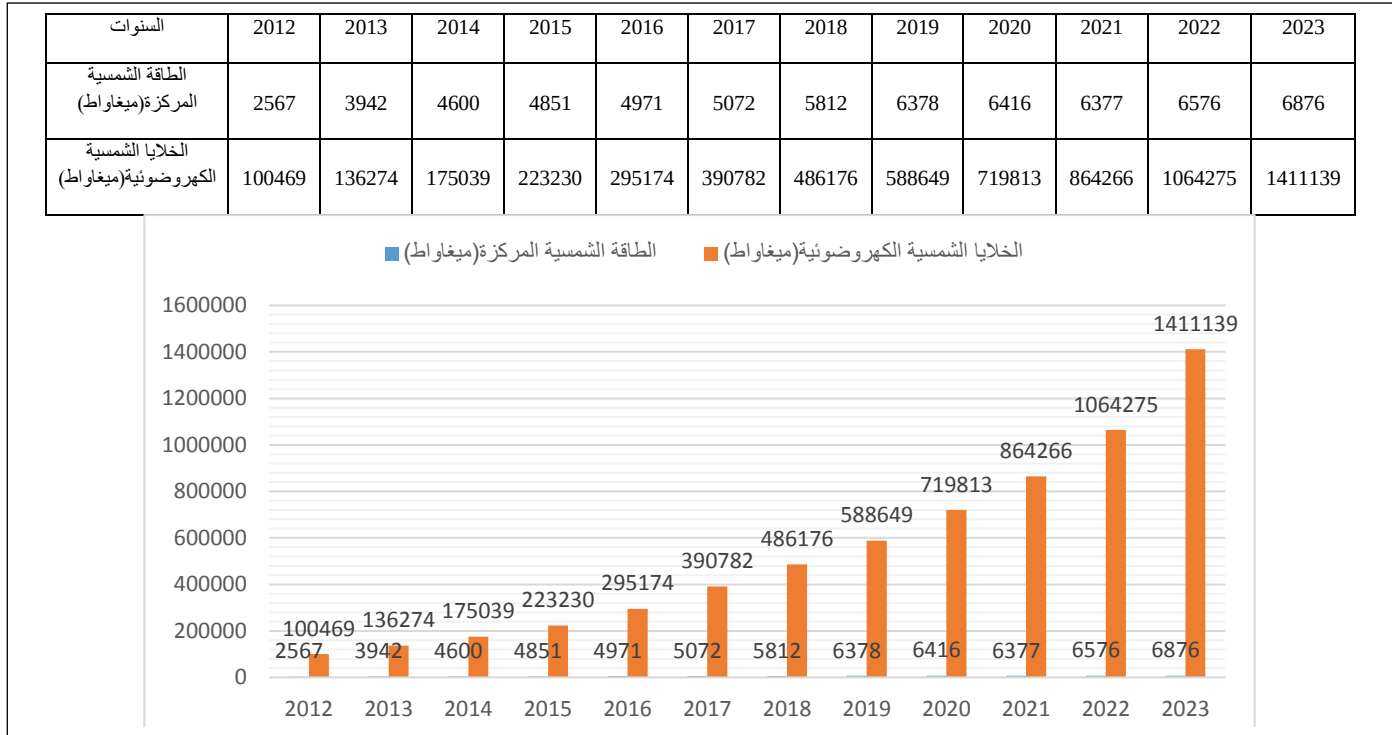
وهي تقنية تقوم على تركيز الأشعة الشمسية باستخدام مرايا عاكسة لتسخين سائل ناقل للحرارة، يُستخدم

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

لاحقاً في توليد بخار لتدوير توربينات كهربائية. تُعتبر هذه التقنية أكثر ملاءمة للمشاريع الكبرى، وقد بلغت قدرتها العالمية المركبة حوالي 7 غيغاواط مع نهاية 2020، بزيادة تضاعفت خمس مرات مقارنة بعام 2010.

وفي هذا الإطار، يبيّن الشكل الموالي تطور القدرات المركبة للطاقة الشمسية الكهروضوئية خلال الفترة 2012-2023، مما يعكس المسار التصاعدي المتسارع الذي يشهده هذا القطاع الحيوي¹.

الشكل رقم (02): القدرة الطاقة الشمسية الكهروضوئية و المركزة في جميع أنحاء العالم



المصدر: من اعداد الباحث بالاعتماد على البيانات الموقع الالكتروني: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy>

يوضح الشكل رقم (02) التطور السريع في قدرات الطاقة الشمسية الكهروضوئية والمركزة في العالم بين 2012 و2023. حيث سجلت الخلايا الشمسية الكهروضوئية (PV) نمواً هائلاً، إذ ارتفعت قدرتها من 100,469 ميغاواط في 2012 إلى 1,411,139 ميغاواط في 2023، مما يعكس الانتشار الواسع لهذا النوع من الطاقة بسبب انخفاض تكلفته وسهولة تركيبه. في المقابل، نمت الطاقة الشمسية المركزة (CSP) بشكل أبطأ بكثير، من 2,567 ميغاواط في 2012 إلى 6,876 ميغاواط في 2023، وهو ما يُظهر محدودية انتشارها نظراً لتكاليفها المرتفعة ومتطلباتها التقنية الخاصة.

يعكس الجدول توجه العالم المتزايد نحو الطاقات المتجددة، وخاصة الكهروضوئية، لتحقيق أهداف التحول الطاقوي

¹ irena, Solar energy, Available on: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy>

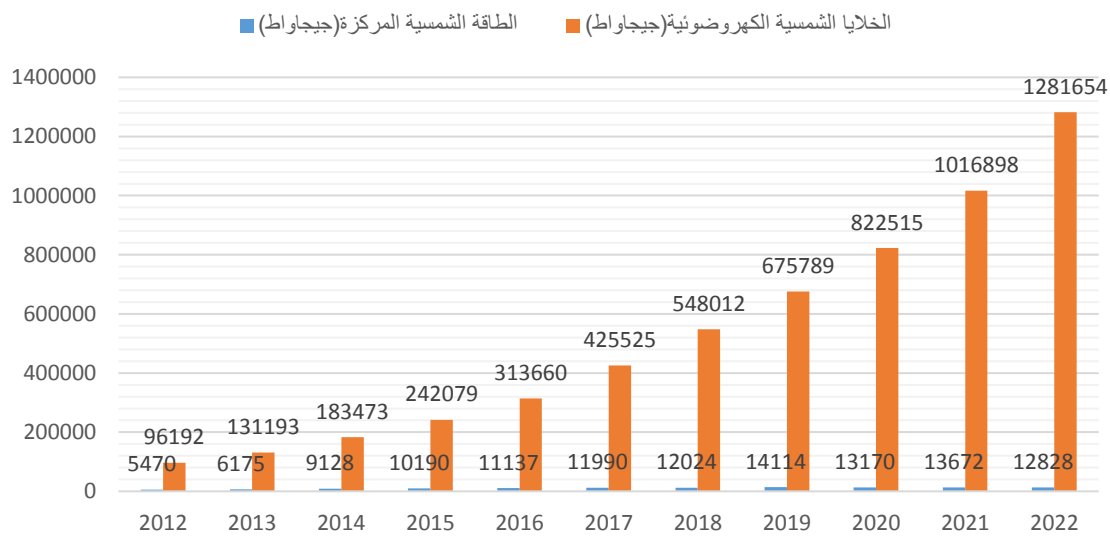
الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

وتقليل انبعاثات الكربون. كما يُظهر أن الخلايا الكهروضوئية أصبحت الخيار الأكثر اعتماداً عالمياً لتوليد الكهرباء من الشمس، مدفوعة بالاستثمارات الكبيرة والدعم الحكومي والتطور التكنولوجي.

يُسجل توليد الطاقة الشمسية توسعاً لافتاً على المستوى العالمي، حيث باتت العديد من الدول تعتمد عليها كمصدر رئيسي لتوليد الكهرباء، سواء عبر الأنظمة الكهروضوئية أو المركزة. ويُعتبر هذا النمو نتيجة مباشرة للتراجع الكبير في تكاليف الإنتاج، والتطور التكنولوجي، ووفرة الإشعاع الشمسي في العديد من المناطق. كما ساهمت السياسات التحفيزية والدعم الحكومي في تسريع وتيرة الاستثمار في هذا القطاع والشكل المادي يبين توليد الطاقة الشمسية في جميع أنحاء العالم.

الشكل رقم (03): توليد طاقة كهربائية من الطاقة الشمسية في جميع أنحاء العالم 2012-2022

السنوات	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
الطاقة الشمسية المركزة (جيجاواط)	5470	6175	9128	10190	11137	11990	12024	14114	13170	13672	12828
الخلايا الشمسية الكهروضوئية (جيجاواط)	96192	131193	183473	242079	313660	425525	548012	675789	822515	1016898	1281654



المصدر: من اعداد الباحث بالاعتماد على البيانات الموقع الالكتروني: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy>

يوضح الشكل رقم (03) أن الفترة 2012-2022 شهدت تحولاً جذرياً في هيكل مصادر الطاقة الشمسية عالمياً، مع صعود الخلايا الشمسية الكهروضوئية (PV) كمصدر رئيسي لتوليد الكهرباء من الشمس. فقد سجلت هذه التقنية زيادة هائلة من 96.2 جيجاواط في 2012 إلى 1,281.6 جيجاواط في 2022، أي ما يزيد على 13 ضعفاً خلال عقد واحد، بمعدل نمو سنوي مركب (CAGR) يقارب 28%، وهو ما يعكس ديناميكية انتشارها السريع على المستوى العالمي. يعود هذا النمو إلى الانخفاض المستمر في تكلفة الوحدة المركبة (LCOE)، وسهولة التركيب، وإمكانية النشر اللامركزي على أسطح المباني والمزارع الشمسية، إضافة إلى الدعم الحكومي الكبير في الدول الرائدة مثل الصين، الهند، وألمانيا.

في المقابل، بقيت الطاقة الشمسية المركزة (CSP) في نطاق نمو محدود، حيث ارتفعت قدرتها من 5.47

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

جيجاواط إلى 12.83 جيجاواط فقط، بمعدل نمو سنوي أقل من 8%، مما يعكس تحدياتها الاقتصادية والتقنية، ومنها ارتفاع تكاليف الاستثمار الأولية، ومتطلبات المساحات الشاسعة والمناخات المشمسة المستقرة، ما حدّ من انتشارها إلا في مناطق جغرافية محددة.

هذا التباين بين المسارين يعكس تحولاً في الاستراتيجية العالمية للطاقة المتجددة، حيث أصبحت PV ركيزة أساسية في مزيج الطاقة، مدفوعة بعوائد اقتصادية سريعة، وإمكانية المساهمة المباشرة في تقليل انبعاثات الكربون، بينما تُعامل CSP كتقنية داعمة أو متخصصة تُستخدم في حالات خاصة، خاصة عند الحاجة إلى تخزين طاقة حرارية طويلة المدى. وهو ما يشير إلى أن مستقبل التحول الطاقوي العالمي حتى 2035 قد يستمر في تكريس الهيمنة الكهروضوئية مع تطوير تدريجي في جدوى الطاقة الشمسية المركزة.

الفرع الثاني: طاقة الرياح

أولاً: مفهوم طاقة الرياح

تُستمد طاقة الرياح من التحويل الديناميكي للطاقة الحركية الناتجة عن حركة الهواء إلى طاقة كهربائية، وذلك باستخدام توربينات الرياح ذات الحجم الكبير، سواء المثبتة على اليابسة (البرية) أو المقامة في البيئات البحرية، بما في ذلك البحار والمستطحات المائية العذبة. ورغم أن الاستفادة من الرياح كمصدر للطاقة تعود إلى آلاف السنين، إلا أن العقود الأخيرة شهدت تطوراً تقنياً ملحوظاً في مجال تكنولوجيا توربينات الرياح، تجلّى في تصميم نماذج أطول وأكثر كفاءة، مزوّدة بأقطار دوارة واسعة تسمح بزيادة القدرة الإنتاجية للطاقة الكهربائية.

ورغم التفاوت الجغرافي في متوسط سرعات الرياح، فإن التقديرات التقنية العالمية تشير إلى أن الإمكانات النظرية لطاقة الرياح تتجاوز بكثير مستوى الطلب العالمي الحالي على الكهرباء، ما يعكس إمكانية التوسع في استخدامها كمصدر طاقي بديل ومستدام على نطاق واسع¹. وتُجدر الإشارة إلى أن العديد من المناطق عبر العالم تتميز بموارد رياح قوية، إلا أن هذه المناطق تكون في بعض الأحيان نائية أو بعيدة عن مراكز الطلب. وفي هذا السياق، تمثل طاقة الرياح البحرية خياراً واعداً بفضل وفرة مواردها واستقرارها النسبي، مما يعزز من دورها في مزيج الطاقة المستقبلي على المستوى العالمي².

ثانياً: القدرة العالمية للطاقة الرياح

تُعدّ طاقة الرياح أحد أبرز مصادر الطاقة المتجددة التي تشهد توسعاً عالمياً متسارعاً، إذ تعتمد هذه التقنية على تحويل الطاقة الحركية الناتجة عن حركة الهواء إلى طاقة كهربائية من خلال أنظمة توربينية متطورة. وتتكون هذه الأنظمة من شفرات دوارة تمتص حركة الرياح وتحولها إلى طاقة ميكانيكية تُنقل بواسطة عمود دوار إلى مولّد كهربائي، منتجةً الكهرباء بكفاءة متزايدة.

¹ Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs Madruga, Youba Sokona, Kristin Seyboth, Patrick Eickemeier, Patrick Matschoss, Gerrit Hansen, Susanne Kadner, Steffen Schlömer, Timm Zwickel, Christoph von Stechow, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012, chapitre 7 Wind Energy, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p542

² irena, Wind energy, Available on: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

شهد قطاع طاقة الرياح منذ مطلع القرن الحادي والعشرين نمواً غير مسبوق، مدفوعاً بالتقدم التكنولوجي، وانخفاض التكاليف، والسياسات الحكومية المحفزة، إلى جانب ارتفاع الوعي البيئي بأهمية الانتقال إلى نظم طاقة مستدامة. ووفقاً لبيانات الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA)، تضاعفت القدرة المركبة لتوليد الكهرباء من الرياح بما يفوق 98 مرة بين عامي 1997 و2018، حيث ارتفعت من 7.5 غيغاواط إلى 733 غيغاواط. وقد كان للنمو في قدرات طاقة الرياح البرية الحصة الأكبر، إذ ارتفعت من 178 غيغاواط عام 2010 إلى 699 غيغاواط في 2020، بينما نمت الطاقة البحرية من 3.1 غيغاواط إلى 34.4 غيغاواط في الفترة نفسها.

يرافق هذا التوسع تحسّن ملحوظ في الأداء التقني، حيث انخفضت الكلفة المرححة العالمية لإنتاج الكهرباء من طاقة الرياح البرية بنسبة 56% خلال العقد الممتد من 2010 إلى 2020، لتصل إلى 0.039 دولار/ك.و.س، فيما تراجعت تكلفة مشاريع الرياح البحرية الجديدة بنحو 48%. وقد ساهمت هذه الديناميكية في تعزيز جدوى الاستثمار في القطاع، خاصة مع الارتفاع المستمر في عوامل السعة وتحسن إنتاجية التوربينات.

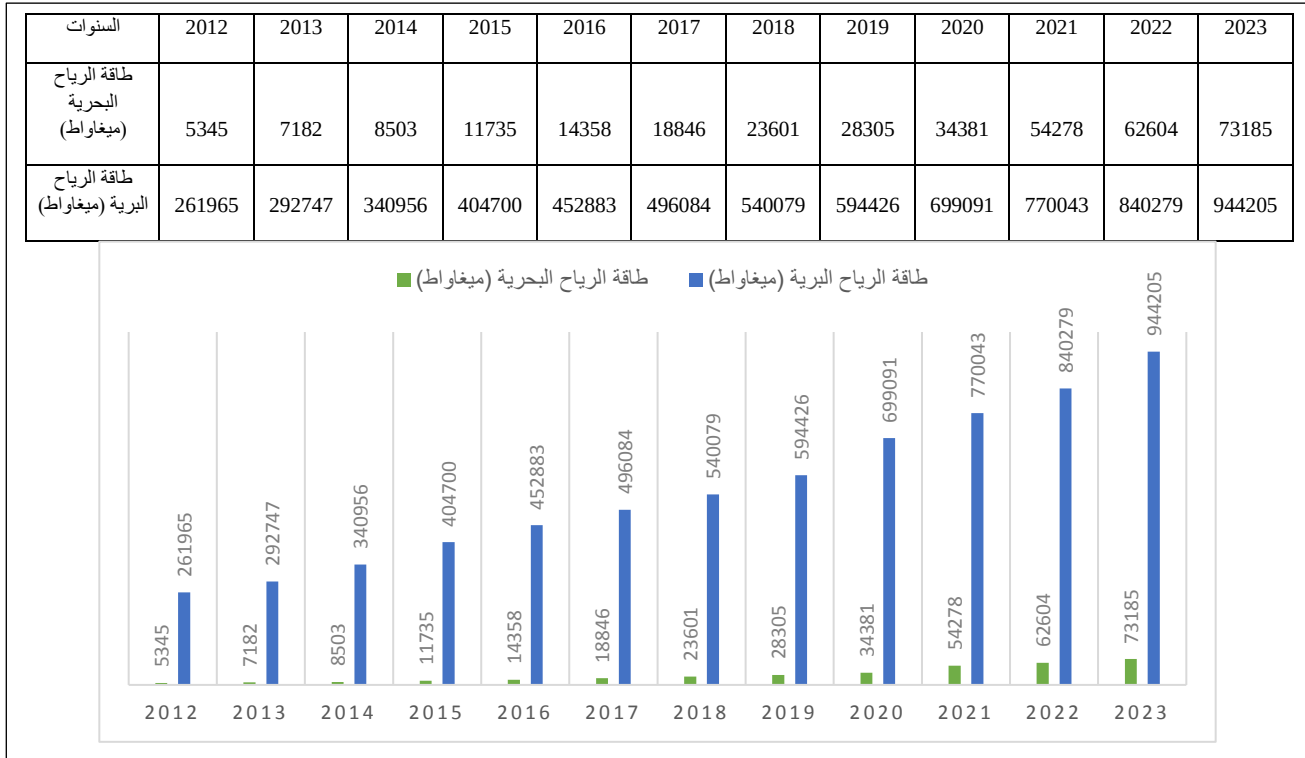
من الناحية التقنية، ارتفعت القدرات الاسمية لتوربينات الرياح بشكل كبير منذ الثمانينيات؛ إذ تطورت من نماذج صغيرة ذات قدرة 0.05 ميغاواط وقطر دوار لا يتجاوز 15 متراً، إلى توربينات بقدرات تصل إلى 4 ميغاواط في المشاريع البرية، و12 ميغاواط في نظيراتها البحرية. وتعتمد القدرة الإنتاجية لهذه التوربينات بشكل كبير على حجمها وسرعة الرياح، حيث أن القدرة المستخلصة تزداد طردياً مع مكعب سرعة الرياح، وهو ما يُضاعف الإمكانيات في المواقع ذات الموارد الريحية القوية.

تاريخياً، تعود أولى محاولات استخدام الرياح لتوليد الكهرباء إلى أواخر القرن التاسع عشر، مباشرة بعد تطوير المولد الكهربائي. وقد سجلت أولى المشاريع في كل من المملكة المتحدة والولايات المتحدة عامي 1887 و1888، بينما شهدت الدنمارك الريادة التقنية من خلال بناء أول توربين أفقي المحور سنة 1891. ومنذ الثمانينيات، أصبح قطاع طاقة الرياح أحد أعمدة التحول الطاقوي العالمي حيث يبين الشكل التالي تطوّر القدرات العالمية المركبة في مجال طاقة الرياح سواء البرية أو البحرية، خلال العقود الأخيرة.

استناداً إلى المعطيات المتوفرة، يبيّن الشكل الموالي تطور القدرات المركبة لطاقة الرياح خلال الفترة 2012–2023، مما يدل على التوسع المتسارع في استغلال هذا المورد الطاقوي على الصعيد العالمي، في إطار الجهود الدولية الرامية إلى تعزيز التحول نحو منظومة طاقوية أكثر استدامة واعتماداً على مصادر نظيفة ومتجددة.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (04): قدرة الكهربائية من الطاقة الرياح افي جميع أنحاء العالم



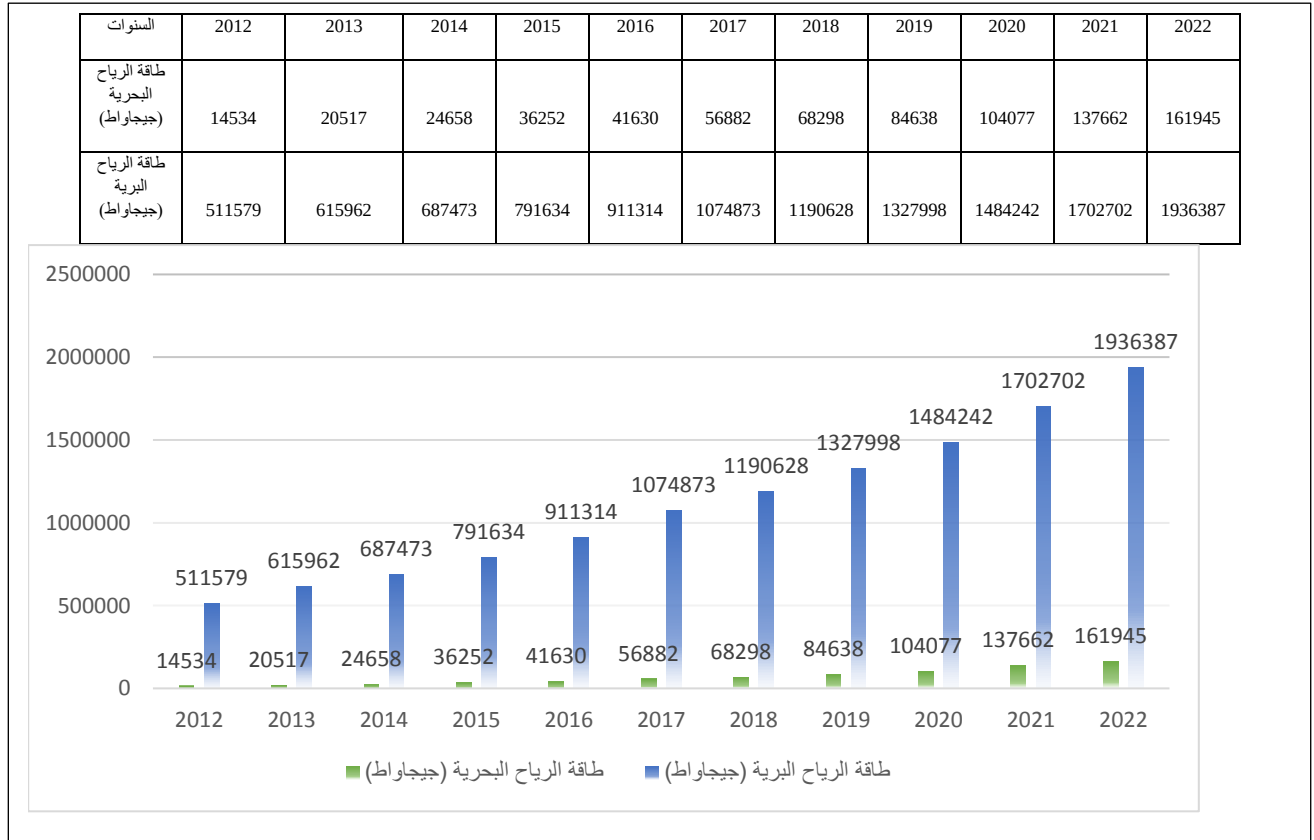
المصدر: من اعداد الباحث بالاعتماد على البيانات الموقع الالكتروني: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>

يشير الجدول إلى التطور التصاعدي الملحوظ في القدرات الكهربائية المركبة من طاقة الرياح عالميا خلال الفترة الممتدة من 2012 إلى 2023، ويعكس ديناميكية النمو في كل من طاقة الرياح البرية والبحرية. فمن جهة، ارتفعت القدرة الإنتاجية لطاقة الرياح البرية من حوالي 262 ألف ميغاواط في 2012 إلى أكثر من 944 ألف ميغاواط في عام 2023، ما يُظهر توسعاً مستداماً في نشر هذه التكنولوجيا، خاصة في الدول التي تمتلك موارد ربحية واسعة وبنية تحتية مناسبة. ومن جهة أخرى، ورغم الانطلاقة المتواضعة لطاقة الرياح البحرية، إلا أنها سجلت نمواً متسارعاً من 5,345 ميغاواط إلى 73,185 ميغاواط خلال نفس الفترة، وهو ما يعكس تزايد اهتمام الدول الساحلية بالاستثمار في البنية التحتية البحرية لما توفره من موارد مستقرة وأعلى إنتاجية. وتُعد هذه المعطيات مؤشراً على التحول العالمي المتزايد نحو مصادر الطاقة النظيفة، مدفوعاً بالتقدم التكنولوجي، انخفاض التكاليف، وضرورة الحد من الانبعاثات الكربونية في قطاع الكهرباء. في هذا السياق، يُلاحظ أن الاعتماد المتزايد على طاقة الرياح قد ساهم بشكل ملموس في تعزيز إنتاج الكهرباء من مصادر متجددة على المستوى العالمي. وقد أدى التوسع في القدرات المركبة، لا سيما خلال العقد الأخير، إلى ارتفاع كبير في كميات الكهرباء المنتجة من طاقة الرياح، مما جعلها أحد المكونات الأساسية في مزيج الطاقة العالمي. كما تعكس هذه الديناميكية الجهود الدولية المبذولة للحد من الاعتماد على الوقود الأحفوري وتحقيق أهداف الانتقال الطاقوي.

الشكل رقم (05) يوضح الاتجاه العام لنمو إنتاج الكهرباء من طاقة الرياح خلال الفترة المدروسة.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (05): توليد طاقة كهربائية من طاقة رياح في جميع أنحاء العالم



المصدر: من اعداد الباحث بالاعتماد على البيانات الموقع الالكتروني: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>

يعكس الجدول المبين في الشكل رقم (05) تطور قدرات توليد الكهرباء من طاقة الرياح عالميًا خلال الفترة 2012-2022، مبرزًا مسارين رئيسيين: الرياح البحرية (Offshore) والرياح البرية (Onshore). فقد ارتفعت القدرة المركبة للرياح البرية من حوالي 511.6 جيجاواط سنة 2012 إلى نحو 1,936.4 جيجاواط سنة 2022، أي بزيادة مطلقة تتجاوز 1.42 تيراواط، وبمعدل نمو سنوي مركب يقارب 13%، مما يؤكد استمرارها كالتقنية المهيمنة في قطاع طاقة الرياح نظرًا لانخفاض تكاليف تركيبها، ونضج تقنياتها، وسهولة دمجها في شبكات الكهرباء القائمة، خاصة في الدول ذات المساحات الشاسعة والموارد الرياحية الغنية.

في المقابل، شهدت طاقة الرياح البحرية نموًا لافتًا رغم حصتها الأصغر، حيث ارتفعت من 14.5 جيجاواط سنة 2012 إلى نحو 161.9 جيجاواط سنة 2022، بمعدل نمو سنوي مركب يناهز 28%. ويعود هذا الارتفاع إلى التطورات التقنية في مجال التوربينات البحرية، وتحسين أساليب التثبيت والصيانة، إلى جانب الدعم السياسي والمالي الموجه لمشاريع الطاقة البحرية، خاصة في أوروبا (المملكة المتحدة، ألمانيا، هولندا) وآسيا (الصين، تايوان). وتكمن أهمية الرياح البحرية في قدرتها على الاستفادة من سرعات رياح أعلى وأكثر استقرارًا، ما يجعلها مكملًا استراتيجيًا للرياح البرية في مزيج الطاقة العالمي.

من منظور التحول الطاقوي، تمثل هذه الأرقام مؤشرًا على التزام متزايد من الدول الكبرى بالانتقال نحو أنظمة

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

طاقة منخفضة الكربون، حيث تُسهم طاقة الرياح بجزء متنامٍ من الإنتاج الكهربائي الخالي من الانبعاثات، ما يساعد على تحقيق أهداف اتفاق باريس للمناخ. اقتصادياً، أدى التوسع في هذا القطاع إلى خفض تكلفة الكهرباء المنتجة (LCOE) للرياح البرية إلى مستويات تنافس الوقود الأحفوري، بينما تتجه الرياح البحرية نحو تحقيق نفس المسار بفضل وفورات الحجم والتطور التقني. كما أن التوسع في مشاريع الرياح يخلق فرص عمل جديدة، ويعزز سلاسل الإمداد الصناعية، ويزيد من أمن الطاقة عبر تقليل الاعتماد على الواردات النفطية والغازية.

الفرع الثالث: الطاقة الكهرومائية

أولاً: مفهوم الطاقة الكهرومائية

تعتمد الطاقة الكهرومائية على استغلال الطاقة الكامنة في المياه المتدفقة من المرتفعات نحو المناطق المنخفضة لتوليد الكهرباء، وتُعد من أكثر تقنيات الطاقة المتجددة نضجاً وانتشاراً على المستوى العالمي. ويمكن تصنيف محطات التوليد الكهرومائي إلى نوعين رئيسيين: محطات التخزين، التي تعتمد على مياه محتجزة في خزانات اصطناعية يتم التحكم في تدفقها، ومحطات الجريان النهرى، التي تستفيد مباشرة من التدفق الطبيعي للأفهار دون الحاجة إلى تخزين المياه على نطاق واسع.

وتتسم الخزانات الكهرومائية بعدة وظائف متعددة الاستخدام، حيث تساهم في تأمين مياه الشرب والري، وتنظيم الفيضانات والجفاف، ودعم حركة الملاحة، بالإضافة إلى دورها المحوري في إنتاج الطاقة الكهربائية. ووفقاً للوكالة الدولية للطاقة (IEA)، تُعد الطاقة الكهرومائية في الوقت الراهن أكبر مصدر للطاقة المتجددة المستخدمة في قطاع الكهرباء، لما توفره من إنتاج مستقر نسبياً وقدرة عالية على تلبية الطلب الأساسي للطاقة. غير أن الاعتماد الكبير على استقرار أنماط الهطول المطري يجعل هذا المصدر عرضة للتقلبات المناخية، حيث يمكن للجفاف أو التغيرات البيئية أن تقلص من الكفاءة التشغيلية لهذه المنشآت¹.

كما أن مشاريع الطاقة الكهرومائية الكبرى قد تُحدث اضطرابات بيئية ملحوظة، تشمل تدهور المواطن البيئية، وتغير تدفقات الأفهار، وتجزئة النظم البيئية المائية. ولهذه الأسباب، تُطرح الطاقة الكهرومائية الصغيرة النطاق كخيار بديل أكثر استدامة من الناحية البيئية، لما تتميز به من تدخل بنيوي محدود، وملاءمة خاصة لتوفير الطاقة في المناطق الريفية والمعزولة².

ثانياً: القدرة العالمية للطاقة الكهرومائية

تُعد الطاقة الكهرومائية من أقدم مصادر الطاقة التي استغلها الإنسان، حيث استخدمت منذ أكثر من ألفي عام،

¹ Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs Madruga, Youba Sokona, Kristin Seyboth, Patrick Eickemeier, Patrick Matschoss, Gerrit Hansen, Susanne Kadner, Steffen Schlömer, Timm Zwickel, Christoph von Stechow, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012, Chapter 5 Hydropower, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p441

² irena, Hydropower, Available on: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydropower>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

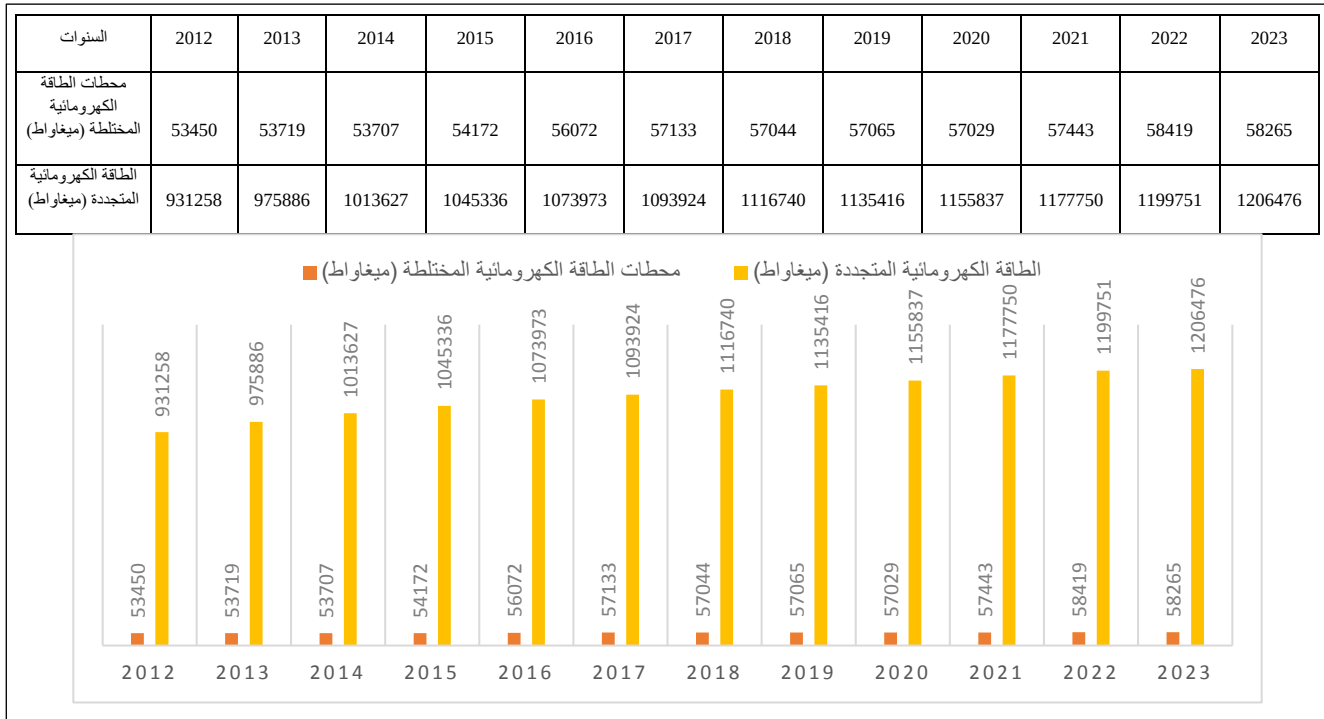
إذ وظّفها الإغريق القدماء لتشغيل العجلات المائية لطحن الحبوب، مما يعكس إدراكا مبكرا لإمكانات هذا المورد الطبيعي. ومع تطور المعرفة الهندسية والطلب المتزايد على الكهرباء، أصبحت الطاقة الكهرومائية اليوم من أكثر الخيارات فعالية من حيث التكلفة في توليد الكهرباء، وتُفضل بشكل واسع في البلدان التي تمتلك وفرة في الموارد المائية. يُمثل النموذج النرويجي حالة بارزة في هذا السياق، حيث يُعزى ما يزيد عن 99% من إنتاجها الكهربائي إلى الطاقة الكهرومائية. كما يُعد "سد الممرات الثلاثة" في الصين أكبر منشأة كهرومائية في العالم، بقدرة إنتاجية تصل إلى 22.5 غيغاواط، وتسهم في توليد ما بين 80 إلى 100 تيراواط-ساعة من الكهرباء سنوياً، وهو ما يعادل احتياجات الطاقة لـ 70 إلى 80 مليون أسرة.

في المقابل، تلعب المشاريع الصغيرة للطاقة الكهرومائية دوراً محورياً في دعم المجتمعات النائية، من خلال توفير حلول طاقة محلية ومستدامة لا تعتمد على البنية التحتية المعقدة لشبكات النقل المركزية، ما يُعزز من استقلالية المجتمعات الريفية ويُسهم في تقليص الفجوة الطاقوية.

من الناحية التقنية، تقوم محطات الطاقة الكهرومائية على تحويل الطاقة الكامنة في المياه الجارية إلى طاقة ميكانيكية تُدير التوربينات المرتبطة بمولدات كهربائية. وتُصنف هذه المحطات إلى نوعين أساسيين: منشآت مزودة بسدود وخزانات، وأخرى تعتمد على التدفق الطبيعي للمجري المائية دون تخزين. ففي الحالة الأولى، تُمكن الخزانات من تخزين المياه لفترات قصيرة أو طويلة، ما يسمح بتغطية الطلب الكهربائي المتزايد في أوقات الذروة. كما يمكن تصميم نظم متعددة للاستخدامات اليومية أو الموسمية، بما في ذلك محطات الضخ والتخزين العكسي التي تتيح توليد الطاقة وضخ المياه في وقت واحد. أما النوع الثاني، الذي يعمل دون سدود أو خزانات، فيُنتج الكهرباء على نطاق صغير من خلال منشآت تتكامل مع الجرى الطبيعي للأخمار، دون تعديل كبير في تدفقها، مما يجعله خياراً بيئياً أكثر استدامة. ويشير الشكل التالي إلى تطور القدرة الكهربائية المنتجة من الطاقة الكهرومائية في مختلف أنحاء العالم.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (06): قدرة طاقة كهربائية من طاقة الكهرومائية في جميع أنحاء العالم 2012-2023



المصدر: من اعداد الباحث بالاعتماد على البيانات الموقع الالكتروني: <https://www.irena.org/Energy>

[Transition/Technology/Hydropower](#)

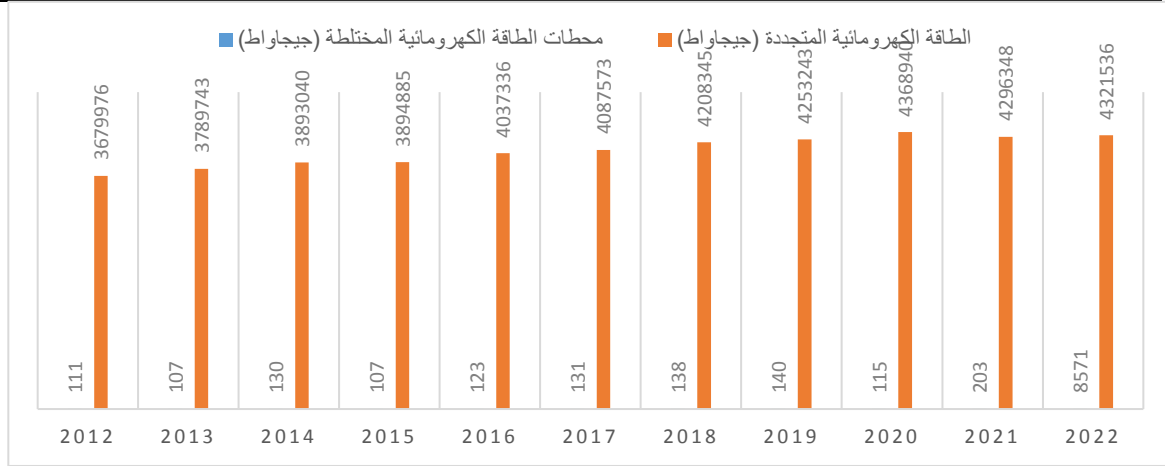
يعكس الجدول رقم (06) التطور الكمي للقدرة الكهربائية المنتجة من الطاقة الكهرومائية على الصعيد العالمي خلال الفترة الممتدة من عام 2012 إلى عام 2023، ويُظهر بوضوح الاتجاه التصاعدي المستمر في الاعتماد على هذا المصدر المتجدد. حيث ارتفعت القدرة الكهربائية للطاقة الكهرومائية المتجددة من حوالي 931 ألف ميغاواط سنة 2012 إلى ما يقارب 1.2 مليون ميغاواط سنة 2023، وهو ما يعكس الجهود الدولية المبذولة لتوسيع حصة الطاقات المتجددة ضمن المزيج الطاقوي. وفي المقابل، حافظت القدرة الكهربائية لمحطات الطاقة الكهرومائية المختلطة على استقرار نسبي، مسجلة معدلات تقارب 57 ألف ميغاواط خلال نفس الفترة، مما يعكس محدودية توسع هذا النوع من المحطات مقارنةً بالطاقة الكهرومائية المتجددة. وتُبرز هذه البيانات الأهمية المتزايدة للطاقة المائية في دعم الأمن الطاقوي العالمي، لا سيما في ظل التوجهات الدولية نحو تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري والتخفيف من انبعاثات الغازات الدفيئة.

وفي هذا الإطار، يُسجل إنتاج الكهرباء من الطاقة الكهرومائية نمواً مطّرداً، مدفوعاً بتزايد الاعتماد على الموارد المائية كمصدر نظيف ومستدام للطاقة. وقد ساهمت الكفاءات التشغيلية العالية لمحطات التوليد الكهرومائية، إلى جانب استقرار إمداداتها، في تعزيز مكانتها ضمن المنظومات الكهربائية الوطنية والدولية. كما يرتبط هذا النمو بالتوسع في الاستثمارات الموجهة نحو تحسين البنية التحتية المائية وتطوير التقنيات الكهروميكانيكية. ويبين الشكل التالي تطور توليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الكهرومائية في جميع أنحاء العالم.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (07): توليد طاقة كهربائية من طاقة الكهرومائية في جميع أنحاء العالم

السنوات	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
محطات الطاقة الكهرومائية المختلطة (جيجاواط)	111	107	130	107	123	131	138	140	115	203	8571
الطاقة الكهرومائية المتجددة (جيجاواط)	3679976	3789743	3893040	3894885	4037336	4087573	4208345	4253243	4368940	4296348	4321536



المصدر: من اعداد الباحث بالاعتماد على البيانات الموقع الالكتروني: <https://www.irena.org/Energy>

Transition/Technology/Hydropower

يعكس الجدول الوارد في الشكل رقم (07) تطور إنتاج الكهرباء من مصادر الطاقة الكهرومائية على المستوى العالمي خلال الفترة 2012-2022، موزعاً بين محطات الطاقة الكهرومائية المختلطة (Hybrid Hydropower Plants) والطاقة الكهرومائية المتجددة التقليدية. يظهر بوضوح أن الطاقة الكهرومائية المتجددة تمثل العمود الفقري للإنتاج، حيث استقرت عند مستويات مرتفعة تراوحت بين نحو 3.68 مليون جيجاواط/ساعة سنة 2012 و 4.32 مليون جيجاواط/ساعة سنة 2022، مع زيادة إجمالية قدرها حوالي 14.9% خلال العقد. يعكس هذا الاستقرار النسبي محدودية التوسع في هذا النمط من الإنتاج، نتيجة القيود البيئية والجغرافية، وتشبع معظم المواقع المناسبة لإنشاء السدود الكبرى.

أما محطات الطاقة الكهرومائية المختلطة، والتي تمثل تقنيات مدمجة مع مصادر أخرى أو أنظمة تخزين، فقد شهدت تغيرات ملحوظة ومتذبذبة، حيث ارتفع إنتاجها من 111 جيجاواط/ساعة سنة 2012 إلى ذروة لافتة بلغت 8,571 جيجاواط/ساعة سنة 2022. هذا القفز الحاد في السنوات الأخيرة يعكس زيادة الاهتمام باستخدام هذه المحطات كحلول مرنة لتعزيز موثوقية الشبكات الكهربائية، خاصة مع تزايد دمج مصادر متقطعة مثل الرياح والطاقة الشمسية، إذ يمكن لهذه المحطات أن توفر تخزيناً مائياً يعوّض تقلبات الإنتاج.

في سياق التحول الطاقوي، تكتسب الطاقة الكهرومائية دوراً مزدوجاً: فهي من جهة مصدر متجدد

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

مستقر وقليل الانبعاثات الكربونية، ومن جهة أخرى أداة إستراتيجية لدعم دمج الطاقات المتقطعة في الشبكات من خلال إمكانات التخزين المائي (Pumped Storage) ورغم أن نمو الطاقة الكهرومائية التقليدية محدود، فإن تطوير الحلول المختلطة يوفر إمكانات جديدة لزيادة مرونة وأمن أنظمة الطاقة العالمية.

من المنظور الاقتصادي، يوفّر الاستثمار في مشاريع الكهرومائية المختلطة قيمة مضافة من خلال تحسين استغلال البنية التحتية المائية القائمة، وتخفيض الحاجة إلى محطات احتياطية تعمل بالوقود الأحفوري، وهو ما يقلل التكاليف التشغيلية والانبعاثات على المدى الطويل. كما أن هذه المشروعات تعزز فرص التنمية المحلية من خلال خلق وظائف في مجالات البناء، التشغيل، والصيانة، مع الحفاظ على استقرار أسعار الكهرباء، خاصة في الاقتصادات الناشئة التي تسعى لتحقيق مزيج طاقي متوازن.

الفرع الرابع: الطاقة البحرية، الطاقة الحرارية الأرضية (الجوفية) و الطاقة الحيوية

أولاً: الطاقة البحرية

تُعدّ الطاقة البحرية من أشكال الطاقة المتجددة التي تستند إلى تحويل الطاقة الحركية والحرارية الكامنة في البيئة البحرية، لا سيما في حركة الأمواج، وتيارات المدّ والجزر، واختلاف درجات حرارة المياه، إلى طاقة كهربائية أو حرارية قابلة للاستعمال. وتُعتمد في هذا السياق مجموعة من التكنولوجيات الناشئة التي تسعى إلى تسخير هذه الظواهر الطبيعية بشكل فعال ومستدام. وعلى الرغم من أن أنظمة الطاقة البحرية لا تزال في مرحلة مبكرة من التطوير، مع اقتصر التطبيق الفعلي على نماذج أولية لأجهزة تحويل طاقة الأمواج والتيارات، فإن الدراسات النظرية تشير إلى أن الإمكانيات الكامنة في هذه الموارد تفوق بدرجة كبيرة حجم الطلب العالمي الحالي على الطاقة. وهو ما يؤكد الحاجة الملحة إلى تكثيف جهود البحث والتطوير في هذا المجال، وتعزيز الاستثمارات التكنولوجية الكفيلة بتحويل هذه الإمكانيات إلى مصادر طاوية قابلة للاستغلال على نطاق واسع في المستقبل¹.

ثانياً: الطاقة الحرارية الأرضية (الجوفية)

تُعدّ الطاقة الحرارية الأرضية أحد الموارد المتجددة التي تعتمد على استغلال الحرارة المخزّنة في باطن الأرض، والتي تُستخرج من خلال حفر آبار عميقة أو باستخدام تقنيات أخرى للوصول إلى ما يُعرف بالخزانات الحرارية الجوفية. وتنقسم هذه الخزانات إلى نوعين رئيسيين: خزانات حرارية مائية، وهي خزانات تتميز بكونها ساخنة بما يكفي وقابلة للنفاد بشكل طبيعي، وأنظمة الطاقة الحرارية الأرضية المحسّنة (Enhanced Geothermal Systems - EGS)، والتي تتطلب تدخلاً اصطناعياً، غالباً من خلال التحفيز الهيدرولي، لتحسين خصائصها الفيزيائية وجعلها ملائمة للاستخدام الطاقوي. بعد استخراج هذه الحرارة ونقلها إلى سطح الأرض عبر السوائل الجوفية، تُستخدم هذه السوائل،

¹ Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs Madruga, Youba Sokona, Kristin Seyboth, Patrick Eickemeier, Patrick Matschoss, Gerrit Hansen, Susanne Kadner, Steffen Schlömer, Timm Zwickel, Christoph von Stechow, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012, chapitre 06 Ocean Energy, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p501

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

التي تختلف درجات حرارتها بحسب طبيعة الخزان، في تشغيل توربينات مخصصة لتوليد الكهرباء. وتُعدّ تقنيات تحويل الطاقة المستخرجة من الخزانات الحرارية المائية إلى كهرباء من بين التكنولوجيات الناضجة والموثوقة في هذا المجال، حيث يعود استخدامها الصناعي إلى أكثر من قرن من الزمن، ما يمنحها ميزة نسبية من حيث الاستقرار والكفاءة مقارنة بعدد من مصادر الطاقة المتجددة الأخرى.¹

ثالثا: الطاقة الحيوية

تُعدّ الطاقة الحيوية من مصادر الطاقة المتجددة القائمة على تحويل المواد العضوية، المعروفة باسم الكتلة الأحيائية، إلى طاقة حرارية أو كهربائية، أو إلى وقود حيوي سائل. وتشمل مصادر الكتلة الأحيائية التقليدية مجموعة متنوعة من المواد، مثل الخشب، والفحم النباتي، والروث، والمخلفات الزراعية، حيث تُستخدم بشكل واسع، لا سيما في المناطق الريفية بالبلدان النامية، لأغراض الطهي والإضاءة والتدفئة من قبل الفئات السكانية ذات الدخل المحدود.

أما أنظمة الكتلة الأحيائية الحديثة، فتعتمد على زراعات مخصصة من المحاصيل أو الأشجار، بالإضافة إلى المخلفات الناتجة عن الأنشطة الزراعية والغابية، وتيارات النفايات العضوية من مختلف القطاعات. وعلى الرغم من أن احتراق الكتلة الأحيائية يؤدي إلى انبعاث غازات دفيئة، إلا أن هذه الانبعاثات تكون، في الغالب، أقل من تلك الناجمة عن احتراق الوقود الأحفوري التقليدي، مثل الفحم أو النفط أو الغاز الطبيعي.

غير أن الاعتماد واسع النطاق على الطاقة الحيوية يطرح تحديات بيئية خطيرة، خصوصًا ما يتعلق بتوسع مساحات زراعات الطاقة وتحوّلات استخدام الأراضي، وهو ما قد يؤدي إلى إزالة الغابات، وفقدان التنوع البيولوجي، وتفاقم الضغوط على الموارد الطبيعية. لذلك، فإن الاستخدام المستدام للطاقة الأحيائية يتطلب اعتماد سياسات دقيقة تحكم التوازن بين الفوائد الطاقوية والمخاطر البيئية والاجتماعية المرتبطة بها.

الفرع الخامس: طاقة الهيدروجين

أولاً: مفهوم الوقود الهيدروجين²

يُعتبر الهيدروجين أحد أبرز الخيارات الطاقوية النظيفة والمرنة، لما يتمتع به من قدرة على الإنتاج بطرق خالية أو منخفضة الانبعاثات الكربونية، ما يجعله عنصراً استراتيجياً في مسار الانتقال نحو أنظمة طاقة مستدامة منخفضة الكربون. وتبرز أهميته بشكل خاص في التطبيقات الطاقوية المتقدمة، ولا سيما في قطاع النقل، حيث يُستخدم وقوداً لتشغيل المركبات المزودة بخلايا وقود الهيدروجين، مُمثلاً بديلاً واعداً للمركبات الكهربائية المعتمدة على البطاريات، بفضل كثافته الطاقوية العالية وسرعة إعادة التزود به مقارنةً بزمان شحن البطاريات.

ويمتاز الهيدروجين بخصائص تقنية تتيح تخزينه ونقله بطرق شبيهة بالوقود الأحفوري التقليدي، إذ يمكن تحويله إلى

¹ Ottmar Edenhofer, Ramón Pichs Madruga, Youba Sokona, Kristin Seyboth, Patrick Eickemeier, Patrick Matschoss, Gerrit Hansen, Susanne Kadner, Steffen Schlömer, Timm Zwickel, Christoph von Stechow, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation, Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012, chapitre 04 Geothermal Energy, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, p404

² GTM, 5 Early Applications for Green Hydrogen, Available on: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/5-early-applications-for-green-hydrogen>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

صورة سائلة أو ضغطه في أسطوانات، وضخه عبر بنية تحتية قريبة من تلك المعتمدة في محطات الوقود الحالية، الأمر الذي يسهل دمجها في منظومات الطاقة القائمة دون الحاجة إلى تغييرات جذرية في شبكات الإمداد. وإضافةً إلى دوره في النقل، يكتسب الهيدروجين أهمية متزايدة في مجالات أخرى مثل التدفئة وتخزين الطاقة على نطاق واسع، خصوصاً في سياق أنظمة الطاقة المتجددة التي تعاني من الطبيعة المتقطعة للإنتاج. وفي هذا الإطار، يمثل الهيدروجين حلاً مرناً وفعالاً لضمان استقرار الشبكات الكهربائية وتحقيق التوازن بين العرض والطلب، مما يعزز دوره كمكوّن محوري في منظومة التحول الطاقوي العالمية.

ثانياً: تقنيات الإنتاج وقود الهيدروجين¹

يتطلب إنتاج وقود الهيدروجين تقنيات متعددة تستند إلى مبادئ فيزيائية وكيميائية وبيولوجية متنوعة. وتُصنف هذه العمليات عمومًا ضمن أربع فئات رئيسية: العمليات الحرارية، والعمليات التحليلية (الإلكتروليزية)، و العمليات المعتمدة على الطاقة الشمسية، والعمليات البيولوجية. لكل من هذه الطرق خصائصها التقنية وآلياتها التفاعلية، وتختلف في كفاءتها البيئية والاقتصادية.

1- العمليات الحرارية:

تعتمد العمليات الحرارية في إنتاج الهيدروجين أساسًا على تقنية "الإصلاح بالبخار"، وهي عملية تتم عند درجات حرارة مرتفعة، حيث يتفاعل بخار الماء مع الوقود الهيدروكربوني لإنتاج الهيدروجين. ويمكن استخدام مجموعة واسعة من أنواع الوقود الهيدروكربونية في هذه العملية، مثل الغاز الطبيعي، والديزل، والوقود السائل المتجدد، والفحم المتآزر، والكتلة الحيوية المتآزر. ويُشار إلى أن حوالي 95% من إنتاج الهيدروجين العالمي الحالي يعتمد على إصلاح الغاز الطبيعي بالبخار، ما يعكس أهمية هذه التقنية في الصناعة المعاصرة، رغم آثارها البيئية.

2- العمليات التحليلية (الإلكتروليزية):

تُستخدم في هذه الطريقة تقنية التحليل الكهربائي لفصل جزيئات الماء إلى عنصري الهيدروجين والأكسجين. وتتم هذه العملية داخل جهاز يُعرف بـ "التحليل الكهربائي (Electrolyzer)"، والذي يشبه في بنيته خلايا الوقود ولكن بألية عكسية؛ فبدلاً من توليد الطاقة من الهيدروجين كما في خلية الوقود، يقوم هذا الجهاز بإنتاج الهيدروجين باستخدام الطاقة الكهربائية. وتُعد هذه الطريقة واعدة من حيث الاستدامة، خصوصاً إذا ما اقترنت بمصادر الكهرباء المتجددة.

3- العمليات المعتمدة على الطاقة الشمسية:

تُوظف هذه العمليات ضوء الشمس كمصدر رئيس لتوفير الطاقة اللازمة لإنتاج الهيدروجين، وتشمل ثلاثة أنواع رئيسية:

- ✓ العمليات الضوئية الحيوية (Photobiological): تعتمد على النشاط التمثيلي الضوئي الطبيعي لبعض أنواع البكتيريا والطحالب الخضراء لإنتاج الهيدروجين.
- ✓ العمليات الكهروضوئية الكيميائية (Photoelectrochemical): تستخدم أشباه موصلات متخصصة تُحفّز ضوئياً لفصل الماء إلى مكوناته الأساسية.

¹ u.s department of energy,hydrogyen fuel basics, Available on: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fuel-basics>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

✓ العمليات الشمسية الحرارية الكيميائية: (Solar Thermochemical) تستعين بالطاقة الشمسية المركزة لإحداث تفاعلات كيميائية تتضمن عادةً تجزئة الماء، وقد يُستخدم معها مواد تفاعلية مثل الأكاسيد المعدنية لتعزيز الكفاءة.

4- العمليات البيولوجية:

تُوظف هذه العمليات كائنات دقيقة مثل البكتيريا والطحالب المجهرية لإنتاج الهيدروجين عبر تفاعلات حيوية طبيعية. وتندرج تحت هذه الفئة طريقتان رئيسيتان:

- ✓ تحويل الكتلة الحيوية الميكروبي (Microbial Biomass Conversion) حيث تقوم الميكروبات بتحليل المواد العضوية مثل الكتلة الحيوية أو مياه الصرف الصحي لإنتاج الهيدروجين.
- ✓ العمليات الضوئية الحيوية: (Photobiological) وتتم من خلال استخدام الكائنات الدقيقة للضوء كمصدر طاقة لتنفيذ تفاعلات التمثيل الضوئي المؤدية إلى إنتاج الهيدروجين.

ثالثاً: الهيدروجين الأخضر¹

يمثل الهيدروجين الأخضر أحد أبرز التوجهات الحديثة في مجال الطاقة المستدامة، إذ يتم إنتاجه من خلال تقنيات التحليل الكهربائي التي تعتمد على مصادر الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح. وتُفكك في هذه العملية جزيئات الماء إلى عنصري الهيدروجين والأكسجين باستخدام كهرباء نظيفة، دون توليد أي انبعاثات كربونية، مما يجعل العملية صديقة للبيئة بالكامل. ويتم احتجاز الهيدروجين الناتج وتخزينه لاستخدامه لاحقاً كوقود نظيف أو مصدر للطاقة. تكمن أهمية هذه التقنية في قدرتها على تحويل الفائض من الطاقة المتجددة إلى وقود يمكن تخزينه واستخدامه عند الحاجة، مما يساهم في التخفيف من تحديات التقطع الزمني لإنتاج الطاقة المتجددة. ويُنظر إلى الهيدروجين الأخضر كأداة مركزية في خطط إزالة الكربون من قطاعات متعددة، مثل النقل والصناعة الثقيلة وتوليد الكهرباء، فضلاً عن دوره في تعزيز مرونة الشبكات الكهربائية من خلال تخزين الطاقة الفائضة وتقليل الضغط على الشبكة خلال فترات الطلب المرتفع. كما أن الاستخدام الفعال للهيدروجين الأخضر يعزز موثوقية البنية التحتية للطاقة، ويساهم في تسريع تحقيق الأهداف المناخية المتعلقة بتقليل انبعاثات غازات الدفيئة. وبفضل تعدد تطبيقاته وإمكانية دمجها في أنظمة الطاقة المتكاملة، يُعد الهيدروجين الأخضر عنصراً محورياً في التحول العالمي نحو أنظمة طاقة منخفضة الكربون وأكثر استدامة.

المطلب الثالث: مميزات و عيوب استخدام الطاقات المتجددة

يشكل تطوير الطاقات المتجددة خياراً استراتيجياً ضمن السياسات البيئية والاجتماعية والاقتصادية على المستويين الوطني والدولي، نظراً لدورها في تحقيق الأمن الطاقوي، وتخفيف النمو الاقتصادي، وتعزيز التنمية المستدامة. وتكمن أهميتها أيضاً في أثرها الإيجابي على الصحة العامة والبيئة، إلى جانب قدرتها على تلبية احتياجات المناطق المعزولة. غير أن استغلال

¹ وكالة MCE ، خبير الطاقة: الهيدروجين الأخضر متاح على الموقع الإلكتروني: [https://mcecleanenergy.org/ar/energy-expert-green-](https://mcecleanenergy.org/ar/energy-expert-green-hydrogen)

[/hydrogen](https://mcecleanenergy.org/ar/energy-expert-green-hydrogen)

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

هذه المصادر يواجه صعوبات مرتبطة بتذبذب معدلات إنتاجها واعتمادها على ظروف طبيعية متغيرة، مما يستدعي تقييمًا متوازنًا لمزاياها و عيوبها من أجل وضع سياسات فعالة وشاملة في مجال الطاقة.

وفيما يلي عرض لأبرز مميزات وعيوب استخدام مصادر الطاقة المتجددة في توليد الطاقة:

الفرع الأول: مميزات استخدام الطاقات المتجددة

أولاً: الطاقات الصديقة للبيئة

تُعدّ مصادر الطاقات المتجددة من الخيارات الطاقية النظيفة، إذ لا يصدر عنها أي انبعاثات سامة أو ملوثة تُلحق الضرر بالنظم البيئية أو بصحة الإنسان. ويشكل الاعتماد المتزايد على هذه المصادر أداة فعالة للحد من التلوث البيئي والانبعاثات الناتجة عن احتراق الوقود الأحفوري، والتي تمثل أحد العوامل الرئيسة في تدهور صحة الإنسان، وتدمير النظم الطبيعية، والإضرار بالإنتاج الزراعي والمواد الصناعية. إن تعزيز سبل الوصول إلى مصادر الطاقة النظيفة وتطوير تقنيات التحويل ذات الكفاءة العالية يندرج ضمن السياسات البيئية الرامية إلى خفض انبعاثات غازات الاحتباس الحراري إلى مستويات يمكن التعايش معها، الأمر الذي من شأنه أن يساهم في تحقيق الأهداف الإنمائية للألفية وأجندة التنمية المستدامة المعتمدة دوليًا.

ثانياً: تعزيز العدالة الطاقوية بالمجتمعات الريفية المعزولة

تُعدّ تقنيات الطاقة المتجددة أداة استراتيجية لتوسيع نطاق التزود بالطاقة، لا سيما في المناطق الريفية المعزولة أو الدول الجزرية الصغيرة، حيث يشكل ضعف أو غياب البنية التحتية الكهربائية التقليدية عائقاً أمام التنمية. ويُعتمد على نظم الطاقة المتجددة المستقلة، كالشبكات الصغيرة (Mini-Grids) أو الأنظمة الفردية خارج الشبكة (Off-Grid Systems)، باعتبارها بدائل مرنة وفعالة لتوصيل الكهرباء دون الحاجة إلى استثمارات ضخمة في البنية التحتية المعقدة والمكلفة زمنياً ومالياً. ويساهم هذا التوجه في ضمان توزيع أكثر إنصافاً للطاقة المولدة، وتمكين المجتمعات المحلية من الوصول إلى خدمات الطاقة الحديثة، بما يحفز النشاط الاقتصادي، ويعزز الإدماج الاجتماعي، ويفتح آفاقاً جديدة للتنمية المستدامة في المناطق المهمشة أو المحرومة تاريخياً من الخدمات الأساسية.¹

ثالثاً: وفرة مصادر الطاقة المتجددة وأبعادها الجيوسياسية والتنمية

يعتمد نحو 80% من سكان العالم، أي ما يعادل حوالي ستة مليارات نسمة، على واردات الوقود الأحفوري القادمة من خارج حدود بلدانهم، وهو ما يجعلهم عرضة لتقلبات السوق الدولية والصدمات الجيوسياسية التي تهدد أمنهم الطاقوي والاقتصادي.² في المقابل، تُعدّ مصادر الطاقة المتجددة متوفرة بدرجات متفاوتة في جميع دول العالم، ومع ذلك، لم يتم إلى اليوم استثمار إمكاناتها الكاملة بشكل فعال.

¹ سحاري رمة، أثر الطاقات المتجددة على النمو الاقتصادي-دراسة تحليلية قياسية حالة الجزائر (2019-1985)، أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه الطور

الثالث (ل م د) قسم العلوم الاقتصادية، جامعة الجزائر 03، 2022-2023، ص ص 18-20

² Global commission on the geopolitics of energy transformation, A new world the geopolitics of the enregy transformation, international renewable energy agency(irena),2019,p35, Available on: https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2019/jan/global_commission_geopolitics_new_world_2019.pdf

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

وتشير تقارير الوكالة الدولية للطاقة المتجددة (IRENA) إلى إمكانية توليد ما يقارب 90% من كهرباء العالم عبر مصادر الطاقة المتجددة بحلول عام 2050، وهو ما يفتح آفاقاً واسعة لتحسين تحول جذري في البنية الطاقية العالمية. ويمكن أحد أبرز مزايا التحول نحو الطاقة المتجددة في تقليص الاعتماد على واردات الوقود الأحفوري، مما يعزز من استقلالية القرار الطاقى الوطني، ويتيح للبلدان فرصاً لتنويع هياكلها الاقتصادية، وتقوية قدرتها على مواجهة تقلبات أسعار الطاقة التقليدية. كما أن هذا التحول يحمل أبعاداً تنموية واضحة، إذ يساهم في دفع النمو الاقتصادي الشامل، وخلق فرص شغل جديدة، والتقليص من مستويات الفقر، لا سيما في المناطق الهشة اقتصادياً واجتماعياً¹.

رابعاً: انخفاض تكاليف الطاقة المتجددة

تعد مصادر الطاقة المتجددة اليوم من بين أكثر الخيارات الاقتصادية لتوليد الكهرباء على الصعيد العالمي. وقد شهدت تكنولوجيات الطاقة المتجددة تطوراً ملحوظاً من حيث انخفاض تكاليفها، إذ تراجعت تكلفة إنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية الكهروضوئية بنسبة تقارب 85% خلال الفترة الممتدة من عام 2010 إلى عام 2020. كما انخفضت تكاليف إنتاج الكهرباء من طاقة الرياح البرية والبحرية بنسبة 56% و 48% على التوالي في نفس الفترة. يُعزز هذا الانخفاض في التكاليف جاذبية الطاقة المتجددة، لا سيما في الدول ذات الدخل المنخفض والمتوسط، والتي يُتوقع أن تشهد أكبر نمو في الطلب على الكهرباء خلال العقود المقبلة. وتمثل هذه الديناميكية فرصة استراتيجية لتوسيع الاعتماد على مصادر طاقة منخفضة الانبعاثات الكربونية، ما يساهم في تلبية الطلب المتزايد بطريقة مستدامة بيئياً واقتصادياً².

وتشير التقديرات إلى أن الطاقة الكهربائية منخفضة التكلفة المولدة من المصادر المتجددة يمكن أن تغطي نحو 65% من إجمالي الطلب العالمي على الكهرباء بحلول عام 2030، مع إمكانية إزالة الكربون بنسبة تصل إلى 90% من قطاع الطاقة بحلول عام 2050. هذا من شأنه أن يُحدث انخفاضاً جوهرياً في انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وبالتالي يساهم في التخفيف من حدة تغير المناخ³.

ورغم أن السنوات الأخيرة، ولا سيما 2022 و 2023، قد شهدت ارتفاعاً نسبياً في تكاليف الطاقة المتجددة مقارنة بمستويات ما قبل جائحة كوفيد-19، نتيجة الزيادات العالمية في أسعار المواد الخام والنقل، فإن الطاقة المتجددة حافظت على تنافسيتها، بل وتعززت قدرتها التنافسية في ظل الارتفاع الأكبر في أسعار مصادر الطاقة التقليدية، كالنفط والغاز الطبيعي، وفقاً لتقارير الوكالة الدولية للطاقة⁴.

¹ IRENA, Fast-Track Energy Transitions to Win the Race to Zero , Available on:

<https://www.irena.org/news/pressreleases/2021/mar/fast-track-energy-transitions--to-win-the-race-to-zero>

² World energy transitions outlook 2022 1.5°C pathway, international renewable energy agency(irena),2022,p09, Available on: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_WETO_Summary_2022.pdf

³ IRENA, Fast-Track Energy Transitions to Win the Race to Zero , Available on:

<https://www.irena.org/news/pressreleases/2021/mar/fast-track-energy-transitions--to-win-the-race-to-zero>

⁴ Renewable energy market update outlook for 2022 and 2023, international renewable energy agency(irena),p04, Available on: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d6a7300d-7919-4136-b73a-3541c33f8bd7/RenewableEnergyMarketUpdate2022.pdf>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

خامسا: مساهمة الطاقة المتجددة في تعزيز الصحة العامة

تُعد جودة الهواء من أبرز المحددات البيئية للصحة العامة، وتشير تقديرات منظمة الصحة العالمية إلى أن نحو 99% من سكان العالم يتعرضون لمستويات من تلوث الهواء تتجاوز الحدود الموصى بها. ويُعزى جزء كبير من العبء الصحي العالمي إلى العوامل البيئية القابلة للتفادي، وعلى رأسها تلوث الهواء، حيث يُقدر عدد الوفيات السنوية الناجمة عن هذه العوامل بأكثر من 13 مليون حالة¹.

يُعتبر حرق الوقود الأحفوري المصدر الرئيسي لانبعاث الجسيمات الدقيقة (PM2.5) وأكاسيد النيتروجين، والتي تُعد من بين الملوثات الجوية الأكثر ارتباطاً بالمشكلات الصحية الحادة والمزمنة، بما في ذلك أمراض القلب والجهاز التنفسي والسرطان. ووفقاً لدراسة نُشرت عام 2018، بلغت الكلفة الاقتصادية والصحية العالمية لتلوث الهواء الناتج عن الوقود الأحفوري ما يقارب 2.9 تريليون دولار سنوياً، أي ما يعادل نحو 8 مليارات دولار يومياً.

في هذا السياق، يمثل التحول نحو مصادر الطاقة النظيفة، كطاقة الرياح والطاقة الشمسية، خياراً استراتيجياً مزدوج الفائدة؛ فهو لا يقتصر على الإسهام في التخفيف من آثار التغير المناخي، بل يشكل أيضاً أداة فعالة في تقليص مستويات تلوث الهواء، ومن ثم تحسين مؤشرات الصحة العامة. ويُعد هذا الربط بين السياسات الطاقوية والصحية أحد الأبعاد الجوهرية في تحقيق التنمية المستدامة، لا سيما في البيئات الحضرية والصناعية المعرضة لمستويات مرتفعة من التلوث الهوائي².

سادسا: الطاقة المتجددة كمحرك لخلق فرص العمل

يمثل الاستثمار في الطاقة المتجددة رافعة اقتصادية قوية من حيث خلق فرص العمل، حيث تشير التقديرات إلى أن كل دولار يُستثمر في هذا القطاع يُسهم في توليد وظائف تزيد بثلاثة أضعاف مقارنة بتلك التي يُحدثها الاستثمار في قطاع الوقود الأحفوري³. وتؤكد الوكالة الدولية للطاقة (IEA) أن الانتقال العالمي نحو الحياد الكربوني من شأنه أن يُعيد تشكيل سوق العمل في قطاع الطاقة بشكل جذري.

بحلول عام 2030، يُتوقع أن يؤدي هذا التحول إلى فقدان نحو 5 ملايين وظيفة في صناعات الوقود الأحفوري التقليدية، إلا أن هذه الخسارة تقابلها مكاسب صافية تُقدَّر بـ 14 مليون وظيفة جديدة في مجالات الطاقة النظيفة، بما في ذلك الطاقات الشمسية والريحية، وكفاءة الطاقة، وتخزين الكهرباء، مما يعادل زيادة صافية تُناهز 9 ملايين فرصة عمل⁴. علاوة على ذلك، سيستدعي توسع القطاع الطاقوي الحديث توفير ما يُقارب 16 مليون عامل إضافي لشغل

¹ World health organization, Billions of people still breathe unhealthy air: new WHO data, Available on:

<https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>

² World health organization, COP24 special report: health and climate change, Available on:

<https://www.who.int/publications/i/item/cop24-special-report-health-climate-change>

³ United nations, secretary-general, Opening remarks to High-level Dialogue on Energy, Available on:

<https://www.un.org/sg/en/content/sg/speeches/2021-09-24/opening-remarks-high-level-dialogue-energy>

⁴ IEA, Conference Summit on the Future of Energy Security, The importance of focusing on jobs and fairness in clean energy transitions, Available on:

<https://www.iea.org/commentaries/the-importance-of-focusing-on-jobs-and-fairness-in-clean-energy-transitions>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

وظائف في قطاعات جديدة أو متطورة، مثل تصنيع المركبات الكهربائية، وإنتاج الأجهزة المنزلية ذات الكفاءة العالية، وتطوير تكنولوجيات ناشئة كالهيدروجين الأخضر. وبناءً على هذه المعطيات، يُمكن أن يتجاوز إجمالي الوظائف المرتبطة بالطاقة النظيفة والتكنولوجيات منخفضة الانبعاثات 30 مليون وظيفة على الصعيد العالمي بحلول عام 2030.

ولتحقيق انتقال طاقتي مستدام وشامل، سيكون من الضروري اعتماد مقاربة "التحول العادل"، التي تضع في صلبها الحقوق الاجتماعية والاقتصادية للعاملين والمجتمعات المتأثرة. إن مراعاة البعد الاجتماعي في سياسات الطاقة يُعد شرطاً أساسياً لضمان ألا يُترك أحد خلف الركب، وتفادي التفاوتات الناجمة عن التحولات الهيكلية في سوق العمل¹.

سابعاً: الجدوى الاقتصادية لاعتماد مصادر الطاقة المتجددة

تُظهر التقديرات أنّ حجم الإنفاق العالمي على دعم قطاع الوقود الأحفوري قد بلغ نحو 5.9 تريليون دولار أمريكي خلال عام 2020، ويشمل ذلك الإعانات المباشرة، والتخفيضات الضريبية، فضلاً عن التكاليف غير المدرجة ضمن السعر الحقيقي لهذا الوقود، كالأضرار البيئية والصحية الناتجة عن استخدامه. وتبرز هذه الأرقام حجم التشوّه الاقتصادي الذي يُقيّم مصادر الطاقة التقليدية تنافسية على حساب خيارات الطاقة المتجددة².

عندما يتعلق الأمر بالتكاليف، فإن مصادر الطاقة المتجددة كانت تقارن بشكل غير مواتٍ بالوقود الأحفوري. ولكن مع ارتفاع أسعار الوقود الأحفوري، برزت الطاقة المتجددة كخيار للطاقة البديلة بأسعار معقولة. وتشير التقديرات إلى أن 96% من مشاريع الطاقة الشمسية وطاقة الرياح الجديدة على نطاق المرافق كانت تكاليف توليدها أقل من محطات الطاقة الجديدة العاملة بالفحم والغاز الطبيعي³. مع دمج المزيد من مصادر الطاقة المتجددة في شبكات الطاقة، تقوم الشركات أيضاً بتنفيذ برامج إدارة الطاقة لتحسين استخدام الطاقة وتقليل تكاليف الطاقة الإجمالية⁴.

¹international labour organization, Guidelines for a just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all, 2015, Geneva, Switzerland, Available on:

https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@ed_emp/@emp_ent/documents/publication/wcms_432859.pdf

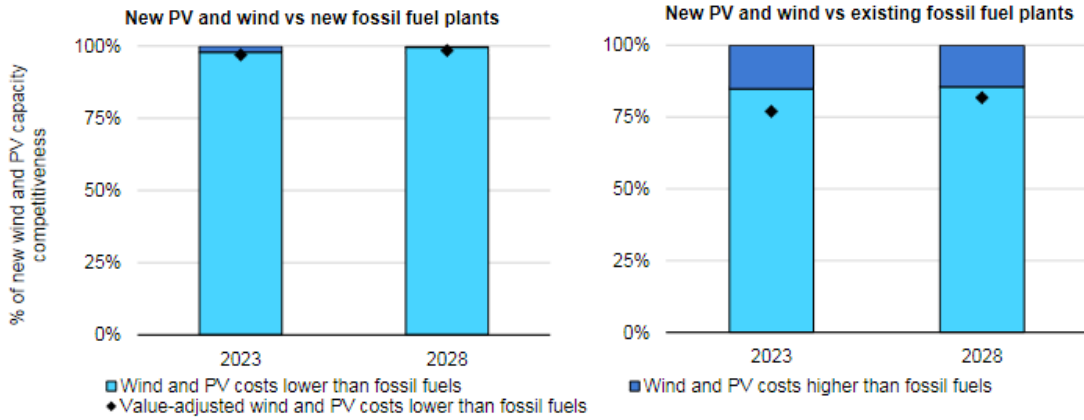
² Ian parry, simon black and nate vernon, still not getting energy prices right :a global and country update of fossil fuel subsidies, imf working paper, 2021, p03, Available on: <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2021/09/23/Still-Not-Getting-Energy-Prices-Right-A-Global-and-Country-Update-of-Fossil-Fuel-Subsidies-466004>

³Yasmina Abdelilah, Ana Alcalde Báscones Heymi Bahar, Piotr Bojek, François Briens, Trevor Criswell, Jeremy Moorhouse, and Laura Mari Martinez, Renewables 2023 analysis and forecast to 2028, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, p48, Available on: https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf

⁴ IBM, What is energy management? , Available on: <https://www.ibm.com/think/topics/energy-management>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (08): يبين مقارنة بين تكاليف إنتاج الطاقة



Source : Yasmina Abdelilah, Ana Alcalde Báscones Heymi Bahar, Piotr Bojek, François Briens, Trevor Criswell, Jeremy Moorhouse, and Laura Mari Martinez, Renewables 2023 analysis and forecast to 2028, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, p48, Available on: https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf

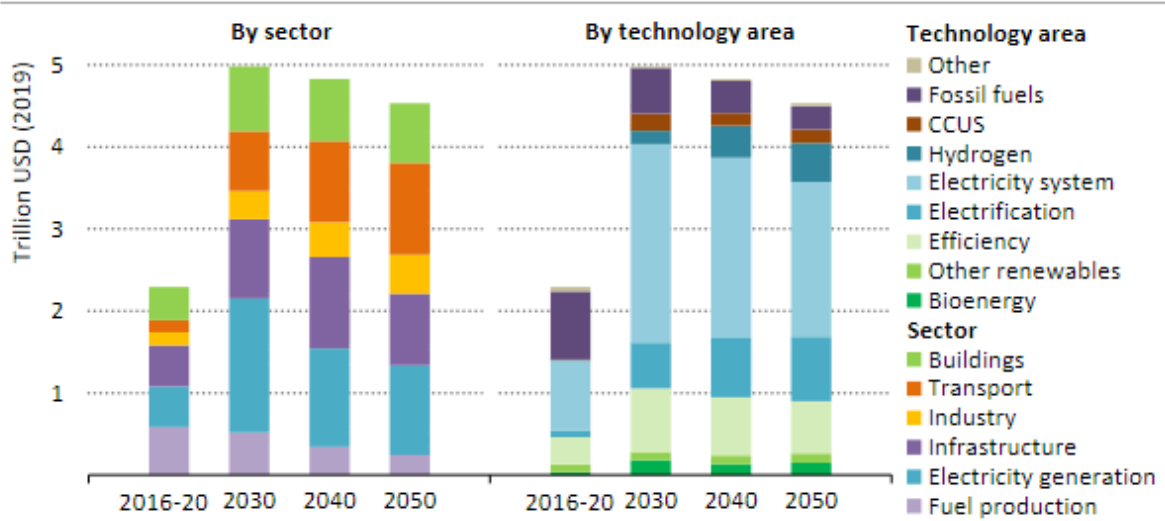
وتجدر الإشارة إلى أن ما يقرب من 4 تريليونات دولار سنوياً من هذه الاستثمارات ينبغي أن تُوجَّه تحديداً نحو قطاع الطاقة المتجددة حتى عام 2030، مع التركيز على تطوير التكنولوجيا وتوسيع البنية التحتية، باعتبار ذلك شرطاً حاسماً لخفض الانبعاثات إلى مستوى الصفر بحلول عام 2050. (أنظر الشكل رقم 09)

وتمثل هذه التحولات نقلة كمية ونوعية في نسبة الاستثمار الرأسمالي من الناتج المحلي الإجمالي العالمي، إذ ترتفع من نحو 2.5% في المرحلة الراهنة إلى ذروتها عند 4.5% في عام 2030، لتعود لاحقاً إلى مستوى 2.5% بحلول منتصف القرن. وهو ما يعكس مساراً ديناميكياً يتطلب سياسات تمويلية واستثمارية دقيقة، تضمن توجيه رأس المال نحو المجالات الأكثر تأثيراً في تحقيق تحوّل طاقي عادل ومستدام.¹

¹ Stéphanie Bouckaert, Araceli Fernandez Pales, Christophe McGlade, Uwe Remme and Brent Wanner. Laszlo Varro, Chief Economist, Davide D'Ambrosio and Thomas Spencer, Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021, p81, Available on: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (09) متوسط الاستثمارات الرأسمالية السنوية في إطار سيناريو صافي الانبعاثات الصفريّة



Source : Stéphanie Bouckaert, Araceli Fernandez Pales, Christophe McGlade, Uwe Remme and Brent Wanner. Laszlo Varro, Chief Economist, Davide D'Ambrosio and Thomas Spencer, Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2021, p81, Available on: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf

الفرع الثاني: عيوب استخدام الطاقات المتجددة

على الرغم من المزايا المتعددة التي تتمتع بها مصادر الطاقة المتجددة، سواء من حيث الاستدامة البيئية أو الحد من الانبعاثات الكربونية، إلا أن تطويرها واستخدامها لا يخلو من عيوب ومعيقات تقنية واقتصادية ولوجستية. إذ تواجه مشاريع الطاقة المتجددة تحديات تتعلق بارتفاع تكاليف الاستثمار الأولي، والتقلبات المرتبطة بالإنتاج الناتج عن الاعتماد على الظروف المناخية، فضلاً عن الحاجة إلى تطوير بنى تحتية متخصصة لضمان التكامل الفعال مع شبكات الطاقة التقليدية. كما قد تفرض هذه العيوب قيوداً على سرعة التوسع في اعتماد هذه المصادر في بعض المناطق، مما يستدعي معالجة منهجية لتلك الإشكاليات ضمن السياسات الوطنية للطاقة.

وفيما يلي أبرز الجوانب السلبية التي يجب أخذها بعين الاعتبار:

أولاً: ارتفاع التكاليف الأولية للاستثمار¹

يُعد ارتفاع التكاليف الأولية أحد أبرز عيوب الانتقال نحو تقنيات الطاقة المتجددة، إذ تتطلب هذه الأخيرة استثمارات رأسمالية كبيرة في مراحلها التأسيسية. فعلى الرغم من أن هذه التقنيات تتيح وفورات مالية ملحوظة على المدى البعيد بفضل انخفاض تكاليف التشغيل والصيانة، إلا أن تكلفة المكونات الأساسية، مثل الألواح الشمسية أو توربينات الرياح، إضافة إلى نفقات التركيب والتوصيل بالبنية التحتية الكهربائية، تظل مرتفعة نسبياً. على سبيل المثال، قد تصل تكلفة تركيب نظام شمسي تجاري إلى ما يزيد عن 100,000 دولار أمريكي، اعتماداً على حجم المنشأة واحتياجاتها الطاقوية. وتمثل هذه التكاليف تحدياً حقيقياً خاصةً بالنسبة للمؤسسات الصغيرة والمتوسطة. ومع ذلك، تسعى العديد من

¹ Forbes, Your Guide To Commercial Solar Panel Installation Companies And Costs, Available on: <https://www.forbes.com/home-improvement/solar/commercial-solar-panel-installation-companies/>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الدول إلى التخفيف من هذه العقبة من خلال حُزم تحفيزية تشمل الإعفاءات الضريبية، والدعم المالي المباشر، وبرامج الخصومات، ما من شأنه أن يعزز الجدوى الاقتصادية لهذه الاستثمارات ويشجع على تسريع وتيرة تبني الطاقة المتجددة في مختلف القطاعات.

ثانيا: متطلبات المساحة والموقع الجغرافي¹

تشكل القيود الجغرافية ومتطلبات المساحة من أبرز عيوب نظم الطاقة المتجددة، حيث تعتمد هذه الأنظمة بشكل كبير على خصائص الموقع لضمان تحقيق كفاءة تشغيلية مقبولة. فمثلاً، تحتاج المزارع الشمسية إلى توفر إشعاع شمسي مباشر وغير معوق، بينما تتطلب منشآت الطاقة الكهرومائية مصادر مياه جارية ذات تدفق مستمر، وتعتمد مزارع الرياح على وجود مساحات مفتوحة ذات تيارات هوائية ثابتة، في حين تشترط أنظمة الطاقة الحرارية الأرضية التقليدية القرب من مصادر المياه الجوفية الحارة. وتفرض هذه الخصائص تحديات تتعلق بتحديد مواقع مناسبة جغرافياً وبيئياً، خصوصاً في البلدان ذات التنوع التضاريسي أو الكثافة السكانية العالية. علاوة على ذلك، تشير دراسات مركز ICF Climate Center إلى أن منشآت الطاقة المتجددة على نطاق واسع تتطلب مساحات أرضية أكبر بنحو عشرة أضعاف مقارنة بمحطات الطاقة المعتمدة على الفحم أو الغاز الطبيعي، ما يثير تساؤلات حول جدوى استغلال الأراضي في ظل الطلب المتزايد على المساحات لأغراض زراعية وعمرانية.

ثالثاً: تقلبات الإنتاج وعدم الاستقرار

تُعد تقلبات الإنتاج من أبرز عيوب الطاقة المتجددة، إذ ترتبط قدرتها على توليد الكهرباء بشكل وثيق بالظروف المناخية والبيئية التي لا يمكن التحكم فيها بشكل كامل. فمثلاً، تنخفض كفاءة أنظمة الطاقة الشمسية خلال الأيام الغائمة، وتراجع قدرة محطات الطاقة الكهرومائية في فترات الجفاف، كما أن طاقة الرياح تتأثر بشكل مباشر بانخفاض سرعة الرياح أو توقفها. هذا الاعتماد على العوامل الطبيعية يفرض تحديات كبيرة على مستوى استقرار شبكة الإمداد الكهربائي، ويجعل من الصعب ضمان إنتاج طاقتي ثابت ومستمر على مدار الساعة. ولمواجهة هذا التحدي، بدأت بعض المؤسسات في اعتماد حلول تكنولوجية متقدمة، من بينها منصة² IBM Environmental Intelligence Suite، التي توظف تقنيات الاستشعار عن بُعد، والبيانات الجغرافية المكانية³، والتحليلات الذكية، إلى جانب أدوات الذكاء الاصطناعي⁴ والتعلم الآلي⁵، من أجل بناء نماذج تنبؤية دقيقة لظروف الطقس، وتقدير إمكانات التوليد الطاقوي خلال الفترات الزمنية القصيرة المقبلة. وتُعد هذه المقاربات جزءاً من التحول الرقمي الذي يهدف إلى تعزيز مرونة أنظمة الطاقة المتجددة وتقليل آثار التذبذب في الإنتاج⁶.

¹ The washington post, The Climate 202 Switching to wind and solar energy will require a lot of land, Available on: <https://www.washingtonpost.com/politics/2023/04/24/switching-wind-solar-energy-will-require-lot-land/>

² IBM, IBM Environmental Intelligence solutions, Available on: <https://www.ibm.com/sa-ar/products/environmental-intelligence/solutions>

³ IBM, What is geospatial data?, Available on: <https://www.ibm.com/think/topics/geospatial-data>

⁴ IBM, What is artificial intelligence (AI)?, Available on: <https://www.ibm.com/think/topics/artificial-intelligence>

⁵ IBM, What is machine learning?, Available on: <https://www.ibm.com/think/topics/machine-learning>

⁶ IBM Environmental Intelligence Suite, Environmental Intelligence Suite for Renewables Forecasting, Available on: <https://www.ibm.com/downloads/documents/us-en/10c317759fd4015e>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

ربعا: متطلبات التخزين الطاقوي

تُعد مسألة التخزين من أبرز العيوب التقنية المرتبطة بأنظمة الطاقة المتجددة، ويرجع ذلك إلى الطبيعة المتقطعة وغير المنتظمة لمصادرها، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. ففي غياب الإنتاج المستمر، يصبح من الضروري الاعتماد على حلول تخزين فعالة—لا سيما البطاريات—لتجميع الفائض الطاقوي خلال فترات ذروة الإنتاج، وتوزيعه لاحقًا بشكل منتظم خلال فترات انخفاض أو انعدام التوليد. ومع ذلك، فإن أنظمة التخزين على نطاق المرافق العامة ما تزال تعاني من ارتفاع تكاليفها الرأسمالية والتشغيلية، مما يشكل عائقًا أمام التوسع السريع في مشاريع الطاقة المتجددة. في هذا السياق، تبرز الجهود البحثية والتكنولوجية الجارية لتطوير حلول تخزين طويلة الأجل أكثر كفاءة واقتصادية، بما يُسهم في تعزيز موثوقية الإمداد الكهربائي، وتحقيق توازن فعال بين الإنتاج والاستهلاك في شبكات الطاقة الحديثة¹.

خامسا: قيود سلسلة التوريد العالمية²

تُعد اختناقات سلسلة التوريد من بين العيوب البنيوية التي تحد من تسارع تنفيذ مشاريع الطاقة المتجددة على الصعيدين الوطني والدولي. وتشير الدراسات الحديثة، ومنها تقرير صادر عن شركة McKinsey & Company، إلى أن مطوري هذه المشاريع يواجهون ثلاث تحديات أساسية في هذا المجال: أولاً، صعوبة تأمين المواد الخام والمعادن الأرضية النادرة اللازمة لتصنيع المكونات التقنية الحيوية، في ظل تنامي الطلب العالمي والنقص المتوقع في الإمدادات؛ ثانياً، محدودية الوصول إلى الكفاءات التقنية والآليات الصناعية المتخصصة، والتي تشكل ركيزة أساسية لعمليات التركيب والتشغيل؛ وثالثاً، ضعف تنوع مصادر التوريد، ما يؤدي إلى تركيز الإنتاج في مناطق جغرافية محددة.

من خلال ما سبق نجد أن تعريفات الطاقة المتجددة قد تختلف من منظور إلى آخر، غير أنها تتقاطع جميعاً عند نقطة مركزية، تتمثل في كونها تمثل خياراً استراتيجياً لمستقبل الطاقة المستدامة، وقاطرة محورية في دفع عجلة التنمية الشاملة، سواء في الدول المتقدمة أو النامية. وعلى الرغم من وجود بعض العيوب التقنية والاقتصادية المرتبطة بتطبيقاتها، فإن فوائدها المتعددة تفوق بشكل واضح هذه التحديات. فقد أصبحت محطات توليد الطاقة المعتمدة على مصادر متجددة أكثر من مجرد وسائل لإنتاج الكهرباء، بل أدوات لتحقيق التحول الطاقوي وتعزيز الاستقلال الطاقوي. وبالنظر إلى التوسع المتسارع في استخدامها، فإن من المرجح أن تتحول في المستقبل القريب إلى المصدر الأساسي لتوليد الطاقة، مستندة إلى تفوقها البيئي، ودورها في دعم التنمية الإقليمية، والمساهمة في بناء شبكات كهربائية ذكية، يُنظر إليها اليوم على أنها الركيزة الأساسية

¹ IBM، مزايا الطاقة المتجددة وعيوبها، متوفر على الموقع الإلكتروني:

<https://www.ibm.com/sa-ar/think/insights/renewable-energy-advantages-disadvantages>

² McKinsey & Company, Renewable-energy development in a net-zero world: Disrupted supply chains, Available on: <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/renewable-energy-development-in-a-net-zero-world-disrupted-supply-chains>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

لنظم الطاقة الحديثة. من هذا المنطلق، تتجلى الأهمية المتزايدة للطاقة المتجددة مقارنة بنظيرتها التقليدية، خاصة في ضوء مميزات المتعددة وتنوع مجالات استخدامها.

سادسا: البصمة الكربونية والنفائات المرتبطة بالطاقة المتجددة¹

رغم أن تقنيات الطاقة المتجددة، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، تُصنّف ضمن الخيارات النظيفة لعدم توليدها لانبعاثات مباشرة أثناء مرحلة التشغيل، إلا أن تحليل دورة الحياة الكاملة لهذه التقنيات يكشف عن وجود عيوب بيئية كامنة لا يمكن إغفالها. ففي المراحل السابقة للتشغيل، وتحديدًا خلال التصنيع والنقل والتركيب، تُسجّل انبعاثات معتبرة من غازات الاحتباس الحراري نتيجة لاستخدام المواد الأولية كثيفة الاستهلاك الطاقوي، فضلاً عن عمليات التصنيع المعتمدة على مصادر طاقة تقليدية. إلى جانب ذلك، تطرح مسألة النفائات تحديًا بيئيًا متناميًا، إذ إن عملية التخلص من مكونات الطاقة المتجددة بعد انتهاء عمرها الافتراضي—مثل شفرات توربينات الرياح والألواح الشمسية—تؤدي إلى تراكم نفائات صناعية غير قابلة لإعادة التدوير بسهولة، مما يشغل مساحات كبيرة من مدافن النفائات، وي طرح تساؤلات جدية حول مدى استدامة هذه الحلول على المدى الطويل. من هنا تبرز ضرورة تطوير سياسات تدوير متقدمة، إلى جانب تشجيع البحوث المرتبطة بالتصميم المستدام للمعدات الطاقوية.

سابعا: محدودية إنتاج الطاقة المتجددة

رغم التقدم الكبير الذي شهدته تكنولوجيات الطاقة المتجددة خلال العقود الأخيرة، فإن قدرتها الإجمالية على توليد الكهرباء لا تزال محدودة مقارنة بمثيلتها التقليدية القائمة على الوقود الأحفوري. فمصادر مثل الفحم، الغاز الطبيعي والنفط لا تزال تُنتج كميات كبيرة ومستقرة من الطاقة، وهو ما يجعل من الصعب، في الوقت الراهن، الاعتماد الكلي على مصادر الطاقة المتجددة في تلبية الطلب الوطني المتزايد على الكهرباء. ويرتبط هذا التحدي بعدة عوامل، من أبرزها التقطع الزمني للإنتاج، وكفاءة التحويل المنخفضة نسبيًا، فضلاً عن الحاجات المتزايدة لتوسيع البنية التحتية القائمة، سواء من حيث عدد المرافق أو قدرتها التشغيلية. وفي ظل هذه المعطيات، يصبح من الضروري تبني مسارين متوازيين:

الأول يتمثل في تعزيز الاستثمارات في تطوير ونشر مشاريع الطاقات المتجددة على نطاق أوسع،

والثاني يركز على تفعيل سياسات ترشيد الاستهلاك الطاقوي وتحسين كفاءة استخدام الطاقة في مختلف القطاعات.

وتشير هذه الديناميكية إلى أن المرحلة الانتقالية نحو نموذج طاقي منخفض الكربون ستظل، خلال المستقبل المنظور، قائمة على مزيج من المصادر التقليدية والمتجددة، مع ضرورة إدارة هذا التوازن بشكل يضمن الأمن الطاقوي والاستدامة البيئية معاً.

ثامنا: عدم موثوقية مصادر الطاقة المتجددة

رغم ما تحقّقه تقنيات الطاقة المتجددة من فوائد بيئية واقتصادية، إلا أنها لا تزال تعاني من عيب جوهري

¹ IBM, What are greenhouse gas (GHG) emissions? , Available on: <https://www.ibm.com/think/topics/greenhouse-gas-emissions>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

يتمثل في محدودية الموثوقية التشغيلية نتيجة اعتمادها الكبير على العوامل المناخية. إذ تعتمد الطاقة الشمسية بشكل مباشر على توفر أشعة الشمس، بينما تعتمد طاقة الرياح على سرعة الرياح واستقرارها، وهو ما يجعل من هذه المصادر عرضة لانخفاض أو انقطاع مفاجئ في الإنتاج عند عدم توفر الظروف الجوية الملائمة. ويؤدي هذا التذبذب في القدرة الإنتاجية إلى صعوبات في تلبية الطلب الطاقوي في فترات الذروة، مما قد يستدعي من الجهات التنظيمية اتخاذ إجراءات استباقية، كإطلاق حملات توعية لترشيد استهلاك الكهرباء أو تفعيل أنظمة إدارة الطلب. ومن هنا، تبرز الحاجة الملحة إلى دمج تقنيات تخزين الطاقة وتحسين دقة أنظمة التنبؤ الجوي ضمن منظومة الطاقة المتجددة، بما يساهم في تقليل الفجوة بين الإنتاج والاستهلاك، وضمان استقرار الشبكة الكهربائية على المدى الطويل.

تاسعا: ضعف الكفاءة التشغيلية لتكنولوجيات الطاقة المتجددة

رغم الزخم العالمي الذي تشهده الاستثمارات في قطاع الطاقة المتجددة، إلا أن إحدى العيوب الأساسية التي لا تزال تعيق انتشارها الواسع تتمثل في محدودية الكفاءة التشغيلية لهذه التقنيات مقارنة بمثيلاتها التقليدية. فكون العديد من تكنولوجيات الطاقة المتجددة لا يزال في مراحل النضج الأولى، يجعل أدائها، من حيث التحويل الطاقوي والجدوى الاقتصادية، أقل من المتوقع في العديد من التطبيقات الصناعية والتجارية. هذا النقص في الكفاءة ينعكس سلباً على قدرة هذه التقنيات في تحقيق عوائد سريعة ومجزية للمستثمرين، وهو ما قد يؤدي إلى إحجام رؤوس الأموال عن الدخول بقوة في هذا القطاع، خاصة في البيئات الاقتصادية التي تبحث عن أرباح قصيرة الأجل. من هنا، فإن تجاوز هذه الإشكالية يتطلب مواصلة الاستثمار في البحث والتطوير لتحسين كفاءة نظم التحويل والتخزين، إلى جانب صياغة سياسات داعمة تقلل من المخاطر الاستثمارية وتعزز من ثقة القطاع الخاص في الجدوى المستقبلية للطاقة المتجددة.

عاشرا: العبء المالي للرأسمال المرتفع

يشكل ارتفاع النفقات الرأسمالية أحد القيود المالية الأساسية التي تُبطئ من وتيرة اعتماد الطاقة المتجددة على نطاق واسع. فبناء مرافق متخصصة لتوليد الكهرباء من مصادر مثل الرياح والطاقة الشمسية والطاقة الكهرومائية يتطلب استثمارات ضخمة تشمل اقتناء تكنولوجيا متقدمة، وتركيب معدات ذات تكلفة عالية كالتوربينات والألواح الشمسية، إضافة إلى مصاريف التصميم والتخطيط والتنفيذ التي غالباً ما تتطلب خبرات هندسية دقيقة. علاوة على ذلك، تتطلب هذه المنشآت صيانة دورية مكلفة للحفاظ على كفاءتها التشغيلية، فضلاً عن الحاجة إلى تمديد شبكات نقل جديدة لنقل الطاقة المنتجة إلى المناطق الحضرية، مما يضيف أعباء مالية إضافية وبذلك، يصبح من الضروري تطوير سياسات تمويلية داعمة، تعتمد على أدوات تحفيزية مثل الإعفاءات الضريبية وتسهيلات القروض، لضمان استقطاب الاستثمارات وتعزيز الجدوى الاقتصادية لهذه المشاريع المستدامة¹

من خلال ما سبق نجد أن تعريفات الطاقة المتجددة قد تختلف من منظور إلى آخر، غير أنها تتقاطع جميعاً عند

¹ conserve energy future, " Advantages and Disadvantages of Renewable Energy", available at: <https://www.conserve-energy-future.com>, 07/05/2024, 19:29.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

نقطة مركزية، تتمثل في كونها تمثل خيارًا استراتيجيًا لمستقبل الطاقة المستدامة، وقاطرة محورية في دفع عجلة التنمية الشاملة، سواء في الدول المتقدمة أو النامية. وعلى الرغم من وجود بعض العيوب التقنية والاقتصادية المرتبطة بتطبيقاتها، فإن فوائدها المتعددة تفوق بشكل واضح هذه التحديات. فقد أصبحت محطات توليد الطاقة المعتمدة على مصادر متجددة أكثر من مجرد وسائل لإنتاج الكهرباء، بل أدوات لتحقيق التحول الطاقوي وتعزيز الاستقلال الطاقوي. وبالنظر إلى التوسع المتسارع في استخدامها، فإن من المرجح أن تتحول في المستقبل القريب إلى المصدر الأساسي لتوليد الطاقة، مستندة إلى تفوقها البيئي، ودورها في دعم التنمية الإقليمية، والمساهمة في بناء شبكات كهربائية ذكية، يُنظر إليها اليوم على أنها الركيزة الأساسية لنظم الطاقة الحديثة. من هذا المنطلق، تتجلى الأهمية المتزايدة للطاقة المتجددة مقارنة بنظيرتها التقليدية، خاصة في ضوء مميزات المتعددة وتنوع مجالات استخدامها، مما يمنحها مكانة مركزية في الاستراتيجيات العالمية المعاصرة والمستقبلية للطاقة¹.

المبحث الثاني: واقع قطاع الطاقات المتجددة في الجزائر.

سعت الجزائر، ضمن توجه استراتيجي، إلى تنويع مصادر دخلها عبر استغلال الطاقات المتجددة كدعامة لتحقيق التنمية الاقتصادية المستدامة وتعزيز مكانتها الإقليمية والدولية. ويأتي هذا التوجه في ظل التحول العالمي نحو نظم طاقة نظيفة، مما يستدعي تحسين كفاءة استخدام الموارد المتجددة وتطوير تطبيقاتها التقنية والاقتصادية.

وانطلاقاً من هذا التوجه، يتناول هذا المبحث في قسمه الأول الإطار التشريعي والتنظيمي الذي يؤثر قطاع الطاقات المتجددة في الجزائر، بينما يخصص القسم الثاني لدراسة وتحليل الإمكانيات والموارد الطبيعية التي تزخر بها البلاد في هذا المجال.

المطلب الأول: الإطار التشريعي والتنظيمي للطاقة المتجددة في الجزائر

حرصت الجزائر، في إطار سعيها لتكريس انتقال طاقوي فعال ومستدام، على إدخال جملة من التعديلات والإصلاحات ذات الطابع التشريعي والتنظيمي، بهدف توفير بيئة قانونية ومؤسسية محفزة تواكب التطورات التكنولوجية والاقتصادية التي يعرفها قطاع الطاقات المتجددة على الصعيدين الوطني والدولي. ويهدف هذا التوجه إلى ضمان استفادة كل من المستثمرين والمستهلكين من إطار تشريعي وتنظيمي مرن وفعال، قادر على الاستجابة للتحديات الراهنة التي تعيق تطوير هذا القطاع الحيوي.

وعليه، يتناول هذا المطلب بالتحليل محورين أساسيين:

يتمثل الأول في الإطار التشريعي المنظم لمجال الطاقات المتجددة في الجزائر، من خلال استعراض القوانين، المراسيم، والنصوص التنظيمية ذات الصلة، بينما يُعنى المحور الثاني بالإطار التنظيمي، من خلال تحديد الهيئات والمؤسسات الوطنية المكلفة بالإشراف على تسيير هذا القطاع وتفعيل برامجه ومشاريعه على أرض الواقع.

الفرع الأول: الإطار التشريعي للطاقة المتجددة في الجزائر

في إطار التوجه نحو ترسيخ سياسة وطنية داعمة لاستغلال الطاقات المتجددة، تم إصدار مجموعة من

¹ عماد تكواشت، نفس المرجع السابق، ص12

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

النصوص التشريعية التي تهدف إلى تحفيز استخدام هذه المصادر الطاقوية البديلة، وتعزيز مساهمتها في المزيج الطاقوي الوطني.

ومن بين أبرز القوانين المعتمدة في هذا السياق، يمكن الإشارة إلى ما يلي:

1- يُعد القانون رقم 99-09 المؤرخ في 28 جويلية 1999، والمتعلق بالتحكم في الطاقة، من النصوص التشريعية المحورية التي أرسى الأسس الأولى لسياسة وطنية شاملة في مجال التسيير الرشيد للطاقة. ويهدف هذا القانون إلى تحديد المبادئ العامة والآليات الكفيلة بضمان التحكم في الطاقة، بما يحقق الاستخدام الأمثل للموارد الطاقوية، ويقلص من الآثار البيئية السلبية للنظام الطاقوي القائم.

وقد نصت المادة الأولى من هذا القانون على أن التحكم في الطاقة يشمل مجمل الإجراءات والنشاطات التطبيقية الرامية إلى ترشيد استخدام الطاقة، مع التركيز على الطاقات المتجددة، وتقليل التأثير البيئي للنظام الطاقوي الوطني. وفي السياق ذاته، أكدت المادة الثالثة على مفهوم "الاستخدام الرشيد للطاقة"، باعتباره الاستعمال الأمثل للطاقة عبر مختلف مراحل الإنتاج، والتحويل، والاستهلاك النهائي، سواء في القطاع الصناعي أو قطاع النقل أو الخدمات أو حتى على مستوى الاستهلاك المنزلي.

أما المادة الرابعة، فقد أولت أهمية خاصة لتطوير الطاقات المتجددة، حيث عرّفت هذا التطوير باعتباره عملية إدماج وترقية فروع تحويل الطاقات المتجددة القابلة للاستغلال، مع الإشارة بشكل صريح إلى الطاقات الشمسية، والحرارية الجوفية، والكتلة الحيوية (البيوماس)، بالإضافة إلى الطاقة الكهرومائية وطاقة الرياح، باعتبارها مصادر واعدة في تعزيز الأمن الطاقوي وتحقيق التحول نحو نموذج طاقوي مستدام¹.

2- يشكل القانون رقم 02-01 المؤرخ في 05 فيفري 2002، والمتعلق بالكهرباء والتوزيع العمومي للغاز بواسطة القنوات، إحدى الركائز التشريعية الهامة التي تنظم النشاطات الطاقوية الحيوية في الجزائر، لا سيما في مجالي الكهرباء والغاز. ويهدف هذا القانون، حسب ما ورد في مادته الأولى، إلى ضبط القواعد العامة التي تحكم عمليات إنتاج ونقل وتوزيع وتسويق الكهرباء، وكذا نقل وتوزيع وتسويق الغاز عبر الشبكات.

وتبرز أهمية هذا النص القانوني في ما نصت عليه المادة 26، التي تُعد محطة مركزية في دعم وترويج الطاقات المتجددة ضمن المنظومة الكهربائية الوطنية. فقد أقرت هذه المادة جملة من الآليات التحفيزية لتشجيع إنتاج الطاقة الكهربائية انطلاقاً من مصادر متجددة، حيث خولت لجنة ضبط الكهرباء والغاز صلاحية اتخاذ الإجراءات الكفيلة بتنظيم السوق بما يضمن تدفقاً عادلاً لهذه الطاقات، سواء من حيث السعر أو من حيث الكمية الدنيا التي يتم إدماجها في الشبكة الوطنية. كما ينص القانون على إمكانية تخصيص التكاليف الإضافية الناتجة عن هذه التدابير من قبل الدولة، أو تحميلها لصندوق الكهرباء والغاز، ل يتم تعويضها من خلال التعريفات المطبقة.

¹ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية، السنة 36، العدد 51 02، أوت 1999، ص: 04-09.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

ويشترط القانون، في هذا الإطار، أن يتم تحديد كميات الطاقة المستهدفة بالدعم من خلال آلية طلب عروض، تُنظَّم وفقاً لأحكام تنظيمية تصدر لاحقاً. ويجسد هذا الإجراء توجه الدولة نحو ترسيخ مبدأ المنافسة الشفافة، وتحقيق النجاح في استغلال الطاقات النظيفة في إطار السياسة الطاقوية الوطنية.¹

3- يمثل القانون رقم 98-11 المؤرخ في 22 أوت 1998، المتضمن التوجيهات العامة والبرنامج الخماسي للبحث العلمي والتطوير التكنولوجي للفترة الممتدة بين 1998 و2002، أحد النصوص التشريعية الأولى التي عكست بوضوح اهتمام الدولة الجزائرية بتكريس البحث العلمي كأداة استراتيجية لدعم التنمية المستدامة، بما في ذلك في مجال الطاقات المتجددة. وقد عدّل هذا القانون واستُكمل بموجب القانون رقم 05-05 المؤرخ في 23 فيفري 2008، قبل أن يُلغى صراحةً بموجب المادة 60 من القانون رقم 15-21 المؤرخ في 30 ديسمبر 2015، الذي جاء في شكل قانون توجيهي جديد خاص بالبحث العلمي والتطوير التكنولوجي.

ويُبرز هذا النص، لاسيما من خلال الفقرة الثامنة من المادة الثالثة منه، مدى مركزية الطاقات المتجددة ضمن أولويات البحث العلمي الوطني، حيث نصّت هذه الفقرة على أن البحث العلمي والتطوير التكنولوجي يهدفان إلى تحقيق التنمية الاقتصادية والاجتماعية والثقافية والعلمية والتكنولوجية للبلاد.

ومن بين الأهداف الاستراتيجية لهذا التوجه، برزت مسألة "إنتاج الطاقة، وتخزينها، وتوزيعها، وعقلنة استعمالها، وتنويع مصادرها"، بما يؤكد على ضرورة إدماج الطاقات البديلة والمتجددة في صلب السياسات البحثية والعلمية للجزائر.

إن إدراج هذا البعد ضمن الأهداف المعلنة للبحث والتطوير يعكس وعياً مبكراً لدى صناع القرار بأهمية دعم الابتكار العلمي والتكنولوجي في مجال الطاقة، كمدخل أساسي لضمان أمن طاقي مستدام وتقليل الاعتماد على الموارد الأحفورية.²

4- يمثل القانون رقم 04-09 المؤرخ في 14 أوت 2004، أحد النصوص التشريعية الخورية التي كرّست التوجه الاستراتيجي للدولة الجزائرية نحو ترقية الطاقات المتجددة ضمن إطار شامل للتنمية المستدامة. ويهدف هذا القانون إلى تحديد كفاءات تطوير الطاقات المتجددة عبر مجموعة من الآليات والمقاربات التي تتماشى مع الالتزامات البيئية الدولية وتطلعات الجزائر لتحقيق أمنها الطاقي على المدى الطويل.

وقد بيّنت المادة الثانية من هذا القانون الأهداف الرئيسية لترقية الطاقات المتجددة، والتي يمكن تلخيصها في أربع محاور أساسية:

أولاً، حماية البيئة من خلال تشجيع اللجوء إلى مصادر طاقيّة نظيفة وغير ملوثة؛

ثانياً، الإسهام في مواجهة التغيرات المناخية عبر تقليص انبعاث الغازات الدفيئة؛

ثالثاً، دعم مسار التنمية المستدامة من خلال الحفاظ على الموارد التقليدية وترشيد استخدامها؛

وأخيراً، الإسهام في تنمية الإقليم الوطني عن طريق تمييز المصادر الطاقوية المتجددة وتعميم استعمالها.

¹ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 39، العدد 08، 06 فبراير 2002، ص ص : 04-26.

² الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 35 العدد 62، 14 أوت 1998، ص: 03

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

وفي سياق التعاريف القانونية، نصت المادة الثالثة من القانون على مفهوم الطاقات المتجددة، حيث عرّفها بأنها تشمل الأشكال الكهربائية أو الحركية أو الحرارية أو الغازية للطاقة، الناتجة عن تحويل الإشعاعات الشمسية، طاقة الرياح، الحرارة الجوفية، النفايات العضوية، والطاقة المائية، إضافة إلى تقنيات استخدام الكتلة الحيوية. كما أدرجت هذه المادة أيضاً الطرق التكنولوجية التي تحقق اقتصاداً معتبراً في الطاقة، مثل تقنيات "هندسة المناخ الحيوي" المطبقة في البناء.

أما المادة الرابعة، فقد حددت بدقة فروع تحويل الطاقات المتجددة التي تقع ضمن مجال تطبيق هذا القانون، وتشمل ما يلي:

- ✓ **الطاقة الشمسية:** التحويل الكهروضوئي، والتحويل الحراري والحراري الحركي؛
 - ✓ **الكتلة الحيوية:** التحويل اللاهوائي عبر التخمر الميثاني والكحولي، والتحويل الجاف من خلال الاحتراق، التفحيم، أو التحويل إلى غاز؛
 - ✓ **طاقة الرياح:** التحويل الميكانيكي والكهروميكانيكي؛
 - ✓ **الطاقة الحرارية الجوفية:** الاسترجاع الحراري؛
 - ✓ **الطاقة المائية:** التحويل الكهروميكانيكي؛
 - ✓ **هندسة المناخ الحيوي:** من خلال المواد والتقنيات التي تسمح بتحقيق اقتصاد ملموس في استهلاك الطاقة التقليدية. وفي إطار تعزيز هذا التوجه، نصت المادة السادسة من القانون ذاته على ضرورة اعتماد برنامج وطني لترقية الطاقات المتجددة، يُشار إليه في النص باسم "البرنامج الوطني"، مدعوماً بـ "حصيلة سنوية" لتقييم مدى التقدم المحقق في هذا المجال. كما أقرت مجموعة من الآليات المؤسسية والتنظيمية لمراقبة هذا البرنامج، من أبرزها ما نصت عليه المادة 17، التي تقضي بإنشاء هيئة وطنية مكلفة بترقية وتطوير استخدام الطاقات المتجددة، تُعرف بـ "المركز الوطني لترقية الطاقات المتجددة". ويمثل هذا الإطار التشريعي خطوة نوعية في مسار تكريس التحول الطاقوي في الجزائر، ويعكس التزام الدولة بإدماج الطاقات النظيفة ضمن سياساتها التنموية، مع ضمان استدامة الموارد وتقليص الآثار البيئية السلبية للنمو الاقتصادي.¹
- 5- نص المرسوم الرئاسي رقم 11-467 المؤرخ في 28 ديسمبر 2011، على التصديق على النظام الأساسي للوكالة الدولية للطاقة المتجددة "إيرينا" المعتمد في بون بتاريخ 26 جانفي 2009. وتؤكد المادة الثانية من هذا النظام على التزام الوكالة بتشجيع الانتشار الواسع والمتزايد لمختلف مصادر الطاقة المتجددة، وتعزيز استخدامها بطريقة مستدامة.

ويتم ذلك مع مراعاة جملة من الاعتبارات الجوهرية، من بينها:

- ✓ **أولاً:** ضرورة احترام الأولويات الوطنية والمحلية، مع إبراز أهمية التكامل بين الطاقات المتجددة وتدابير الاستخدام الفعال للطاقة، لما في ذلك من فوائد متعددة المستويات.

¹ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية، السنة 41 العدد 52، 18 أوت 2004، ص ص: 09-12

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

✓ ثانيًا: الاعتراف بالدور المحوري للطاقة المتجددة في حماية البيئة، لا سيما من خلال تقليل الضغط على الموارد الطبيعية، والحد من ظاهرة إزالة الغابات، خصوصًا في المناطق الاستوائية. كما تبرز مساهمتها في الحفاظ على المناخ، وتعزيز النمو الاقتصادي، وتقوية التماسك الاجتماعي، إلى جانب دورها في التخفيف من حدة الفقر وتحقيق أهداف التنمية المستدامة. كما تشمل هذه الأهداف تحسين أمن الإمدادات الطاقوية، ودعم التنمية الإقليمية، وترسيخ مبدأ المسؤولية المشتركة بين الأجيال.

أما فيما يتعلق بتعريف الطاقات المتجددة، فقد نصّت المادة الثالثة من النظام الأساسي على أنها تشمل كافة أشكال الطاقة الناتجة عن موارد متجددة يتم استغلالها بشكل مستدام، ويشمل ذلك على وجه الخصوص:

✓ الطاقة الحيوية (البيوإنرجي)،

✓ الطاقة الحرارية الجوفية (الجيومتريمية)،

✓ الطاقة الكهرومائية،

✓ طاقة المحيطات، بما في ذلك طاقة المد والجزر، والأمواج، والطاقة الحرارية للمحيطات وغيرها،

✓ الطاقة الشمسية،

✓ طاقة الرياح.¹

6- مرسوم رقم 56-88 مؤرخ في 22 مارس 1988 يتضمن إنشاء مركز تنمية أنظمة الطاقة.²

7- مرسوم رقم 57-88 مؤرخ في 22 مارس 1988 يتضمن إنشاء محطة تجريب التجهيزات الشمسية في الوسط الصحراوي.³

8- مرسوم رقم 59-88 مؤرخ في 22 مارس 1988 يتضمن إنشاء مركز تنمية التقنيات النووية.⁴

9- مرسوم رقم 60-88 مؤرخ في 22 مارس 1988 يتضمن إنشاء مركز تنمية الطاقات المتجددة.⁵

10- قرار مؤرخ في 28 ديسمبر 1988 يتضمن إلحاق وحدة تنمية الأجهزة الشمسية بمركز تنمية الطاقات المتجددة.⁶

11- مرسوم تنفيذي رقم 69-15 مؤرخ في 21 ربيع الثاني عام 1436 الموافق 11 فبراير سنة 2015، يحدد كفاءات

إثبات شهادة أصل الطاقة المتجددة واستعمال هذه الشهادات.⁷

¹ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية، السنة 49 العدد 03، 18 جانفي 2012، ص: 04-11

² الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية، السنة 25 العدد 12، 23 مارس 1988، ص: 490-491

³ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية، السنة 25 العدد 12، 23 مارس 1988، ص: 491-492

⁴ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية، السنة 25 العدد 12، 23 مارس 1988، ص: 493-494

⁵ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية، السنة 25 العدد 12، 23 مارس 1988، ص: 494-495

⁶ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية، السنة 26 العدد 04 25 جانفي 1989، ص: 101

⁷ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية، السنة 52 العدد 09، 18 فبراير 2015، ص: 11-15

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

- 12- مرسوم تنفيذي رقم 167 - 17 مؤرخ في 25 شعبان عام 1438 الموافق 22 مايو سنة 2017، يعدل ويتم المرسوم التنفيذي رقم 69 - 15 المؤرخ في 21 ربيع الثاني عام 1436 الموافق 11 فبراير سنة 2015 الذي يحدد كفاءات إثبات شهادة أصل الطاقة المتجددة واستعمال هذه الشهادات.¹
- 13- قرار وزاري مشترك مؤرخ في 15 جوان 2013، يتضمن التنظيم الداخلي لمركز تنمية الطاقات.²
- 14- مرسوم تنفيذي رقم 11-33 المؤرخ في 27 جانفي 2011، الذي يتضمن إنشاء المعهد الجزائري للطاقات المتجددة وتنظيمه وسيرها.³
- 15- مرسوم رئاسي رقم 11-435 المؤرخ في 11 ديسمبر 2011، يتضمن التصديق على مذكرة التفاهم للتعاون في مجالات النفط والغاز ومصادر الطاقات الجديدة والمتجددة بين حكومة الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وحكومة دولة الكويت الموقعة بالكويت في 02 جوان 2010.⁴
- 16- مرسوم رئاسي رقم 12-416 المؤرخ في 11 ديسمبر 2012 يتضمن التصديق على مذكرة التفاهم بين حكومة الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية وحكومة الجمهورية التونسية في ميادين التحكم في الطاقة والطاقات المتجددة الموقعة بالجزائر في 02 جويلية 2009.⁵
- 17- قرار وزاري مشترك مؤرخ في 15 جانفي 2013 يتضمن التنظيم الداخلي لمركز تنمية الطاقات المتجددة.⁶
- 18- مرسوم تنفيذي رقم 15-69 المؤرخ في 11 فيفري 2015 يحدد كفاءات إثبات شهادة أصل الطاقة المتجددة واستعمال هذه الشهادات.⁷
- 19- مرسوم تنفيذي رقم 16-70 مؤرخ في 201 في 27 جانفي 2011 والمتضمن إنشاء المعهد الجزائري للطاقات المتجددة وتنظيمه وسيره.⁸
- 20- مرسوم تنفيذي رقم 17-98 مؤرخ في 26 فيفري 2017 يحدد إجراء طلب عروض الإنتاج الطاقات المتجددة أو المنبثقة عن الإنتاج المشترك وإدماجها في المنظومة الوطنية للتزويد بالطاقة الكهربائية.⁹

¹ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 54 العدد 31، 28 ماي 2017، ص: 11-13

² الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 51 العدد 31، 11 جوان 2014، ص: 28-31

³ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 48 العدد 08، 06 فبراير 2011، ص: 03-08

⁴ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 48 العدد 71، 28 ديسمبر 2011، ص: 14-15

⁵ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 49 العدد 68، 16 ديسمبر 2012، ص: 11-13.

⁶ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 51 العدد 31، 11 جوان 2014، ص: 28-31.

⁷ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 52 العدد 09، 18 فيفري 2015، ص: 11-15.

⁸ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 53 العدد 10، 22 فيفري 2016، ص: 17.

⁹ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 54 العدد 15، 05 مارس 2017، ص: 03-09.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

- 21- مرسوم تنفيذي رقم 17-167 مؤرخ في 22 ماي 2017 يعدل ويتمم المرسوم التنفيذي رقم 15-69 المؤرخ في 11 فيفري 2015 الذي يحدد كفايات إثبات شهادة أصل الطاقة المتجددة واستعمال هذه الشهادات.¹
- 22- مرسوم تنفيذي رقم 17-204 مؤرخ في 22 جوان 2017، يتمم المرسوم التنفيذي رقم 17-98 المؤرخ في 26 فيفري 2017 الذي يحدد إجراء طلب عروض لإنتاج الطاقات المتجددة أو المنبثقة عن الإنتاج المشترك و إدماجها في المنظومة الوطنية للتزويد بالطاقة الكهربائية.²
- 23- مرسوم تنفيذي رقم 11-423 المؤرخ في 08 ديسمبر 2011 يحدد كفايات تسيير حساب التخصيص الخاص رقم 131-302 الذي عنوانه " الصندوق الوطني للطاقات المتجددة و المشتركة"³، و الذي تم تعديله بموجب المرسوم التنفيذي رقم 15-319 مؤرخ في 13 ديسمبر 2015، الذي يحدد كفايات تسيير حساب التخصيص الخاص رقم 131-302 الذي عنوانه " الصندوق الوطني للتحكم في الطاقة و الطاقات المتجددة و المشتركة".⁴
- 24- مرسوم تنفيذي رقم 03-456 المؤرخ في 01 ديسمبر 2003 يعدل ويتمم المرسوم رقم 88-60 المؤرخ في 22 مارس 1988 والمتضمن إنشاء مركز تنمية الطاقات المتجددة.⁵

الفرع الثاني: الإطار التنظيمي للطاقة المتجددة في الجزائر

تُعبر الجزائر عن إرادتها في تطوير قطاع الطاقات المتجددة من خلال تبني سياسة واضحة تهدف إلى ترقية هذا المجال الحيوي، وقد تجسدت هذه الإرادة في إنشاء هياكل ومؤسسات متخصصة تكرس نشاطها للبحث العلمي، والتطوير التكنولوجي، ودعم مشاريع التنمية المستدامة المرتبطة بالطاقات النظيفة منها⁶:

أولا: محافظة الطاقات المتجددة (PEN)

تأسست هذه الهيئة بموجب المرسوم رقم 82-46 الصادر بتاريخ 27 ربيع الأول 1402 هـ الموافق لـ 23 جانفي 1982،⁷ وقد وُضعت تحت وصاية المجلس الأعلى للبحث العلمي والتقني. وتتمثل مهامها الأساسية في إعداد وتنفيذ المخططات الوطنية الخاصة بتطوير القدرات العلمية، والتكنولوجية، والصناعية بما يتماشى مع أهدافها الاستراتيجية. كما تضطلع بدور محوري في إنجاز الأبحاث العلمية والتقنية الموجهة نحو تطوير وإنتاج الطاقات الجديدة.⁸

¹ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 54 العدد 31، 28 ماي 2017، ص: 11-13.

² الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 54 العدد 40، 06 جويلية 2017، ص: 06-07.

³ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 48 العدد 68، 14 ديسمبر 2011، ص: 21-22.

⁴ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 52 العدد 68، 27 ماي 2015، ص: 10-11.

⁵ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 40 العدد 75، 07 ديسمبر 2003، ص: 20-21.

⁶ زاهي محمد الأمين، دور الطاقات الخضراء في تحقيق التنمية المستدامة * دراسة التجربة الجزائرية ، أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه في العلوم الاقتصادية، جامعة يحيى فارس بالمدينة، الجزائر 2018-2019، ص 189

⁷ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 19 العدد 5، 2 فبراير سنة 1982، ص 197.

⁸ سابق نسime، 2019، الاطار القانوني و المؤسساتي لقطاع الطاقات المتجددة في الجزائر، مجلة الباحث للدراسات الأكاديمية، المجلد 06/العدد 01، ص 526-

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

ثانيا: الوكالة الوطنية لتطوير الطاقة و ترشيدها (APRUE)¹

تُعد الوكالة الوطنية لترقية وترشيد استخدام الطاقة (APRUE) مؤسسة عمومية ذات طابع صناعي وتجاري، أنشئت بموجب مرسوم رئاسي صادر سنة 1985، وتُناط بها مهمة محورية تتمثل في تجسيد السياسة الوطنية الخاصة بتسيير الطاقة. وتركز الوكالة بشكل خاص على تعزيز كفاءة استخدام الطاقة، من خلال برامج وإجراءات تهدف إلى ترشيد الاستهلاك وتحسين الأداء الطاقوي على المستوى الوطني.

ثالثا: المرصد الوطني لترقية الطاقات المتجددة

في إطار الجهود التشريعية الرامية إلى دعم الانتقال الطاقوي وتعزيز التنمية المستدامة، نصّ القانون رقم 04-09 المؤرخ في 14 أوت 2004، والمتعلق بترقية الطاقات المتجددة، في مادته السابعة عشرة على استحداث هيئة وطنية لتطوير استعمالات الطاقات المتجددة، أطلق عليها اسم "المرصد الوطني لترقية الطاقات المتجددة". وتتمثل المهمة الجوهرية لهذه الهيئة في تنسيق الجهود الرامية إلى توسيع حصة الطاقات المتجددة ضمن المزيج الطاقوي الوطني، من خلال وضع الاستراتيجيات، واقتراح الآليات، ومتابعة السياسات العمومية ذات الصلة، بما ينسجم مع أهداف التنمية المستدامة ومتطلبات الأمن الطاقوي.²

رابعا: المعهد الجزائري للطاقات المتجددة³ (IAER)

تمّ إنشاء المعهد الجزائري للطاقات المتجددة بموجب المرسوم التنفيذي رقم 11-33 المؤرخ في 27 جانفي 2011 ، باعتباره مؤسسة عمومية ذات طابع صناعي وتجاري، تتمتع بالشخصية المعنوية والاستقلالية المالية، وتخضع لوصاية الوزير المكلف بالطاقة. ويقع مقره الإداري ببلدية حاسي الرمل، ولاية الأغواط، وهي منطقة تُعد ذات أهمية استراتيجية في المنظومة الطاقوية الوطنية.

ويضطلع المعهد بعدّة مهام محورية في دعم الانتقال الطاقوي وتعزيز فعالية الطاقة، من أبرزها:

تلبية احتياجات مختلف الهيئات والمؤسسات، سواء العمومية أو الخاصة، في مجال التكوين المتخصص، وتحسين الكفاءات وتحسين المعارف المتعلقة بالطاقات المتجددة والنجاعة الطاقوية؛ إلى جانب تطوير البحث التطبيقي وتأمين مخرجاته في هذا المجال الحيوي. كما يتولى المعهد إنجاز المنشآت النموذجية، ومتابعة وتوجيه المتعاملين الاقتصاديين في مختلف مراحل تطوير مشاريع الطاقات المتجددة، فضلاً عن إبرام اتفاقات وشراكات على المستويين الوطني والدولي، بما يعزز التكامل المعرفي والتقني في هذا القطاع الاستراتيجي.

¹ الوكالة الوطنية لتطوير الطاقة و ترشيدها (APRUE) ، عن الوكالة، المتاح على الموقع الإلكتروني: <https://www.aprue.org.dz>

² صافية أولدرابح - إقلولي، محمد إقلولي، 2022، مجلة صوت القانون، المجلد 08/ العدد 02، الإطار القانوني و المؤسساتي للطاقات المتجددة، ص 1397.

³ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 48 العدد 08، 06 فبراير 2011، ص ص: 3-8.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

خامسا: مركز تنمية الطاقات المتجددة (CDER)¹:

يُعد مركز تنمية الطاقات المتجددة مؤسسة بحثية وطنية محورية في المنظومة العلمية الجزائرية، وقد أنشئ بتاريخ 22 مارس 1988، في إطار عملية إعادة هيكلة مؤسسات البحث العلمي وبتفويض من مفوضية البحث، استجابة لحاجة ملحة إلى إطار مؤسسي يهدف إلى تطوير المعارف والتكنولوجيا في مجال الطاقات المستدامة. وهو مؤسسة عمومية ذات طابع علمي وتكنولوجي، تتكفل بوضع وتنفيذ البرامج الوطنية للبحث والتطوير في مجالات الطاقات المتجددة. ينخرط المركز بصفة دائمة في تنفيذ البرنامج الوطني للبحث العلمي والتطوير التكنولوجي، كما هو منصوص عليه في قانون التوجيه للبحث العلمي، وفي إطار برنامج إسقاطي خماسي يأخذ في الحسبان الأولويات الاقتصادية والاجتماعية للدولة. وتُوجّه البرامج البحثية التي يُشرف عليها المركز وفقاً لاحتياجات التنمية الاقتصادية المستدامة، لا سيما ما يتعلق بأمن الطاقة والانتقال نحو نموذج طاقي قائم على مصادر نظيفة ومتجددة.

ويغطي نشاط المركز مختلف أنماط الطاقة المتجددة، بما في ذلك الطاقة الشمسية الكهروضوئية والحرارية، طاقة الرياح، الطاقة الحرارية الأرضية، بالإضافة إلى الطاقة الحيوية البيئية. ويضطلع المركز بدور استراتيجي في تجسيد أهداف الدولة في مجال الانتقال الطاقي، وذلك من خلال تطوير حلول تكنولوجية قابلة للتطبيق، وتعزيز القدرات الوطنية في مجال الابتكار الطاقي.

سادسا: وحدة تطوير التجهيزات الشمسية (UDES)²

تُعد وحدة تطوير المعدات الشمسية (UDES) إحدى الوحدات البحثية التابعة لمركز تنمية الطاقات المتجددة، وقد تم إنشاؤها بموجب المرسوم الرئاسي رقم 008 المؤرخ في 9 جانفي 1988، والصادر في الجريدة الرسمية رقم 60 بتاريخ 10 فيفري من نفس السنة. تندرج هذه الوحدة ضمن الهيكل الوطني للبحث العلمي في مجال الطاقات المتجددة، وتتمركز بمدينة بوسماعيل التابعة لولاية تيارت.

سابعا: وحدة البحث التطبيقي في طاقة المتجددة³

تم إنشاء وحدة البحث التطبيقي في الطاقات المتجددة سنة 1999، كإحدى الوحدات التابعة لمركز تنمية الطاقات المتجددة، وتموقع هذه الوحدة البحثية في ولاية غرداية، ضمن منطقة تعتبر من أبرز المناطق المؤهلة للاستغلال الأمثل لمصادر الطاقات المتجددة، نظراً لخصائصها المناخية والبيئية.

تسعى الوحدة إلى أن ترسخ مكانتها كمركز مرجعي إقليمي، بل وعالمي، في ميدان التجريب والتطوير التكنولوجي

¹ مركز تنمية الطاقات المتجددة، المتاح على الموقع الإلكتروني: <https://www.cder.dz/spip.php?rubrique565>

² مركز تنمية الطاقات المتجددة، المتاح على الموقع الإلكتروني: <https://www.cder.dz/spip.php?article1395>

³ مركز تنمية الطاقات المتجددة، المتاح على الموقع الإلكتروني: <https://www.cder.dz/spip.php?article1394>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

بالطاقات المتجددة، إضافة إلى كونها حلقة وصل بين مختلف الفاعلين المحليين والدوليين، من مؤسسات بحثية، وأكاديمية، وصناعية، في هذا المجال الحيوي.

سابعاً: وحدة الأبحاث التطبيقية في مجال الطاقة المتجددة في المناطق الصحراوية¹

تأسست وحدة البحث في الطاقات المتجددة في الوسط الصحراوي بموجب المرسوم التنفيذي رقم 57-88 الصادر بتاريخ 22 مارس 1988، والذي نص على إنشاء "مخطة التجريب للأجهزة الشمسية في الوسط الصحراوي". وتم تعديل تسميتها إلى الصيغة الحالية بموجب القرار الوزاري رقم 76 المؤرخ في 22 ماي 2004، لتصبح وحدة بحثية تابعة لمركز تنمية الطاقات المتجددة، الكائن مقره ببيوزريعة - الجزائر، وتعمل تحت وصاية وزارة التعليم العالي والبحث العلمي. ويقع مقر الوحدة بمدينة أدرار، إحدى المناطق الاستراتيجية من حيث الإمكانيات الطاقوية المتجددة.

ثامناً: دراسات و إنجازات في الطاقات المتجددة (ER2)²

تم إنشاء فرع "دراسات وإنجازات في الطاقات المتجددة (ER2)" بتاريخ 03 جويلية 2007، كوحدة تجارية تابعة لمركز تنمية الطاقات المتجددة، ويتخذ من بن عكنون بالعاصمة الجزائرية مقراً له. يهدف هذا الفرع إلى تجسيد التكامل بين البحث العلمي والتطبيقات العملية، خاصة في مجال الطاقات المتجددة، من خلال ترجمة نتائج البحث إلى حلول واقعية تلبي احتياجات السوق الوطني.

تاسعاً: محافظة الطاقات المتجددة والفعالية الطاقوية³

تم بموجب المرسوم التنفيذي رقم 19-280 الصادر بتاريخ 20 أكتوبر 2019، إنشاء "محافظة الطاقات المتجددة والفعالية الطاقوية" كمؤسسة عمومية تتمتع بالشخصية المعنوية والاستقلال المالي، وتخضع لوصاية الوزير الأول. يمثل هذا الجهاز مؤسسة مركزية في الحوكمة الوطنية للانتقال الطاقوي، إذ أنيطت به مجموعة من المهام المحورية في مجال تطوير الطاقات المتجددة وتحسين كفاءة استخدام الطاقة.

تُكلف المحافظة، بالتنسيق مع القطاعات الوزارية المعنية، بإعداد الاستراتيجية الوطنية للطاقات المتجددة والفعالية الطاقوية، مع مراعاة انسجامها مع المخططات الأخرى الجاري إعدادها وفقاً للأطر التشريعية والتنظيمية السارية. كما تضطلع بتحديد التوجهات الصناعية الداعمة لإنجاز البرنامج الوطني في هذا المجال، مع المساهمة في بلورة المخططات القطاعية والإقليمية ذات الصلة.

¹ وحدة البحث في الطاقات المتجددة في الوسط الصحراوي بأدرار، التعريف بالوحدة، المتاح على الموقع الإلكتروني:

<https://urms.cder.dz/%d8%a7%d9%84%d8%aa%d8%b9%d8%b1%d9%8a%d9%81-%d8%a8%d8%a7%d9%84%d9%88%d8%ad%d8%af%d8%a9>

² دراسات و إنجازات في الطاقات المتجددة (ER2)، المتاح على الموقع الإلكتروني: <https://www.er2.dz/>

³ وكالة الأنباء الجزائرية، صدور مرسوم تنفيذي يوضح مهام محافظة الطاقات المتجددة والفعالية الطاقوية، المتاح على الموقع الإلكتروني:

<https://www.aps.dz/ar/economie/79269-2019-11-06-14-12-15>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

عاشرا: الصندوق الوطني للطاقات المتجددة و المشتركة¹

تم إنشاء الصندوق الوطني للطاقات المتجددة كآلية مالية موجهة لدعم سياسات الدولة في مجال التحول الطاقوي، وذلك استناداً إلى المادة الثانية من المرسوم التنفيذي رقم 11-423 الصادر بتاريخ 8 ديسمبر 2011 الموافق لـ 13 محرم 1433. ويُحدد هذا النص القانوني كليات تسيير حساب التخصيص الخاص رقم 131-302، والمدرج تحت تسمية "الصندوق الوطني للطاقات المتجددة" في دفاتر الخزينة العمومية.

يُسند الإشراف على هذا الحساب إلى الوزير المكلف بالطاقة، الذي يُعد الأمر بصرف الموارد المالية المرتبطة به. ويُعد هذا الصندوق أداة استراتيجية لتمويل المشاريع المندرجة ضمن البرنامج الوطني لتطوير الطاقات المتجددة، من خلال تخصيص الموارد اللازمة لدعم البحث، وتطوير النماذج الصناعية، وتمويل المبادرات الهادفة إلى توسيع استخدام الطاقات المتجددة على المستويين المحلي والوطني.

حادي عشر: مركز تنمية التكنولوجيات المتطورة (CDTA)

يُعد مركز تطوير التكنولوجيات المتقدمة (CDTA) مؤسسة عمومية ذات طابع علمي وتكنولوجي، وُضعت تحت إشراف وزارة التعليم العالي والبحث العلمي،² وقد تأسس رسميًا بموجب المرسوم التنفيذي رقم 88-61 المؤرخ في 22 مارس 1988. يقع مقر المركز في بوعينان، ولاية البليدة، ويُعد أحد الأقطاب الوطنية المتخصصة في البحث العلمي المتقدم والتطوير التكنولوجي في الجزائر.

يُسند إلى المركز دور محوري في إعداد وتنفيذ برامج بحث علمي تهدف إلى تطوير واستغلال التكنولوجيات المتقدمة، لاسيما في المجالات ذات الأولوية الوطنية. وتشمل مهامه الأساسية:

- ✓ إعداد وتنفيذ برامج بحثية متكاملة في ميدان تكنولوجيا الإعلام، وتطبيقات الأشعة، وتكنولوجيات الليزر، والبلازما بمختلف أنواعها، بالإضافة إلى البحث في مجالات الانصهار النووي الحراري كمصدر محتمل للطاقة المستقبلية.³
- ✓ إجراء الدراسات العلمية والتقنية المتعلقة بإدماج تكنولوجيات الطاقة الشمسية، لاسيما الصفائح الشمسية، ضمن النسيج الصناعي الوطني، مع العمل على تطوير حلول محلية مستدامة تساهم في تحقيق الأمن الطاقوي.⁴
- ✓ المساهمة في نقل المعرفة والتكنولوجيات المتقدمة إلى الأوساط الصناعية والاقتصادية، من خلال التعاون مع الجامعات، ومراكز البحث، والشركاء الاقتصاديين، في إطار مشاريع تنمية ذات بُعد استراتيجي.

ثاني عشر: الشركة الجزائرية للطاقات المتجددة NEAL

¹ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية، السنة 48 العدد 68، 14 ديسمبر 2011، ص: 21-22.

² مركز تنمية التكنولوجيات المتطورة، متاح على الموقع الإلكتروني: <https://www.cdta.dz/ar/>

³ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية، السنة 25 العدد 12، 23 مارس 1988، ص: 495-496.

⁴ يوسف كلوم، الطاقات المتجددة كآلية مزدوجة لدعم الاقتصاد الوطني و حماية البيئة، أطروحة مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه، الطور الثالث في الحقوق، جامعة زيان

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

تُعد هذه الشركة نموذجًا حديثًا للشركات المساهمة، حيث تم تأسيسها بتاريخ 28 يوليو 2002، وتتميز بتركيبتها الهيكلية التي تجمع بين رؤوس أموال وطنية من القطاعين العام والخاص. ويتجسد هذا النموذج من خلال مساهمة ثلاث مؤسسات اقتصادية وطنية كبرى في هيكل رأس مال الشركة، وهي: شركة سوناطراك، وشركة سونلغاز، بالإضافة إلى مجمع SIM الناشط في مجال الصناعة الغذائية.

وتتوزع نسب المساهمة كما يلي: 45% لكل من سوناطراك وسونلغاز، و10% لمجمع SIM، ما يعكس توجهًا استراتيجيًا نحو تعبئة الموارد الوطنية لتعزيز الاستثمار المشترك وتطوير مشاريع اقتصادية ذات قيمة مضافة عالية، لا سيما في القطاعات الحيوية المرتبطة بالطاقة والصناعة¹.

تُعتبر الشركة الجزائرية للطاقات المتجددة (NEAL (New Energy Algeria) فاعلاً محورياً في تنفيذ السياسة الوطنية المتعلقة بتطوير الطاقات المتجددة والنظيفة. وتضطلع هذه المؤسسة بمهام متعددة تدرج في إطار الانتقال الطاقوي الوطني، من خلال تعزيز استخدام مصادر الطاقة المستدامة، وتكثيف الاستثمارات في مشاريع إنتاج الكهرباء من مصادر غير تقليدية.

ثالث عشر: وحدة تنمية تكنولوجيا السيليسيوم (USTD)

تُعد وحدة تنمية تكنولوجيا السيليسيوم (USTD)، التي تم إنشاؤها سنة 1988 تحت وصاية وزارة التعليم العالي والبحث العلمي²، مؤسسة بحثية وطنية متخصصة تُعنى بتطوير البحوث العلمية والابتكار التكنولوجي في مجال المواد المتقدمة، لا سيما تكنولوجيات السيليسيوم وتطبيقاته.

تتمثل المهام الأساسية لهذه الوحدة في إنجاز برامج بحثية متعددة التخصصات، تشمل العلوم والتكنولوجيات المرتبطة بالمواد والأجهزة، مع تركيز خاص على التطبيقات الكهروضوئية، وتخزين الطاقة، وغيرها من المجالات ذات الصلة بالتحول الطاقوي. كما تضطلع الوحدة بمهام التكوين لما بعد التدرج، ما يعزز مكانتها كمؤسسة موجهة نحو دعم القدرات الوطنية في مجال البحث والتطوير.

تسهم وحدة تكنولوجيا السيليسيوم كذلك في تحويل المعارف العلمية إلى تطبيقات صناعية ذات مردودية اقتصادية،

¹ Tawfik Hasni, Création de la New Energy Algeria NEAL, Bulletin des énergies renouvelables – N° 2, CDER, Décembre 2002, p: 2,p3

² حمّاش وليد، التكنولوجيات النظيفة كآلية للحد من التلوث الصناعي لتجسيد التنمية الصناعية المستدامة دراسة حالة الطاقة النظيفة في الجزائر، أطروحة مقدمة

لنيل شهادة الدكتوراه علوم في العلوم الاقتصادية، جامعة فرحات عباس سطيف 1، الجزائر، 2019-2020، ص265

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

خاصة في مجال الطاقات المتجددة، من خلال تطوير منتجات وتقنيات قائمة على السيليسيوم، مما يجعلها فاعلاً مهماً في دعم الابتكار وتعزيز السيادة التكنولوجية في هذا القطاع الحيوي.¹

رابع عشر: مركز البحوث في تكنولوجيا الطاقة: (CRTSE) 2

يُعد هذا المركز مؤسسة بحثية وتطويرية تخضع لإشراف وزارة التعليم العالي والبحث العلمي، وقد تم إنشاؤه بموجب المرسوم التنفيذي رقم 12-316 الصادر بتاريخ 21 أوت 2012. ويأتي تأسيسه كامتداد لوحدة تطوير تكنولوجيا السيليسيوم التي كانت تابعة لمركز تطوير التكنولوجيات المتقدمة، وذلك في إطار تعزيز البنية الوطنية للبحث العلمي وتوسيع نطاق أنشطتها في مجال تكنولوجيات المواد المتقدمة، لاسيما تلك ذات الصلة بالطاقة المتجددة.

خامس عشر: الهياكل المؤسسية المعنية بالتحول في مجال الطاقة:

باشرت الجزائر خلال السنوات الأخيرة اعتماد جملة من الترتيبات المؤسسية الرامية إلى إدماج الطاقات المتجددة وتعزيز كفاءة استخدام الطاقة، وذلك في إطار استراتيجية وطنية تهدف إلى تنويع المزيج الطاقوي والتأسيس لمرحلة التحول الطاقوي المستدام. وفي هذا السياق، تم إنشاء عدد من الهيئات والمؤسسات العمومية المتخصصة، يُنَاط بها دور محوري في مرافقة هذا التحول، من خلال دعم السياسات العمومية، وتطوير البنية التحتية، وتعزيز القدرات البحثية والتقنية في هذا المجال.

1- إدارة الطاقات الجديدة والمتجددة وكفاءة الطاقة: تُعد إدارة الطاقات الجديدة والمتجددة وكفاءة الطاقة إحدى الهيئات التنفيذية المركزية التي وُضعت تحت وصاية المديرية العامة للكهرباء والغاز والطاقات الجديدة والمتجددة التابعة لوزارة الطاقة، وذلك بهدف الإشراف على تنفيذ السياسات العمومية في مجال الطاقات المتجددة وترشيد استهلاك الطاقة، وضمان التنسيق بين مختلف الفاعلين المؤسستين المعنيين بالانتقال الطاقوي.

2- إدارة تطوير وتشجيع واستخدام الطاقات المتجددة تحت سلطة وزارة البيئة والطاقات المتجددة السابقة.

3- مفوضية الطاقة المتجددة وكفاءة الطاقة: تُعد مفوضية الطاقات المتجددة وكفاءة الطاقة (CERFE) هيئة استُحدثت بموجب المرسوم التنفيذي رقم 19-280 المؤرخ في 20 أكتوبر 2019، تحت سلطة الوزير الأول، بهدف تقديم الدعم التقني والمؤسسي في تنفيذ وتقييم السياسة الوطنية في مجالي الطاقات المتجددة وكفاءة استخدام الطاقة.

*السيليسيوم هي مادة نصف ناقلة تستخدم في تركيب شكل رمل أو صلصال أو صخر في مجال الإنشاءات البنائية. كما تُستخدم السيليكات في الأسمنت البورتلاندي من أجل الملاط والخراف الحصى؛ كما تُمزج مع الرمل والحصى لتحضير الخرسانة؛ وتدخل أيضاً في تركيب الخزف والبورسلان؛ وكذلك في تركيب أنواع مختلفة من الزجاج، مثل زجاج الصودا والجير.

¹ رحمة بلهادف، رشيد يوسف، الاستثمار في الطاقات المتجددة خيار استراتيجي للانتقال نحو الاقتصاد الأخضر في إطار الاستغلال المستدام للنفط العربي، مجلة

الإستراتيجية والتنمية، جامعة ابن باديس، مستغانم، المجلد 2 العدد 1، ص 273

²Noureddine YASSAA, Messaoud KHELIF, Transition Énergétique en Algérie Leçons, Etat des Lieux et Perspectives pour un Développement Accéléré des Énergies Renouvelable, Edition 2020, Commissariat aux Énergies Renouvelables et à l'Efficacité Énergétique, Premier Ministre, Alger, p59-60,61,62

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

وتُشكل المفوضية أداةً استراتيجية لتحسين الحوكمة القطاعية من خلال تعزيز التنسيق بين مختلف الفاعلين العموميين، وتوفير المشورة العلمية والفنية لمتابعة وتقييم البرامج الوطنية المعتمدة.¹

4- **وزارة البيئة و الطاقات المتجددة:** في إطار تعزيز البعد البيئي ضمن سياسات التنمية المستدامة، تم في سبتمبر 2022 استحداث وزارة البيئة والطاقات المتجددة، التي تُعنى بتكريس نهج بيئي شامل ومندمج يُسهم في تحقيق الإصلاح البيئي والتحول الطاقوي في آنٍ واحد.²

5- **مديرية الطاقات الجديدة والمتجددة:** تُعد مديرية الطاقات الجديدة والمتجددة، التي تم إنشاؤها سنة 1995 بالجزائر العاصمة، إحدى البنى المؤسسية الأولى التابعة لوزارة الطاقة والمناجم في مجال الطاقات النظيفة. وقد أُنيطت بها مهام محورية تتمثل في تقييم الإمكانيات الوطنية للطاقات المتجددة بمختلف أنواعها، ووضع الأسس العلمية والتقنية لتطويرها، بما يخدم توجه الدولة نحو تنويع مصادر الطاقة وتعزيز الأمن الطاقوي في إطار التنمية المستدامة. وتُشكل هذه المديرية إطارًا إداريًا وتقنيًا لتوجيه السياسات العمومية المتعلقة باستكشاف الموارد الطاقوية المتجددة، وتحديد أولويات الاستثمار والبحث في هذا القطاع الاستراتيجي.³

6- **مديرية الصناعات الكهربائية والإلكترونية والطاقات المتجددة :** في إطار إصلاح الإدارة المركزية لوزارة الصناعة وتعزيز دورها في تطوير الفروع الصناعية ذات الأولوية، تم بموجب المرسوم التنفيذي رقم 23-412 الصادر في 06 جمادى الأولى 1445 هـ، الموافق لـ 20 نوفمبر 2023، إنشاء مديرية الصناعات الكهربائية والإلكترونية والطاقات المتجددة، التابعة لوزارة الصناعة والإنتاج الصيدلاني.⁴

المطلب الثاني: قدرات الطاقة المتجددة في الجزائر:

تُعد الجزائر من أبرز الدول المرشحة للعب دور محوري في مجال الطاقة المتجددة، بفضل امتلاكها موارد طبيعية هائلة تشمل الطاقة الشمسية، الريحية، المائية، طاقة الكتلة الحية، والطاقة الحرارية الجوفية، نبرز أهمها فيما يلي.

الفرع الأول: تطور قدرات الجزائر في مجال الطاقة المتجددة

شهدت الجزائر خلال العقد الأخير تطورًا ملحوظًا في قدراتها المركبة من مصادر الطاقة المتجددة، مع التركيز بشكل خاص على الطاقة الشمسية الكهروضوئية. يوضح الجدول أدناه تطور هذه القدرات خلال الفترة من عام 2014 إلى عام 2023:

¹ (سحاري نفس مرجع سابق)، ص 169

² الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية، وزارة البيئة وجودة الحياة، مهام قطاع البيئة، متاح على الموقع الإلكتروني:

<https://www.me.gov.dz/fr/missions-du-secteur-environnemental>

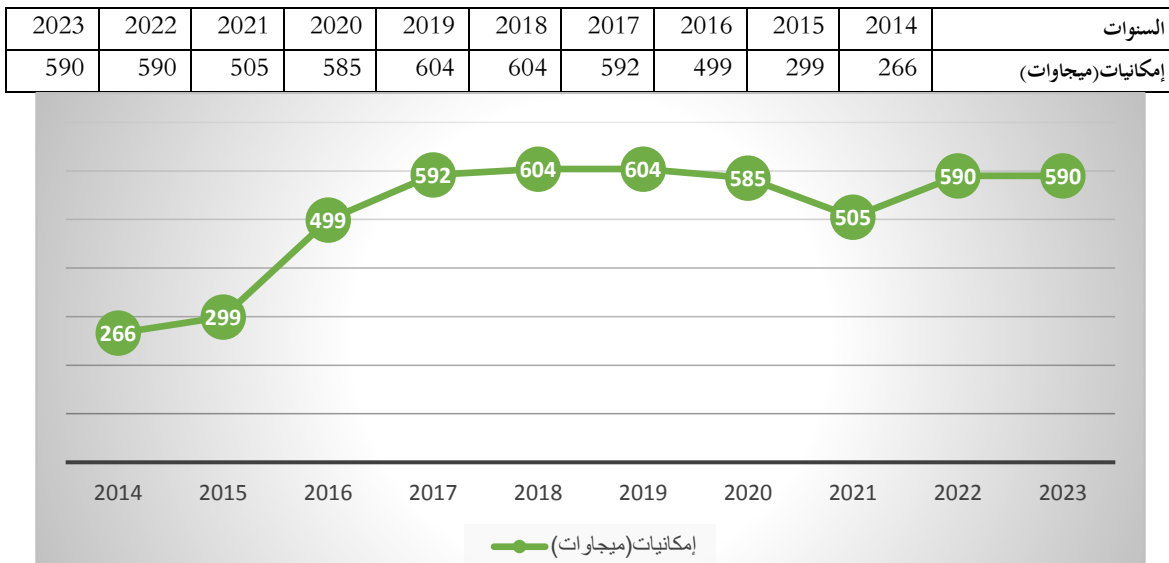
³ حمزة جعفر، آليات تمويل و تنمية مشاريع الطاقة المتجددة لتحقيق التنمية المستدامة في الجزائر، أطروحة مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم الاقتصادية، جامعة

فرحات عباس سطيف 1، الجزائر، 2017-2018، ص 202

⁴ الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 60 العدد 75، 22 نوفمبر 2023 ، ص ص: 8-30.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (10): تطور القدرات المركبة للطاقة المتجددة في الجزائر (2014-2023)



المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على البيانات RENEWABLE ENERGY (IRENA), International Renewable Energy Agency
STATISTICS 2024 ,p02

تشير البيانات إلى أنه في سنة 2014، بلغت القدرة المركبة حوالي 266 ميغاواط، ثم ارتفعت إلى 299 ميغاواط في 2015، لتصل إلى 499 ميغاواط سنة 2016. واستمر هذا التوسع في السنوات الموالية، حيث تم تسجيل 592 ميغاواط سنة 2017 و604 ميغاواط في سنتي 2018 و2019. رغم هذا الارتفاع، عرفت القدرات تراجعاً طفيفاً في سنة 2020 إلى 585 ميغاواط، ثم إلى 505 ميغاواط سنة 2021، قبل أن تعود إلى مستوى 590 ميغاواط في سنتي 2022 و2023.

هذا التطور يعكس سعي الجزائر لتعزيز استعمال الطاقات المتجددة، خاصة في ظل الإمكانيات الطبيعية الكبيرة التي تتوفر عليها البلاد مثل الطاقة الشمسية. ورغم التقدم المحقق، إلا أن الأرقام تشير إلى بطء نسبي في وتيرة الإنجاز مقارنة بالطموحات المعلنة في البرامج الوطنية. ويمكن تفسير هذا التذبذب في النمو بعدة عوامل، من بينها التحديات التمويلية، والإجراءات الإدارية، وأحياناً غياب الانسجام بين مختلف الفاعلين في القطاع.

الفرع الثاني : قدرات الجزائر في مجال الطاقة الكهربائية

تشير بيانات وزارة الطاقة والمناجم (2007) إلى أن الجزائر تستفيد من كميات هامة من التساقطات المطرية تُقدَّر بحوالي 65 مليار متر مكعب سنوياً. ومع ذلك، فإن التوزيع الجغرافي لهذه الموارد يتميز بعدم التوازن، حيث تتركز في مناطق محددة، وتتعرض لمعدلات تبخر مرتفعة، فضلاً عن التسرب السريع نحو البحر، مما يقلص من كفاءة الاستفادة منها. وبناءً على هذه المعطيات، تُقدر الموارد المائية القابلة للاستغلال بنحو 25 مليار متر مكعب، يتم التحكم فيها من خلال أكثر من 50 سدّاً قائماً، في حين تشير الدراسات إلى وجود 103 مواقع إضافية محتملة لإنشاء سدود لم تُستغل بعد.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

من حيث مساهمة الطاقة الكهرومائية في المزيج الطاقوي الوطني، فإن قدرتها لا تتعدى 5% من إجمالي قدرة توليد الكهرباء، وهو ما يعادل إنتاجاً سنوياً يقدر بـ 280 ميغاواط، موزعة على 13 محطة كهرومائية. ويمكن إرجاع هذا المستوى المتدني من الإنتاج إلى عاملين رئيسيين: أولهما محدودية المواقع الطبيعية المناسبة لتوليد الطاقة الكهرومائية، وثانيهما ضعف استغلال الإمكانيات المتوفرة.¹

وتشير البيانات المتاحة إلى أن القدرة الكلية المركبة لمحطات الطاقة الكهرومائية تبلغ حوالي 286 ميغاواط، وهي قدرة ضئيلة نسبياً بالنظر إلى الإمكانيات المائية المتاحة، خاصة في ظل وجود موارد مائية سطحية وجوفية متجددة تُقدّر بـ 17.2 مليار متر مكعب سنوياً، تمتد في شمال البلاد وجنوبها.

جدير بالذكر أن الجزائر قد شرعت في تنفيذ بعض مشاريع إعادة التأهيل في هذا المجال، من بينها مشروع تأهيل محطة زيامة منصورية بولاية جيجل خلال سنة 2005، والتي تُقدّر قدرتها الإنتاجية بـ 100 ميغاواط.² وفيما يلي توزيع القدرات الطاقوية لأهم المحطات الكهرومائية النشطة في الجزائر، حيث تتركز جميعها تقريباً في المناطق الشمالية:

الجدول رقم (01): محطات الطاقة الكهرومائية في الجزائر

(الوحدة: جيجاواط)

المحطة	القدرة الطاقوية	المحطة	القدرة الطاقوية	المحطة	القدرة الطاقوية	المحطة	القدرة الطاقوية
درقية	71.5	سوق الجمعة	8.08	قوريت	6.42	ارقان	16
أغبل مدى	24	تيزي مدن	4.58	بوحنيقية	5.7	غريب	7
منصورية	100	اقزنشبال	2.712	واد الفضّة	15.6	تسيالة	4.228

المصدر: كسير سمير، عادل مستوي، الاتجاهات الحالية لإنتاج واستهلاك الطاقة الناضبة ومشروع الطاقة المتجددة في الجزائر - رؤية تحليلية انية ومستقبلية - مجلة العلوم الاقتصادية والتسيير والعلوم التجارية، العدد 14/2015، ص 161.

وإضافة إلى التوزيع الجغرافي لمحطات التوليد، من المفيد تتبع تطور السعة المركبة للطاقة الكهرومائية خلال العقد الماضي. ويظهر الجدول التالي السعة الإجمالية للطاقة الكهرومائية (بوحدة ميغاواط) للفترة الممتدة من 2014 إلى 2023، حيث نلاحظ استقراراً في القيمة عند حدود 228 ميغاواط خلال الفترة من 2014 إلى 2019، تلتها مرحلة تراجع ملحوظ بدأ سنة 2020 واستمر حتى 2023:

¹ خليفة الحاج، مزواغي جيلالي، تواتي خديجة، تجربة الجزائر في التحول إلى استخدام الطاقات الخضراء لتحقيق الاستدامة، مجلة الإستراتيجية والتنمية، عدد خاص بالمؤتمر الدولي الأول: الطاقة الخضراء والتنمية المستدامة، مقاربات وتجارب، جامعة ابن باديس، مستغانم، مجلد 09، عدد خاص (الجزء الأول) /جويلية 2019، ص 19.

² راشدي فاطمة، غوال نادية، بلهاشمي جبهة، تقييم سياسة التمويل الطاقة الخضراء في الجزائر في ظل التوجه نحو تنوع و تنمية الاستثمار الطاقوي وفق برنامج المخطط الوطني للطاقات المتجددة 2011-2030، مجلة الإستراتيجية والتنمية، عدد خاص بالمؤتمر الدولي الأول: الطاقة الخضراء والتنمية المستدامة، مقاربات وتجارب، جامعة ابن باديس، مستغانم، مجلد 09، عدد خاص (الجزء الأول) /جويلية 2019، ص 101.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (11): قدرات الجزائر من الطاقة الكهرومائية

السنوات	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
إمكانات (ميغاوات)	228	228	228	228	228	228	209	129	129	129



المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على البيانات، International Renewable Energy Agency (IRENA), RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2024, p10

هذا التراجع في القدرة الإنتاجية الكهرومائية خلال السنوات الأخيرة يُثير تساؤلات مهمة بشأن التحديات التقنية والمؤسسية المرتبطة بإدارة وصيانة البنية التحتية الحالية، فضلاً عن غياب استثمارات جديدة في القطاع الكهرومائي، ما يستوجب إدراج هذا المحور ضمن أولويات السياسة الطاقوية الوطنية المستقبلية.

الفرع الثالث: قدرات الجزائر في مجال طاقة الرياح

تُعَدّ الرياح من الظواهر الطبيعية الناتجة عن التفاوت في امتصاص سطح الأرض للطاقة الشمسية، الأمر الذي يؤدي إلى اختلافات في درجات الحرارة والضغط الجوي، ومن ثم تحرك كتل الهواء من مناطق الضغط المرتفع إلى مناطق الضغط المنخفض. وقد شكلت هذه الظاهرة مورداً استراتيجياً للإنسان منذ العصور القديمة، حيث تم تسخيرها في عدة مجالات حيوية؛ من بينها طحن الحبوب باستخدام الطواحين الهوائية، وكذلك دفع السفن الشراعية للإبحار عكس التيارات البحرية.

وفي العصر الحديث، اكتسبت طاقة الرياح أهمية متزايدة ضمن أنظمة التحول الطاقوي، نظراً لطابعها المستدام وانعدام انبعاثاتها الغازية الضارة. وأصبحت محل اهتمام واسع في ميادين علمية وتطبيقية متداخلة تشمل علم المناخ، الأرصاد الجوية، الزراعة، التخطيط العمراني، وحماية البيئة، إضافة إلى قطاع الطاقة.

لقد شهد قطاع الطاقة الريحية خلال العقود الأخيرة تطوراً لافتاً، مدفوعاً بالتقدم التكنولوجي في تصنيع وتركيب التوربينات الهوائية، لا سيما في الدول الصناعية. كما ساهمت الالتزامات البيئية الدولية، وعلى رأسها التوجه نحو تقليص انبعاثات الغازات الدفيئة، في تعزيز مكانة هذا المورد ضمن السياسات الطاقوية الوطنية.

رغم ذلك، فإن تحقيق مردودية مثلى في استغلال الطاقة الريحية يتطلب توافر قاعدة بيانات دقيقة حول خصائص

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الرياح في كل موقع جغرافي. فنجاح أي نظام لتحويل الطاقة الهوائية يعتمد بدرجة كبيرة على المعرفة العلمية الدقيقة بسرعات الرياح، تواترها، وتوزيعها الزمني والمكاني. لذلك، تعد عملية القياس والتحليل المناخي لمورد الرياح خطوة أساسية في تصميم البنى التحتية الطاقوية ذات الصلة.

وفيما يخص الجزائر، فإن الإمكانات الريحية تختلف باختلاف المناطق، وذلك بفعل الطوبوغرافيا المتنوعة والاختلافات المناخية الكبيرة بين الشمال والجنوب. وتمثل الجزائر نموذجاً فريداً من حيث تنوعها الجغرافي، إذ يمكن تقسيمها إلى ثلاث مناطق رئيسية:

✓ **الشمال المتوسطي:** يمتد على طول ساحل يناهز 1200 كيلومتر، ويتميز بتضاريس جبلية معقدة تشمل سلاسل الأطلس التلي والأطلس الصحراوي. ويؤثر هذا التنوع التضاريسي على ديناميكيات الرياح ويقلل من استقرارها.

✓ **الهضاب العليا والمناطق الداخلية:** تتميز بمناخ قاري وتوفر إمكانات ريحية متوسطة إلى مرتفعة، ما يجعلها ملائمة لبعض المشاريع ذات الطابع المحلي.

✓ **الجنوب الكبير:** يمتد على مساحات شاسعة تحت تأثير مناخ صحراوي، ويُعدّ من أكثر المناطق واعدة من حيث وفرة وسرعة الرياح، خاصة في ولايات أدرار، تمنراست، وتندوف، حيث تُسجّل سرعات تفوق في المتوسط 6 أمتار في الثانية، ما يؤهلها لإقامة مشاريع طاقوية ضخمة¹.

من أجل تحديد الإمكانات بدقة، تمّ الاعتماد على خرائط تمهيدية مبنية على معطيات مرصدية جمعت من شبكة مكونة من 75 محطة تابعة للديوان الوطني للأرصاد الجوية، وقد تم تسجيل بيانات متوسطات السرعة الشهرية للرياح على ارتفاع 10 أمتار من سطح الأرض. وسمحت هذه الخرائط بتحقيق هدفين أساسيين:

1. تحديد المناطق الواعدة التي تمتلك خصائص ملائمة لإنتاج الكهرباء من طاقة الرياح.
2. إبراز التباين الجغرافي لمورد الرياح عبر التراب الوطني، بما يساهم في توجيه الاستثمارات المستقبلية بشكل أكثر دقة وفعالية.

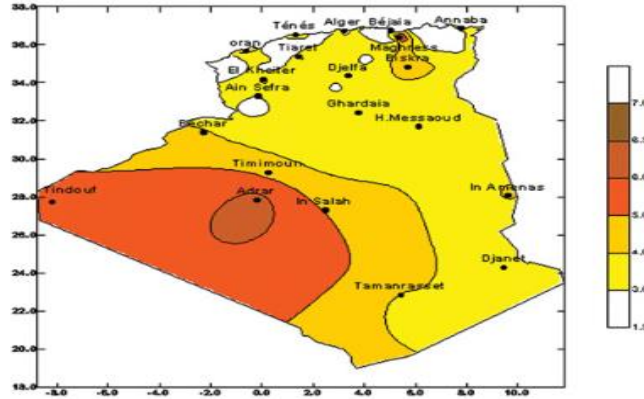
ويمثل الشكل التالي خريطة سنوية لمتوسط سرعة الرياح على ارتفاع 10 أمتار، تُعدّ مرجعاً أولياً لتوجيه السياسة

الوطنية في مجال تطوير مشاريع الطاقة الريحية.

¹ L.âche hamane,a.khellaf, cartographie de ressources éoliennes de l'algerie, centre de developpement de energies renouvelables, bulletin des sciences geographiques N°11, avril 2003, p23

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (12): خريطة سنوية لمتوسط سرعة الرياح على ارتفاع 10 أمتار من سطح الأرض.



SOURCE : lilia HAMANE, les ressources éoliennes de l'Algérie, bulletin des énergies renouvelables, CDER, Algérie, N3, Juin 2003, P10 .

تُبرز خريطة متوسط سرعة الرياح السنوية على ارتفاع 10 أمتار فوق مستوى سطح الأرض (الشكل رقم 12) تفاوتاً ملحوظاً في التوزيع الجغرافي لمورد الرياح عبر التراب الوطني. حيث يتضح أن المناطق الجنوبية، وبوجه خاص الجنوب الغربي للبلاد، تمتاز بسرعات أعلى مقارنة بالمناطق الشمالية. وتُسجل سرعات تفوق 4 م/ث، بل تتجاوز 6 م/ث في بعض مناطق ولاية أدرار، مما يجعلها ذات جدوى اقتصادية عالية لاستغلال هذا المورد في مشاريع إنتاج الكهرباء. في المقابل، فإن المناطق الشمالية، ورغم انخفاض متوسط السرعة نسبياً، إلا أنها تحتوي على جيوب محلية (microclimats) ذات خصائص ريحية مميزة. وتشمل هذه المناطق كلاً من وهران، بجاية، عنابة، بالإضافة إلى الهضاب العليا في ولايتي تيارت والخيطة، وكذلك على امتداد المحور الجغرافي الواصل بين بجاية وبسكرة. وتشير هذه البيانات إلى وجود إمكانيات ريحية ذات طابع موضعي يمكن استثمارها في مشاريع صغيرة ومتوسطة النطاق، شرط إجراء تقييمات دقيقة على المستوى الموقعي.

ويُعدّ عامل الارتفاع من بين المحددات الفيزيائية الأساسية التي تؤثر على سرعة الرياح. إذ تُبين الأدبيات العلمية أن سرعة الرياح تزداد بارتفاع نقطة القياس عن سطح الأرض، وهو ما ينعكس بشكل مباشر على كمية الطاقة المستخرجة من التوربين الهوائي، نظراً للعلاقة الطردية بين الطاقة الهوائية وارتفاع موقع الشفرات الدوّارة للتوربين.

من جهة أخرى، فإن المورد الريحي في الجزائر يتأثر بالتغيرات الفصلية، وهو ما ينبغي أخذه بعين الاعتبار عند تصميم أنظمة التحويل الطاقوي. وتُعدّ هذه الخاصية حاسمة على وجه الخصوص في القطاعات التي تتسم باختلاف الطلب الطاقوي بين الفصول، مثل قطاع الزراعة. فعلى سبيل المثال، يتم اللجوء إلى استخدام توربينات الرياح لضخ المياه من الآبار بغرض السقي خلال فصل الصيف الذي يتميز بضعف التساقطات، ما يرفع من أهمية استغلال المورد الريحي خلال هذه الفترة.

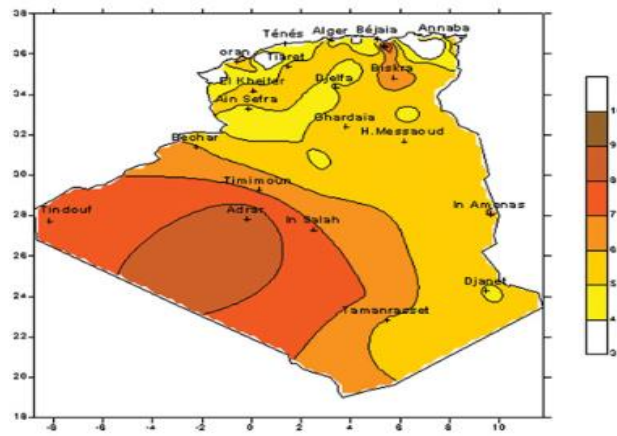
لتحقيق تقييم أدق لإمكانيات الرياح، تم احتساب متوسطات السرعة السنوية والموسمية على ارتفاع 50 متراً فوق

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

سطح الأرض باستخدام نموذج حساب القدرة، مما أتاح نظرة أوسع وأكثر واقعية حول موارد الرياح الممكن استغلالها.¹ ويظهر الشكل رقم (13)، الذي يمثل خريطة متوسط سرعة الرياح على هذا الارتفاع، تسجيل زيادات معتبرة في السرعة عبر كامل التراب الوطني.

ففي حين أن سرعة الرياح عند ارتفاع 10 أمتار تجاوزت 4 م/ث في بعض مناطق الجنوب الغربي، فإنها ترتفع إلى ما فوق 6 م/ث عند ارتفاع 50 متراً، بل وتصل إلى أكثر من 8 م/ث في منطقة أدرار، مما يؤكد الأهمية الاستراتيجية لهذا الموقع في تطوير مشاريع طاقة الرياح على نطاق واسع.

الشكل رقم (13): خريطة سنوية لمتوسط سرعة الرياح على ارتفاع 50 متراً من سطح الأرض.



SOURCE : lilia HAMANE, les ressources éoliennes de l'Algérie, bulletin des énergies renouvelables, CDER, Algérie, N3, Juin 2003, P10 .

تُبرز الخرائط الموسمية لسرعة الرياح، كما هو موضح في الشكل رقم (13)، وجود اختلافات معتبرة في شدة الرياح بين فصول السنة. حيث يُسجل أدنى متوسط لسرعة الرياح خلال فصلي الشتاء والخريف، بينما يُعدّ فصل الربيع الأكثر ملاءمة من حيث قوة الرياح، متبوعاً بفصل الصيف، مما يشير إلى أن المورد الريحي في الجزائر يتمتع بديناميكية فصلية يمكن استغلالها بشكل استراتيجي في تخطيط مشاريع الطاقة الريحية.

وتشير المعطيات الميدانية إلى أن هذا التباين الموسمي لا يتوزع بصفة متجانسة على كامل التراب الوطني، بل يختلف من موقع إلى آخر وفقاً للخصائص الجغرافية والطقسية المحلية. فمثلاً، تسجل مواقع وهران، الخيطير، تيمون، تندوف، أدرار، تمنراست وحاسي مسعود نمطاً ريحياً يتميز باستقرار نسبي خلال فصلي الشتاء والخريف، في حين تعرف ارتفاعاً ملحوظاً في سرعات الرياح خلال فصلي الربيع والصيف.

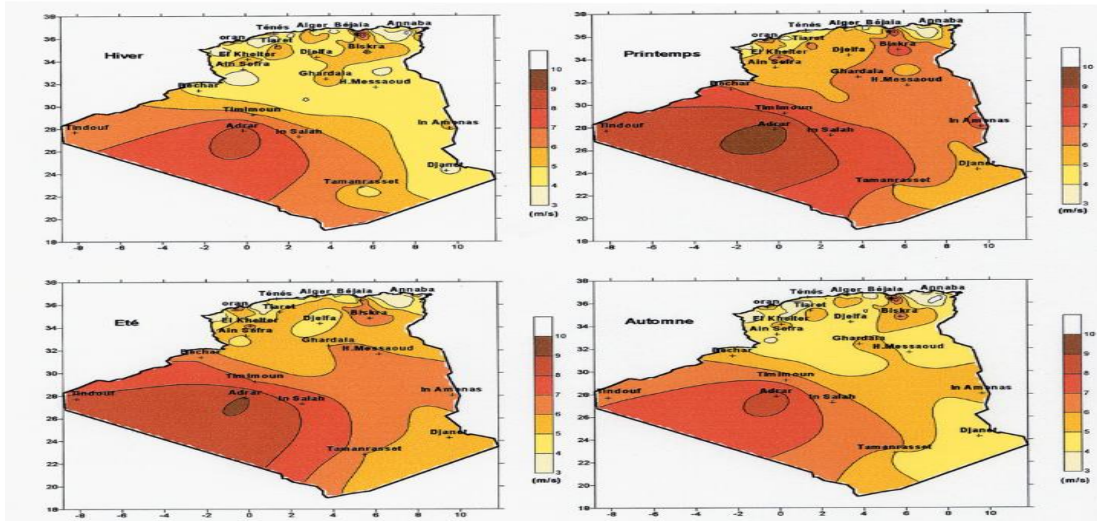
ويُعدّ هذا النوع من التحليل الموسمي أمراً جوهرياً في تقييم الجدوى التقنية والاقتصادية لمشاريع استغلال طاقة الرياح،

¹ Justus, C. G. et W.R., Mikhail, 1976, "Variation de la hauteur de la vitesse du vent et statistiques de distribution du vent", Geophysical Research Letters, vol.3, No.5, pp261-264.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

إذ يسمح بتحديد الفترات المثلى للإنتاج الطاقوي، كما يساهم في اختيار التكنولوجيات المناسبة للتوربينات الهوائية التي تتماشى مع خصائص الرياح الفصلية في كل موقع.

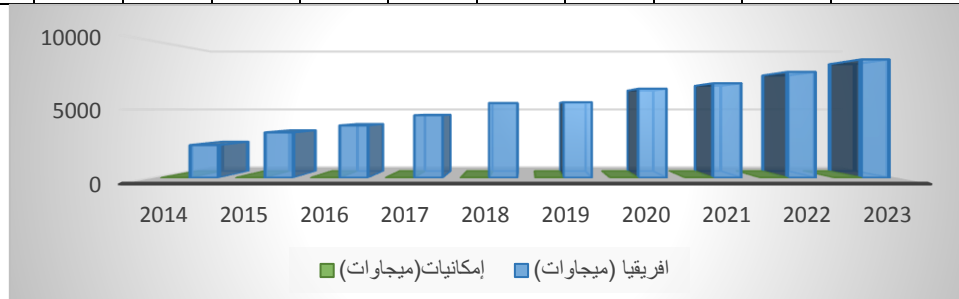
الشكل رقم(14): خرائط موسمية لسرعة الرياح على ارتفاع 50 متراً من سطح الأرض.



SOURCE : lilia HAMANE, les ressources éoliennes de l'Algérie, bulletin des énergies renouvelables, CDER, Algérie, N3, Juin 2003, P11.

رغم الإمكانيات الكبيرة للطاقة الريحية في الجزائر، إلا أن القدرات الفعلية لا تزال محدودة مقارنة بالقارة الإفريقية. بقيت القدرة الاسمية للطاقة الريحية في الجزائر ثابتة عند 10 ميغاواط من عام 2014 إلى عام 2023، في حين شهدت إفريقيا تطوراً ملحوظاً، حيث ارتفعت القدرات من 2399 ميغاواط في 2014 إلى 8654 ميغاواط في 2023. الشكل رقم(15): تطور السعة الإجمالية لطاقة الرياح في الجزائر مقارنة بإفريقيا (2014-2023).

السنوات	2023	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014
إمكانيات(ميغاوات)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
افريقيا (ميغاوات)	8654	7745	6909	6514	5528	5471	4578	3831	3320	2399



المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على البيانات ، International Renewable Energy Agency (IRENA), RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2024 ,p26

تشير هذه البيانات إلى الفجوة الكبيرة بين الإمكانيات الفعلية والاستغلال الفعلي للطاقة الريحية في الجزائر، مما

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

يتطلب اعتماد استراتيجيات وطنية لتحفيز الاستثمار في هذا المجال، بما يضمن تحقيق التنمية المستدامة في المناطق النائية وتعزيز المزيج الطاقوي الوطني.

الفرع الرابع: القدرات الوطنية في مجال الطاقة الشمسية

تُصنّف الجزائر ضمن الدول ذات الإمكانيات الشمسية الأعلى في حوض البحر الأبيض المتوسط، حيث تُقدّر الطاقة الشمسية النظرية المتاحة سنويًا بـ 169,440 تيراواط-ساعة، وهو ما يعادل خمسة آلاف ضعف الاستهلاك الوطني من الكهرباء، ويُقدّر كذلك بما يفوق 60 ضعفًا لحجم الاستهلاك السنوي لدول الاتحاد الأوروبي، المقدّر بنحو 3,000 تيراواط-ساعة في السنة. وبحسب بيانات وزارة الطاقة والمناجم الجزائرية، يُعد المورد الشمسي أكبر مورد من بين مصادر الطاقات المتجددة في البلاد¹، وذلك بالنظر إلى متوسط السطوع الشمسي السنوي الذي يبلغ حوالي 3,000 ساعة، بمعدل يومي يقدر بـ 6.57 كيلوواط-ساعة/متر مربع، ما يمنح الجزائر موقعًا استراتيجيًا فريدًا ضمن خارطة الطاقة الشمسية العالمية، بفضل امتلاكها نحو 86% من مساحة الصحراء الكبرى (جدول رقم 02).

في سياق المقارنة مع مصادر الطاقة التقليدية، تكشف الدراسات أن الإمكانيات الشمسية للجزائر تعادل سنويًا ما يقارب 37,000 مليار متر مكعب من الغاز الطبيعي، أي ما يزيد عن ثمانية أضعاف الاحتياطيات الوطنية المؤكدة من هذه المادة، مع الفارق الجوهري المتمثل في أن الطاقة الشمسية تُعد مصدرًا متجددًا غير قابل للنضوب، على عكس الوقود الأحفوري.²

وفي إطار استثمار هذا المورد الاستراتيجي، أطلقت الشركة الجزائرية لتطوير الطاقات المتجددة "نيو إنرجي ألجيريا (New Energy Algeria - NEAL)" مشروعًا طموحًا لإنشاء محطة هجينة تعتمد على كل من الطاقة الشمسية والغاز، ضمن برنامج وطني شامل يُعنى بتطوير الطاقات المتجددة، لاسيما الشمسية والرياح، حيث تقدّمت الجزائر بطلب تمويل لهذا المشروع من البنك الدولي. ويُعد هذا النموذج من المشاريع الهجينة من بين خمسة مشاريع فقط على المستوى العالمي حظيت باتفاقيات تمويل ميسرة بقيمة 50 مليون دولار أمريكي.

وفي عام 2006، تم الإعلان عن برنامج تكميلي لإنشاء ثلاث محطات طاقة هجينة إضافية، تبلغ القدرة الإنتاجية لكل منها 300 ميغاواط، موزعة على مناطق المغير شرقًا، حاسي الرمل في الوسط، والنعام غربًا. وتُوجّه هذا التوجه بتشغيل أول محطة هجينة في حاسي الرمل سنة يوليو 2011.

¹ سميرة مومن، تمويل مشروعات الطاقة المتجددة لتحقيق التنمية المستدامة دراسة حالة الجزائر، أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه الطور الثالث lmd في العلوم

الاقتصادية، جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي-تبسة الجزائر، 2021-2022، ص 144

² nation Unies, Commission économique pour l'Afrique, Bureau pour l'Afrique du nord, Le secteur des énergies renouvelables en Afrique du nord «situation actuelle et perspectives», publiée par le Bureau pour l'Afrique du nord de la Commission économique des nation Unies pour l'Afrique (CEA-AN), Riad Rabat, Maroc , P18

*اللجنة الاقتصادية لأفريقيا التابعة للأمم المتحدة.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

أما خلال الفترة 2016-2020، فقد تم وضع خطة لتشييد أربع محطات طاقة حرارية بقدرة تخزينية إجمالية تناهز 1,200 ميغاواط، مع برجة إضافة 500 ميغاواط سنوياً حتى عام 2023، ثم 600 ميغاواط سنوياً إلى غاية عام 2030، وهو ما شكّل تحدياً مباشراً للوبيات النفط والغاز في البلاد.¹

الجدول رقم (02): توزيع إشعاع الطاقة الشمسية حسب المناطق الجغرافية في الجزائر

المناطق	الصحراء	الهضاب العليا	المنطقة الساحلية
النسبة من المساحة الكلية(%)	86	10	4
معدل الإشعاع الشمسي (ساعة/سنة)	3500	3000	2650
الطاقة المستخرجة (كيلواط/م ² /سنة)	2650	1900	1700

Source : nation Unies, Commission économique pour l'Afrique, Bureau pour l'Afrique du nord, Le secteur des énergies renouvelables en Afrique du nord «situation actuelle et perspectives», publiée par le Bureau pour l'Afrique du nord de la Commission économique des nation Unies pour l'afrique (CEA-AN), Riad Rabat, Maroc , P18

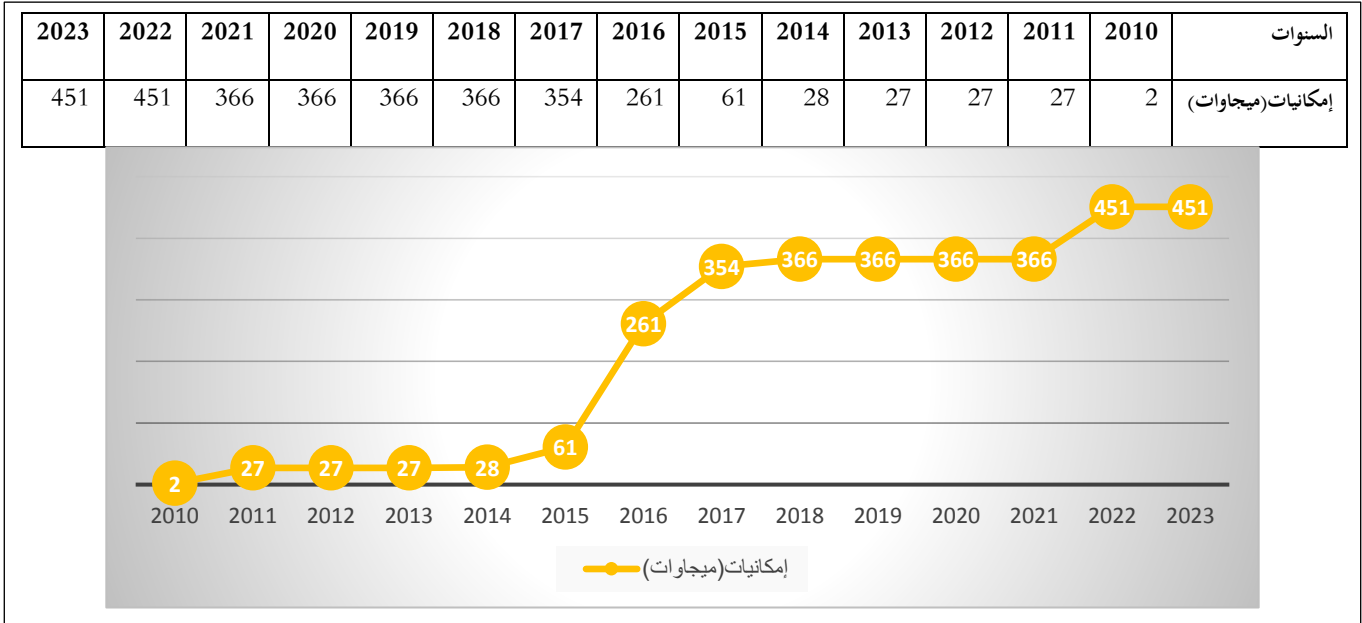
يُظهر الجدول رقم (02) توزيع إشعاع الطاقة الشمسية عبر المناطق الجغرافية الثلاث الرئيسة في البلاد. تتركز النسبة الأكبر من الإمكانيات الشمسية في المنطقة الصحراوية التي تمثل حوالي 86% من إجمالي المساحة الوطنية، بمعدل إشعاع يصل إلى 3500 ساعة سنوياً، وطاقة شمسية متاحة تُقدّر بـ 2650 كيلواط/م²/سنة. أما الهضاب العليا التي تشكل حوالي 10% من المساحة، فتسجل معدل إشعاع سنوي يُقدّر بـ 3000 ساعة وطاقة مستخرجة تبلغ 1900 كيلواط/م²/سنة. في المقابل، تسجل المنطقة الساحلية، رغم أهميتها السكانية والاقتصادية، مستويات أدنى من الإشعاع، حيث يبلغ المعدل السنوي حوالي 2650 ساعة، مع إمكانية توليد 1700 كيلواط/م²/سنة فقط.

تعكس هذه المؤشرات التقنية، لاسيما كثافة الإشعاع الشمسي ومدة سطوع الشمس، مدى توفر الظروف الطبيعية المواتية لتطوير مشاريع الطاقة الشمسية في مختلف أنحاء الجزائر، خصوصاً في المناطق الجنوبية التي تتسم بأعلى معدلات الإشعاع السنوي. وقد شكّل ذلك ركيزة أساسية في الاستراتيجية الوطنية للطاقات المتجددة، والتي تجسدت على أرض الواقع من خلال تصاعد القدرات المركبة لإنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية خلال السنوات الأخيرة. ويوضح الشكل الموالي المراحل الرئيسية لهذا التطور، مسلطاً الضوء على وتيرة نمو المشاريع الشمسية المركبة على المستوى الوطني خلال الفترة الممتدة من سنة 2010 إلى غاية سنة 2023:

الشكل رقم (16): تطور القدرات المركبة للطاقة الشمسية في الجزائر (2010-2023)

¹ توفيق حسني، رضوان مالك، و نزيه زويوش. (2021). الجزائر 100% طاقة متجددة توصيات من أجل استراتيجية وطنية للطاقات المتجددة. مؤسسة فريدريش إيبتر، ص 06.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر



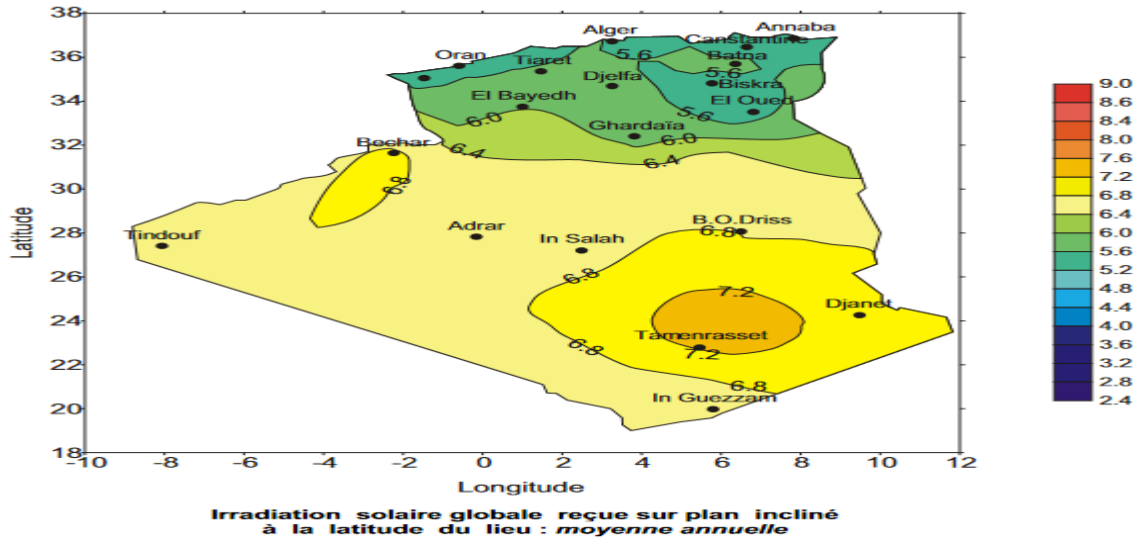
المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على البيانات ، International Renewable Energy Agency (IRENA), RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2024,2016 ,p40

تشير البيانات إلى أن إنتاج الطاقة الشمسية بدأ فعلياً عام 2011 بإطلاق محطة حاسي الرمل بقدرة 27 ميغاواط، واستمر هذا المعدل حتى سنة 2014، التي شهدت تشغيل محطة نموذجية في غرداية، ليرتفع الإنتاج إلى 28 ميغاواط، ثم شهد قفزة نوعية في السنوات اللاحقة، حيث بلغت القدرة المركبة 354 ميغاواط سنة 2017، واستمرت بالثبات إلى حدود 451 ميغاواط بحلول سنة 2023، نتيجة توسع شبكة محطات الطاقة الكهروضوئية في البلاد.

وفي هذا السياق، تبرز أهمية التوزيع الجغرافي للإشعاع الشمسي في الجزائر، والذي يمثل عاملاً حاسماً في توجيه الاستثمارات ومشاريع الطاقة المتجددة نحو المناطق ذات الكفاءة الطاقوية العالية. وتُظهر البيانات المناخية المسجلة عبر مختلف الولايات الجزائرية تبايناً ملحوظاً في المتوسط السنوي لشدة الإشعاع الشمسي اليومي، مما يؤكد التميز الإشعاعي للمناطق الصحراوية مقارنة بالمناطق الساحلية أو الداخلية. ويُعد هذا التباين من بين المؤشرات الأساسية المعتمدة في التخطيط لاستغلال الطاقة الشمسية، سواء في محطات كهروضوئية أو حرارية. ويوضح الشكل التالي التوزيع الجغرافي لمتوسط الإشعاع الشمسي اليومي على المستوى الوطني، بينما يقدم الجدول الموازي المعطيات الرقمية التفصيلية لهذا التوزيع حسب الولايات:

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (17): المتوسط السنوي لشدة الاشعاع الشمسي اليومي في مختلف مناطق الوطن



SOURCE : M, Y, bouroubi; H, Mimouni A.Mefti (chef de projet Gisement Solaire), Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des énergies renouvelables, CDER, N2, Décembre 2002, P12.

الجدول رقم (03) المتوسط السنوي لشدة الاشعاع الشمسي اليومي في مختلف مناطق الوطن

الإشعاع (كيلوواط/م ² /يوم)	الولاية	الإشعاع (كيلوواط/م ² /يوم)	الولاية
5,6	البيض	6,8	الوادي
5,6	وهران	6,8	بشار
5,6	الجزائر	7,2	تندوف
6	عنابة	7,2	أدرار
6,4	قسنطينة	9	عين صالح
6	تيارت	8,6	برج عمر إدريس
6,4	الجلوفة	8,4	جانت
6,8	بسكرة	8	تمنراست
6,8	باتنة	7,6	إن قزام
6,8	غرداية		

المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على مخرجات خريطة شكل رقم (17)

يتبين من خلال هذه المعطيات أن ولايات الجنوب الجزائري، لاسيما أدرار، تندوف، برج عمر إدريس، جانت، وتمنراست، تسجل أعلى معدلات للإشعاع الشمسي اليومي، حيث تتراوح القيم ما بين 7,2 و 9 كيلوواط-ساعة/م²/يوم، ما يجعلها من بين أكثر المناطق إشعاعاً على المستوى القاري. وبالمقابل، تسجل ولايات الشمال كالعاصمة، وهران، والبيض معدلات أدنى، تتراوح بين 5,6 و 6,0 كيلوواط-ساعة/م²/يوم. ويشكل هذا التفاوت المكاني في الإمكانيات الشمسية

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

أساسًا علميًا لاتخاذ قرارات استراتيجية تتعلق بتموقع المشاريع الكبرى لإنتاج الكهرباء من الطاقة الشمسية، حيث يتم التركيز على الولايات ذات الإشعاع المرتفع لتثبيت المحطات الصناعية الكبرى، بينما تُخصص المناطق الأقل إشعاعًا لتطبيقات محلية أو هجينة ذات طابع تكميلي. ويعزز هذا التوجه من مردودية المشاريع ويحقق أعلى درجات النجاعة الاقتصادية والطاقوية ضمن الرؤية الوطنية للانتقال الطاقوي.

الفرع الخامس: القدرات الوطنية في مجال الطاقة الهيدروجين الأخضر

في إطار توجه الجزائر نحو التحول الطاقوي المستدام، تبرز إمكانات البلاد الواعدة في إنتاج الهيدروجين الأخضر، بالاعتماد على مصادرها الطبيعية الغنية، وفي مقدمتها الطاقة الشمسية. وتُعد الجزائر من بين الدول التي تتمتع بميزة تنافسية في هذا المجال، نظرًا لموقعها الجغرافي الفريد، الذي يتيح لها استغلال مستويات مرتفعة من الإشعاع الشمسي في المناطق الصحراوية والجنوبية، وكذلك في بعض المناطق الساحلية.

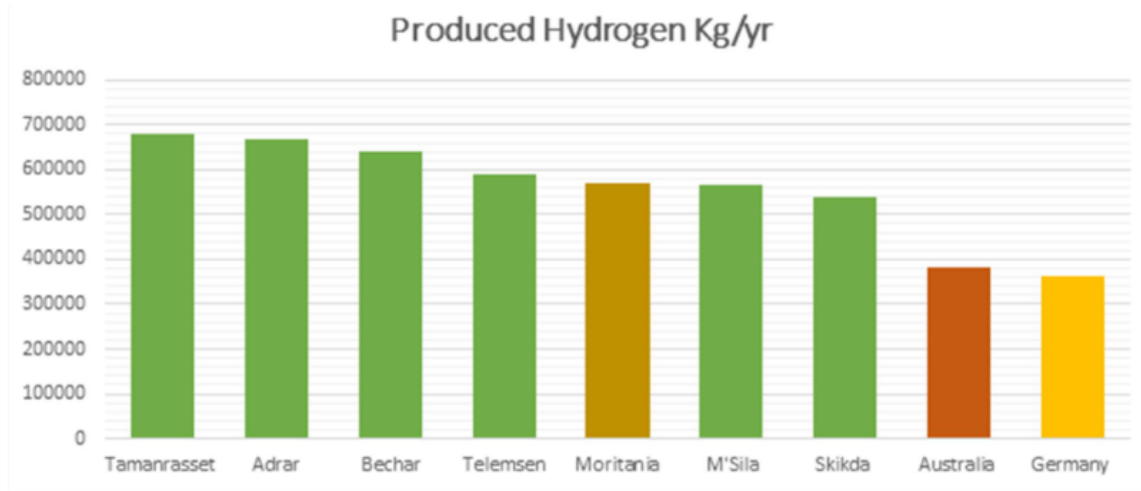
وتُظهر المعطيات الواردة في الشكل رقم (18) أن ولاية تمنراست تُصنّف ضمن أكثر المناطق كفاءة على الصعيد العالمي لإنتاج الهيدروجين الأخضر من حيث القدرة الإنتاجية والتكلفة، إذ يُقدّر إنتاجها السنوي بنحو 679 طنًا، تليها ولاية أدرار بـ 668 طنًا، في حين تسجل ولاية سكيكدة، رغم موقعها الساحلي وقلة الإشعاع النسبي مقارنة بالجنوب، إنتاجًا سنويًا يُقدّر بـ 539 طنًا. وتكتسي هذه الأرقام دلالة استراتيجية، إذ إنها تفوق القدرات الإنتاجية المسجلة في عدد من الدول المتقدمة في هذا القطاع، على غرار ألمانيا بـ 361 طنًا وأستراليا بـ 382 طنًا، كما تُقارب إنتاج موريتانيا الذي يبلغ 571 طنًا سنويًا.

وتؤكد هذه المعطيات على أن الجزائر ليست فقط مرشحة للعب دور ريادي إقليمي في إنتاج الهيدروجين الأخضر، بل إنها قادرة كذلك على المنافسة على الصعيد الدولي، شرط تسريع وتيرة الاستثمارات وتفعيل الإطار المؤسسي والتقني الملائم لهذا التوجه الطاقوي الجديد.¹

¹ Yacine Benchenina, Abderrahim Zemmit, Mohammed Moustafa Bouzaki, Abdelouadoud Loukriz, Salah K. Elsayed, Ali Alzaed, Guma Ali & Sherif S. M. Ghoneim, Advancing green hydrogen production in Algeria with opportunities and challenges for future directions, Scientific Reports 15, Article number: 5559 (2025), p10

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

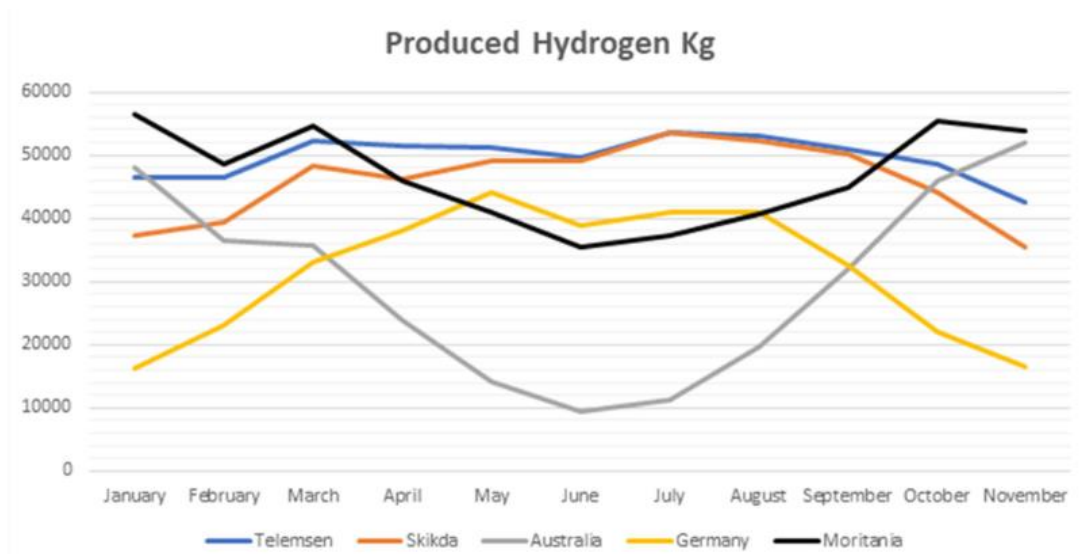
الشكل رقم (18): مقارنة إنتاج الهيدروجين في مواقع مختلفة حول العالم



source :Yacine Benchenina, Abderrahim Zemmit, Mohammed Moustafa Bouzaki, Abdelouadoud Loukriz, Salah K. Elsayed, Ali Alzaed, Guma Ali & Sherif S. M. Ghoneim, Advancing green hydrogen production in Algeria with opportunities and challenges for future directions, Scientific Reports 15, Article number: 5559 (2025),p10

استمرارًا في إبراز الأهمية الاستراتيجية التي تكتسيها قدرات الجزائر في إنتاج الهيدروجين الأخضر، تأتي مقارنة المعطيات الدولية لتوفر منظورًا تكامليًا أكثر عمقًا للسياق التنافسي العالمي، وهو ما يوضحه الشكل رقم (19) الذي يعرض تطور إنتاج الهيدروجين (بالكيلوغرام) عبر أشهر السنة في مواقع مختلفة، تشمل ولايتي تمنراست وسكيكدة في الجزائر، بالإضافة إلى كل من ألمانيا، أستراليا، وموريتانيا. يُظهر هذا الشكل تباينات واضحة في مستويات الإنتاج على مدار السنة، وهو ما يعكس التفاوت في وفرة مصادر الطاقة المتجددة، لا سيما الشمسية، وكذلك في البنى التحتية والاستثمارات المتوفرة في كل منطقة.

الشكل رقم (19): مقارنة إنتاج الهيدروجين في مواقع مختلفة حول العالم



Source :Yacine Benchenina, Abderrahim Zemmit, Mohammed Moustafa Bouzaki, Abdelouadoud Loukriz, Salah K. Elsayed, Ali Alzaed, Guma Ali & Sherif S. M. Ghoneim, Advancing green hydrogen production in Algeria with

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

opportunities and challenges for future directions, Scientific Reports 15, Article number: 5559 (2025),p11
<https://doi.org/10.1038/s41598-025-90336-1>

➤ تحديات الطاقة الهيدروجينية في الجزائر¹:

رغم الإمكانيات التقنية والموارد الطبيعية الهائلة التي تزخر بها الجزائر في مجال إنتاج الهيدروجين الأخضر، إلا أن مسار تطوير هذا القطاع الاستراتيجي لا يخلو من تحديات بنيوية معقدة، يقتضي التعاطي معها ضمن رؤية متكاملة ومستدامة. ومن بين أبرز هذه التحديات مسألة تحقيق التوازن بين توافر الإشعاع الشمسي المكثف في المناطق الجنوبية، التي تُعد الأنسب لإنتاج الطاقات المتجددة، ووفرة الموارد المائية في المناطق الشمالية، ما يفرض ضرورة التنسيق الفعال بين الأقاليم وتطوير شبكات البنية التحتية لنقل الموارد وضمان توزيعها العادل.

وتُطرح في هذا السياق إشكالية استخدام المياه العذبة في عمليات التحليل الكهربائي، ما قد يشكل ضغطاً إضافياً على منظومة الموارد المائية، خاصة في ظل التغيرات المناخية والتحديات البيئية المرتبطة بها. غير أن هذه العقبة يمكن تجاوزها عبر توظيف حلول تكنولوجية مبتكرة، على غرار اعتماد تقنيات متقدمة لمعالجة المياه المستعملة وإعادة تدويرها، فضلاً عن تعزيز قدرات تحلية مياه البحر واستخدامها في إنتاج الهيدروجين، وهو ما من شأنه أن يساهم في تقليص الأثر البيئي وضمان استدامة المنظومة المائية، دون المساس باحتياجات السكان أو القطاعات الحيوية الأخرى.

في هذا الإطار، يصبح من الضروري إرساء استراتيجية وطنية متعددة الأبعاد، تأخذ في الحسبان خصوصيات التوزيع الجغرافي للموارد الطبيعية، وتُشجّع على البحث العلمي والابتكار التقني، بما يضمن تحقيق انتقال طاقي فعال يحترم مبادئ التنمية المستدامة ويُعزز السيادة الطاقوية للجزائر.

الفرع السادس: قدرات الجزائر في مجال الطاقة الحرارية الأرضية

انطلقت أولى المبادرات لاستكشاف موارد الطاقة الحرارية الأرضية (الجيوحرارية) في الجزائر منذ سنة 1967، تحت إشراف شركة سوناطراك، ضمن إطار البحث عن بدائل طاقيّة مستدامة. وقد شهد هذا المجال تطوراً مهماً في بداية الثمانينيات، حين باشرت شركة سونلغاز، بالتعاون مع شركة ENEL الإيطالية، تنفيذ دراسات علمية بهدف تحديد مواقع الموارد الجيوحرارية في الشمال والشرق الجزائري. ومع مطلع سنة 1983، تولى مركز تطوير الطاقات المتجددة (CDER) مهمة توسيع هذا البرنامج ليشمل المناطق الشمالية كافة، عبر إجراء بحوث ميدانية وجيولوجية دقيقة. ورغم هذا الجهد

¹ سولارابيك، الجزائر على أعتاب ريادة علمية في إنتاج الهيدروجين الأخضر، متوفر على الموقع الإلكتروني:

<https://solarabic.com/%D8%A3%D8%AE%D8%A8%D8%A7%D8%B1-%D8%A7%D9%84%D8%B7%D8%A7%D9%82%D8%A9-%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%AA%D8%AC%D8%AF%D8%AF%D8%A9/2025/02/%D8%A7%D9%84%D8%AC%D8%B2%D8%A7%D8%A6%D8%B1-%D8%B9%D9%84%D9%89-%D8%A3%D8%B9%D8%AA%D8%A7%D8%A8-%D8%B1%D9%8A%D8%A7%D8%AF%D8%A9-%D8%B9%D8%A7%D9%84%D9%85%D9%8A%D8%A9-%D9%81%D9%8A-%D8%A5%D9%86%D8%AA%D8%A7>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

العلمي، فقد أثّرت الأسعار المنخفضة لمصادر الطاقة التقليدية، وعلى رأسها الغاز الطبيعي، سلباً على وتيرة تطور هذا النمط الطاقوي في البلاد، ما أسهم في تباطؤ الاستثمارات والاهتمام المؤسسي به¹.

وقد مكّن تجميع وتحليل المعطيات الجيولوجية، الجيوكيميائية والجيوفيزيائية من إعداد خريطة أولية لمصادر الطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر، كشفت عن وجود أكثر من 200 منبع حراري موزعة في مختلف المناطق الشمالية من البلاد. وتشير البيانات إلى أن قرابة 33% من هذه الينابيع تتجاوز درجات حرارتها 45 درجة مئوية، ما يجعلها قابلة للاستغلال في استخدامات متعددة. وتُعتبر منطقة بسكرة من بين أبرز المناطق من حيث شدة الحرارة الجوفية، حيث تصل درجات حرارة بعض ينابيعها إلى 118 درجة مئوية، مما يعكس وجود خزانات حرارية ذات مردودية عالية. وتُلاحظ هذه التدفقات المائية غالباً نتيجة تسربات من تلك الخزانات الجوفية، حيث يتجاوز معدل تدفق بعض الينابيع 2 متر مكعب في الثانية، غير أن هذه الكميات لا تمثل سوى نسبة ضئيلة من الإمكانيات الحرارية الكامنة في باطن الأرض.

ويُبرز الشكل رقم (20)، المستند إلى معطيات الأطلس الوطني لموارد الطاقات المتجددة لسنة 2019، التوزيع الجغرافي للمصادر الحرارية الجوفية في الجزائر. وتدل النقاط الحمراء الظاهرة على الخريطة على تموضع الينابيع الحرارية الرئيسية، مما يتيح تصوراً أولياً لحجم الإمكانيات غير المستغلة. ووفقاً لتقارير محافظة الطاقات المتجددة والفعالية الطاقوية، فإن الجزائر تحتوي على أكثر من 240 منبعاً حرارياً موزعاً على مناطق مختلفة، الأمر الذي يرسّخ موقعها كدولة تمتلك موارد معتبرة في هذا المجال. ويُعد منبع حمام دباغ بولاية قالمة من أبرز هذه الموارد، حيث تبلغ حرارة مياهه عند نقطة التدفق حوالي 98 درجة مئوية، مما يجعله من بين أعلى الينابيع الحرارية عالمياً.²

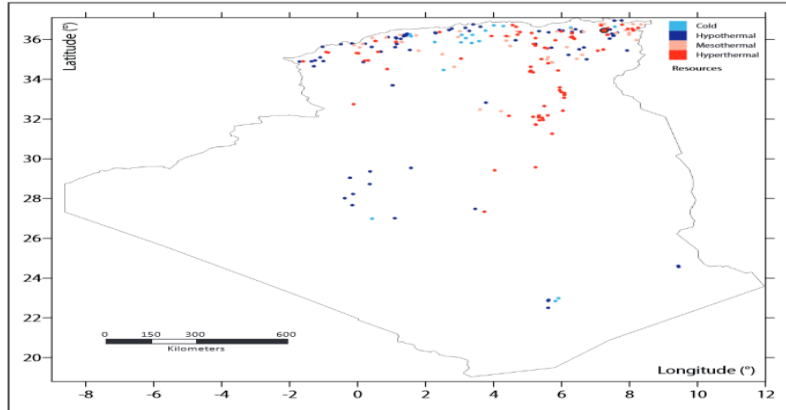
وتُبرز هذه المعطيات العلمية والتقنية أهمية الطاقة الحرارية الأرضية باعتبارها مورداً واعداً في سياق تنويع المزيج الطاقوي الوطني وتعزيز الاستقلالية الطاقوية. وتفتح هذه الإمكانيات آفاقاً واسعة لتوظيف هذا المورد في عدد من التطبيقات الاقتصادية والاستراتيجية، مثل إنتاج الكهرباء في المناطق ذات النشاط الحراري المرتفع، وتوفير التدفئة للمنشآت السياحية والفندقية، فضلاً عن استعمالها في تدفئة البيوت البلاستيكية الزراعية، مما يسهم في دعم التنمية الفلاحية واستقرار الإنتاج الزراعي، لا سيما خلال الفترات المناخية الباردة. وعليه، فإن الطاقة الحرارية الأرضية تمثل أحد البدائل الطاقوية ذات الأبعاد التنموية والبيئية التي يُمكن أن تلعب دوراً محورياً في تحقيق الانتقال الطاقوي المستدام في الجزائر.

¹ H. Saibi, Geothermal Resources in Algeria, Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015, p: 01.

² Salima OUALI - Khedidja BOUZIDI - Khaled IMESSAD - Abdelkader AIT-OUALI ,Algerian Renewable Energy Resource Atlas, Centre De Développement Des Energies Renouvelables, CDER, , Edition 2019, p :38.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (20) خريطة موارد الطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر.



Source : Salima OUALI - Khedidja BOUZIDI - Khaled IMESSAD - Abdelkader AIT-OUALI , Algerian Renewable Energy Resource Atlas, Centre De Développement Des Energies Renouvelables, CDER, , Edition 2019, p :38.

أما في المناطق الجنوبية من الجزائر، فتُعد التكوينات الصخرية القارية خزانات حرارية جوفية ذات امتداد واسع، تغطي مساحات شاسعة تُقدَّر بآلاف الكيلومترات المربعة. ويُشار إلى هذا الخزان في الأدبيات العلمية بمصطلح "المنصة الألبية" (Albian Platform)، ويُستغل حاليًا عبر تقنيات الحفر العميق، حيث يتم استخراج مياه حرارية بدرجات حرارة متوسطة تصل إلى حوالي 57 درجة مئوية، وبمعدل تدفق يفوق 4 أمتار مكعبة في الثانية. وتُعكس هذه المؤشرات حجم الإمكانات الحرارية الجوفية المتوفرة في الجزائر، والتي لا تزال إلى حد كبير غير مُستثمرة بالشكل الكافي، ما يفتح آفاقًا واعدة أمام استراتيجيات تنمية مستقبلية قائمة على توسيع استخدام هذا المورد الطاقوي البديل.¹

الشكل رقم(21): المناطق الجيوحرارية الرئيسية في الجزائر



source : Kamel Abdeladim, Salim Bouchakou, Hadj Arab, Renewable Energies Algeria : Current Situation and Perspectives, Conference Paper, 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, Nederland, September 2014,p4121

يوضح الشكل رقم (21) الخريطة الجغرافية الأساسية لتوزيع المناطق ذات الإمكانات الحرارية الأرضية في الجزائر

¹ Kamel Abdeladim, Salim Bouchakou, Hadj Arab, Renewable Energies Algeria : Current Situation and Perspectives, Conference Paper, 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, Nederland, September 2014,p4120

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

وبعض المناطق المجاورة. وتُبين هذه الخريطة تموضع المناطق ذات النشاط الحراري الأرضي المرتفع، والتي تُميزها التدرجات اللونية الداكنة، خاصة في المناطق الواقعة بالهضاب العليا وعمق الصحراء الكبرى. كما تُبرز حدود مناطق الانزلاق والتراكب الجيولوجي (Overthrust Front)، بالإضافة إلى التكوينات الطباشيرية السطحية المعروفة بـ "الطبقة الألبية (Albian)" (Outcrops)، مما يسمح برسم صورة طبوغرافية وجيولوجية دقيقة لمواقع الخزانات الحرارية الجوفية. وتُحدد الخريطة كذلك مواقع عدد من المدن الكبرى مثل الجزائر العاصمة، عنابة، ورقلة، وتيمون، بما يُسهّل تقييم مدى قرب هذه الموارد من مراكز الاستهلاك الحضري. ويكتسي هذا التوزيع المكاني أهمية استراتيجية في سياق البحث عن بدائل طاقوية مستدامة، خصوصاً في ظل تصاعد الاهتمام الوطني والعالمي بالطاقات المتجددة.

وفيما يتعلق بالاستخدامات الممكنة للمياه الحارة المستخرجة من الحوض الألي، تُبين البيانات الواردة في الجدول أدناه الإمكانيات المتاحة بحسب درجة حرارة المياه:

جدول رقم (04): استعمال المياه الحارة لحوض الماء الألي

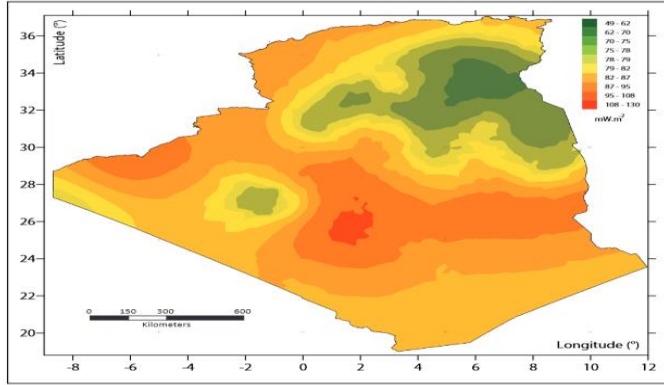
درجة حرارة الماء (درجة مئوية)	إمكانيات الاستعمال
70	تبريد (حد أدنى)
60	تربية حيوانات مائية
50	زراعة الفطريات
40	تدفئة حضرية (حد أدنى)
30	تخمير
20	تربية الأسماك

المصدر: محمد مداحي، فعالية الاستثمار في الطاقات المتجددة في ظل التوجه الحديث للاقتصاد الأخضر، التوجه الجزائري على ضوء بعض التجارب الدولية، أطروحة مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم الاقتصادية، جامعة يحي فارس بالمدينة، 2015-2016، ص 201

وتجدر الإشارة إلى أن تدفق الحرارة الجوفية يُعد مؤشراً حاسماً لنشاط الأرض الداخلي، حيث يُقدّر متوسط التدفق الحراري في المناطق الجنوبية للبلاد بحوالي 100 ميلي واط/م²، بينما لا يتجاوز 90 ميلي واط/م² في المناطق الشمالية، كما هو موضح في الشكل أدناه. وتُعتبر هذه القيم من العوامل الجيولوجية الأساسية في تقييم الجدوى التقنية والاقتصادية لاستغلال الطاقة الحرارية الأرضية في الجزائر.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

شكل رقم (22): خريطة التدفق الجيوحراري في الجزائر



Source : Salima OUALI - Khedidja BOUZIDI - Khaled IMESSAD - Abdelkader AIT-OUALI , Algerian Renewable Energy Resource Atlas, Centre De Développement Des Energies Renouvelables, CDER, , Edition 2019, p :36.

الفرع السابع: قدرات الجزائر من طاقة الكتلة الحيوية

تُعد طاقة الكتلة الحيوية من الموارد المتجددة ذات الإمكانيات الواعدة في الجزائر، حيث تُقدّر الطاقة المتوفرة منها بحوالي 37 مليون طن مكافئ نفط (toe) ، يستمد أغلبها من الغطاء الغابي، مع معدل استرجاع لا يتجاوز 10%. كما تنتج البلاد سنوياً ما يقارب 5 ملايين طن من النفايات الحضرية والزراعية، أي ما يُعادل 365 كيلوغراماً من النفايات الحضرية للفرد الواحد. ويُترجم هذا الحجم إلى إمكانيات طاقتية تناهز 1.33 مليون طن مكافئ نفط سنوياً، إلا أن هذا المورد الحيوي لا يزال يشهد ضعفاً في الاستغلال ولم يُدمج بعد بالشكل الكافي ضمن السياسات الطاقوية الوطنية، بما يحقق الجدوى الاقتصادية والبيئية المرجوة.

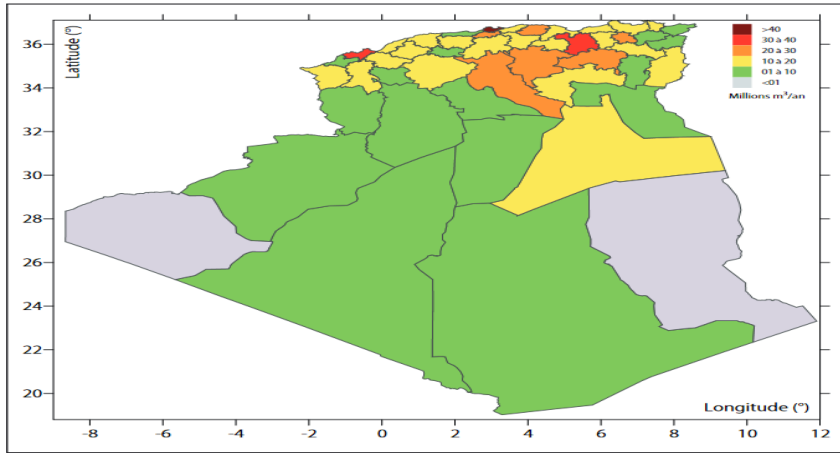
وفي هذا الإطار، يبرز خيار تجميع النفايات العضوية، ولا سيما النفايات الحيوانية، من خلال إنتاج الغاز الحيوي (البيوغاز) كحل عملي وفعال. ويتميز هذا الخيار بكونه لا مركزياً، مما يتيح إمكانية تعزيز الاستقلالية الطاقوية للتجمعات الريفية، مع ما يترتب عن ذلك من مساهمة في تحقيق التنمية المستدامة في المناطق النائية، عبر توفير مصادر طاقة نظيفة ومنخفضة الانبعاثات، تتماشى مع مبادئ الاقتصاد الدائري¹.

وفي سياق توضيح الإمكانيات الجغرافية المتاحة، يُبين الشكل رقم (23) توزيع الموارد الحيوية على مستوى التراب الوطني، حيث يوضح التباين الإقليمي في توفر الطاقة الحيوية، والمقدّرة بوحدة "مليون م³/سنة". وتُظهر الخريطة أن أعلى الإمكانيات متركزة في المناطق الشمالية، لاسيما في الولايات ذات الكثافة السكانية والنشاط الزراعي المكثف، والتي تتراوح إمكانياتها بين 40 إلى أكثر من 60 مليون م³/سنة، كما هو موضح بالألوان الأحمر والبرتقالي. في المقابل، تسجّل الولايات الجنوبية إمكانيات منخفضة إلى معدومة، نتيجة ضعف النشاط الزراعي وقلة الكثافة السكانية، وهو ما توضحه المساحات الرمادية في الخريطة

¹ Kamel Abdeladim, Salim Bouchakou, Hadj Arab, Renewable Energies Algeria : Current Situation and Perspectives, Conference Paper, 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, Nederland, September 2014,p4121

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (23): الإمكانيات المتوفرة في الجزائر في مجال الطاقة الحيوية



Source : Salima OUALI - Khedidja BOUZIDI - Khaled IMESSAD - Abdelkader AIT-OUALI , Algerian Renewable Energy Resource Atlas, Centre De Développement Des Energies Renouvelables, CDER, , Edition 2019, p :45.

➤ إنتاج الكهرباء من النفايات المنزلية:

يمثل إنتاج الكهرباء انطلاقاً من الغاز الحيوي الناتج عن النفايات المنزلية أحد المسارات الرئيسية لشمين هذا المورد ضمن رؤية شاملة للتحويل الطاقوي. وتُشير محافظة الطاقات المتجددة والفعالية الطاقوية إلى أن التقييمات التقنية والطاقوية المنجزة تسمح بتقدير كميات معتبرة من الكهرباء التي يمكن توليدها من النفايات الحضرية، ما يفتح المجال لدمج هذا المصدر ضمن المزيج الطاقوي الوطني بشكل فعال ومستدام.

وتُبرز المحافظة أن من بين الخصائص الجغرافية المميزة للطاقة الحيوية في الجزائر هو تركزها بكميات كبيرة في مناطق شمال البلاد، مما يمنحها دوراً تكميلياً محورياً لمصادر الطاقة الشمسية، التي تتسم بإنتاجية أقل نسبياً في هذه المناطق مقارنة بالجنوب الجزائري. ومن هذا المنظور، يتيح الدمج بين الطاقة الحيوية والطاقة الشمسية في شكل حلول هجينة إمكانية تحسين موثوقية واستقرار الإمدادات الطاقوية، خاصة في القطاعات التي تتطلب استمرارية عالية في التزويد بالطاقة.

وقد أوصت محافظة الطاقات المتجددة بضرورة إدراج التثمين الطاقوي للنفايات ضمن الاستراتيجية الوطنية للطاقة المتجددة، ليس فقط كمصدر للكهرباء، بل أيضاً كحل متعدد الاستخدامات يمكن توظيفه في التدفئة، وفي الصناعات الثقيلة (كصناعة الأسمنت) أو كوقود نظيف لقطاع النقل. كما أكدت على القيمة المضافة للمخلفات المتبقية من عمليات التثمين، التي يمكن تحويلها إلى أسمدة عضوية تُعزز الإنتاجية الزراعية وتدعم التحويل نحو نموذج اقتصاد دائري. وتُعتمد الطاقة الحيوية في هذا السياق على تحويل الكتلة الحيوية أو النفايات إلى طاقة مفيدة (حرارية، كهربائية، أو وقود)، وذلك من خلال أربعة مسارات تقنية رئيسية: التحويل الحراري، التحويل الكيميائي الحراري، التحويل الكيميائي، والتحويل البيوكيميائي¹.

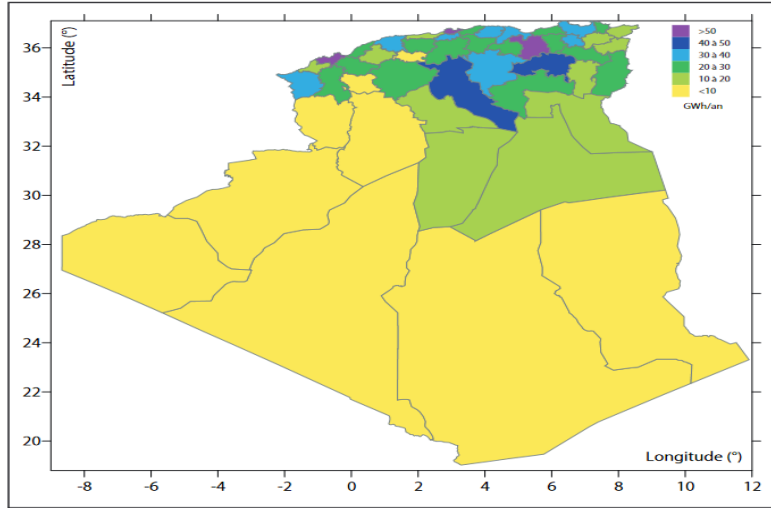
¹ وكالة الأنباء الجزائرية، الامكانيات الوطنية في مجال الطاقة الحيوية تتجاوز 500.000 طن معادل بترول،، متوفر على:

<https://www.aps.dz/ar/economie/100812-500-000>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

ويبرز الشكل البياني التالي الإمكانيات التقديرية لإنتاج الكهرباء اعتمادًا على الطاقة الحيوية، مما يعكس الأهمية الاستراتيجية لهذا المورد في دعم أمن الطاقة وتعزيز الاستدامة البيئية في الجزائر.

الشكل رقم (24): إمكانيات التقديرية لإنتاج الكهرباء



Source : Salima OUALI - Khedidja BOUZIDI - Khaled IMESSAD - Abdelkader AIT-OUALI , Algerian Renewable Energy Resource Atlas, Centre De Développement Des Energies Renouvelables, CDER, , Edition 2019, p :45.

المبحث الثالث: خارطة الطريق نحو الطاقات المتجددة في الجزائر آفاق 2030

في ظل التحولات العميقة التي يشهدها المشهد الطاقوي العالمي، بات من الضروري على الدول، ولا سيما تلك ذات الاقتصاد الريعي، أن تبني استراتيجيات طويلة الأمد للتحويل نحو مصادر طاقة مستدامة. وتندرج الجزائر ضمن هذه الدول التي تواجه تحديات مزدوجة: استنزاف الموارد الأحفورية من جهة، والحاجة إلى تأمين الطلب المحلي المتزايد على الطاقة من جهة أخرى. لذا، فإن إعداد خارطة طريق وطنية لتطوير الطاقات المتجددة يُعدّ خيارًا استراتيجيًا لا محيد عنه، خاصة في أفق 2030 الذي حُدد كسقف زمني لتحقيق أهداف وطنية طموحة في هذا المجال.

المطلب الأول: آفاق إنتاج واستهلاك الطاقات المتجددة في الجزائر

إن فهم مستقبل الطاقات المتجددة في الجزائر يستلزم تحليلًا مزدوجًا لمستويات الإنتاج المتوقعة وكذا أنماط الاستهلاك المحلي للطاقة. إذ لا يمكن رسم مسار فعال نحو الانتقال الطاقوي دون تقييم شامل لقدرات البلاد الإنتاجية، وتحديد ديناميكيات الطلب الطاقوي الداخلي. ويُشكل هذا المطلب محاولة لاستشراف الآفاق المستقبلية للطاقة المتجددة من خلال قراءة في المؤشرات الكمية والنوعية المسجلة خلال العقد الماضي، واستنتاج التوجهات العامة التي قد تحكم تطورها خلال السنوات القادمة.

الفرع الأول: إنتاج الطاقات المتجددة في الجزائر

أولاً: كميات إنتاج الطاقات المتجددة في الجزائر

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

عرفت الجزائر خلال العقد الأخير نمواً متذبذباً في إنتاج الطاقات المتجددة، يعكس من جهة الإرادة السياسية لتطوير هذا القطاع، ومن جهة أخرى التحديات المؤسساتية والهيكلية التي تعترض تجسيد الأهداف المعلنة. ووفقاً لبيانات الوكالة الدولية للطاقات المتجددة (IRENA)، فقد ارتفع إنتاج الجزائر من الكهرباء المتجددة من 393 جيغاوات ساعة سنة 2014 إلى 867 جيغاوات ساعة سنة 2022، مع تسجيل فترات تباطؤ في بعض السنوات، ما يستدعي تحليلاً دقيقاً للمعوقات والفرص الكامنة وراء هذه الأرقام، قصد تحسين الأداء في المستقبل.

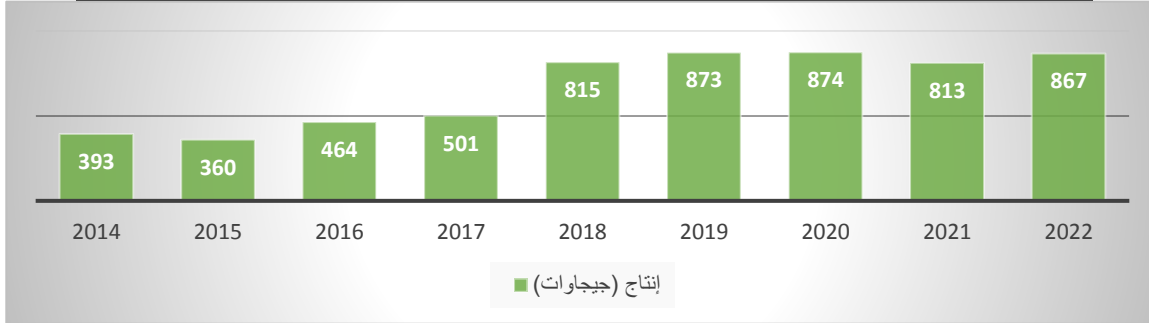
فخلال الفترة الممتدة بين 2014 و2022، عرفت كميات الإنتاج تذبذباً واضحاً يعكس غياب نسق تصاعدي مستقر. فعلى الرغم من الانخفاض المسجل سنة 2015 بنسبة تقارب 8.4% مقارنة بالسنة السابقة، إلا أن الفترة الموالية شهدت انتعاشاً تدريجياً بلغ ذروته سنة 2018، حيث حقق الإنتاج قفزة نوعية بنسبة تفوق 60% مقارنة بسنة 2017، ليصل إلى 815 جيغاوات ساعة. ويُعزى هذا الارتفاع الكبير إلى دخول مجموعة من المحطات الشمسية الجديدة الخدمة، خصوصاً في مناطق الجنوب ذات الإشعاع الشمسي المرتفع، في إطار البرنامج الوطني لتنمية الطاقات المتجددة. غير أن هذا الزخم لم يدم طويلاً، إذ سجل الإنتاج خلال سنتي 2020 و2021 حالة من الجمود والانكماش، حيث بلغ الإنتاج 874 و813 جيغاوات ساعة على التوالي، ما يعكس تأثير جملة من العوامل المعيقة، من بينها التعقيدات الإدارية المتعلقة بمنح التراخيص، ونقص التمويل، وتأثيرات جائحة كوفيد-19 التي تسببت في تأجيل العديد من المشاريع الطاقوية على المستوى الوطني. ورغم عودة المنحنى للارتفاع مجدداً سنة 2022، فإن حجم النمو ظل محدوداً، ما يثير تساؤلات جدية حول فعالية الآليات التنفيذية المعتمدة.

إن التحليل الكمي لتطور الإنتاج يُظهر أن الجزائر لم تبلغ بعد مرحلة النضج المؤسسي والتقني الضروريين لضمان نمو مستدام لهذا القطاع الحيوي. وعليه، فإن ترسيخ استراتيجية طاقوية قائمة على رؤية واضحة، وإصلاح بيئة الأعمال المرتبطة بالطاقات المتجددة، إلى جانب إشراك القطاع الخاص وتعزيز الشراكات الدولية، يُعدّ شرطاً أساسياً لتجاوز حالة التذبذب وتحقيق الأهداف المعلنة لأفق 2030.

الشكل رقم (25): تطور إنتاج الطاقات المتجددة في الجزائر (2014-2022)

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

السنوات	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	2015	2014
إنتاج (جيجاوات)	867	813	874	873	815	501	464	360	393
التغير السنوي (GWh)	+54	-61	+1	+58	+314	+37	+104	-33	-
نسبة التغير (%)	+6.6	-7.0	+0.1	+7.1	+62.7	+8.0	+28.9	-8.4	-



المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على البيانات، RENEWABLE، International Renewable Energy Agency (IRENA), ENERGY STATISTICS 2024, p06

ثانيًا: الكميات المنتجة من الطاقة الكهرومائية في الجزائر

رغم ما تتمتع به الجزائر من شبكة سدود ومجاري مائية قابلة للتوظيف في إنتاج الطاقة الكهرومائية، إلا أن مساهمة هذا المصدر الطاقوي في المزيج الوطني للطاقة المتجددة ظلت محدودة وغير مستقرة خلال السنوات الأخيرة. فقد كشفت بيانات الوكالة الدولية للطاقات المتجددة (IRENA) عن تراجع لاف في كميات الكهرباء المنتجة من الطاقة الكهرومائية، حيث انخفضت من 193 جيجاوات ساعة سنة 2014 إلى 16 جيجاوات ساعة فقط سنة 2022، بنسبة انخفاض إجمالية تقارب 91.7%، ما يطرح إشكالات جوهرية حول فعالية استغلال هذا المورد الطبيعي.

وقد شهد الإنتاج خلال هذه الفترة تقلبات حادة، إذ انتقل من 193 جيجاوات ساعة سنة 2014 إلى 145 جيجاوات سنة 2015، ليواصل تراجعته تدريجيًا إلى 72 جيجاوات في 2016 و 56 جيجاوات في 2017. ورغم تسجيل انتعاشة نسبية سنة 2018 (117 جيجاوات) و 2019 (152 جيجاوات)، إلا أن هذا التوجه لم يستمر، حيث سجلت السنوات الموالية انهيارًا شبه كلي في مستويات الإنتاج، إذ لم تتجاوز الكمية المنتجة 9 جيجاوات سنة 2021، لترتفع قليلًا إلى 16 جيجاوات في 2022.

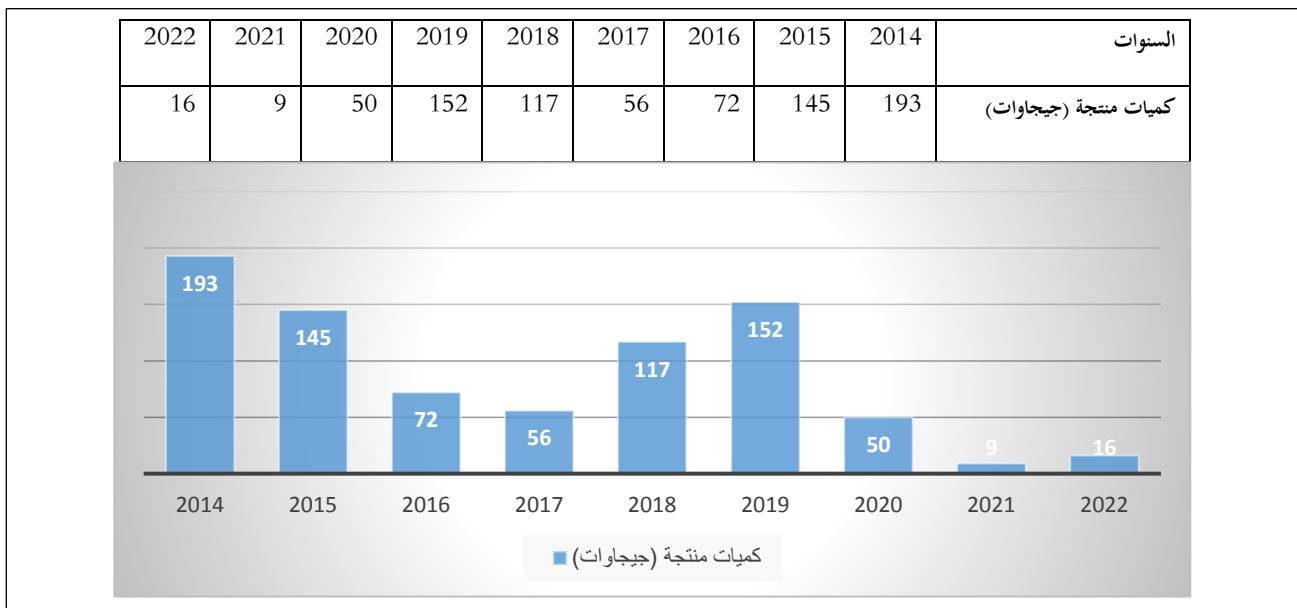
تُفسر هذه التذبذبات بعوامل متعددة، يأتي في مقدمتها الاعتماد الكبير على الظروف المناخية وتقلبات التساقطات المطرية، مما يؤثر مباشرة على منسوب المياه في السدود، وبالتالي على قدرة التوربينات الكهرومائية على التشغيل. كما أن غياب برامج استثمارية حديثة لتأهيل المحطات القديمة أو بناء منشآت جديدة ساهم في تعميق هذا التراجع، بالإضافة إلى

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

توجه السلطات العمومية نحو مصادر أخرى أكثر استقرارًا، مثل الطاقة الشمسية والريحية، ضمن رؤية استراتيجية تركز على العائد الطاقوي والجدوى الاقتصادية.

ويُظهر تحليل هذه المعطيات أن الجزائر، على الرغم من توفرها على بنية تحتية مائية لا بأس بها، لم تُفلح في ترسيخ مكانة للطاقة الكهرومائية ضمن استراتيجيتها الوطنية للطاقات المتجددة. وهو ما يستدعي إعادة تقييم جدوى هذا المورد، سواء عبر تحسين كفاءة استغلاله أو تكامل استخدامه مع مشاريع الطاقات الأخرى، ضمن مقارنة متعددة المصادر وأكثر تكيفًا مع التحولات المناخية.

الشكل رقم (26): الكميات المنتجة من الطاقة الكهرومائية في الجزائر



المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على البيانات، International Renewable Energy Agency (IRENA), RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2024, p13

ثالثًا: الكميات المنتجة من طاقة الرياح في الجزائر

تمثل الطاقة الريحية أحد الخيارات الاستراتيجية البديلة التي يمكن أن تساهم في تنويع مصادر الطاقة المتجددة في الجزائر، بالنظر إلى توفر البلاد على مناطق واسعة ذات مؤهلات طبيعية مواتية، خصوصًا في الهضاب العليا وجنوب البلاد. ومع ذلك، فإن تحليل كميات الطاقة المنتجة من الرياح خلال الفترة 2014-2022 يُبرز قصورًا واضحًا في استغلال الإمكانيات المتاحة، وتأخرًا في وتيرة التطوير، ما يعكس غياب ديناميكية حقيقية في استغلال هذا المورد.

ووفقًا لإحصائيات الوكالة الدولية للطاقات المتجددة (IRENA)، فإن كميات الكهرباء المنتجة من الطاقة الريحية في الجزائر بقيت ضعيفة وغير مستقرة، حيث تراوحت بين 1 جيجاوات ساعة فقط سنة 2014 وبلغت ذروتها المؤقتة عند 19 جيجاوات ساعة خلال ثلاث سنوات متتالية (2015، 2016، 2017). إلا أن هذا المستوى لم يُحافظ عليه،

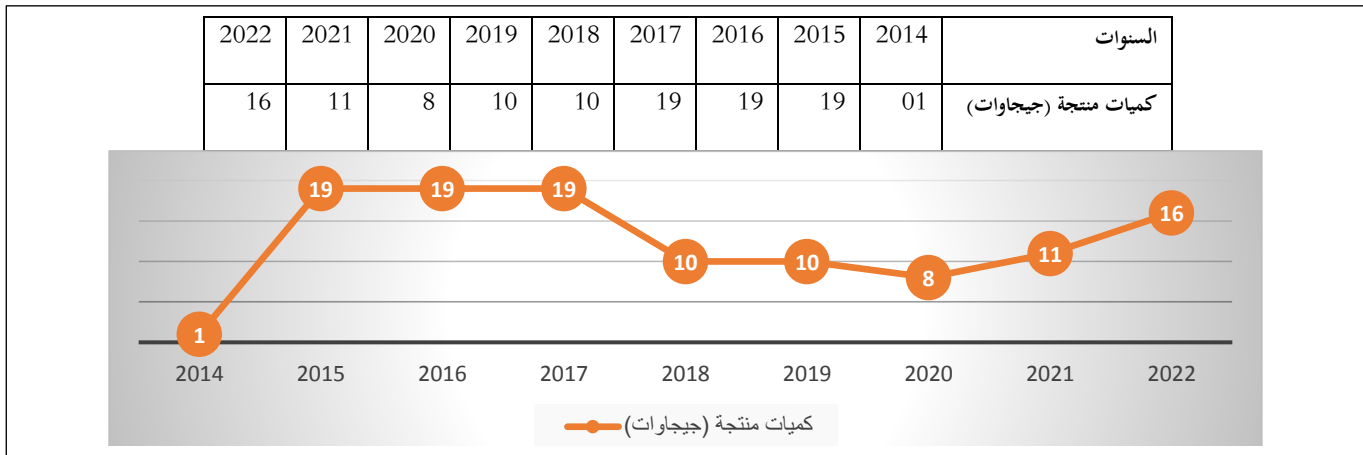
الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

حيث عرف الإنتاج تراجعاً ملحوظاً إلى 10 جيغاوات في 2018 و 2019، ثم 8 جيغاوات فقط في 2020. وعلى الرغم من تسجيل بعض التحسن في 2021 (11 جيغاوات) و 2022 (16 جيغاوات)، إلا أن الأرقام تبقى محدودة جداً مقارنة بالإمكانات المتاحة.

ويُفسّر هذا الأداء المتواضع بعدة عوامل، من أبرزها غياب مشاريع استثمارية كبرى في هذا المجال منذ تدشين محطة أدرار سنة 2014، والتي تظل الوحيدة قيد التشغيل على المستوى الوطني. كما ساهم ضعف التمويل، وغياب الحوافز الموجهة للقطاع الخاص، والتأخر في إعداد خارطة طريق واضحة لتطوير الطاقة الريحية، في تفويت العديد من الفرص المتاحة خلال السنوات الماضية. كما أن التركيز المفرط على الطاقة الشمسية ضمن السياسات العمومية الطاقوية قد أتى على حساب تطوير مصادر أخرى واعدة كطاقة الرياح.

من جهة أخرى، فإن المعطيات التقنية المرتبطة بسرعة الرياح ومردودية التوربينات في المواقع المختارة، فضلاً عن الحاجة إلى تطوير شبكة كهربائية ذكية قادرة على استيعاب الإنتاج المتذبذب لهذه الطاقة، تمثل تحديات إضافية تستدعي تدخلاً استراتيجياً. وعليه، فإن دمج الطاقة الريحية في المزيج الطاقوي الوطني بشكل أكثر فاعلية يقتضي إعادة تقييم شاملة للخيارات التقنية والمؤسسية، مع اعتماد منهجية تخطيطية طويلة الأمد تتكامل مع باقي مصادر الطاقة المتجددة.

الشكل رقم (27): الكميات المنتجة من طاقة الرياح في الجزائر



المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على البيانات، International Renewable Energy Agency (IRENA), RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2024, p29

رابعا: الكميات المنتجة من الطاقة الشمسية في الجزائر

تُعد الطاقة الشمسية الركيزة الأساسية في استراتيجية الجزائر للتحويل نحو الطاقات المتجددة، نظرا لما تزخر به البلاد

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

من موارد شمسية هائلة، حيث تُقدّر عدد ساعات الإشعاع الشمسي بما يفوق 3,000 ساعة سنوياً في معظم المناطق. وقد شكّل هذا المورد رهاناً رئيسياً للسلطات العمومية منذ مطلع العقد الماضي، مما انعكس على تطور الكميات المنتجة من الكهرباء الشمسية، والتي سجلت نمواً تصاعدياً ملحوظاً خلال الفترة الممتدة بين 2010 و2022.

وبحسب معطيات الوكالة الدولية للطاقات المتجددة (IRENA)، فقد ارتفعت الكمية المنتجة من الكهرباء الشمسية من 3 جيجاوات ساعة فقط سنة 2010 إلى 835 جيجاوات ساعة سنة 2022، ما يمثل نمواً بحوالي 278 ضعفاً خلال 13 سنة. وقد بدأت وتيرة الإنتاج في التسارع الفعلي منذ سنة 2011 (103 جيجاوات)، ثم تضاعفت تقريباً سنة 2012 (190 جيجاوات)، وبقيت مستقرة نسبياً حتى 2014. غير أن التحول النوعي في الأداء تم تسجيله انطلاقاً من 2016، حيث بلغ الإنتاج 372 جيجاوات ساعة، ليتواصل نسق الارتفاع إلى 688 جيجاوات سنة 2018، ثم 816 جيجاوات في 2020، وبلغ 835 جيجاوات في 2022.

هذا الاتجاه التصاعدي يُعبّر عن دخول الطاقة الشمسية مرحلة النضج التدريجي، نتيجة إطلاق مشاريع كبرى كمحطات الأغواط، غرداية، البيض، وتمنراست، فضلاً عن تحسن نسبي في مناخ الاستثمار وتشجيع الشراكات بين القطاعين العام والخاص. كما ساهمت برامج الوكالة الوطنية لترقية استخدام الطاقة وترشيدها (APRUE) وكذا مركز تطوير الطاقات المتجددة (CDER) في مرافقة هذا المسار من خلال الدراسات التقنية والتكوين المتخصص.

ومع ذلك، لا يزال الإنتاج المحقق دون الإمكانيات النظرية المتاحة، والتي تُقدّر بعدة آلاف من التيراواط ساعي سنوياً، ما يعني أن القدرات الفعلية المستغلة لا تمثل سوى نسبة ضئيلة من الإمكانيات الوطنية. ويرتبط هذا التفاوت بعدة إشكالات، أبرزها البيروقراطية في منح العقود، تعقيدات التمويل، غياب شبكة كهربائية ذكية لدمج الطاقات المتجددة، ونقص الصناعات المحلية المكتملة لتصنيع الألواح الشمسية والبطاريات.

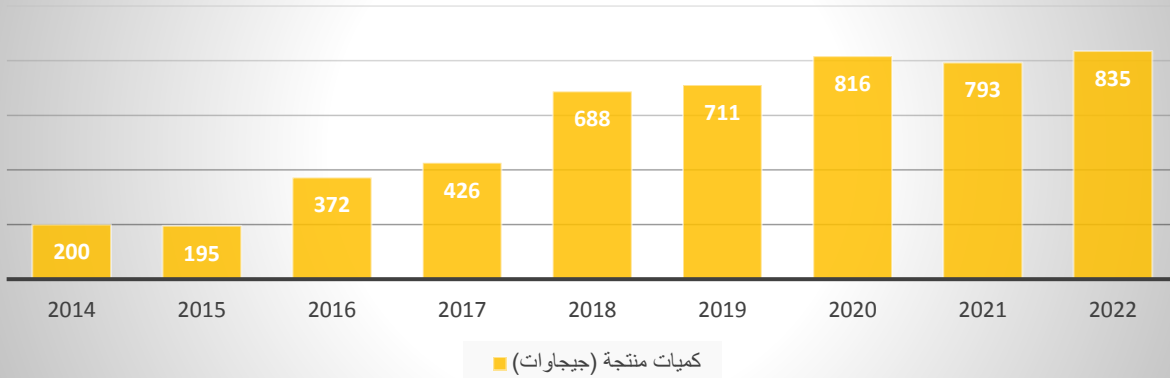
إن تحليل هذا المنحى يفرض التأكيد على أن الطاقة الشمسية تُمثّل دون منازع القاطرة الأساسية لمشروع الانتقال الطاقوي في الجزائر، غير أن تعظيم مردودها يستدعي تعزيز الإطار القانوني والمؤسسي، وتوسيع الشراكات الدولية، مع التوجه نحو استغلال الطاقات الشمسية الحرارية (CSP) وتقنيات التخزين الذكي لضمان استمرارية التزويد.

الشكل رقم (28): الكميات المنتجة من الطاقة الشمسية في الجزائر

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

السنوات	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
كميات منتجة (جيجاوات)	3	103	190	190	200	195	372	426	688	711	816	793	835

الكميات منتجة من الطاقة الشمسية في الجزائر



المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على البيانات، International Renewable Energy Agency (IRENA), RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2024, p44

الفرع الثاني: استهلاك الطاقات المتجددة في الجزائر

أولاً: استهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر

يُعد استهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر مؤشراً معبراً عن واقع وآفاق دمج هذا المورد المتجدد في منظومة الاستهلاك الوطني للكهرباء. فمن خلال تحليل المعطيات الإحصائية للفترة الممتدة بين سنة 2010 وسنة 2023، يتبين أن حجم استهلاك الطاقة الكهرومائية قد شهد تذبذباً ملحوظاً، ما يعكس من جهة محاولة محدودة لدمج هذا المورد ضمن الاستراتيجية الطاقوية، ومن جهة أخرى ضعفاً بنيوياً في الاعتماد عليه ضمن مزيج الطاقة الوطني، وبدل على محدودية قدراته التوليدية من جهة، وضعف استراتيجيته التوزيعية والاستهلاكية من جهة أخرى.

وقد بلغ الاستهلاك الوطني للطاقة الكهرومائية ذروته سنة 2012 بحجم قدره 0.62 تيراواط/ساعة، ثم سجل منحى تنازلياً تدريجياً ليستقر عند 0.01 تيراواط/ساعة فقط في سنتي 2021 و2022، قبل أن يسجل ارتفاعاً طفيفاً إلى 0.07 تيراواط/ساعة في 2023. أما السنوات التي سبقت الذروة، فقد تميزت بتقلبات متفاوتة، إذ بلغ الاستهلاك 0.17 تيراواط/ساعة سنة 2010 وارتفع إلى 0.5 تيراواط/ساعة سنة 2011، ليواصل صعوده النسبي سنة 2013 (0.33) و2014 (0.25)، قبل أن يدخل في مرحلة التراجع التي تزامنت مع تراجع كميات الإنتاج المسجلة في نفس الفترة.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

يرتبط هذا الانخفاض المستمر بعدة عوامل بنيوية ومناخية، أبرزها تراجع منسوب السدود نتيجة تواتر فترات الجفاف، محدودية قدرات التخزين الهيدروليكي، وعدم تجديد البنية التحتية القديمة لمحطات التوليد. كما أن غياب سياسة تكاملية لدمج الطاقة الكهرومائية ضمن الشبكة الوطنية، والاكتفاء بدور هامشي لها ضمن المخطط العام للانتقال الطاقوي، أسهما في تدني مستوى الاستهلاك، بالرغم من إمكانيات فنية وتقنية يمكن تطويرها على المدى المتوسط. إن قراءة هذه المؤشرات تُبرز الحاجة إلى مراجعة شاملة للاستراتيجية الوطنية للطاقة الكهرومائية، سواء من خلال تحسين كفاءة الاستغلال الحالي، توسيع الاستثمارات في تقنيات التخزين المائي الصغيرة (micro-hydropower)، أو إدماج هذه الطاقة ضمن نموذج مرّن للتزويد بالكهرباء في المناطق المعزولة، مما قد يعزز من مساهمتها في تنويع مصادر الطاقة وخفض الانبعاثات.

الجدول رقم (05): استهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر

السنوات	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
استهلاك الطاقة الكهرومائية (تيراواط/الساعة)	0,17	0,5	0,62	0,33	0,25	0,14	0,22	0,06	0,12	0,15	0,05	0,01	0,01	0,07

المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على البيانات- <https://ourworldindata.org/grapher/hydropower-consumption?tab=chart&country=DZA>

ثانياً: استهلاك طاقة الرياح في الجزائر

يشكل استهلاك طاقة الرياح في الجزائر أحد المؤشرات الثانوية ضمن مسار الانتقال الطاقوي، إذ يعكس حجم الطلب الفعلي على هذا المورد المتجدد، كما يكشف عن مدى تكامل إنتاجه مع المنظومة الوطنية لاستهلاك الكهرباء. وتشير المعطيات الإحصائية الصادرة عن منصة Our World in Data إلى أن استهلاك الجزائر من طاقة الرياح لا يزال محدوداً للغاية، حيث لم يتجاوز 0.016 تيراواط/ساعة سنة 2023، مقابل 0.01 تيراواط/ساعة خلال أغلب السنوات الممتدة من 2016 إلى 2022، مع تسجيل استهلاك بلغ 0.03 تيراواط/ساعة فقط في 2016 و 0.02 تيراواط/ساعة في 2015.

هذه المؤشرات الرقمية الضعيفة تعكس حضوراً هامشياً لطاقة الرياح ضمن المزيج الطاقوي الوطني، رغم توفر الجزائر على إمكانيات معتبرة في هذا المجال، خصوصاً في الهضاب العليا والمناطق الصحراوية التي تتميز بسرعة رياح ملائمة لتركيب المحطات الهوائية. ويُرجع هذا الأداء المحدود إلى جملة من التحديات، تشمل محدودية الاستثمارات في مشاريع الرياح، نقص الدراسات الجيوتقنية الدقيقة، وكذا غياب إطار تنظيمي متكامل يُحفّز المنتجين والمستثمرين على تطوير هذا القطاع.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

إن استهلاك طاقة الرياح بهذا المستوى الضعيف يعكس تأخرًا في استغلال إمكانيات متاحة، ويستدعي إعادة النظر في مقارنة التخطيط الطاقوي، من خلال تعزيز البنية التحتية المخصصة لطاقة الرياح، دعم الشراكات الدولية، وتطوير خارطة طريق تقنية وجغرافية لثبيت محطات إنتاج ذات مردودية عالية.

الجدول رقم (06): استهلاك طاقة الرياح في الجزائر

السنوات	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
استهلاك الطاقة الرياح (تيراواط/الساعة)	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.016

المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على البيانات <https://ourworldindata.org/grapher/wind-generation?tab=chart&country=DZA> :

ثالثًا: استهلاك الطاقة الشمسية في الجزائر

تُعد الطاقة الشمسية من بين أهم مصادر الطاقات المتجددة التي تسعى الجزائر إلى توسيع استخدامها ضمن مزيجها الطاقوي، بالنظر إلى ما تزخر به من إمكانيات إشعاع شمسي تُعدّ من بين الأعلى عالميًا. وتُظهر البيانات الإحصائية لفترة 2015–2023 تطورًا تدريجيًا في مستويات استهلاك الكهرباء المنتجة من الطاقة الشمسية، حيث ارتفع الاستهلاك من 0.06 تيراواط/ساعة سنة 2015 إلى 0.649 تيراواط/ساعة في 2023، ما يعكس ديناميكية تصاعدية ولو بوتيرة بطيئة.

ففي المرحلة الأولى الممتدة بين 2015 و2017، سُجّل تطور طفيف نسبيًا في معدلات الاستهلاك، حيث انتقل من 0.06 إلى 0.57 تيراواط/ساعة، وهو ما يعكس بداية دخول مشاريع الطاقة الشمسية طور التشغيل الفعلي، بالتوازي مع انطلاق مشاريع مجمّعات الطاقة الشمسية في بعض الولايات الجنوبية. أما الفترة الممتدة من 2018 إلى 2023، فقد عرفت نوعًا من الاستقرار النسبي في حجم الاستهلاك، إذ تراوحت القيم بين 0.64 و0.68 تيراواط/ساعة، مع تسجيل أعلى مستوى في سنة 2019 (0.68 تيراواط/ساعة) وأدنى مستوى نسبي في 2021 (0.64 تيراواط/ساعة).

إن هذا المسار يعكس من جهة النجاح النسبي للبرامج الحكومية في تثبيت مشاريع إنتاج الطاقة الشمسية وربطها بالشبكة الوطنية، لكنه من جهة أخرى يُبرز محدودية النمو الممنهج على المستوى البيئي في استهلاك هذا المورد، في ظل غياب تحفيزات قوية لتوسيع استخدامه على مستوى الأفراد والمؤسسات، إلى جانب تأخر في تحديث البنية التحتية الضرورية لتوزيعه بكفاءة.

إن التحول نحو استهلاك أوسع للطاقة الشمسية يتطلب إعادة صياغة السياسات العمومية الداعمة للطاقة

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

المتجددة، وتعزيز الإطار التشريعي، وتوسيع الاستثمارات المحلية والأجنبية في مجالات التركيب، الصيانة والتخزين، بما يسمح برفع مساهمة الطاقة الشمسية في تلبية الحاجيات الوطنية للكهرباء، وتقليص التبعة للوقود الأحفوري.

الجدول رقم (07): استهلاك الطاقة الشمسية في الجزائر

السنوات	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
استهلاك الطاقة الشمسية (تيرا واط ساعة)	0,06	0,09	0,57	0,65	0,68	0,67	0,64	0,66	0,649

المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على البيانات-<https://ourworldindata.org/grapher/solar-energy-consumption?tab=chart&country=DZA>

[consumption?tab=chart&country=DZA](https://ourworldindata.org/grapher/solar-energy-consumption?tab=chart&country=DZA)

رابعا: تحليل تطور استهلاك الطاقة المتجددة في الجزائر حسب القطاعات

تُسجل الطلب على الطاقة في البلدان النامية نموًا متسارعًا، في وقتٍ تُعد فيه تقلبات أسعار الوقود الأحفوري من بين أبرز التحديات التي تواجه الدول التي تعتمد بشكل كبير على مصادر الطاقة التقليدية لتلبية احتياجاتها الطاقوية. وفي هذا السياق، تبرز الحاجة الملحة إلى تبني مصادر بديلة للطاقة، وعلى رأسها الطاقات المتجددة، كحلٍ استراتيجي لتقليص الاعتماد على الوقود الأحفوري، مع ضمان تقليص انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

تُعد الجزائر، وهي أكبر دولة من حيث المساحة في إفريقيا، من بين البلدان التي شهدت نموًا سريعًا في الطلب على الطاقة خلال العقد الأخير، نتيجة التوسع الكبير في قطاعات السكن، الخدمات، والصناعة. وتعتمد البلاد حاليًا بشكل شبه كامل على الوقود الأحفوري في إنتاج الكهرباء، في حين لا تزال مساهمة الطاقات المتجددة في المزيج الطاقوي الوطني محدودة جدًا.

ومع ذلك، تمتلك الجزائر إمكانات هائلة في مجال إنتاج الطاقة المتجددة، تشمل الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، الكتلة الحيوية، الطاقة الحرارية الجوفية، والطاقة المائية. ومن هذا المنطلق، تعمل الحكومة الجزائرية على تنويع مصادر الطاقة والابتعاد تدريجيًا عن الاعتماد الحصري على الوقود الأحفوري، من خلال تبني سياسات وبرامج موجهة نحو دعم الطاقات المتجددة¹.

➤ استهلاك الطاقة المتجددة في الجزائر في قطاع الصناعة:

يمثل قطاع الصناعة أحد المحاور الحيوية في استهلاك الطاقة المتجددة في الجزائر، حيث بدأ يعرف تحولات تدريجية نحو مصادر طاقة بديلة. في السنوات الأخيرة، سعت بعض المؤسسات الصناعية إلى إدماج الطاقة الشمسية في عمليات الإنتاج، خاصة في المناطق الجنوبية التي تتميز بإشعاع شمسي مرتفع. ورغم أن استهلاك هذا القطاع لا يزال محدودًا مقارنة

¹ Younes Zahraoui , Mohammed Rezasudin Basir Khan , Ibrahim AlHamrouni, Saad Mekhilef and Mahrous Ahmed, *Energies*, 2021, 14(9), 2354, Current Status, Scenario, and Prospective of Renewable Energy in Algeria: A Review. Retrieved from : <https://doi.org/10.3390/en14092354>,p01

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

بالوقود الأحفوري، إلا أن بيانات سنة 2020 تُظهر أن الصناعة كانت من بين أكثر القطاعات استهلاكًا للطاقة المتجددة بما يناهز 1,287 تيراجول.

هذا الاتجاه يعكس وعيًا متزايدًا من الفاعلين الاقتصاديين بأهمية تقليص البصمة الكربونية وتعزيز التنافسية عبر تقليص التكاليف الطاقوية على المدى الطويل. ومن أجل تعزيز هذا المسار، من الضروري تفعيل آليات تمويلية وتحفيزية للمشاريع الصناعية الخضراء.

➤ استهلاك الطاقة المتجددة في قطاع النقل:

يُعد قطاع النقل في الجزائر من أقل القطاعات استخدامًا لمصادر الطاقة المتجددة، إذ يعتمد بشكل شبه كلي على المحروقات المدعومة، وهو ما يُشكل تحديًا كبيرًا في سياق التحول الطاقوي. لا تزال البنية التحتية للنقل الكهربائي أو الهجين شبه منعدمة، رغم المبادرات المحدودة لتجريب الحافلات الكهربائية في بعض المدن الكبرى. تُشير بيانات إلى أن مساهمة الطاقات المتجددة في تلبية احتياجات هذا القطاع تكاد تكون رمزية، الأمر الذي يعكس غياب استراتيجية واضحة لتشجيع استخدام الوقود الحيوي أو الطاقة الكهربائية. وفي ظل الازدحام الحضري وتزايد عدد المركبات، أصبح من الضروري تطوير شبكة نقل عمومي تعتمد على الطاقة النظيفة، مع دعم اقتناء المركبات الكهربائية وتوفير محطات شحن على المستوى الوطني، وهو ما سيسهم تدريجيًا في تقليص الاعتماد على الوقود التقليدي.

➤ استهلاك الطاقة المتجددة في القطاع الأسري وباقي القطاعات:

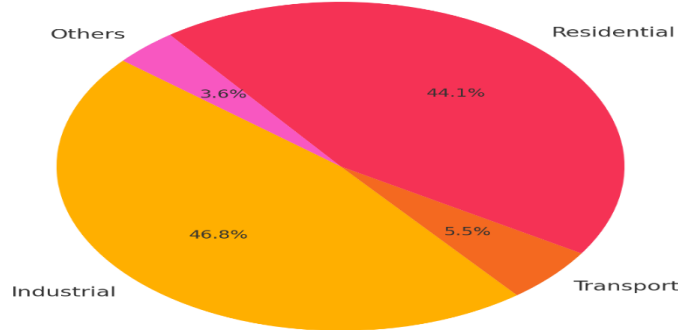
يُشكل القطاع الأسري ثاني أكبر مستهلك للطاقة المتجددة في الجزائر بعد الصناعة، حيث بلغ استهلاكه حوالي 1,214 تيراجول في عام 2020 يعود ذلك إلى المبادرات الحكومية والخاصة التي هدفت إلى تزويد المناطق الريفية والمعزولة بأنظمة طاقة شمسية مستقلة، تُستخدم في الإضاءة وضخ المياه والتبريد. كما أن اعتماد بعض الأسر على سخانات المياه الشمسية أصبح خيارًا اقتصاديًا ملائمًا في ظل ارتفاع أسعار الكهرباء في بعض المناطق. ورغم هذه الخطوات الإيجابية، فإن تعميم استخدام الطاقات المتجددة في المنازل لا يزال يواجه عراقيل تقنية ومالية، إلى جانب ضعف الوعي المجتمعي بفوائدها على المدى الطويل. وتبقى باقي القطاعات مثل الفلاحة والإدارة العمومية في مرحلة أولية من حيث دمج هذه الطاقات، ما يستدعي توجيه الاستثمارات نحو مشاريع نموذجية تُبرز الجدوى الاقتصادية والبيئية للطاقة النظيفة¹.

¹ Statista. (2023). Renewable energy consumption in Algeria by sector. Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/1361684/renewable-energy-consumption-in-algeria-by-sector>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (29): تحليل تطور استهلاك الطاقة المتجددة في الجزائر حسب القطاعات

Renewable Energy Consumption in Algeria by Sector (2020)



المصدر: من إعداد الباحث اعتمادا على البيانات الموقع التالي: Statista. (2023). Renewable energy consumption in Algeria by sector.

Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/1361684/renewable-energy-consumption-in-algeria-by-sector>

يعكس الشكل البياني توزيع استهلاك الطاقة المتجددة في الجزائر حسب القطاعات لسنة 2020، حيث يتصدر القطاع الصناعي القائمة بنسبة استهلاك تبلغ حوالي 40% من إجمالي الطاقة المتجددة، بما يعادل 1,287 تيراجول. ويعزى هذا الارتفاع إلى توظيف الطاقة الشمسية في العمليات الصناعية، خصوصاً في المناطق النائية التي يصعب ربطها بالشبكة الكهربائية التقليدية. يلي ذلك القطاع السكني بنسبة تقارب 38%، نتيجة استخدام الأنظمة الشمسية المنزلية في بعض التجمعات الريفية. بينما يُظهر قطاع النقل نسبة ضئيلة جداً من الاستهلاك، تعكس استمرار الاعتماد شبه الكامل على الوقود الأحفوري وغياب البنية التحتية الداعمة للمركبات النظيفة. أما باقي القطاعات، فتسجل استهلاكاً هامشياً يعكس ضعف تكامل الطاقة المتجددة ضمن القطاعات الإدارية أو التجارية. هذا التوزيع يُبرز الحاجة الملحة إلى إصلاحات هيكلية لرفع مساهمة الطاقات النظيفة في القطاعات الأقل استخداماً، خاصة النقل، لتحقيق التحول الطاقوي المستهدف.

الفرع الثالث: البعد الاقتصادي للطاقة المتجددة

أولاً: الجانب الاقتصادي من مشاريع إنتاج الكهرباء من مصادر الطاقة المتجددة

لا تزال الكلفة الاستثمارية لمشاريع الطاقة المتجددة مرتفعة نسبياً، باستثناء مشاريع الطاقة المائية وتلك المعتمدة على طاقة الرياح في بعض المواقع ذات الإمكانيات العالية، وذلك على الرغم من الانتشار التجاري التدريجي لبعض التطبيقات. وتُعد تكلفة وحدة الطاقة المنتجة من المصادر المتجددة من العوامل الحاسمة التي تؤثر في مدى انتشار هذه التكنولوجيا، كما تمثل عامل جذب أو نفور للقطاع الخاص الراغب في الاستثمار ضمن هذا المجال.

وفي هذا السياق، يكتسب تقدير الكلفة الاستثمارية للقدرة المركبة (بالكيلوواط) وأيضاً تكلفة إنتاج وحدة الطاقة

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

(بالسنت دولار/كيلوواط ساعة) أهمية خاصة في عمليات التقييم الاقتصادي والفني لمشاريع الطاقة المتجددة. ويعرض الجدول رقم (08) نظرة شاملة على الخصائص النمطية، والتكلفة الرأسمالية، إلى جانب تكلفة وحدة الطاقة المنتجة من مصادر الطاقة المتجددة المختلفة، وذلك استناداً إلى بيانات عام 2011¹.

الجدول رقم(08): الكلفة الرأسمالية و كلفة وحدة الطاقة المنتجة بواسطة مصادر الطاقة المتجددة في 2011

المصدر/نوع التكنولوجيا	المواصفات النمطية	الكلفة الرأسمالية (دولار/ك.و.)	كلفة وحدة الطاقة (سنت) (دولار/ك.و. من)
طاقة الرياح (على الأرض): • المحطات الصغيرة	سعة التربين (ك.و.): حتى 100. سعة التربين (م.و.): 1.5-3.5. قطر دوران الريشة (م): 60-110 وما فوق معامل السعة (%): 20-40.	6000-3000 2475-1410	20-15 16.5-5.2
طاقة الرياح في البحر	سعة التربين (م.و.): 1.5-7.5. قطر دوران الريشة (م): 70-125. معامل السعة (%): 35-45.	5870-3760	22.4-11.4
خلايا فوتوفلطية على سطح المبني	أقصى سعة: 3-5 ك.و. (سكني): 100 ك.و. (تجاري)، 500 ك.و. (صناعي)، كفاءة التحويل (%): 12-20.	3270-2480	44-22
محطة كهرباء بنظم الخلايا الفوتوفلطية	أقصى سعة: 2.5-100 م.و. كفاءة التحويل (%): 15-27.	2350-1830	37-20
مركزات شمسية حرارية: • قطع مكافئ	500-50 م.و. معامل السعة (%): 20-25 (بدون نظام تخزين حراري).	4500	29-18.8
• برج مركزي	50-40 (مع نظام تخزين لمدة 6 ساعات) 300-50 م.و.	9000-7100	
المصدر/نوع التكنولوجيا	المواصفات النمطية	الكلفة الرأسمالية (دولار/ك.و.)	كلفة وحدة الطاقة (سنت) (دولار/ك.و. من)
• قطع طبقي	معامل السعة (%): 40-80 (مع نظام تخزين لمدة 6-15 ساعة) حتى 25 ك.و.	10500-6300	
الكتلة الحيوية: - محطة تعتمد على غلاية عادية/تربين بخاري ومائع	100-25 م.و. كفاءة التحويل (%): 27. معامل السعة (%): 70-80.	4660-3030	17.6-7.9
مصادر أخرى: - المصدر الكهرومائي • السعات الصغيرة (بدون ربط بالشبكة الكهربائية) • السعات الكبرى (مربوطة على الشبكة الكهربائية)	0.1 ك.و. - 1 م.و. 18000-10 م.و. فأكثر ○ محطة أكبر من 300 م.و. (خزان، نهر) ○ محطة أقل من 300 م.و. معامل السعة (%): 30-60 100-1 م.و. معامل السعة (%): 60-90 معامل السعة (%): 23-29	3500-1175 أقل من 2000 4000-2000 6100-2100 5870-5290	40-5 10-5 10.7-5.7 28-21
- طاقة حرارة باطن الأرض - طاقة المحيطات (المد والجزر)			

المصدر: اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا (الإسكوا)، دور الطاقة المتجددة في الحد من تغير المناخ في منطقة الإسكوا، الأمم المتحدة، نيويورك، 2012، ص23

يتوافد مستوى كلفة وحدة الطاقة المنتجة من طاقة الرياح، سواء البرية أو البحرية، إلى مجموعة من العوامل التقنية والجغرافية والاقتصادية. من أبرز هذه العوامل: موقع المحطة وطبوغرافية الأرض التي تُقام عليها، فضلاً عن الظروف المناخية السائدة مثل درجات الحرارة والرطوبة النسبية. كما يُعد هيكل الرياح ومتوسط سرعاتها السنوية من المحددات الأساسية في هذا السياق، لما له من أثر مباشر على الإنتاجية. وبالنسبة لمحطات الرياح البحرية، فإن ارتفاع تكلفة إنشائها يُعزى إلى

¹RENEWABLES 2012 (REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century), GLOBAL STATUS REPORT, 2012, P28-29

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

متطلباتها التقنية الخاصة، بما في ذلك الحاجة إلى قواعد بحرية متينة للتوربينات، وكابلات كهربائية مقاومة للبيئة البحرية، إضافة إلى المعدات اللازمة لأعمال الحفر والإنشاء، ناهيك عن ارتفاع تكاليف التشغيل والصيانة.

وفيما يخص الطاقة الشمسية بنوعها (الكهروضوئية والحرارية)، فإن الفجوة في كلفة وحدة الطاقة المنتجة تعود بدورها إلى عوامل متعددة. من بينها: كثافة الإشعاع الشمسي في موقع المشروع، ومستويات الرطوبة ودرجات الحرارة، والطبيعة الجغرافية للمنطقة، ومدى الحاجة إلى منظومة تخزين (كالبطاريات) أو الربط مع الشبكة الكهربائية الوطنية، بالإضافة إلى تكاليف التشييد والتشغيل.

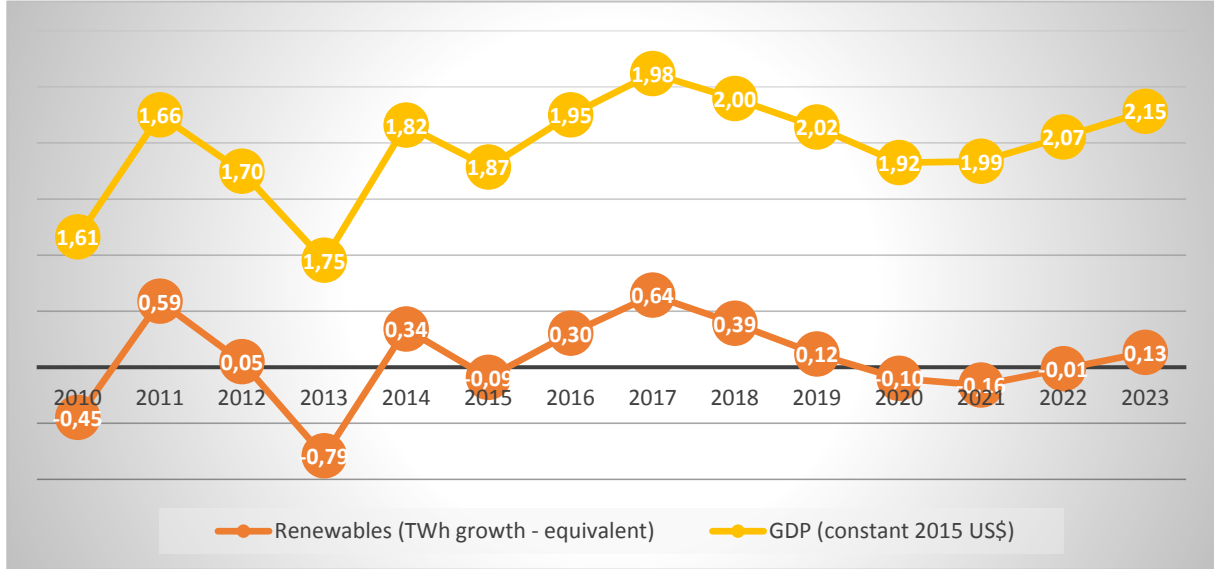
وإلى جانب تلك العوامل التقنية والمناخية، توجد محددات تنظيمية واقتصادية تؤثر بصورة كبيرة على تكلفة إنتاج الطاقة المتجددة بشكل عام. وتشمل هذه المحددات: وجود سياسات وتشريعات داعمة للطاقة المتجددة، ومدى توافر الحوافز الحكومية، ومصادر تمويل المشروع وكلفته، إضافة إلى درجة المخاطر الاستثمارية، والضرائب والرسوم الجمركية، وتكاليف العمالة، ومعدلات التضخم، ونسبة المكون المحلي في المشروع، وتكاليف الربط بالشبكة، ومستوى النضج التكنولوجي للمعدات المستخدمة، والهامش الربحي المستهدف، وأخيراً درجة المنافسة في السوق وكفاءة الحوكمة السياسية والإدارية.

ثانياً: أثر استهلاك الطاقة المتجددة على الناتج المحلي الإجمالي في الجزائر

تُعد الطاقة، بمختلف مصادرها سواء التقليدية أو المتجددة، عنصراً محورياً ضمن ركائز التنمية الاقتصادية، نظراً للدور الحيوي الذي تؤديه في تحفيز النشاط الإنتاجي والصناعي والخدمي. وتُظهر الأدبيات الاقتصادية وجود علاقة وثيقة ومباشرة بين توسّع استهلاك الطاقة ومعدلات النمو الاقتصادي، حيث يُمثّل الطلب على الطاقة أحد المؤشرات الأساسية لديناميكية الاقتصاد الوطني. وانطلاقاً من هذا الإطار، تهدف هذه الدراسة إلى تحليل مساهمة التحول نحو مصادر الطاقة المتجددة في دعم النمو الاقتصادي في الجزائر، وذلك من خلال قياس مدى تأثير هذا التحول على تطور الناتج المحلي الإجمالي خلال السنوات الأخيرة.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (30): العلاقة بين استهلاك الطاقة المتجددة و الناتج المحلي الإجمالي في الجزائر 2010-2023



المصدر: من إعداد الطالب اعتمادا على البيانات الموقع التالي-<https://ourworldindata.org/grapher/gdp-worldbank-constant-usd?tab=chart&country=DZA>:

يبرز الشكل البياني العلاقة بين تطور استهلاك الطاقة المتجددة والناتج المحلي الإجمالي (GDP) في الجزائر خلال الفترة 2010-2023، حيث يُلاحظ وجود تباين واضح في مسارات النمو بين المؤشرين. فعلى الرغم من الاتجاه التصاعدي العام لاستهلاك الطاقة المتجددة، إلا أن وتيرته كانت غير مستقرة، بخاصة في الفترة الممتدة من 2010 إلى 2015، ما يعكس غياب استراتيجية طاقوية واضحة المعالم خلال تلك المرحلة. ابتداءً من 2015، يظهر تحسن تدريجي في استهلاك الطاقة المتجددة، وهو ما يمكن تفسيره ببدء تفعيل سياسات التحول الطاقوي وتزايد الوعي الحكومي بأهمية تنويع مصادر الطاقة لتقليص التبعية للمحروقات، لاسيما في ظل تقلبات أسعار النفط العالمية.

اقتصاديا، يشير هذا التفاوت إلى أن النمو الاقتصادي في الجزائر لم يكن مدفوعاً في معظمه بالطاقة المتجددة، بل ظل معتمداً بدرجة كبيرة على الربيع النفطي، وهو ما يُضعف مرونة الاقتصاد أمام الصدمات الخارجية. ومن ثم، فإن تعزيز مساهمة الطاقات المتجددة في النمو يتطلب استثمارات مؤسسية وتكنولوجية موجهة، إلى جانب إصلاحات هيكلية في سوق الطاقة وتطوير الإطار القانوني الجاذب للقطاع الخاص. ويوضح الشكل أن الانتقال الطاقوي لا يزال في مرحلة تأسيسية، تتطلب تسريع وتيرة التنفيذ لتحقيق تنمية اقتصادية مستدامة ومبنية على أسس منخفضة الكربون.

ثالثا: العوامل المؤثرة على استهلاك الطاقة المتجددة في الجزائر

1- السعر ودعم الطاقة:

تُعد أسعار الطاقة المحلية في الجزائر من بين الأدنى على مستوى العالم، وهو ما يُعزى إلى نظام الدعم الشامل

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

والمكثف الذي تطبقه الدولة منذ عقود (انظر الشكل 30). فوفقًا لتقديرات خبراء صندوق النقد الدولي باستخدام أداة تقييم السياسات المناخية* (CPAT)، التي تم تطويرها بالشراكة مع البنك الدولي، فإن أسعار البنزين والديزل والكهرباء في الجزائر خلال سنة 2023 كانت أقل بنسبة تتجاوز 60% من مستويات استرداد التكلفة الحقيقية. أما بالنسبة للغاز الطبيعي وغاز البترول المسال، فقد كانت الأسعار المحلية أقل من مستويات الاسترداد بما يزيد عن 90%، ما يعكس حجم الفجوة الكبيرة بين التكلفة الحقيقية وسعر البيع للمستهلك.

وقد قدّرت السلطات الجزائرية أن التكلفة غير المباشرة لهذا الدعم، والمتمثلة في الإيرادات الضائعة من الميزانية العمومية، بلغت حوالي 10.7% من الناتج الداخلي الخام سنة 2021، وهو رقم يعكس العبء المالي الكبير الذي تتحمله الدولة نتيجة هذا النظام السعري غير الفعال.

هذا الواقع يؤثر بشكل مباشر على انتقال الجزائر نحو الطاقات المتجددة، إذ تُضعف الأسعار المنخفضة للوقود الأحفوري من القدرة التنافسية لمصادر الطاقة المتجددة، وتقلص من الحوافز الاقتصادية لتبنيها سواء على مستوى الأسر أو المؤسسات. فطالما ظلت الطاقة التقليدية مدعومة بهذه الطريقة، سيبقى الاستثمار في مشاريع الطاقة الشمسية أو الريحية غير مجديٍّ من الناحية الاقتصادية دون تدخل سياسي واضح لإصلاح نظام التسعير والدعم. من ثم، فإن إعادة هيكلة سياسة الدعم الطاقوي تُعد خطوة مركزية لتوفير بيئة مواتية لتعزيز دور الطاقات النظيفة في تحقيق التنمية المستدامة وخفض انبعاثات الغازات الدفيئة.

في الجزائر، تُهيمن المؤسسات العمومية المملوكة للدولة على سلسلة التوريد المحلية للنفط والغاز، بما يشمل عمليات الاستخراج والإنتاج والتوزيع، بالإضافة إلى استيراد المشتقات البترولية عند الحاجة لتلبية الطلب المحلي. وتُجرى هذه المعاملات وفق أسعار إدارية يتم تحديدها من قبل الدولة، وهي أقل بكثير من مستويات استرداد التكلفة الحقيقية.

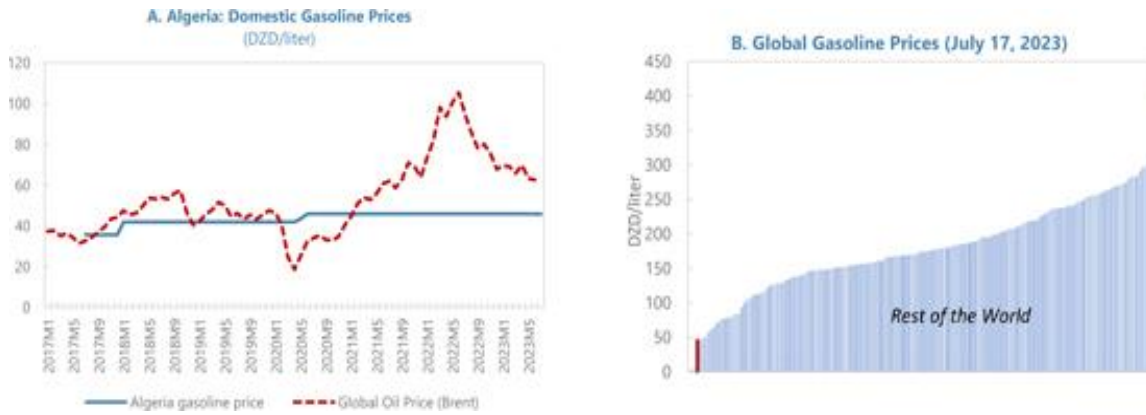
كما يُباع الغاز الطبيعي الموجه لإنتاج الكهرباء بأسعار مدعومة أيضًا لشركة الكهرباء الوطنية العمومية، التي تقوم بدورها بتموين المستهلكين بالكهرباء بأسعار منخفضة ومدعومة. وتُقدر النفقات السنوية الظاهرة في الميزانية المخصصة لدعم الكهرباء والغاز وتحتل مياه البحر بنحو 0.5% من الناتج الداخلي الخام. غير أن الجزء الأكبر من التكلفة المالية للدعم يتمثل في دعم ضمني وغير مدرج في الميزانية، ويظهر على شكل عوائد ضائعة من الضرائب، والحقوق الربعية، وتوزيعات الأرباح الناتجة عن عمليات استخراج وبيع المحروقات.

كما تلجأ الحكومة بين الحين والآخر إلى تقديم تحويلات مالية مباشرة للمؤسسات العمومية الناشطة في قطاع

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الطاقة، بهدف تعويضها عن تكاليف الدعم، لا سيما فيما يتعلق باستيراد المنتجات البترولية. تعكس هذه الآليات طبيعة النموذج الاقتصادي الريعي الذي لا يزال يُشكّل عقبة أمام التحول الطاقوي وتبني الطاقات المتجددة، حيث يُضعف هذا النظام من الحوافز الاقتصادية والمالية للاستثمار في بدائل الطاقة النظيفة.¹

الشكل رقم (31): أسعار البنزين



Source: Mahmoud Harb and Jarin Nashin , International Monetary Fund. Middle East and Central Asia Dept.. Algeria: Selected Issues. IMF Staff Country Reports. 2024;2024(089):A001. doi:10.5089/9798400271922.002.A001,p18.

2- تأثير النمو الديمغرافي والاقتصادي على استهلاك الطاقة في الجزائر 2:

لقد كان الارتفاع المضطرب في انبعاثات الغازات الدفيئة (GHG) في الجزائر نتيجة مباشرة لتقاطع عدة عوامل هيكلية، في مقدمتها النمو الاقتصادي والديمغرافي، إلى جانب تزايد كثافة الطاقة ضمن النشاط الاقتصادي (انظر الشكل 32). فمنذ سنة 2000، ارتفع عدد السكان بنسبة تقارب 46%، في حين سجل الناتج المحلي الإجمالي الحقيقي للفرد نمواً يُقدَّر بـ 29% خلال الفترة الممتدة بين 2000 و 2021. بالتوازي، ارتفعت كثافة استهلاك الطاقة للنمو الاقتصادي بنسبة 22%، وهو ما يُعزى إلى تحولات بنيوية تمس النسيج الاقتصادي، مثل التوسع العمراني المتسارع المصحوب بارتفاع

* نموذج CPAT أداة تقييم السياسات المناخية) هو نموذج تحليلي قائم على الجداول الممتدة (Excel)، تم تطويره بشكل مشترك من قبل خبراء صندوق النقد الدولي والبنك الدولي. يُتيح هذا النموذج إجراء توقعات دقيقة لاستهلاك الوقود وانبعاثات الغازات الدفيئة (GHG) عبر القطاعات الاقتصادية الرئيسية في 188 دولة. كما يُمكن من تقييم تأثير مجموعة واسعة من أدوات السياسات التخفيفية، وذلك من خلال قياس تأثيرها النسبي على أسعار الوقود ومدى استجابة استهلاك الوقود للأسعار داخل كل قطاع.

ويُستخدم هذا النموذج على نطاق واسع ضمن مهام الرقابة الاقتصادية لصندوق النقد الدولي، وفي التحليلات المقارنة بين الدول، وكذلك في برامج الدعم الفني التي تقدمها المؤسسات. يُعد CPAT أداة استراتيجية لدعم صانعي القرار في تصميم سياسات مناخية وطاقوية أكثر فاعلية ومواءمة مع الأهداف العالمية للتنمية المستدامة.

¹ Mahmoud Harb and Jarin Nashin , International Monetary Fund. Middle East and Central Asia Dept.. Algeria: Selected Issues. IMF Staff Country Reports. 2024;2024(089):A001. doi:10.5089/9798400271922.002.A001,p17

² Mahmoud Harb and Jarin Nashin , International Monetary Fund. Middle East and Central Asia Dept.. Algeria: Selected Issues. IMF Staff Country Reports. 2024;2024(089):A001. doi:10.5089/9798400271922.002.A001,p14

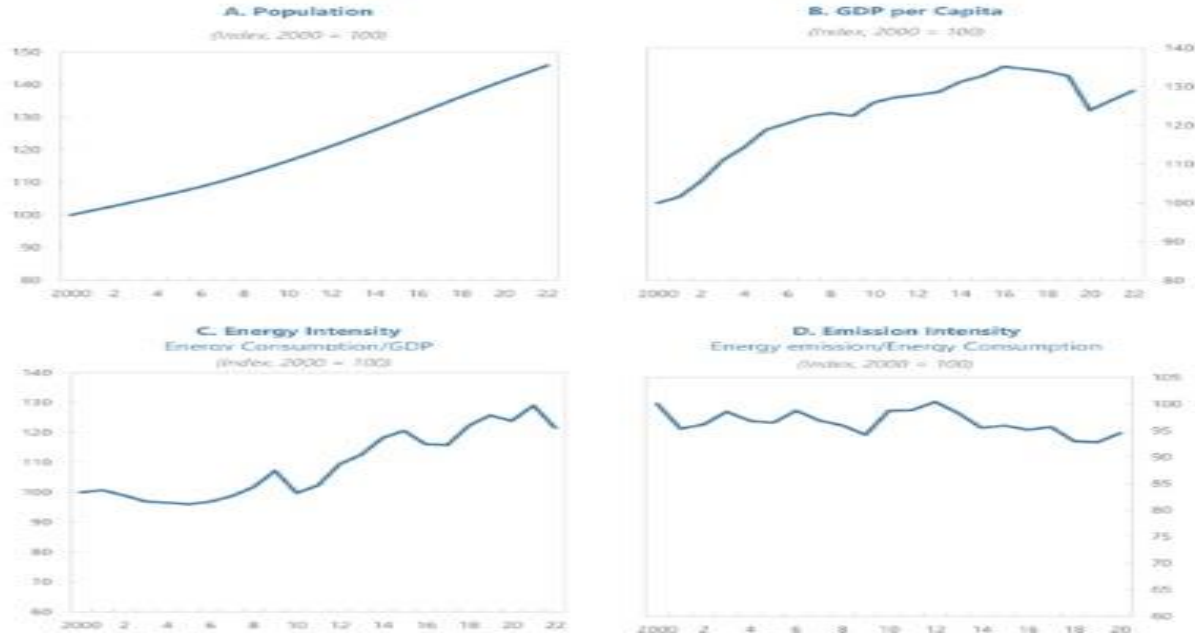
الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

نسبة الوصول إلى الكهرباء، فضلاً عن التطور السريع للقطاعات الصناعية كثيفة الاستهلاك للطاقة كصناعة الإسمنت والأسمدة والمعادن.

الشكل رقم (32): تحليل كايا (Kaya) لنمو انبعاثات الغازات الدفيئة (GHG)

The **Kaya identity** decomposes GHG emissions into the product of population, GDP per capita, energy intensity of economic activity and emission intensity of electricity generations, as follows:

$$\text{Energy emissions (GHG)} = \text{population} \times \text{GDP/population} \times \text{Energy consumption/GDP} \times \text{Energy emissions/energy consumption}$$

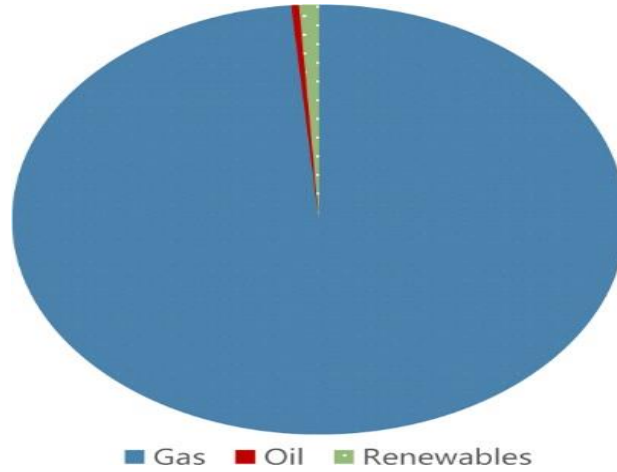


Source: Mahmoud Harb and Jarin Nashin , International Monetary Fund. Middle East and Central Asia Dept.. Algeria: Selected Issues. IMF Staff Country Reports. 2024;2024(089):A001. doi:10.5089/9798400271922.002.A001,p15

رغم هذا النمو، فإن الاعتماد شبه الكامل على الغاز الطبيعي لتوليد الكهرباء في الجزائر (انظر الشكل 33) لم يُسهم في تحسين ملموس لكفاءة الطاقة من حيث كثافة الانبعاثات، وهو ما يبرز محدودية الأثر البيئي للطاقة التقليدية المستخدمة. ويُتوقع أن تستمر هذه العوامل الهيكلية في دفع مستويات الانبعاثات نحو الارتفاع، ما لم تُتخذ إجراءات سياسية جذرية وموجهة للحد منها.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (33) : إنتاج الكهرباء حسب المصدر (تيراواط ساعي)، سنة 2019



Source: Mahmoud Harb and Jarin Nashin , International Monetary Fund. Middle East and Central Asia Dept.. Algeria: Selected Issues. IMF Staff Country Reports. 2024;2024(089):A001. doi:10.5089/9798400271922.002.A001,p14.

وفي هذا السياق، تبرز الطاقات المتجددة كخيار استراتيجي لا غنى عنه لتحقيق أهداف الجزائر في تقليص الانبعاثات. فتبني مصادر طاقة نظيفة مثل الطاقة الشمسية والريحية من شأنه ليس فقط تقليص الاعتماد على الغاز الطبيعي، بل أيضاً تحسين كفاءة الطاقة وخفض كثافة الانبعاثات في مختلف القطاعات. لكن لتحقيق ذلك، لا بد من صياغة سياسات طاقوية مندمجة تعيد توجيه الاستثمارات وتُصلح نظام الدعم، بما يعزز من جدوى الطاقة المتجددة اقتصادياً وبيئياً.

المطلب الثاني: برنامج الطاقات المتجددة آفاق 2030

في سياق الاستراتيجية الوطنية التي تنتهجها الجزائر لإدماج الطاقات المتجددة ضمن المزيج الطاقوي، تم إطلاق برنامج طموح في فبراير 2011 يهدف إلى تطوير الطاقات المتجددة وتعزيز كفاءة استخدام الطاقة. ويُعد هذا البرنامج جزءاً من رؤية شاملة لتقليص الاعتماد الهيكلي على مصادر الطاقة التقليدية، لاسيما المحروقات، من خلال تنويع مصادر إنتاج الكهرباء بالاعتماد على الموارد الطبيعية المتجددة. كما يسعى إلى إرساء أسس انتقال طاقوي فعال يواكب متطلبات التنمية المستدامة ويحافظ على التوازن البيئي، بما يعزز قدرة البلاد على مواجهة التحديات الطاقوية المستقبلية ويضمن استقراراً اقتصادياً وبيئياً على المدى الطويل.

الفرع الأول: البرنامج الوطني للطاقات المتجددة والنجاعة الطاقوية 2015-2030

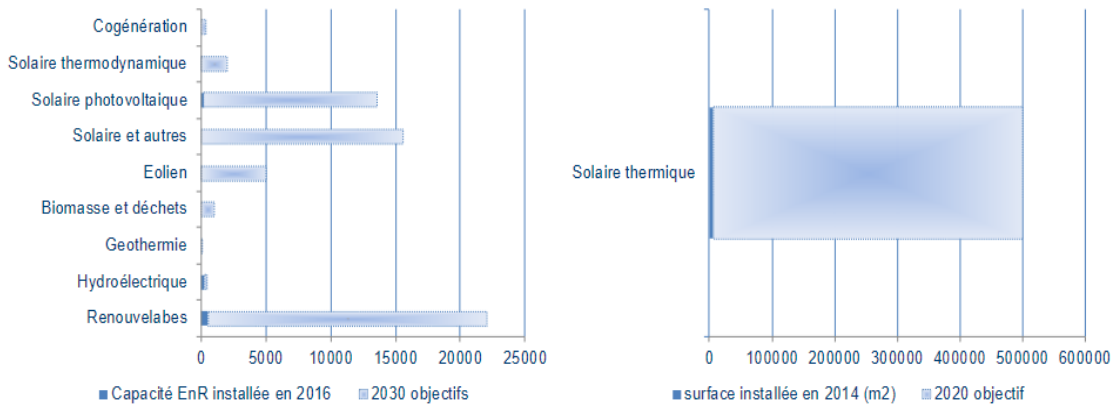
في إطار مساعيها الرامية إلى تنويع مصادر الطاقة وتعزيز الاستدامة الطاقوية، أطلقت الجزائر في فبراير 2011 خطة وطنية لتطوير الطاقات المتجددة، جرى تحيينها في مايو 2015، لتمتد في تنفيذها حتى أفق عام 2030. وقد أولت هذه الخطة اهتماماً خاصاً لتطوير الطاقة الشمسية الفوتوفولتية (PV) وطاقة الرياح، بوصفهما المحورين الرئيسيين لتحقيق تحول فعال في البنية الطاقوية الوطنية. ويتضمن المخطط المحدث هدفاً طموحاً يتمثل في بلوغ قدرة إنتاجية تصل إلى 22

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

جيغاواط من مصادر متجددة في أفق 2030، بما يعادل 27٪ من إجمالي الإنتاج الوطني للكهرباء و 37٪ من إجمالي القدرة المركبة. ومن هذه القدرة، يُفترض أن تُخصص 4500 ميغاواط للسوق المحلي وتُنجز قبل حلول عام 2020. وقد جرى تفصيل الأهداف حسب نوع التكنولوجيا الطاقوية المعتمدة، على النحو التالي: 13,575 ميغاواط من الطاقة الشمسية الفوتوفولتية، 5,010 ميغاواط من طاقة الرياح، و 2,000 ميغاواط من الطاقة الشمسية المركزة (CSP) ابتداءً من سنة 2021، بالإضافة إلى 1,000 ميغاواط من طاقة الكتلة الحيوية، و 400 ميغاواط من التوليد المزدوج، و 15 ميغاواط فقط من الطاقة الحرارية الجوفية. وبالمقابل، لم تُحدد أهداف رقمية دقيقة فيما يتعلق بتطبيقات التدفئة والتبريد، باستثناء ما أُدرج ضمن المبادرة العالمية لسخانات المياه الشمسية التابعة لبرنامج الأمم المتحدة الإنمائي (GSHW)¹.

ويوضح الشكل البياني أدناه الفجوة القائمة بين الوضع القائم سنة 2016 والأهداف الوطنية المسطرة لسنة 2030، حيث يُبين التوزيع التكنولوجي للقدرة المركبة المتوقعة. وتُسلّج هيمنة مرتقبة للطاقة الشمسية الفوتوفولتية وطاقة الرياح كمصدرين رئيسيين في مزيج الطاقات المتجددة. كما يبرز الرسم المقابل تطور المساحات المركبة للطاقة الشمسية الحرارية، مبيّناً التوسع المتوقع بحلول عام 2020 مقارنة بالمساحات المنجزة سنة 2014. ومن خلال تحليل هذه المعطيات، يتضح أن الجزائر تراهن بوضوح على مواردها المتجددة كخيار استراتيجي لبناء اقتصاد طاووي مستدام وتقليل التبعية لمصادر الطاقة التقليدية.

الشكل رقم (34): الأهداف الوطنية للجزائر في مجال الطاقات المتجددة (EnR)



Source : Les énergies renouvelables en mediterranee, Tendances, perspectives et bonnes pratiques, 2018, MEDENER/OME avec le soutien de l'ADEME P.20

أولاً: مراحل تنفيذ برنامج الطاقات المتجددة في الجزائر (2015-2030):

يشكل تنفيذ برنامج الطاقات المتجددة في الجزائر أحد المحاور المركزية للاستراتيجية الوطنية الهادفة إلى ضمان أمن طاووي

¹ Les énergies renouvelables en mediterranee, Tendances, perspectives et bonnes pratiques, 2018, MEDENER/OME avec le soutien de l'ADEME P.20

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

مستدام وتنوع مصادر إنتاج الكهرباء. وقد تم تخطيط هذا البرنامج بشكل تدريجي، يأخذ في الاعتبار التحديات التقنية والاقتصادية، عبر مرحلتين رئيسيتين تمتدان من عام 2015 إلى غاية 2030¹، وتهدفان إلى إنتاج طاقة كهربائية موجهة أساسًا لتغطية حاجيات السوق الوطنية.

✓ **المرحلة الأولى (2015-2020):** تمثل هذه المرحلة نقطة الانطلاق الفعلية للبرنامج، وقد خُصصت لتركيب قدرة إجمالية قدرها 4,010 ميغاواط من الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح، بالإضافة إلى 515 ميغاواط من مصادر أخرى تشمل الكتلة الحيوية، التوليد المشترك، والطاقة الحرارية الجوفية. وقد جرى تنفيذ مشاريع هذه المرحلة في مناطق متنوعة من التراب الوطني، مع التركيز على تعزيز الخبرة المحلية وتطوير سلسلة القيمة الصناعية المرتبطة بالتجهيزات الطاقوية.

✓ **المرحلة الثانية (2021-2030):** تمثل هذه المرحلة المحور الأساسي للتوسع الهيكلي في قدرات الطاقات المتجددة، حيث يتوقع أن يتم فيها تركيب محطات كبرى في المناطق الجنوبية، خاصة في أدرار، عين صالح، تيميمون و بشار. وقد أصبح هذا التوسع ممكنًا بفضل مشاريع الربط الكهربائي بين شمال البلاد والجنوب، ما يُمكن من دمج الإنتاج الطاقوي الجديد في الشبكة الوطنية بفعالية. كما يُتوقع أن تُصبح الطاقة الشمسية المركزة (CSP) مجدية اقتصاديًا خلال هذه الفترة، ما سيفتح آفاقًا جديدة أمام تنوع مصادر الطاقة المستدامة.

ويبين الجدول التالي توزيع القدرات المركبة حسب نوع التكنولوجيا ومرحلة التنفيذ ضمن البرنامج الوطني للطاقات المتجددة:

الجدول رقم (09): القدرات المركبة لإنتاج الطاقة وفق برنامج الطاقات المتجددة 2010-2030

النوع (MW)	المرحلة الأولى (2015-2020)	المرحلة الثانية (2021-2030)	المجموع الكلي
الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PHOTOVOLTAIQUE)	3000 ميغاواط	10575 ميغاواط	13575 ميغاواط
طاقة الرياح (éolien)	1010 ميغاواط	4000 ميغاواط	5010 ميغاواط
الطاقة الشمسية المركزة csp	-	2000 ميغاواط	2000 ميغاواط
التوليد المشترك (Cogénération)	150 ميغاواط	250 ميغاواط	400 ميغاواط
الكتلة الحيوية (Biomasse)	360 ميغاواط	640 ميغاواط	1000 ميغاواط
الطاقة الحرارية الجوفية (Géothermie)	5 ميغاواط	10 ميغاواط	15 ميغاواط
المجموع الكلي	4525 ميغاواط	17475 ميغاواط	22000 ميغاواط

المصدر: وزارة الطاقة، برنامج تطوير الطاقات المتجددة والنجاعة الطاقوية، الجزائر، صات أنفو، سونلغاز، الجزائر، 2016، ص 9.

تُظهر هذه الأرقام بوضوح هيمنة الطاقة الشمسية الكهروضوئية على تركيبة البرنامج، حيث تمثل أكثر من

¹ بوزرورة لينة، قطاف سهيلة، برنامج تطوير الطاقات المتجددة و الفعالية الطاقوية في الجزائر في الفترة بين: 2015-2030، مجلة دفاتر اقتصادية المجلد 10-

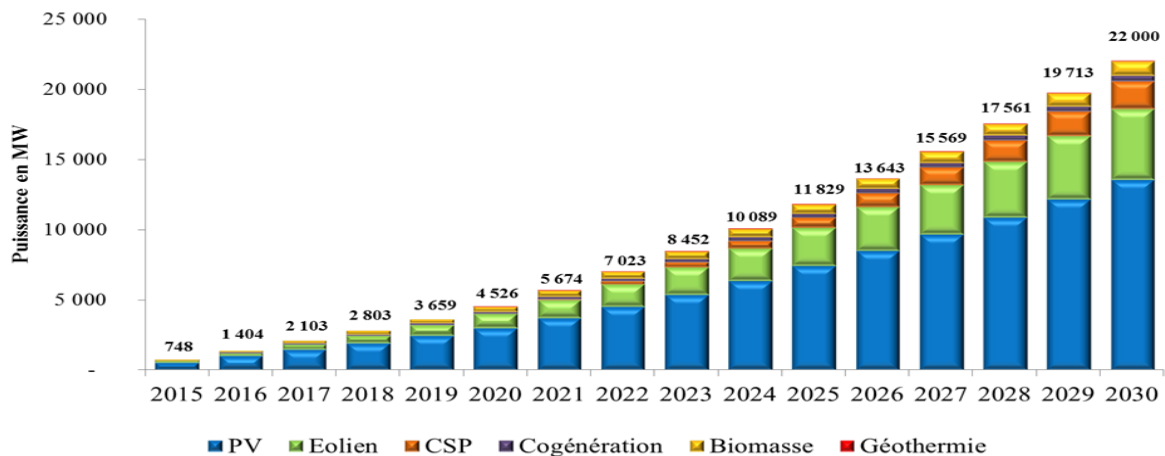
الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

61% من إجمالي القدرات المركبة المستهدفة، تليها طاقة الرياح بنسبة تفوق 22%. ويعكس هذا التوجه إرادة سياسية واضحة للاستفادة من الإمكانيات الطبيعية الهائلة التي تزخر بها الجزائر، خصوصًا من حيث الإشعاع الشمسي وقوة الرياح لا سيما في المناطق الجنوبية مع إدماج تدريجي لمصادر أخرى ذات طابع تكميلي كالكتلة الحيوية والطاقة الحرارية الجوفية.، وذلك ضمن رؤية متكاملة للتحويل الطاقوي المستدام.

تُدعم التوجهات الاستراتيجية للبرنامج الوطني للطاقات المتجددة بالتمثيل البياني الموضح في الشكل رقم (34)، الذي يُجسد التدرج السنوي في القدرات المركبة خلال الفترة 2015-2030. يُبرز الشكل الارتفاع المتواصل في القدرة الإنتاجية الإجمالية، التي انتقلت من 748 ميغاواط سنة 2015 إلى 22,000 ميغاواط بحلول عام 2030. ويُظهر التوزيع التكنولوجي تفوق الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) بوصفها الركيزة الأساسية لهذا البرنامج، تليها طاقة الرياح، ثم الطاقة الشمسية المركزة (CSP)، فالكتلة الحيوية، فالتوليد المشترك، وأخيرًا الطاقة الحرارية الجوفية، التي تمثل مساهمة محدودة نسبيًا في المزيج الطاقوي.

يعكس هذا المسار التحويلي توجهًا استراتيجيًا مبنياً على استغلال أمثل للإمكانيات الطبيعية التي تزخر بها الجزائر، خاصة في مجال الإشعاع الشمسي وطاقة الرياح، المتوفرة بوفرة في المناطق الجنوبية والهضاب العليا. كما يُبرز النسق التصاعدي في القدرات المركبة اعتماد الدولة على خطة تطبيق تدريجية ومدروسة، تراعي الخصائص الواقعية للبيئة الاقتصادية والتقنية، وتوازن بين الطموحات الوطنية في تطوير الطاقات المتجددة وبين الإمكانيات المتاحة من حيث البنى التحتية، والتمويل، ونقل التكنولوجيا. ويجسد هذا التدرج في الإنجاز التزامًا مؤسسيًا بتحقيق انتقال طاقوي متوازن، يقوم على تنويع مصادر الطاقة وتخفيض الاعتماد على الوقود الأحفوري، ضمن رؤية وطنية تهدف إلى بناء نموذج طاقوي مستدام ومرن.

الشكل رقم (35): تطور القدرات المركبة لإنتاج الطاقة المتجددة في الجزائر



المصدر: الموقع الرسمي لوزارة الطاقة و المناجم والطاقات المتجددة: <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>

وتهدف استراتيجية الجزائر في هذا المجال إلى تطوير صناعة حقيقية للطاقات المتجددة، تكون مرتبطة ببرنامج

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

للتكوين وتراكم المعارف¹، مما سيمكن مستقبلاً من توظيف الكفاءات الجزائرية المحلية، خاصة في مجالات الهندسة وإدارة المشاريع. وسيساهم برنامج الطاقات المتجددة، الموجه لتلبية حاجيات السوق الوطني من الكهرباء، في خلق عدة آلاف من مناصب الشغل المباشرة وغير المباشرة².

ويتضح من خلال هذه المعطيات أن تجسيد الأهداف الوطنية في مجال الطاقات المتجددة يظل مرهوناً بتعزيز الإطار التشريعي والمؤسسي، وتوفير مناخ استثماري جذاب، فضلاً عن نقل التكنولوجيا وتوطين الصناعات الطاقوية النظيفة. كما يُعد دعم البحث العلمي وبناء القدرات البشرية من الشروط المحورية لضمان استدامة هذا التحول وتحقيق السيادة الطاقوية على المدى البعيد.

ثانياً: الإجراءات التحفيزية³

يخضع تشجيع استعمال الطاقات المتجددة في الجزائر للقانون رقم 04-09 المؤرخ في 14 أوت 2004، والذي ينص على نظام منح علاوات إعادة الشراء (نظام تعويضات تشجيعية). كما تم اعتماد المرسوم التنفيذي رقم 13-218 المؤرخ في 18 جوان 2013، والذي يحدد شروط منح العلاوات المرتبطة بتكاليف تنويع إنتاج الكهرباء، وقد نُشر هذا المرسوم في الجريدة الرسمية رقم 33 بتاريخ 26 جوان 2013.

وقد أصدرت الجزائر مرسوماً تنفيذياً آخر رقم 15-69 بتاريخ 11 فيفري 2015 يحدد إجراءات منح شهادات المنشأ للطاقات المتجددة، وكيفية استخدام هذه الشهادات، وهو آلية تهدف إلى تخصيص علاوات لتكاليف تنويع إنتاج الكهرباء. وتُستند هذه الشهادات من قبل لجنة تنظيم الكهرباء والغاز.

وفيما يخص تمويل مشاريع الطاقات المتجددة، فقد تم إنشاء صندوق خاص لهذا الغرض تحت اسم "الصندوق الوطني للطاقات المتجددة والتوليد المشترك للطاقة" (FNERC)، ويمول هذا الصندوق بنسبة 1% من إجمالي الإيرادات البترولية. كما تم تحديد كيفية تسيير هذا الحساب بموجب المرسوم رقم 11-423 المؤرخ في 8 ديسمبر 2011. وقد صدر قرار وزاري مشترك بتاريخ 28 أكتوبر 2012 يتعلق بكيفيات متابعة وتقييم الحساب الائتماني رقم 302131 المعنون "الصندوق الوطني للطاقة المتجددة والتوليد المشترك".

أما فيما يخص عقود شراء الطاقة (PPAs)، فقد تم تحديدها بموجب قرارات وزارية مؤرخة في 2 فيفري 2014، والتي تشمل إنتاج الكهرباء من مشاريع الطاقة الشمسية الفوتوفولطية والرياح، مع ضمان تسعيرات لمدة 20 سنة. ومن المنتظر أن يتم تمويل مشاريع أخرى وتقنيات جديدة بعد سنة 2021 بنسبة تتراوح بين 50% و90%، وذلك حسب نوعية التكنولوجيا المعتمدة من طرف الصندوق.

¹ نذير غانية، أحمد نصير، يونس زين، برنامج المخطط الوطني للطاقات المتجددة 2011/2030 كاستراتيجية وطنية للخروج من التبعية النفطية وضمان أمن طاقي مستدام في الجزائر، مجلة العلوم الإدارية العراقية، مجلة فصلية متخصصة محكمة، المجلد: 3 العدد: 2 لسنة: 2019، ص 525

² الموقع الرسمي لوزارة الطاقة و المناجم والطاقات المتجددة: <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>

³ : Les energies renouvelables en mediterranee, Tendances, perspectives et bonnes pratiques, 2018, MEDENER/OME avec le soutien de l'ADEME P.20,21

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

ينبغي أن يخضع الصندوق لقانونين تنفيذيين مشتركين جديدين تم اعتمادهما في عام 2017، يتعلق الأول بتحديد مصادر التمويل وطرق إنفاقها، بينما يخص الثاني إجراءات المتابعة والتقييم. وفيما يتعلق بالطاقات المتجددة والتوليد المشترك للطاقة، فإن التمويل الرئيسي للصندوق يأتي من نسبة 1% من الإتاوات البترولية. أما فيما يخص مصادر تمويل كفاءة الطاقة، فهي تعتمد أساساً على الإعانات التي تقدمها الدولة، بالإضافة إلى عائدات الضريبة الوطنية على استهلاك الطاقة والرسوم المفروضة على الأجهزة المستهلكة للطاقة.

أما فيما يخص أسعار الشراء المحددة للطاقة المنتجة من المصادر المتجددة، فهي تعتمد على القدرة المركبة وتختلف حسب مرحلتين: المرحلة الأولى تخص السنوات الخمس الأولى من التشغيل، والمرحلة الثانية تشمل السنوات الخمس عشرة المتبقية. وتُحسب هذه الأسعار بناءً على عدد ساعات التشغيل السنوي، بحيث يُمنح أعلى سعر في حالة التشغيل الأدنى خلال السنة، والعكس صحيح.

جدول رقم (10) : مستويات تعريفية الشراء للطاقة المنتجة من مصادر متجددة في الجزائر

	Capacité (MW)	Tarif d'achat (Feed-in Tariff) (DA/kWh)	
		Phase I (5 premières années)	Phase II (15 années après phase I)
Eolien	1 to 5 MW	13.10	9.55 – 16.66
	> 5 MW	10.48	7.64 – 13.33
Solaire PV	1 to 5 MW	15.94	11.80 – 20.08
	> 5 MW	12.75	9.44 – 16.06

Source : **Les énergies renouvelables en mediterranee, Tendances, perspectives et bonnes pratiques, 2018**, MEDENER/OME avec le soutien de l'ADEME P.20

في إطار تحفيز الاستثمارات في مجال الطاقات المتجددة، اعتمدت الجزائر آلية "تعريفية الشراء المضمونة (Feed-in Tariff)" كأداة تنظيمية لضمان عائدات مستقرة ومنتظمة للمنتجين، لا سيما في مرحلتها الأولى والثانية. ويبيّن الجدول رقم (10) تفاصيل هذه التعريفات حسب نوع التكنولوجيا (الرياح والطاقة الشمسية الكهروضوئية) وسعة الإنتاج المركبة. ففي المرحلة الأولى (السنوات الخمس الأولى)، حُدّدت تعريفية الشراء بالنسبة لمحطات طاقة الرياح ذات سعة من 1 إلى 5 ميغاواط بـ 13.10 دج/ك.و.س، لتتخفّض في المرحلة الثانية إلى ما بين 9.55 و 16.66 دج/ك.و.س. أما المحطات التي تتجاوز 5 ميغاواط، فقد سُعرت عند 10.48 دج/ك.و.س في البداية، ثم تراوحت بين 7.64 و 13.33 دج/ك.و.س بعد ذلك.

في المقابل، استفادت الطاقة الشمسية الكهروضوئية من تعريفات أكثر تحفيزاً، تعكس التوجه الاستراتيجي نحو تعزيز استغلال هذا المورد، حيث بلغت 15.94 دج/ك.و.س للمحطات الصغيرة (1-5 ميغاواط)، و 12.75 دج/ك.و.س للمحطات الكبرى، في المرحلة الأولى، لتتراوح القيم في المرحلة الثانية بين 11.80 و 20.08 دج/ك.و.س و 9.44 و 16.06 دج/ك.و.س على التوالي.

تُبرز هذه السياسة التسعيرية التدرج المدروس في الحوافز، بما يتماشى مع حجم المشاريع ومدة استغلالها، ما يُسهم في

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

تقليل المخاطر المالية للمستثمرين من جهة، ويعكس وعي الدولة بأهمية ضبط التكلفة الإجمالية على المدى الطويل من جهة أخرى. وتُعد هذه الآلية من الركائز الأساسية لإنجاح الانتقال الطاقوي وتعزيز جاذبية السوق الوطنية لمشاريع الطاقات المتجددة.

➤ إجراءات تحفيزية أخرى:¹

تماشيا مع أهداف تطوير الإطار المؤسسي والتنظيمي للطاقات المتجددة، اعتمدت الجزائر جملة من الإجراءات التحفيزية المكملّة لتدابير الدعم المالي والتسعيري، بهدف تهيئة بيئة مواتية وجاذبة للاستثمار. ومن بين أبرز هذه التدابير، توفير الأوعية العقارية المؤهلة لإنشاء محطات إنتاج الكهرباء من مصادر متجددة، وذلك من خلال تسهيل إجراءات تخصيص الأراضي في المناطق ذات الإمكانيات الطاقوية العالية. كما تم إقرار آلية لمرافقة المستثمرين خلال كافة مراحل المشروع، لاسيما في ما يتعلق بالحصول على التراخيص الإدارية والفنية، بما يقلل من العراقيل البيروقراطية المحتملة.

إضافة إلى ذلك، تم الشروع في إجراء عمليات مسح وتحديد دقيق للإمكانيات الطاقوية على المستوى الوطني، تشمل الإشعاع الشمسي، وسرعة الرياح، والموارد الحرارية الجوفية، وذلك لتوجيه الاستثمارات نحو المناطق الأكثر ملاءمة من الناحية التقنية والاقتصادية. وفي سياق مشابه، تم إطلاق مشاريع نموذجية تجريبية في مختلف المجالات التكنولوجية (كالطاقة الشمسية والريحية)، بهدف تقييم الأداء الفعلي ونقل المعارف التقنية والتشغيلية.

ومن جهة أخرى، تم إنشاء هيكل وهيئات مختصة في اعتماد ومراقبة الجودة والأداء للمكونات والتجهيزات والعمليات المتعلقة بإنتاج الكهرباء من مصادر متجددة أو من أنظمة التوليد المشترك، بما يعزز موثوقية التجهيزات ويضمن الامتثال للمعايير الدولية. كما تشمل الإجراءات المبرمجة برنامجًا لتكوين وتأهيل الموارد البشرية من خلال المعاهد المتخصصة، مع إشراك الجامعات ومراكز البحث العلمي في تكوين المهندسين وتطوير القدرات التقنية الوطنية.

وفي الجانب التحفيزي الضريبي، تم إقرار إعفاءات جمركية وتخفيضات على ضريبة القيمة المضافة (TVA) تخص المكونات المستوردة، والمواد الأولية، والمنتجات نصف المصنعة المستعملة في تصنيع تجهيزات الطاقات المتجددة ومستلزمات تحسين الفعالية الطاقوية، بما يُسهّم في تقليص كلفة الاستثمار وتشجيع الإدماج الصناعي المحلي في هذا المجال الاستراتيجي.

ثالثا: الاستراتيجية الوطنية الجديدة لتطوير الطاقات المتجددة لإنتاج الكهرباء²

تماشيا مع المساعي الوطنية الرامية إلى تسريع وتيرة تنفيذ البرنامج الوطني لتطوير الطاقات المتجددة، وبالنظر إلى الانخفاض الملموس في تكاليف التجهيزات والمعدات على الصعيد العالمي، واستلهامًا من النماذج الدولية التي أثبتت فعالية اعتماد آلية المناقصات كوسيلة لتنشيط الاستثمار في هذا المجال، بادرت وزارة الطاقة الجزائرية سنة 2016 إلى اعتماد استراتيجية جديدة تُكرّس نظام المناقصات كأداة تنظيمية رئيسية في تطوير قطاع الطاقات المتجددة. وقد تم تأطير هذه

¹ الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية، وزارة الطاقة و المناجم والطاقات المتجددة، الطاقات الجديدة والمتجددة وإدارة الطاقة المتوفر على:

<https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>

² الموقع الرسمي لوزارة الطاقة و المناجم والطاقات المتجددة:- <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>

[renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie](https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie)

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الآلية من الناحية القانونية بموجب المرسوم التنفيذي رقم 17-98 الصادر بتاريخ 26 فبراير 2017، والذي يحدد الشروط والإجراءات المتعلقة بتنظيم المناقصات الخاصة بإنتاج الكهرباء من مصادر متجددة.

ترتكز هذه الاستراتيجية على مقارنة شمولية تهدف إلى تهيئة الموارد الطبيعية المتاحة، وتحقيق أهداف التنمية المستدامة، مع العمل على إرساء قاعدة صناعية محلية متخصصة في إنتاج مكونات وتجهيزات الطاقات المتجددة، بما يساهم في تنويع الاقتصاد الوطني وتقليص الاعتماد على العائدات البترولية. كما يُتوقع من آلية المناقصات أن تُعزز المنافسة بين المتعاملين الاقتصاديين، مما يؤدي إلى تخفيض تكاليف إنتاج الكيلوواط/ساعة، والحد من فرص تحقيق أرباح غير مبررة. وينص المرسوم التنفيذي سالف الذكر على صيغتين أساسيتين لإطلاق المناقصات، ما يعكس إرادة السلطات التنظيمية في توفير مرونة تُمكن من تكييف العروض مع متطلبات السوق والحدوى التقنية والاقتصادية للمشاريع.

➤ صيغة المناقصة الموجهة للمستثمرين:

تُعد المناقصة الموجهة للمستثمرين من بين الآليات التنظيمية الأساسية المعتمدة من طرف وزارة الطاقة لتحسيد المشاريع الكبرى في مجال الطاقات المتجددة، لاسيما تلك المتعلقة بإنشاء واستغلال محطات كهربائية ذات قدرات إنتاجية مرتفعة. وتستهدف هذه الصيغة المشاريع التي تتجاوز قدرتها الإنتاجية السنوية 20 جيجاواط/ساعة لكل موقع، ما يبرز طابعها الاستراتيجي ضمن المخطط الوطني للتحويل الطاقوي.

تُطلق هذه المناقصات مباشرة من قبل الوزارة الوصية، بعد تحديد دقيق للمواقع المؤهلة لإنشاء المحطات، استنادا إلى دراسات تقنية وبيئية مسبقة. وتُخصص هذه المواقع لمستثمرين يتم اختيارهم وفق معايير موضوعية وشفافة، تأخذ في الاعتبار الجوانب المالية والتقنية للمتعاملين، بما يضمن إنجاز مشاريع ذات موثوقية عالية وفعالية اقتصادية معتبرة، مع المساهمة في تعزيز الإنتاج الوطني للكهرباء من مصادر متجددة.

➤ صيغة المناقصة عن طريق المزاد:

تمثل صيغة المزاد أحد الأطر التنظيمية المكملّة التي تهدف إلى توسيع مساهمة الطاقات المتجددة ضمن المزيج الطاقوي الوطني. وتُشرف على هذه الآلية اللجنة الجزائرية لتنظيم الكهرباء والغاز (CREG) وتُخصص هذه الصيغة لإنجاز واستغلال محطات إنتاج كهرباء من مصادر متجددة ذات قدرة إنتاجية متوسطة إلى صغيرة، إذ تتراوح الطاقة السنوية المستهدفة لكل موقع بين 10 و20 جيجاواط/ساعة.

وتنص هذه الصيغة على ضرورة إعداد دفتر شروط مفصل يتضمن كافة الجوانب التقنية والمالية للمشروع، ويُعد بمثابة المرجعية القانونية لعملية المزاد. وفي هذا السياق، يتحمل المستثمر مسؤولية توفير الوعاء العقاري المناسب لإنشاء المشروع، ما يُجسد توجه السلطات العمومية نحو إشراك القطاع الخاص بفعالية في تمويل وتنفيذ مشاريع الطاقات المتجددة. كما تُساهم هذه الآلية في خلق مناخ تنافسي مفتوح يتيح الحصول على عروض ذات جدوى اقتصادية عالية، ويُعزز فرص التنمية المحلية المستدامة والمتوازنة جغرافيًا، بما يدعم الأمن الطاقوي الوطني ويساهم في بلوغ أهداف الانتقال الطاقوي.

الفرع الثاني: البرنامج الوطني للفعالية الطاقوية واقتصاد الطاقة

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

أولاً: البرنامج الوطني للفعالية الطاقوية¹:

في سياق التوجهات الوطنية الرامية إلى تعزيز الاستدامة وتقليص التبعة للموارد الطاقوية التقليدية، يُعدّ البرنامج الوطني للفعالية الطاقوية إحدى الركائز الأساسية لسياسة الدولة في مجال الانتقال الطاقوي. ويجسد هذا البرنامج التزام الجزائر بتبني نموذج استهلاك طاقي أكثر عقلانية ومسؤولية، يهدف إلى الحفاظ على نفس مستوى الإنتاج والخدمات، مع تقليص حجم الطاقة المستهلكة.

ويعتمد البرنامج على مقارنة مزدوجة تجمع بين الحلول التقنية والسلوكية، من خلال تحسين أداء التجهيزات والمعدات، وتشجيع استخدام مصادر طاقوية ذات مردودية عالية. كما يسعى إلى دمج مبادئ الفعالية الطاقوية ضمن قطاعات رئيسية تمثل القسط الأكبر من الاستهلاك الوطني، وهي قطاعات البناء، والنقل، والصناعة. ويواكب ذلك دعم لظهور صناعة محلية متخصصة في إنتاج تجهيزات ذات كفاءة طاقوية عالية، على غرار المصاييح الاقتصادية، وسخانات المياه الشمسية، ومواد العزل الحراري، بما يعزز النسيج الصناعي الوطني ويخلق فرصاً جديدة للنمو.

وتُعَوّل الدولة على هذا التوجه للعب دور محوري في توازن المعادلة الطاقوية الوطنية، خاصة في ظل تنامي الطلب على الطاقة، لاسيما في القطاعين السكني والصناعي. ومن شأن تنفيذ هذه الخطة أن يفتح آفاقاً اقتصادية جديدة، ويُهدّد لقيام سوق ناشئة ومستدامة في مجال الفعالية الطاقوية. كما يُرتقب أن تعود آثار هذا التوجه بالنفع على المجتمع ككل، من خلال تحسين جودة الحياة، وتعزيز الأمن الطاقوي، وتقليص التكاليف الطاقوية، إلى جانب المنافع البيئية المرتبطة بتقليص انبعاثات الغازات المسببة للاحتباس الحراري.

من الناحية القانونية والتنظيمية، يُستند في تنفيذ هذه الاستراتيجية إلى القانون رقم 09-99 الصادر بتاريخ 28 جوان 1991، المتعلق بالتحكم في الطاقة، والذي يُعد المرجعية الأساسية التي تُحدد شروط وآليات ترشيد الاستهلاك الطاقوي على المستوى الوطني. ويُسند تنفيذ البرنامج إلى عدد من الهيئات المتخصصة، في مقدمتها الوكالة الوطنية لترقية وترشيد استخدام الطاقة (APRUE)، بدعم من الصندوق الوطني للتحكم في الطاقة (FNME)، والبرنامج الوطني لترشيد استهلاك الطاقة (PNME)، إلى جانب اللجنة المشتركة بين القطاعات لترشيد الطاقة (CIME).

وقد تم تحديد الإطار التنفيذي لهذا البرنامج من خلال المرسوم الصادر سنة 2004، والذي منح لوكالة APRUE صلاحيات تنفيذ هذه الاستراتيجية تحت إشراف وزارة الطاقة والمناجم، وذلك عبر وضع خطة شاملة للتحكم في الطلب على الطاقة، وتقييم الإمكانيات الوطنية في هذا المجال، وتحديد أهداف قصيرة ومتوسطة وطويلة المدى.

أما من حيث تمويل مشاريع الفعالية الطاقوية، فيعتمد البرنامج على موارد الصندوق الوطني للتحكم في الطاقة، الذي يوفر آليات تمويل متنوعة تشمل الإعانات والقروض المدعومة. وتغطي هذه المشاريع مختلف أنواع الطاقة المستخدمة، مثل الكهرباء والوقود، وتشمل مجالات تطبيق متعددة كالتدفئة والإنارة، مع استهداف قطاعات واسعة تشمل الصناعة،

¹ الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية، وزارة الطاقة و المناجم والطاقات المتجددة، الطاقات الجديدة والمتجددة وإدارة الطاقة المتوفر على:

<https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

والفلاحة، والخدمات. وبهذا، يطمح البرنامج إلى تعميم ممارسات الفعالية الطاقوية على امتداد الاقتصاد الوطني، وتحقيق تحول طاقي فعلي يُواكب التحديات التنموية والبيئية الراهنة.

ثانيا: المجالات القطاعية ذات الأولوية في استراتيجية الفعالية الطاقوية:¹

ضمن توجه الجزائر نحو تحقيق انتقال طاقي مستدام، تم تحديد عدد من القطاعات الاستراتيجية ذات الأولوية في إطار السياسة الوطنية للفعالية الطاقوية، وذلك بالنظر إلى مساهمتها الكبيرة في استهلاك الطاقة وإمكانيات الترشيد التي تتيحها. وتُمثل هذه القطاعات مرتكزا أساسيا في تنفيذ البرامج الوطنية للتحكم في الطلب على الطاقة، وتشمل على وجه الخصوص قطاعات البناء، النقل، والصناعة.

1- قطاع البناء:

يُعد قطاع البناء من أكثر القطاعات استهلاكًا للطاقة، وهو ما يبرر تركيز الاستراتيجية الوطنية على هذا المجال كأولوية قصوى ضمن برنامج الفعالية الطاقوية. وينبع هذا التوجه من حجم الاستهلاك المتزايد المرتبط بأنشطة التدفئة، التبريد، والإنارة، وكذا من الفرص الكبيرة التي يتيحها القطاع لتحقيق اقتصاد ملموس في الطاقة دون المساس بجودة الخدمات أو الراحة داخل المباني.

ترتكز التدخلات في هذا القطاع على تعميم استخدام تقنيات العزل الحراري في كل من المباني الجديدة والقائمة، وذلك من خلال فرض معايير تصميم معماري تأخذ بعين الاعتبار النجاعة الطاقوية منذ المراحل الأولى للمشروع. كما تعمل السلطات العمومية على تشجيع استعمال تجهيزات ذات كفاءة طاقوية عالية، من قبيل سخانات المياه بالطاقة الشمسية والمصاييح الاقتصادية، باعتبارها حلاً عملياً لتحسين كفاءة استهلاك الطاقة داخل الوحدات السكنية. إلى جانب ذلك، يُمثل تطوير صناعة محلية متخصصة في إنتاج مواد العزل والتجهيزات ذات النجاعة الطاقوية رهاناً استراتيجياً لتعزيز الاكتفاء الذاتي وتحفيز الاقتصاد الأخضر، من خلال خلق قيمة مضافة وفرص عمل مستدامة.

وقد قُدرت النتائج المنتظرة من هذا المحور، في أفق سنة 2030، بتحقيق وفر طاقي إجمالي يزيد عن 30 مليون طن

معادل نفط (TEP)، موزعة على النحو التالي:

- ✓ العزل الحراري: أكثر من 7 ملايين TEP ؛
- ✓ سخانات المياه الشمسية: حوالي 2 مليون TEP ؛
- ✓ المصاييح الاقتصادية: قرابة 20 مليون TEP ؛
- ✓ الإنارة العمومية: نحو 1 مليون TEP ، مع أثر إيجابي مباشر على ميزانيات الجماعات المحلية.

2- قطاع النقل:

¹ الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية، وزارة الطاقة و المناجم والطاقات المتجددة، الطاقات الجديدة والمتجددة وإدارة الطاقة المتوفر على:

<https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

يشكل قطاع النقل أحد أكثر المجالات حيوية وتعقيداً ضمن معادلة الفعالية الطاقوية، نظراً لتزايد الطلب عليه بشكل مستمر، واعتماده شبه الكلي على المنتجات النفطية، مما يجعله مصدراً رئيسياً لانبعاثات الغازات الملوثة. واستجابة لهذه التحديات، سطرت الاستراتيجية الوطنية مجموعة من التدابير الرامية إلى ترشيد استهلاك الطاقة في هذا القطاع، تركز على تشجيع استعمال أنواع وقود بديلة نظيفة وأقل كلفة، لاسيما الغاز البترولي المميع (GPLC) والغاز الطبيعي المضغوط (GNC).

ويُراد من خلال هذا التحول التقني والتدريجي تقليص الاعتماد على الوقود الأحفوري الثقيل، لا سيما المازوت، والحد من التلوث الهوائي في المناطق الحضرية، بما يُسهم في تحسين الصحة العامة وتعزيز جودة الحياة. وتُرافق هذه السياسات حزمة من الحوافز الاقتصادية الموجهة إلى الناقلين الخواص والمهنيين، قصد تسريع وتيرة التحول نحو حلول نقل مستدامة. وتُشير التقديرات إلى أن الإجراءات المتخذة في هذا المجال ستمكّن من تحقيق وفر طاقي يُقدّر بأكثر من 16 مليون طن معادل نفط (TEP) في أفق سنة 2030، ما يُعزز مسار الانتقال الطاقي ويُكرّس ثقافة النقل النظيف داخل النسيج الحضري الجزائري.

3- القطاع الصناعي:

يمثل القطاع الصناعي إحدى الركائز الأساسية في الاقتصاد الوطني، غير أنه يُعد كذلك من بين أكبر مستهلكي الطاقة، ما يجعله مجالاً ذا أولوية قصوى في جهود الفعالية الطاقوية. وفي ظل التوقعات التي تشير إلى تزايد النشاط الصناعي وتوسع القاعدة الإنتاجية خلال السنوات المقبلة، فقد تم تحديد هدف طاقي يتجاوز 30 مليون طن معادل نفط (TEP) في أفق 2030.

وتقوم الاستراتيجية المعتمدة على تفعيل عمليات التدقيق الطاقي الممنهج داخل المؤسسات الصناعية، من أجل تشخيص مواضع الهدر بدقة، واقتراح حلول تقنية وتنظيمية ملائمة. كما يتم دعم هذه العملية بآليات تمويل عمومية موجهة لتمكين المؤسسات من تحديث تجهيزاتها واعتماد تقنيات أكثر كفاءة، مع تخفيف الأعباء الاستثمارية المرتبطة بعمليات التحول التكنولوجي.

وتسعى هذه التدابير إلى تحقيق تحول بنيوي في الثقافة الصناعية المرتبطة باستهلاك الطاقة، بما يُعزز من تنافسية

المؤسسات الوطنية في الأسواق المحلية والدولية، ويسهم في تكريس مبادئ الاقتصاد الأخضر والاستدامة الصناعية.

ثالثاً: النتائج المتوقعة من تنفيذ البرنامج الوطني لتحسين الفعالية الطاقوية:¹

يتوقع أن يُسهم تنفيذ البرنامج الوطني لتحسين الفعالية الطاقوية في تحقيق مجموعة من النتائج النوعية ذات الأثر

¹ الموقع الرسمي لوزارة الطاقة و المناجم والطاقات المتجددة: <https://www.energy.gov.dz/?article=resultats-attendus>

(تاريخ الإطلاع: 2025/04/20)

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

البالغ على الصعيدين الاقتصادي والبيئي. فعلى المستوى الطاقوي، من المنتظر أن يساهم البرنامج في توفير ما يُعرف بـ "الوديعة الطاقوية"، والتي تُقدّر بحوالي 63 مليون طن معادل نفط (TEP) في أفق سنة 2030. وتُعادل هذه الكمية من الطاقة، وفقًا للأسعار الحالية للتصدير، قيمة مالية تناهز 38 مليار دولار أمريكي، وهو ما يعكس الأهمية الاستراتيجية للترشيد الطاقوي كأداة فعالة لتعزيز الأمن الطاقوي الوطني وتقليل الاعتماد على الموارد التقليدية.

وفيما يتعلق بالإنتاج الكهربائي، يُرتقب أن يساعد البرنامج في تحنّب إنشاء محطات جديدة لتوليد الكهرباء بطاقة إجمالية تتجاوز 1500 ميغاواط، وهو ما يُترجم إلى وفورات مالية تُقدّر بحوالي 2 مليار دولار. ويُعد هذا المؤشر دليلاً ملموساً على الجدوى الاقتصادية التي ينجم عنها تحسين كفاءة استهلاك الطاقة، لا سيما في القطاعات ذات الاستهلاك المرتفع كالقطاع الصناعي والسكني.

أما من الناحية البيئية، فمن المتوقع أن يُسهم البرنامج في تقليص انبعاثات غازات الدفيئة، وفي مقدمتها انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO_2)، وذلك بحجم إجمالي يصل إلى حوالي 193 مليون طن من الانبعاثات التي يمكن تجنّبها بحلول سنة 2030. وتُعادل هذه الكمية، عند تقييمها وفق آليات تسعير الكربون المعتمدة عالمياً، قيمة مالية تقارب 1.1 مليار دولار، ما يُبرز البعد البيئي العميق لهذا البرنامج، ويدعم مساعي الجزائر في الانخراط ضمن الجهود الدولية الرامية إلى مكافحة التغيرات المناخية.

وتُجسّد هذه المؤشرات، مجتمعة، الإمكانيات الكبيرة التي يحتويها البرنامج الوطني للفعالية الطاقوية، سواء من حيث دعم مسار الانتقال الطاقوي المستدام، أو من خلال تقليص الأثر البيئي للأنشطة الاقتصادية. ويتضح ذلك بوضوح من خلال المعطيات الواردة في الجدول والشكل الآتيين:

جدول رقم (11) موجز لانبعاثات CO_2 التي يتعين تجنبها بحلول عام 2030

الوحدة: مليون طن من ثاني أكسيد الكربون

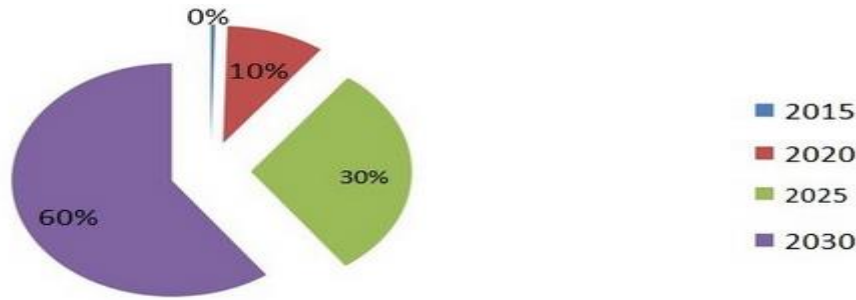
السنوات	2015	2020	2025	2030
تجنب الانبعاثات	1.1	32.1	95.9	193.3

المصدر: الموقع الرسمي لوزارة الطاقة و المناجم والطاقات المتجددة: <https://www.energy.gov.dz/?article=resultats-attendus>

(تاريخ الإطلاع: 2025/04/20)

شكل رقم (36) الانبعاثات الكربونية التي تم تجنبها (مقدّرة بملايين الأطنان من CO_2)

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر



المصدر: جميلة منجيل، دور البدائل الاستثمارية في هيكلة جديدة لتمويل الاقتصاد الجزائري - دراسة حالة الطاقات المتجددة في الجزائر، أطروحة لنيل شهادة دكتوراه
الطور الثالث في العلوم الاقتصادية، جامعة فرحات عباس سطيف-1، الجزائر، 2018-2019، ص 254

يتضح من الجدول رقم (11) والشكل البياني المرافق له، أنّ الجهود المبذولة لتقليص انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في الجزائر، ضمن إطار التحول الطاقوي، قد شهدت تطوراً تدريجياً ملحوظاً خلال الفترة الممتدة من سنة 2015 إلى غاية التقديرات المستهدفة لسنة 2030. فقد بدأت هذه الجهود بوتيرة متواضعة سنة 2015، حيث لم تتجاوز الانبعاثات المتجنبة 1.1 مليون طن، ما يعادل نسبة 0% من إجمالي الانبعاثات المقدرة للفترة كاملة، وهو ما يعكس بداية ضعيفة للاستثمار في الطاقات المتجددة آنذاك.

أما سنة 2020، فقد سجلت تحسناً نسبياً، مع تجنب ما يقارب 32.1 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون، أي بنسبة 10% من إجمالي الهدف النهائي، مما يشير إلى بداية تفعيل بعض المشاريع الطاقوية البديلة، رغم أنها لا تزال في مراحلها الأولى.

وفي سنة 2025، يرتفع منحى الأداء بشكل ملحوظ، حيث بلغت الانبعاثات المتجنبة 95.9 مليون طن، أي ما يعادل 30% من المجموع الكلي، مما يدل على دخول مشاريع الطاقات المتجددة مرحلة أكثر نضجاً وفاعلية، مع بداية ظهور نتائج ملموسة على أرض الواقع.

لكن القفزة الكبرى تبرز في أفق سنة 2030، أين يُتوقع تجنب 193.3 مليون طن من ثاني أكسيد الكربون، وهو ما يمثل 60% من الإجمالي المستهدف، مما يعكس الرهان الكبير الذي تعول عليه الدولة الجزائرية في السنوات القادمة لتحقيق تحول طاقوي شامل ومستدام. ويعني ذلك أن أغلب الجهود والنتائج سيتم حصدتها في نهاية الفترة، ما يطرح تساؤلات جوهرية حول قدرة البنية التحتية الحالية والسياسات الطاقوية على مواكبة هذا التسارع في الأداء.

إلى جانب المكاسب الاقتصادية والبيئية التي يوفرها البرنامج الوطني للطاقات المتجددة وتحسين الفعالية الطاقوية، يُرتقب أن يساهم هذا البرنامج في خلق أكثر من 500,000 منصب شغل دائم، سواء بشكل مباشر من خلال إنجاز مشاريع الطاقات المتجددة، أو بشكل غير مباشر عبر الخدمات المرتبطة بها. وتشمل هذه المناصب مختلف التخصصات، مثل تركيب وصيانة الألواح الشمسية، تشغيل محطات توليد الكهرباء من مصادر متجددة، تطوير أنظمة العزل الحراري

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

للمباني، وتحديث شبكات الإنارة العمومية باستخدام تقنيات موفرة للطاقة، إضافة إلى الوظائف المرتبطة بالتكوين والتدريب في مجالات الطاقات النظيفة.

ويمثل هذا الأثر الاجتماعي أحد المؤشرات الجوهرية على البعد التنموي للبرنامج، وعلى إمكانيته في تقليص نسب البطالة، خاصة في المناطق الداخلية والجنوبية التي تعاني من ضعف النشاط الصناعي وقلة فرص التشغيل. كما يمكن أن يسهم هذا التوجه في خلق ديناميكية اقتصادية محلية جديدة، تدور حول استغلال الإمكانيات الطبيعية المتوفرة، مثل الإشعاع الشمسي والرياح، وتحويلها إلى مصدر للنمو المستدام.

وعند تجميع هذه المؤشرات البيئية والاجتماعية، يظهر بوضوح أن البرنامج يحمل في طياته إمكانيات تحول هيكلية عميق في المنظومة الطاقوية الوطنية، إذ لا يقتصر الأمر على تقليل التبعة للوقود الأحفوري، بل يشمل أيضاً تنويع مصادر الطاقة، وتحقيق أمن طاقي طويل الأمد، والمساهمة في التوجه نحو اقتصاد أخضر منخفض الانبعاثات.

ورغم أن بلوغ نسبة 100% من الاستدامة الطاقوية في أفق 2030 يُعتبر هدفاً طموحاً للغاية، إلا أنه يبقى ممكناً من الناحية النظرية، شريطة توفر إرادة سياسية قوية، وتعبئة الموارد المالية والبشرية، وتوفير بيئة تنظيمية مناسبة، إلى جانب تسريع وتيرة المشاريع الطاقوية الكبرى.

ومن بين الأدلة على جدوى هذا التوجه، أن الجزائر تمتلك إمكانيات طبيعية هائلة غير مستغلة بعد. فعلى سبيل المثال، يمكن عبر استغلال حوالي 130,000 كيلومتر مربع من الأراضي الصحراوية، وهي مساحات شاسعة غير مأهولة ومشمسة طوال العام، تركيب أنظمة شمسية كهروضوئية قادرة على إنتاج كميات ضخمة من الكهرباء، تكفي لتغطية احتياجات الجزائر، بل وحتى بلدان مجاورة مثل تونس وليبيا، أو حتى تصدير الفائض نحو أوروبا.

وعلى الرغم من النجاحات المسجلة في مجال تطوير البنى التحتية لنقل الطاقة الأحفورية، إلا أن الجزائر لا تزال تسير بخطى بطيئة في ميدان الطاقات المتجددة. هذا التأخر يفرض إعادة النظر في السياسات العمومية المعتمدة، عبر تشجيع الاستثمار في هذا القطاع، وتسهيل الإجراءات الإدارية، وتحفيز الشراكة بين القطاعين العام والخاص، مع التركيز على إدماج هذه المشاريع ضمن مخططات التنمية الجهوية.

وفي هذا الإطار، فإن دمج الحلول المبتكرة بيئياً، كاستعمال أنظمة تدفئة وتبريد تعتمد على الطاقة الشمسية، أو إدخال تقنيات ذكية لتسيير استهلاك الكهرباء في المؤسسات العمومية، من شأنه أن يسهم في بناء منظومة طاقوية أكثر كفاءة واستدامة. ورغم أن هذا التحول يتطلب وقتاً واستثمارات كبيرة، إلا أنه يمثل ضرورة استراتيجية لضمان مستقبل طاقي مستقل، نظيف ومستدام للأجيال القادمة.¹

المطلب الثالث: المشاريع الطاقات المتجددة في الجزائر

¹ Global energy network institute (GENI), How is 100% Renewable Energy Possible for Algeria by 2030?, may 2016, p: 30.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

يمثل الانتقال إلى الطاقات المتجددة أحد الركائز الأساسية التي تبنتها الجزائر في سياق سعيها إلى تنويع مصادر الطاقة وتحقيق التنمية المستدامة. وفي هذا الإطار، بادرت الدولة إلى وضع برنامج وطني طموح يهدف إلى تطوير مشاريع متكاملة في مجالات الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، والطاقة الحرارية الجوفية، وغيرها من المصادر النظيفة. وقد تجسدت هذه الرؤية من خلال تنفيذ عدد من المشاريع الفعلية على الميدان، إلى جانب إعداد دراسات متخصصة لتحديد الجدوى الاقتصادية والتقنية لهذه المشاريع. ويهدف هذا المطلب إلى عرض أبرز الإنجازات والمبادرات المسجلة في هذا السياق، مع تسليط الضوء على الجهود المبذولة لتجسيد أهداف البرنامج الوطني للطاقات المتجددة وتحسين الفعالية الطاقوية.

الفرع الأول: المشاريع والدراسات المبرمجة في إطار برنامج الطاقات المتجددة

في إطار تنفيذ الاستراتيجية الوطنية للانتقال الطاقوي، قامت الدولة الجزائرية بإطلاق مجموعة من المشاريع الرائدة في مجال الطاقات المتجددة، إلى جانب إعداد العديد من الدراسات التقنية والاقتصادية والاستشرافية التي ترمي إلى تقييم الجدوى وتعزيز التخطيط العلمي لهذا التحول. وتمثل هذه المبادرات التجسيد العملي للإرادة السياسية والمؤسسية الرامية إلى تنويع مصادر الطاقة وتقليص التبعية للوقود الأحفوري، بما ينسجم مع الالتزامات البيئية ومتطلبات التنمية المستدامة.

أولاً: الإنجازات المحققة على أرض الواقع

يمكن عرض أبرز الإنجازات المحققة على أرض الواقع على النحو الآتي:¹

1- قامت بإنجاز أكبر برج عالمي للطاقة الشمسية والغاز في إطار شراكة الجزائر (80%) وألمانيا (20%) ببورقية تيبازة بقيمة (مليار دينار) في 2011 يتربع على مساحة (30 هكتار) تبلغ طاقته (7 ميغاواط).

2- كهربية 18 قرية في الجنوب الجزائري بالطاقة الشمسية تقدر مساحة الولايات الاربعة حوالي (1 مليون كلم) بقدرة الكلية للطاقة الكهروضوئية المركبة (453) كيلواط (1000 منزل)، إنتاج (2) ميغاواط / ساعة) حالياً.

3- محطة طاقة شمسية-غازية هجينة بقدرة 150 ميغاوات جويلية 2011 :

بناء أول محطة هجينة للطاقة الشمسية الغاز بحاسي الرمل (الأغواط). عن طريق الشراكة (جزائرية إسبانية : ABENER NEAL) سنة 2010 بالتكلفة 315 مليون أورو يتربع على مساحة (64 هكتار)؛ تقدر طاقته ب 150 ميغاواط الغاز (120 ميغاواط وشمسي 30 ميغاواط).

4- مشروع الطاقات المتجددة بالمدينة الجديدة بوغزول: تضمن برنامج تهيئة إنجاز محطة هجينة (شمسية وهوائية) تتربع على مساحة 45 هكتارا شرق المدينة تهدف إلى بلوغ نسبة (10%) من برنامج الطاقوي الوطني للطاقة المتجددة في أفق 2030 من خلال إستغلال الطاقة الشمسية المقدرة (1900 كيلواط / سا/ سنويا) ذات إشعاع سنوي (3000 سا) وسرعة الرياح التي تفوق أو تساوي (3 م / انا) والتي تفوق مدتها (4000 سا) في السنة.

¹ طبيب سعيدة، سنوسي بن عبو، إستراتيجية استغلال مصادر الطاقات المتجددة بكفؤ لضمان أمن طاقوي مستدام الطاقة الشمسية في الجزائر، مجلة

الاستراتيجية والتنمية، ، المجلد 08/العدد 01 (2018)، ص17

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

- 5- مركز تطوير الطاقات المتجددة CDER الموصلة بشبكة الكهرباء الوطنية: في 2004 قام CDER بتشغيل أول محطة انارة فولطية بقدرة (10 كيلواط) تم ربطها بشبكة التوزيع سونلغاز يدخل هذا المشروع في إطار التعاون الجزائري الاسباني يسمح بانتاج (200 كيلواط).
- 6- مصنع لإنتاج الألواح الشمسية بالروبية: المقاول الرئيسي له المجمع الألماني (سانتروثارم وكينيتيكس)، تقدر طاقته بـ (120) ميغاواط سنويا بتكلفته (30) مليار دينار.
- 7- مصنع لإنتاج الألواح الشمسية بباتنة: المقاول الرئيسي للمصنع الشركة الجزائرية الفرنسية أوراس سولار بقدرة (25) ميغاواط سنويا، تقدر تكلفته بـ (10) ملايين أورو.
- 8- مشروع انارة الطريق السيار (شرق-غرب): انجاز 10 محطات الطاقة الشمسية بطاقة (10) كيلواط - محطة.
- 9- مشروع الانارة الشمسية في الجنوب: ترتب على تطبيق شركة سونلغاز للبرنامج الوطني للكهرباء بالشراكة مع الشركات الأجنبية وكذا مراكز البحث و التنمية تزويد 20 قرية نائية بالطاقة الشمسية الفوتوفولطية في ولايات الجنوب التالية: تندوف، تمنراست، أدرار و اليزي، القرى النائية في الصحراء، حيث يشير إحصاء سنة 1994 أن 270000 ساكن يتطلب أكثر من 40000 ألف كيلومتر من الشبكة لسد احتياجاتها الضرورية¹، لذلك بادرت بفتح مجال المشاركة أمام الشركات الأجنبية وكذا مراكز البحث والتنمية بحكم أن لها الأولوية لخوض مهمة تطبيق التقنيات التي تستجيب للتكنولوجيات الاقتصادية والمشاكل المتعلقة بتزويدها للمناطق النائية، ومن أهداف المشروع نذكر ما يلي²:
 - ✓ توفير مصدر طاقة نظيف ومستدام، في ظل نفاد المصادر التقليدية للطاقة.
 - ✓ تخفيض تكلفة الإنارة والخدمات الأساسية في القرى النائية، وتحسين الأداء في المستشفيات، المراكز الصحية، والمدارس.
 - ✓ تمكين سكان المناطق النائية من الاستفادة من الخدمات العمومية دون الحاجة للسفر لمسافات طويلة للمدن.
 - ✓ خلق فرص عمل جديدة في مختلف القطاعات للمساهمة في الحد من البطالة.
 - ✓ تحقيق اقتصاد في العملة الصعبة من خلال توجيهها نحو إقامة المشاريع التنموية.
 - ✓ المساهمة في الحد من ظاهرة النزوح عبر توفير الطاقة اللازمة للاستخدامات الزراعية المختلفة.
 - ✓ دراسة مدى كفاءة الأجهزة المستخدمة في البيئات الطبيعية الصعبة، بما في ذلك درجات الحرارة العالية والتعرض للرمال.

¹ الشريف بوفاس، ربيع بلايلية، تفعيل استخدام الطاقة المتجددة كاستراتيجية للتنوع الطاقوي في الجزائر، الملتقى الوطني حول: المؤسسات الاقتصادية الجزائرية و استراتيجيات التنوع الاقتصادي في ظل انخيار أسعار المحروقات يومي 25 و 26 أبريل 2017، كلية العلوم الاقتصادية و التجارية و علوم التسيير، جامعة 08 ماي 1945-قائمة-، ص16

² فروحات حدة، الطاقات المتجددة كمدخل لتحقيق التنمية المستدامة في الجزائر، دراسة لواقع مشروع تطبيق الطاقة الشمسية في الجنوب الكبير بالجزائر، مجلة الباحث، المجلد 11 العدد 11 (2012) ص149-156، ص154

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

✓ مقارنة الطاقة الشمسية بالعائد الاقتصادي لمصادر الطاقة التقليدية مثل البترول، وكذلك بالقوة الحرارية وضغط الكهرباء المقدم للمناطق النائية.

✓ ضمان استمرارية الطاقة من خلال استخدام نظام متكامل للبطاريات يقلل من الانقطاعات الكهربائية التقليدية.

✓ تحسين إدارة الطاقة وتوزيعها بشكل منظم وفعال باستخدام أجهزة التحكم المناسبة.

أهم هذه القرى¹:

أ- قرية مولاي حسن:

أول قرية بدأت التشغيل هي مولاي حسن بولاية تمنراست والتي تتواجد مابين تمنراست وعين صالح بوسط الصحراء والتي تصل بها درجة الحرارة إلى 48 درجة مئوية في الصيف وهي مجهزة آليا بالطاقة الشمسية عن طريق :

✓ نظام شمسي فوتوفولطي بقوة 6 كيلوواط كالوري لتوفير الاحتياجات الطاقوية الضرورية ل 20 مسكن القاطنين بها، وقد بدأت الأشغال بها سنة 1998 وقد أنجز أكثر من 1300 كيلو واط/سا.

✓ سخان الماء بالطاقة الشمسية لسعة 200 لتر مستعمل للتوزيع العمومي وتزويد السكان بالماء الصحي ومن أجل تخفيف استهلاك الغاز وتفادي استعمال الحطب والوسائل الأخرى.

ب- القرى الأخرى التي بدأت في التشغيل :

✓ قرية غار جيالات :بقوة إجمالية 34.5 كيلوواط كالوري موزعة على 11 أجهزة الأنظمة الفوتوفولطية ذات أنواع مختلفة للتوزيع لما يقارب 50 مسكن ومختلف المرافق العمومية الأخرى.

✓ قرية حاسي منير :بقوة إجمالية 21 كيلوواط كالوري، عدد الأنظمة الفوتوفولطية ما بين 4-24 مسكن.

✓ قرية تاحيفات :بقوة إجمالية 61.5 كيلوواط كالوري بعدد أنظمة فوتوفولطية متوقعة ما بين 14-100 مسكن ،وقد بدأ التشغيل بالموازاة لنظامين(2) بقوة 12 كيلوواط كالوري لتزويد 20 مسكن والباقي في طريق التشغيل.

✓ قرية عين دلاغ :بقوة إجمالية 15 كيلوواط كالوري بعدد أنظمة فوتوفولطية ما بين 3-25 مسكن.

✓ قرية عراق :بقوة إجمالية مركبة 52.5 كيلوواط كالوري عدد الأنظمة الفوتوفولطية المتوقع ما بين 12-88 مسكن المنجز فعلا والذي بدأ في التشغيل، 03 أنظمة بقوة 12 كيلوواط كالوري لتزويد 20 مسكن والباقي في طريق التشغيل

✓ قرية تاماجارت :بقوة إجمالية 24 كيلوواط كالوري لعدد أنظمة فوتوفولطية ما بين 8-42 مسكن والمستغل منها فعلا نظام واحد بقوة 6 كيلوواط كالوري لتزويد 10 مساكن للاحتياجات اليومية والباقي ينطلق في تشغيلها لاحقا

¹ عمر شريف ،استخدام الطاقات المتجددة ودورها في التنمية المحلية المستدامة : دراسة حالة الطاقة الشمسية في الجزائر، أطروحة دكتوراه الدولة في العلوم

الاقتصادية ،جامعة الحاج لخضر -باتنة-،الجزائر ،2006-2007،ص369-370

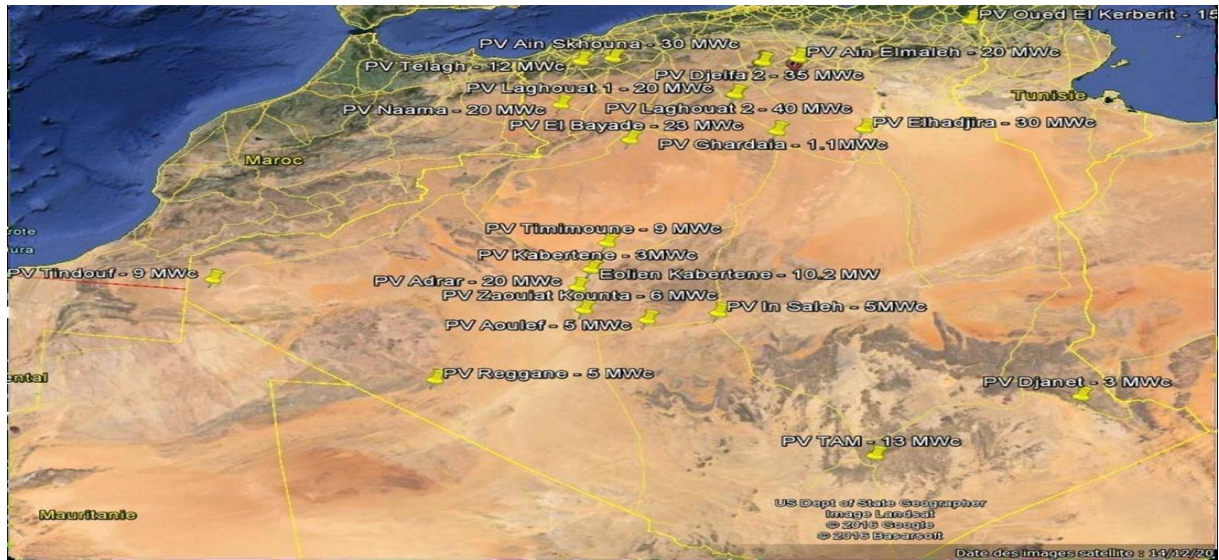
الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

- 10- مزرعة رياح بقدرة 10 ميجاوات تقع في كابرتان (أدرار) جوان 2014: يتم استغلال الطاقة المتولدة عنها في محطة توليد الكهرباء الكلاسيكية المتواجدة بذات الموقع. وتتربع هذه المحطة على مساحة 33 هكتار وتوفر على 12 عمود هوائي ويشغل بها 48 عاملا وقد أنجزت بغرض تدعيم شبكة توزيع الكهرباء بذات المنطقة.¹
- 11- تدشين محطة واد نشو الكهروضوئية النموذجية 1.1 ميجاوات تقع وادي نشو (غرداية) جوان 2014² تبلغ قدرة المحطة الشمسية لغرداية والمتواجدة بمنطقة واد نشو على مسافة 10 كم من مقر الولاية حوالي 1.1 ميغاواط ، وقد خصص لإنشاء هذه المحطة حوالي 900 مليون دج، وتعد محطة 100% كهروضوئية.

12- مشروع محطات توليد الطاقة الكهروضوئية بقدرة 343 ميجاوات:

يوضح الشكل خريطة جغرافية لمواقع محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) ومزارع الرياح المنجزة في الجزائر، موزعة عبر مختلف ولايات الوطن، مع الإشارة إلى القدرة الإنتاجية لكل محطة بوحدة الميغاواط (MW). يتبين من الخريطة أن أغلب المشاريع تتركز في مناطق الجنوب والهضاب العليا، حيث تتوفر الجزائر على إمكانيات إشعاع شمسي مرتفعة. كما يلاحظ تنوع في أحجام المحطات، إذ تتراوح قدراتها بين 1 ميغاواط و35 ميغاواط. يعكس هذا التوزيع الجغرافي الاستراتيجية الوطنية الرامية إلى استغلال الإمكانيات الطبيعية المتاحة بفعالية. وتُعد هذه المشاريع جزءاً من برنامج وطني واسع لتوسيع استخدام الطاقات المتجددة وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، مع تحقيق التنمية المحلية في المناطق النائية.

الشكل رقم (37): خريطة تبين مواقع محطات توليد الطاقة الكهروضوئية في الجزائر



المصدر: الموقع الرسمي لوزارة الطاقة و المناجم والطاقات المتجددة: <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles>

[renouvelables-et-maitrise-de-lenergie](#)

¹ الإذاعة الجزائرية، وزير الطاقة يدشن محطة لتوليد الكهرباء عن طريق الطاقة الشمسية بولاية أدرار ، على الموقع الإلكتروني:

<https://radioalgerie.dz/news/ar/article/20160117/64739.html>

² الإذاعة الجزائرية، تدشين محطة نموذجية لتوليد الكهرباء عن طريق الطاقة الشمسية بغرداية، على الموقع الإلكتروني:

<https://radioalgerie.dz/news/ar/article/20140710/6529.html>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الجدول رقم (12): قائمة المشاريع المبرمجة خلال الفترة 2011-2020 للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة 343 ميجاوات

الولاية	الموقع	القدرة(ميغاواط)	تاريخ الدخول في الخدمة
إليزي	جانت	03	2015/02/19
أدرار	أدرار	20	2015/10/28
أدرار	كابرتان	03	2015/10/13
تمنراست	تمنراست	13	2015/11/03
تندوف	تندوف	09	2015/12/14
أدرار	زاوية كتنة	06	2016/01/11
أدرار	رقان	05	2016/01/28
أدرار	تيميمون	09	2016/02/07
تمنراست	عين صالح	05	2016/02/11
أدرار	أولاوف	05	2016/03/07
الأغواط	الحناق (1)	20	2016/04/08
الأغواط	الحناق(2)	40	2017/04/26
الجللفة	عين الإبل (1)	20	2016/04/08
الجللفة	عين الإبل (2)	33	2017/04/06
سوق أهراس	وادي الكبريت	15	2016/04/24
النعامة	سدرات لغزال	20	2016/05/03
سعيدة	عين سخونة	30	2016/05/05
سيدي بلعباس	تلاغ	12	2016/09/29
البيضاء	بيوض سيدي الشيخ	23	2016/10/26
المسيلة	عين الملح	20	2017/01/26
ورقلة	الحجيرة	30	2017/02/16
باتنة	وادي الماء	02	2018/01/16
مجموع الكلي	343 ميجاوات		

المصدر: الموقع الرسمي لوزارة الطاقة و المناجم والطاقات المتجددة: <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>

13- مشروع بورقلة وتقرت (1993-1997) تم خلال هذه الفترة بتهيئة 18 بيت بلاستيكي فلاحى على مساحة تبلغ 7200 متر مربع باستعمال مياه الطبقة الألبية (LA NAPPE ALBIENNE)، و لكن هذه التجربة لم تعمم على غرار تجربة تونس في هذا المجال و التي بدأت بواحد 1 هكتار في سنة 1986 لتبلغ اليوم أكثر من 104 هكتار .

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

14- البرنامج الخاص بالجنوب الكبير (1985-1989): ممول من طرف الدولة، مخصص لولايات أقصى الجنوب (أدرار، بشار، الواد، إليزي، تمنراست)، يسمح هذا البرنامج بتوفير الماء الشروب لساكلي هذه المناطق الضخ أو التحلية، توفير الإنارة، تبريد الهواء داخل المبنى في فصل الصيف.¹

ثانيا: الدراسات:²

في إطار تعزيز البنية التحتية المعرفية لتطوير الطاقات المتجددة في الجزائر، تم تنفيذ مجموعة من المبادرات الاستراتيجية بالتنسيق مع عدد من الهيئات الوطنية المتخصصة. شملت هذه المبادرات تحديث "الأطلس الوطني لطاقة الرياح"، وذلك بالتعاون مع الديوان الوطني للأرصاد الجوية (ONM)، بهدف توفير قاعدة بيانات محدثة حول الإمكانيات الريحية على المستوى الوطني، اعتماداً على قياسات مناخية دقيقة ونماذج محاكاة متقدمة.

وفي السياق ذاته، تم تحديد عدد من المواقع ذات الجدوى التقنية والاقتصادية لإنشاء مزارع رياحية، لاسيما في مناطق تقرت، حاسي مسعود وغرداية، وذلك بالتعاون مع مركز تطوير الطاقات المتجددة (CDER)، استناداً إلى معايير متعددة تشمل سرعة الرياح، البنية التحتية، وقربها من نقاط الربط بالشبكة الكهربائية.

أما في مجال الطاقة الشمسية، فقد تم إعداد "الأطلس الشمسي الوطني" بالتعاون مع الوكالة الفضائية الجزائرية (ASAL)، معتمداً على صور أقمار صناعية ونماذج إشعاع شمسي متقدمة، مما سمح بتحديد مناطق ذات إمكانيات إشعاعية مرتفعة. وقد أسفر هذا العمل عن اقتراح عدد من المواقع الاستراتيجية التي تصلح لاحتضان محطات شمسية كهروضوئية على نطاق واسع.

وعلاوة على ذلك، تم إجراء دراسة تقنية حول مدى تأثير إدماج مصادر الطاقة المتجددة على أداء واستقرار الشبكة الكهربائية الوطنية، من طرف مجمع سونلغاز بالتعاون مع كل من منظمة RES4MED والمؤسسة الإيطالية CESI، وذلك بهدف ضمان التوافق بين الإنتاج الطاقوي المتجدد والمتطلبات التقنية للشبكة من حيث التوزيع والتوازن الطاقوي.

الفرع الثاني: المشاريع المستقبلية للطاقات المتجددة في إطار التعاون الدولي

في إطار استراتيجيتها الرامية إلى الانتقال الطاقوي وتأمين الموارد الطبيعية المستدامة، شرعت الجزائر في برمجة مجموعة من المشاريع المستقبلية في مجال الطاقات المتجددة، وذلك انسجاماً مع التزاماتها الدولية المتعلقة بالتنمية المستدامة وتغير المناخ. وقد تجسدت هذه الرؤية من خلال مبادرات فعلية لعقد شراكات مع عدد من الدول، بهدف توسيع آفاق التعاون الدولي في ميدان الطاقات النظيفة وتعزيز تبادل الخبرات والتقنيات الحديثة. ويُعد هذا التوجه دعامة أساسية لترسيخ مكانة

¹ ذبيحي عقيلة، الطاقة في ظل التنمية المستدامة (دراسة حالة الطاقة المستدامة في الجزائر)، مذكرة تدخل ضمن متطلبات نيل شهادة ماجستير في العلوم الاقتصادية، جامعة منتوري قسنطينة، الجزائر، 2008-2009، ص 237-238

² الموقع الرسمي لوزارة الطاقة و المناجم والطاقات المتجددة: <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles>

renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie (تاريخ الإطلاع: 2025/04/20)

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الجزائر كشريك طاقتي موثوق في الحوض المتوسطي وإفريقيا، خاصة في ظل الإمكانيات الشمسية والريحية الهائلة التي تزخر بها، ما يؤهلها لتكون فاعلاً محورياً في مشهد الطاقة المتجددة على الصعيدين الإقليمي والدولي.

أولاً: مشروع "ممر الهيدروجين الجنوبي": ركيزة استراتيجية لنقل الهيدروجين الأخضر من الجزائر نحو أوروبا:¹
يُعد مشروع "ممر الهيدروجين الجنوبي" (South H2 Corridor) "أحد أبرز المشروعات الطاقوية المستقبلية التي تخطط الجزائر لتنفيذها، في إطار توجيهها نحو تعزيز موقعها كمصدر رئيسي للهيدروجين الأخضر في السوق العالمية. ويمثل هذا المشروع، الذي يتمثل في خط أنابيب بطول 3,300 كيلومتر، جزءاً من الرؤية الاستراتيجية الهادفة إلى نقل الهيدروجين منخفض الانبعاثات من الجزائر إلى الأسواق الأوروبية.

ويُتوقع أن يدخل المشروع حيز التشغيل الكامل بحلول عام 2030، ليشكل حلقة وصل حيوية بين شمال أفريقيا ودول أوروبا، لاسيما إيطاليا والنمسا وألمانيا. وسيساهم هذا الربط في تسهيل تدفق الهيدروجين الأخضر المنتج في منطقة جنوب البحر المتوسط إلى المستهلكين الأوروبيين، في ظل تزايد الطلب على مصادر الطاقة النظيفة. ويستهدف "ممر ساوث H2" نقل ما يقارب 4 ملايين طن سنوياً من الهيدروجين منخفض الانبعاثات إلى أوروبا بحلول عام 2040، مما يعزز من قدرة الجزائر على أن تصبح فاعلاً محورياً في منظومة الطاقة النظيفة العالمية. كما ينسجم هذا المشروع مع الالتزامات المناخية المشتركة لكل من الجزائر ودول الاتحاد الأوروبي، في سياق التحول نحو اقتصاد منخفض الكربون.

ويمثل المشروع أحد الأعمدة الأساسية في الإستراتيجية الوطنية للهيدروجين، والتي تسعى الجزائر من خلالها إلى تنويع صادراتها الطاقوية، وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، مع توسيع آفاق الاستثمار في التكنولوجيا النظيفة والبنية التحتية العابرة للحدود.

ثانياً: مشروع الربط الكهربائي البحري بين الجزائر وإيطاليا خطوة استراتيجية لتعزيز تكامل الطاقة الإقليمية:

يُعد مشروع الربط الكهربائي البحري بين الجزائر وإيطاليا أحد أبرز مشروعات الطاقة المقررة لعام 2025، ويأتي في إطار الجهود الثنائية لتطوير بنية تحتية طاقوية عابرة للحدود، تهدف إلى تصدير الكهرباء الجزائرية إلى السوق الأوروبية. ويجري تنفيذ المشروع بالشراكة بين الشركات الوطنية الجزائرية المتخصصة في قطاعي المحركات والكهرباء، إلى جانب شريك إيطالي، حيث يُرتقب أن يشكّل هذا الخط محورياً رئيساً في استراتيجية تنويع صادرات الطاقة الجزائرية. يساهم الخط في تسهيل تصدير الكهرباء المولدة من مصادر متعددة، تشمل الغاز الطبيعي والطاقة المتجددة، وهو ما يعكس التوجه المتنامي نحو اعتماد مزيج طاقتي متنوع ومستدام. وقد انطلقت المفاوضات بين الطرفين منذ عام 2022، في سياق سعي أوروبا إلى تعزيز أمنها الطاقوي وتنويع مصادر الإمداد، من خلال التعاون مع دول شمال أفريقيا.

¹ الطاقة، محمد عبد السند، أهم 5 مشروعات طاقة في الجزائر ستكون مرتقبة خلال 2025، على الموقع الإلكتروني:

<https://attaqa.net/2025/01/08/%D8%A3%D9%87%D9%85-5-%D9%85%D8%B4%D8%B1%D9%88%D8%B9%D8%A7%D8%AA-%D8%B7%D8%A7%D9%82%D8%A9-%D9%81%D9%8A-%D8%A7%D9%84%D8%AC%D8%B2%D8%A7%D8%A6%D8%B1-%D8%B3%D8%AA%D9%83%D9%88%D9%86-%D9%85%D8%B1%D8%AA%D9%82>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

وفي 11 أكتوبر/تشرين الأول 2022، تم الإعلان الرسمي عن المشروع من قبل وزارة الطاقة الجزائرية، حيث تم التأكيد على أن الخط سيوفر الكهرباء للأسواق الإيطالية، مع إمكانية توسيع النطاق ليشمل دولاً أوروبية أخرى في المستقبل، ضمن شبكة طاقة إقليمية متكاملة.

ويمثل المشروع جزءاً من رؤية أشمل لتكثيف دمج الطاقة المتجددة ضمن صادرات الجزائر، من خلال البنية التحتية الحديثة، بما يساهم في تقليل البصمة الكربونية لصادرات الطاقة وتعزيز مكانة البلاد كمزود موثوق للطاقة النظيفة. كما يؤدي هذا الربط البحري دوراً مهماً في دعم أمن الطاقة لإيطاليا والدول المجاورة، من خلال توفير إمدادات مستقرة وقابلة للتوسع.

ثالثاً: مشروع "سولار 1000": خطوة استراتيجية نحو تعزيز الطاقة الشمسية في الجزائر

يمثل مشروع "سولار 1000" أولى الخطوات العملية في إطار تنفيذ الإستراتيجية الوطنية للطاقة المتجددة في الجزائر، حيث يهدف إلى تركيب محطات شمسية كهروضوئية بقدرة إجمالية تبلغ 1000 ميغاواط، موزعة على خمس ولايات جنوبية، وذلك في سياق خطة طويلة المدى ترمي إلى بلوغ إنتاج قدره 15 غيغاواط من مصادر الطاقة المتجددة بحلول عام 2035.

وكانت الجزائر قد أعلنت في عام 2016 عن خطة طموحة لتوليد 22 غيغاواط من الطاقات المتجددة في أفق عام 2030، غير أن التحديات التقنية والمؤسسية والمالية حالت دون تحقيق هذا الهدف، ما استدعى إعادة تقييم البرنامج وتعديله وفقاً لمعطيات أكثر واقعية، بحيث أصبح الهدف الجديد يتمثل في توليد 15 غيغاواط من الكهرباء النظيفة في أفق 2035.

يندرج مشروع "سولار 1000" ضمن هذا المسعى، ويشمل تأسيس شركات ذات أغراض خاصة تتكفل بإنشاء وتشغيل محطات شمسية في ولايات: بشار، ورقلة، الوادي، تڤرت، والأغواط، حيث تتراوح قدرات المحطات ما بين 50 و300 ميغاواط لكل موقع، بحسب خصوصيات المنطقة ومدى توافر البنية التحتية.

ومن المتوقع أن يساهم المشروع في إحداث أكثر من 5 آلاف فرصة عمل مباشرة، ما التنمية المحلية المستدامة ويعزز من إشراك الولايات الداخلية في التحول الطاقوي الوطني. ويتضمن توزيع القدرة الإنتاجية للمشروع تخصيص 50 ميغاواط لولاية بشار، و100 ميغاواط لورقلة، و250 ميغاواط لتڤرت، و300 ميغاواط لكل من ولايتي الأغواط والوادي.

وقد حُطّط لبدء الإنتاج التجريبي في المحطة الأولى، الكائنة بولاية بشار، بقدرة 50 ميغاواط، مع مطلع عام 2023، مما يمثل انطلاقة فعلية نحو تحقيق الأهداف الطاقوية المنشودة، وتأكيد التزام الجزائر بتعزيز مساهمة الطاقة النظيفة في مزيجها الكهربائي الوطني.

رابعاً: مشروع ديزرتيك الألماني¹ Desertec

¹ شكاكطة عبد الكريم، سياسات التعاون الأوروبي الجنوب المتوسطي في مجال الطاقة: واقع و انعكاسات، المجلة الجزائرية للسياسات العامة العدد 6-فيفري

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

يُعد مشروع ديزرتيك (Desertec) أحد المبادرات الطموحة التي ارتكزت على مفهوم استغلال الإمكانيات الشمسية الهائلة المتوفرة في صحاري شمال إفريقيا والشرق الأوسط، بغرض توفير مصدر مستدام للكهرباء الخضراء للدول المجاورة، خاصة في القارة الأوروبية. وقد بلغت التقديرات الأولية لتكلفة البنية التحتية لتحويل الطاقة نحو 9.1 مليار يورو، مع توقعات من البنك الأوروبي للاستثمار بأن كل يورو يُستثمر في هذا المشروع يمكن أن يحقق عائداً يقدر بعشرين يورو للمستثمرين، ما يعكس الطابع الاقتصادي المجدي للمشروع في حال تجسيده.

تأسست مؤسسة ديزرتيك سنة 2003 بمبادرة من جهات علمية دولية، وسرعان ما تطور الهيكل المؤسسي عبر خلق ذراع صناعية متمثلة في شركة Dii GmbH بالشراكة مع مبادرات إقليمية أخرى مثل Medgrid، لتهيئة الأرضية الصناعية والتنظيمية لتجسيد المشروع في منطقة أوروبا والشرق الأوسط وشمال إفريقيا (EU-MENA). وقد شهدت المبادرة دعماً من شركات طاقة أوروبية كبرى، ومؤسسات مالية عالمية، إضافة إلى مساهمات من فاعلين صناعيين من دول الجنوب، من بينها الجزائر، التي كانت من أبرز الدول المرشحة لاستضافة مشاريع استراتيجية في إطار هذا المخطط.

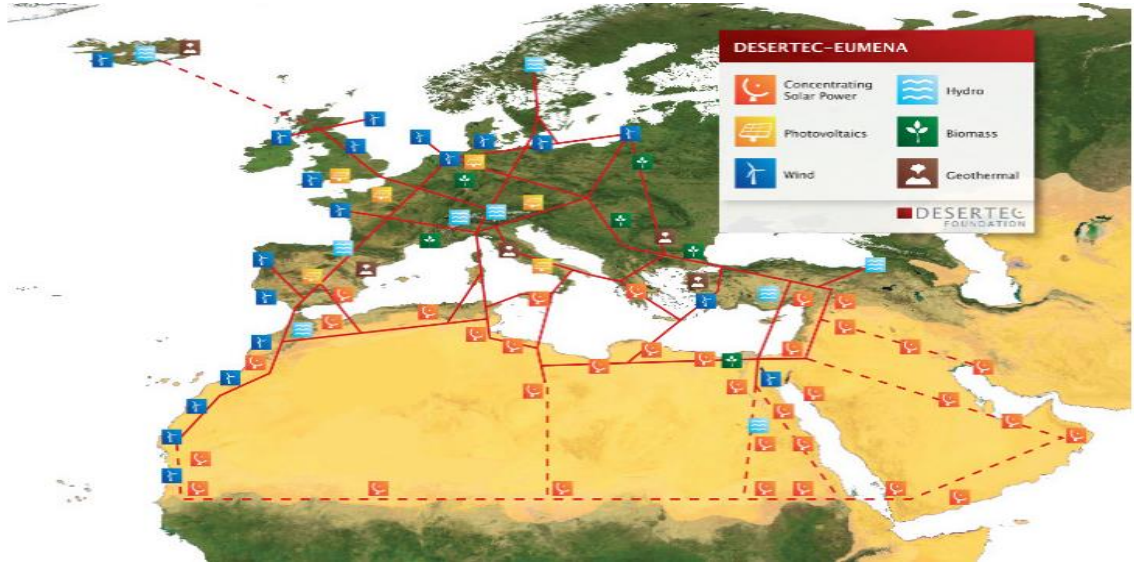
في السياق الجزائري، حظي المشروع باهتمام خاص بالنظر إلى الإمكانيات الشمسية الهائلة التي تميز الصحراء الجزائرية، والتي تُمكن - نظرياً - كل كيلومترين مربعين منها من توليد طاقة شمسية تعادل ما يقارب 1.5 مليون برميل نفط سنوياً. ضمن هذا الإطار، تضمن التصور الجزائري ضمن مشروع ديزرتيك خطة طموحة لإنتاج 2600 ميغاواط من الطاقة الكهربائية، منها 2000 ميغاواط موجهة للتصدير، خاصة نحو أوروبا، في حين خصص الباقي لتغطية الطلب المحلي. كما تم الاتفاق على تنفيذ 65 مشروعاً كمرحلة أولى ضمن برنامج طويل المدى يمتد بين 20 إلى 30 سنة، هدفه الأساسي تعزيز قدرات الإنتاج الوطني من الطاقات المتجددة وتحقيق تحول استراتيجي نحو الاقتصاد الأخضر.

كما شهد التعاون الجزائري مع ديزرتيك توقيع اتفاقيات شراكة تهدف إلى تبادل الخبرات التقنية، وإنجاز دراسات الجدوى الخاصة بإنشاء مشاريع مرجعية، من بينها محطة نموذجية بقدرة 1000 ميغاواط. ورغم الزخم الذي صاحب انطلاق المشروع، إلا أن العديد من العوائق الهيكلية حالت دون تحقيق أهدافه، من بينها التكاليف المالية المرتفعة، والتي قُدرت بنحو 400 مليار يورو لإنتاج 100 جيغاواط من الكهرباء بحلول سنة 2050، إلى جانب انسحاب عدد من الشركاء الصناعيين الرئيسيين مثل سيمنز وبوش، ما أثر سلباً على استمرارية الزخم السياسي والمالي للمبادرة.

وقد ساهم غياب الدعم المؤسسي الكافي من بعض الحكومات الأوروبية، لا سيما في ما يتعلق بمشاريع نقل الكهرباء من شمال إفريقيا إلى أوروبا، في تباطؤ وتيرة تنفيذ المشروع. وهو ما أدى في نهاية المطاف إلى إعلان المجموعة الصناعية المشرفة على ديزرتيك تعليق أنشطتها، مع التأكيد على أن الأسواق الأوروبية قادرة داخلياً على تغطية معظم حاجياتها الطاقوية من مصادر متجددة. ورغم ذلك، يبقى مشروع ديزرتيك مرجعية محورية في التفكير الاستراتيجي الطاقوي للجزائر، بالنظر إلى ما كشفه من فرص وتحديات مرتبطة بالتحول الطاقوي، ودوره في تحفيز السياسات الوطنية لتطوير الطاقات المتجددة.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الشكل رقم (38): خريطة مشروع ديزرتيك



Source :Desertec Solar Power Project Abandoned by Shareholders , [en ligne], inhabitat, Disponible sur : <https://inhabitat.com/desertec-solar-power-project-abandoned-by-shareholders/>,(consulté le 21/04/2025).

يوضح الشكل خريطة مشروع ديزرتيك في منطقة أوروبا، الشرق الأوسط وشمال إفريقيا (EUMENA)، حيث تُبين الشبكة المقترحة لربط مصادر الطاقة المتجددة المختلفة بين هذه المناطق. تُظهر الخريطة توزيع تقنيات الطاقة مثل الطاقة الشمسية المركزة (CSP) في الصحراء الكبرى، والطاقة الكهرومائية في المناطق الأوروبية، وطاقة الرياح والطاقة الشمسية الكهروضوئية على امتداد شمال إفريقيا وأوروبا. كما تبرز الخطوط الحمراء البنية التحتية المخططة لنقل الكهرباء بين الدول، ما يشير إلى التكامل الطاقوي الإقليمي المنشود. ويعكس هذا التصور طموح ديزرتيك في بناء شبكة طاقة نظيفة ومتراصة، تسمح بتبادل الكهرباء الخضراء بين دول الجنوب والشمال على نحو مستدام.

خامسا: المشروع الجزائري الياباني صحراء صولار بريدير أس أس بي " للطاقة الشمسية وانعكاساته الاقتصادية والبيئية¹

في سياق تعزيز التعاون العلمي الدولي في مجال الطاقات المتجددة، يبرز مشروع "صحراء صولار بريدير (SSB) " كأحد أبرز ثمار الشراكة الجزائرية اليابانية في ميدان الطاقة الشمسية، حيث يجسد نموذجاً واعداً للتكامل بين البحث العلمي والتطبيقات الصناعية في مجال التحول الطاقوي. يتأسس المشروع على تعاون متعدد الأطراف بين مؤسسات جامعية وبخيرية جزائرية ويابانية، ويهدف إلى تطوير تكنولوجيات متقدمة لتصنيع الخلايا الشمسية ومحطات إنتاج الكهرباء انطلاقاً من مادة السيليسيوم المستخرجة من رمال الصحراء الجزائرية.

¹ كافي فريدة، الاستثمار في الطاقة المتجددة كمدخل لدفع عجلة التنمية المستدامة في الجزائر: الإشارة إلى مشروع صحراء صولار بريدير، نشرية الطاقات

المتجددة، العدد2، وزارة التعليم العالي والبحث العلمي، مركز تنمية الطاقات المتجددة، الجزائر، على الموقع الالكتروني

<https://www.cder.dz/spip.php?article2883>، ص26-27.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

ويُعد المشروع الأول من نوعه على المستوى العالمي من حيث تصوراته التقنية واستغلاله لموارد طبيعية محلية لإنتاج الطاقة النظيفة. وقد تم اختياره للإنجاز في الجزائر بالنظر إلى توفرها على مؤهلات طبيعية متميزة، على غرار المساحات الشاسعة ذات الإشعاع الشمسي المرتفع وجودة الرمال الغنية بمادة السيليسيوم، إلى جانب توفرها على قاعدة علمية وخبرة معتبرة في ميدان الطاقات المتجددة. يهدف المشروع إلى إنشاء مصانع لإنتاج الألواح الشمسية ومحطات لتوليد الكهرباء، يتم توجيهها نحو الشمال الجزائري، لا سيما لتغذية المنشآت الحيوية كمحطات تحلية مياه البحر.

تمت برمجة إنجاز المزرعة الشمسية التجريبية بمدينة سعيدة، إلى جانب إنشاء مركز بحث علمي متخصص بوهراڤ ووحدات دعم تكنولوجية بأدرار، في إطار تمويل ياباني كامل قدر بـ 5 ملايين دولار. وسيتم تنفيذ المشروع على مدى خمس سنوات، يتخلله تكوين مستمر للكوادر الجزائرية وتجهيزات علمية متطورة. ويُرتقب أن يسهم هذا المشروع، ضمن أفق 2050، في صياغة نموذج عالمي جديد للتمويل المستدام بالطاقة، من خلال تعزيز التكامل الطاقوي بين الجنوب والشمال على المستوى الوطني، مع إمكانية توسيع التجربة إلى بلدان أخرى.

الفرع الثالث: تحولات السياسة الطاقوية الجزائرية بحلول 2025¹

تسعى الجزائر، ضمن رؤيتها الاستراتيجية لقطاع الطاقة، إلى تحقيق تحول نوعي في بنيتها الطاقوية من خلال تبني مشروعات كبرى تهدف إلى تنويع مزيج الكهرباء وتقليل الاعتماد على الغاز الطبيعي، رغم وفرة احتياطياته الكبيرة في البلاد. وقد أصبحت ثلاث مشاريع رئيسية تُشكل ركيزة هذا التحول، ويُعَوَّل عليها في تحقيق الأهداف الوطنية بحلول عام 2025.

تشمل هذه المشاريع تطوير الحقل الغازي العملاق "حاسي الرمل"، وتوسيع أنشطة الإنتاج في "حوض بركين"، إلى جانب إنشاء محطتين لتوليد الكهرباء من أجل تعزيز القدرة الإنتاجية المحلية.

وتطمح الجزائر من خلال هذه المشروعات إلى تعزيز مكانتها في سوق الطاقة العالمية، لا سيما في ظل الطلب الأوروبي المتنامي على مصادر طاقة بديلة وآمنة. وتمثل هذه المشروعات أداة استراتيجية لتقوية الصادرات، ورفع الكفاءة الإنتاجية المحلية، وتحقيق الأمن الطاقوي، بما يدعم التنمية الاقتصادية الوطنية.

وبذلك، فإن المشاريع الثلاث المرتقبة لعام 2025 تُعدّ من أهم دعائم السياسة الطاقوية الجزائرية، وتشكل خطوة محورية في مسار الانتقال نحو نموذج طاقوي أكثر تنوعًا واستدامة.

أولاً: محطات الكهرباء ذات الدورة المركبة لتعزيز أمن الكهرباء في الجزائر:

تُعد محطتا الكهرباء ذات الدورة المركبة في بسكرة وبلارة من بين أبرز مشروعات الطاقة التي تعتمد عليها

¹ الطاقة، محمد عبد السند، أهم 5 مشروعات طاقة في الجزائر ستكون مرتقبة خلال 2025، على الموقع الإلكتروني:

<https://attaqa.net/2025/01/08/%D8%A3%D9%87%D9%85-5-%D9%85%D8%B4%D8%B1%D9%88%D8%B9%D8%A7%D8%AA-%D8%B7%D8%A7%D9%82%D8%A9-%D9%81%D9%8A-%D8%A7%D9%84%D8%AC%D8%B2%D8%A7%D8%A6%D8%B1-%D8%B3%D8%AA%D9%83%D9%88%D9%86-%D9%85%D8%B1%D8%AA%D9%82>

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

الجزائر لتعزيز قدراتها في مجال توليد الكهرباء، ضمن رؤية وطنية تهدف إلى تلبية الطلب المتزايد على الطاقة وتحقيق الأمن الطاقوي. تقع محطة بلارة في بلدية المليية بولاية جيجل، بينما تقع محطة بيسكرا في المنطقة الشرقية للبلاد، وتتميز كل منهما باستخدام تقنيات الدورة المركبة التي تجمع بين التوربينات الغازية والبخارية، ما يُحسن من الكفاءة الطاقوية.

ويُنتظر أن تدخل هاتان المحطتان الخدمة خلال عام 2025، بطاقة إنتاجية تلامس 1340 ميغاواط لكل واحدة، ما يجعلهما من أكبر المشاريع الطاقوية المنجزة في الجزائر في السنوات الأخيرة. ويُعوّل على هذه المحطات في دعم الشبكة الوطنية للكهرباء، لا سيما في فترات الذروة، إلى جانب مساهمتها المباشرة في دفع عجلة التنمية الاقتصادية عبر توفير طاقة مستقرة للصناعة والخدمات.

ويأتي هذا المشروع ضمن جهود شاملة تبذلها الدولة لتعزيز البنية التحتية الكهربائية، في ظل تسجيل سعة إنتاجية وطنية تتجاوز 25 ألف ميغاواط، وهو ما يفوق مستوى الذروة في الطلب على الكهرباء المقدّر بـ19.5 ألف ميغاواط. هذا الفائض الطاقوي يمكّن الجزائر من تصدير الكهرباء إلى دول الجوار، مثل تونس، ويفتح آفاقاً للتوسع في الربط الإقليمي مستقبلاً.

وبحسب تقديرات رسمية، يُتوقع أن ينمو الطلب على الكهرباء في الجزائر بمعدل سنوي يُقدّر بنحو 5% خلال الفترة الممتدة من 2022 إلى 2025، ما يعكس أهمية هذه المشاريع في مواكبة التطور الديموغرافي والاقتصادي، وضمان استمرارية الإمدادات الكهربائية بكفاءة وموثوقية.

ثانياً: تطوير حقل حاسي الرمل: مشروع استراتيجي لتعزيز أمن الغاز وتدفقه نحو أوروبا

يمثل مشروع تطوير حقل حاسي الرمل أحد أهم مشروعات الغاز الطبيعي في الجزائر وعلى مستوى العالم، من حيث الحجم والأهمية الجيوطاقوية. يقع الحقل على بُعد حوالي 550 كيلومتراً جنوب العاصمة الجزائرية، ويعد تطويره جزءاً من استراتيجية وطنية شاملة تهدف إلى تعزيز دور الجزائر كمزود رئيسي للغاز الطبيعي للأسواق الأوروبية، لا سيما في ظل تصاعد الطلب العالمي على مصادر الطاقة التقليدية الآمنة والموثوقة.

تُقدّر التكلفة الاستثمارية للمشروع بنحو 2.3 مليار دولار، ويشمل إنجاز ثلاث محطات غازية جديدة، إلى جانب تحديث شبكة تجميع الغاز داخل الحقل، بما يعزز من كفاءة العمليات الإنتاجية ويرفع من مستوى التحكم الفني في تدفقات الغاز. ويُنتظر أن تبلغ القدرة الإنتاجية اليومية للحقل، بعد التوسعة، حوالي 188 مليون متر مكعب من الغاز الطبيعي، ما يعزز قدرات التصدير نحو الشركاء الأوروبيين، وفي مقدمتهم إيطاليا.

تُشرف على تنفيذ هذا المشروع شركتان دوليتان مختصتان، إحداها إيطالية والأخرى أمريكية، ويُرتقب استكمالهما بشكل كامل بحلول عام 2027، ضمن جدول زمني دقيق يراعي المتغيرات التقنية والاقتصادية. ويُعد هذا المشروع حلقة محورية في سلسلة المشاريع الطاقوية التي تعمل الجزائر على إنجازها لتأمين تدفق مستقر ومستدام للغاز نحو شركائها الاستراتيجيين.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

تاريخيًا، تم اكتشاف حقل حاسي الرمل في عام 1956، وقد ظل لعقود يشكل حجر الأساس في إنتاج الغاز الجزائري. وتشير التقديرات الرسمية إلى أن احتياطياته القابلة للاستخراج بلغت نحو 2.4 تريليون متر مكعب (ما يعادل 85 تريليون قدم مكعبة)، وهو ما يمثل أكثر من نصف احتياطيات الجزائر من الغاز الطبيعي المؤكدة حتى نهاية عام 2020. وبذلك، يكتسي المشروع أهمية خاصة ليس فقط من حيث مساهمته في تلبية الطلب الداخلي والخارجي، بل أيضًا باعتباره ركيزة استراتيجية في دعم الأمن الطاقوي الأوروبي، وتعزيز مكانة الجزائر كمصدر رئيسي للغاز الطبيعي على الساحة الدولية.

ثالثا: مشروع تطوير حوض بركين:

يمثل حوض بركين أحد أهم الأحواض الرسوبية الغنية بالنفط والغاز في الجزائر، ويشكل ركيزة محورية في استراتيجية البلاد الطاقوية الرامية إلى تعزيز قدراتها الإنتاجية وزيادة صادراتها نحو الأسواق العالمية. ويستعد الحوض حاليًا لمرحلة جديدة من التطوير بفضل اتفاقيات تعاون مع شركات دولية، على رأسها شركة غازبروم الروسية، التي ستسهم في تعزيز الاستثمارات التقنية والبشرية داخل المنطقة.

يتضمن مشروع تطوير حوض بركين حفر 24 بئرًا جديدة، إلى جانب إنشاء مرافق متكاملة لمعالجة الغاز، ما من شأنه أن يُحسن من كفاءة الإنتاج ويُسرّع وتيرة الاستغلال التجاري للمخزون القابل للاستخراج. وتُقدّر التكلفة الاستثمارية الكلية لهذا المشروع بنحو 4 مليارات دولار، مع توقعات بأن يسفر عن اكتشافات وإنتاجيات تضيف أكثر من مليار برميل من النفط المكافئ، ما يؤدي إلى رفع متوسط معدل الاستخراج بنسبة تُناهز 55%.

وفي مارس 2022، نجحت الشركة الوطنية سوناطراك، بالتعاون مع شركة إيني الإيطالية، في حفر أول بئر نفطية بمنطقة زملة العربي الواقعة ضمن نطاق الحوض، وقد قُدرت احتياطيات هذا الاكتشاف بحوالي 140 مليون برميل من النفط الخام، مما يعكس الإمكانيات الكبيرة التي يزخر بها هذا الحوض.

ويُرتقب أن يبدأ إنتاج الغاز من المشروع فعليًا خلال عام 2025، في توقيت حاسم يتزامن مع ارتفاع متوقع في الطلب الأوروبي على الغاز الطبيعي، خاصة في ظل التغيرات الجيوسياسية المرتبطة بتوقف الإمدادات الروسية نحو أوروبا عقب انتهاء اتفاقية نقل الغاز عبر أوكرانيا في ديسمبر 2024. ومن شأن هذا المشروع أن يُعزز موقع الجزائر كمصدر بديل ومستقر للطاقة في محيطها الإقليمي والدولي، ويوفر لها فرصًا استراتيجية لمضاعفة عائداتها الطاقوية.

الفصل الأول: مدخل للطاقات المتجددة في الجزائر

خلاصة

يُبرز هذا الفصل الأهمية المتزايدة للطاقات المتجددة في ظل التحولات العالمية الراهنة، والتي باتت تفرض ضرورة الانتقال من الاعتماد المفرط على الموارد الطاقوية التقليدية نحو مصادر طاقة نظيفة، مستدامة وصديقة للبيئة. وقد تطرقنا إلى الجوانب المفاهيمية الأساسية المرتبطة بالطاقات المتجددة، بما في ذلك تعريفها وأهميتها، مع عرض تفصيلي لأبرز مصادرها، إلى جانب استعراض مزايا استخدامها والتحديات التقنية والاقتصادية التي تعيق انتشارها الواسع.

كما أتاح الفصل الوقوف على واقع قطاع الطاقات المتجددة في الجزائر من حيث الإطار التشريعي والتنظيمي، والقدرات الوطنية المتوفرة في هذا المجال، مما يسمح بفهم أوضح لموقع الجزائر ضمن المسار العالمي للانتقال الطاقوي. وتبين من خلال التحليل أن الجزائر تمتلك إمكانات واعدة في هذا القطاع، إلا أن تفعيل هذه الإمكانيات يظل مشروطاً بإرادة سياسية واضحة، واستراتيجيات تنفيذية فعّالة، وتنسيق محكم بين مختلف المتدخلين.

وأخيراً، تم تسليط الضوء على الأهداف الطموحة التي رسمتها الدولة في إطار رؤيتها المستقبلية لتنمية الطاقات المتجددة في أفق عام 2030، والتي تمثل خطوة مهمة نحو تحقيق أمن طاقوي مستدام وتنمية اقتصادية أقل تبعية للوقود الأحفوري.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

تمهيد

تُعدّ عملية التنبؤ أداة محورية في دعم اتخاذ القرار على مختلف الأصعدة الاقتصادية والاجتماعية والبيئية، وتزداد أهميتها في ظل بيئة تتسم بعدم اليقين وتسارع التغيرات. ويشكّل بناء النماذج القياسية للتنبؤ أحد أبرز التحديات العلمية التي تواجه الباحثين، لا سيما في ظل تنوع الأساليب وتعدد الأدوات الإحصائية والرياضية، بما في ذلك نماذج السلاسل الزمنية، والنماذج الهيكلية والسببية، فضلا عن النماذج القائمة على الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة.

يهدف هذا الفصل إلى تقديم عرض منهجي ومتكامل لأهم النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة، من خلال استعراض الأدبيات والدراسات السابقة ذات الصلة، سواء العربية أو الأجنبية، ثم تحديد موقع الدراسة الحالية ضمن المجال البحثي، مع التطرق إلى أبرز النماذج الأكثر اعتمادا، وأخيرا التعمق في النماذج المتقدمة مثل نماذج بوكس-جنكينز، أساليب التمهيد الأسّي، والشبكات العصبية الاصطناعية. ويمثل هذا التناول أرضية نظرية ضرورية للفصول التطبيقية اللاحقة التي ستتناول استخدام هذه النماذج في التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة المتجددة في الجزائر.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

المبحث الأول: الإطار المرجعي للدراسات السابقة

يُعد الإطار المرجعي للدراسات السابقة أحد المكونات الأساسية في أي بحث علمي رصين، إذ يوفر للباحث أرضية معرفية صلبة تساعد على تحديد موقع بحثه ضمن السياق الأكاديمي القائم. فالاطلاع على الأدبيات السابقة يمكن من استجلاء المفاهيم النظرية والمقاربات المنهجية التي اعتمدتها الدراسات السابقة، كما يتيح الوقوف على النتائج التي تم التوصل إليها، والفجوات البحثية التي لم تحظَ بالاهتمام الكافي. ومن هذا المنطلق، فإن تناول الإطار المرجعي لا يقتصر على مجرد عرض وصفي للدراسات، بل يتجاوز ذلك إلى التحليل والنقد والمقارنة، بما يسمح ببناء تصور نظري ومنهجي متماسك يوجه هذا البحث ويبرز قيمته المضافة في الحقل العلمي.

المطلب الأول: استعراض الأدبيات والدراسات ذات الصلة

يهدف استعراض الأدبيات والدراسات ذات الصلة إلى تقديم قراءة تحليلية ومنظمة للأعمال البحثية التي تناولت موضوع التنبؤ بالطاقة المتجددة بصفة عامة، وفي السياق الجزائري أو الإقليمي بصفة خاصة. ويسمح هذا الاستعراض بتتبع تطور الاهتمام العلمي بالموضوع، سواء من حيث الإطار المفاهيمي الذي تمت معالجته أو من حيث الأدوات والمنهجيات القياسية المستعملة في النمذجة والتنبؤ. كما يساعد على تحديد مدى التوافق أو التباين بين نتائج الدراسات السابقة، الأمر الذي يمهد لتأسيس قاعدة معرفية قوية يعتمد عليها هذا البحث في معالجة إشكاليته وصياغة مقارنته المنهجية.

الفرع الأول: الدراسات العربية

سنحاول من خلال هذا الفرع تقديم عرض تحليلي لأبرز الدراسات السابقة ذات الصلة بموضوع التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقات المتجددة، وذلك وفق ترتيب زمني يبدأ من الأحدث إلى الأقدم. ويهدف هذا التدرج إلى إبراز التطور الحاصل في الأدبيات، سواء من حيث الإشكاليات المطروحة أو الأدوات المنهجية المستعملة أو النتائج المتوصل إليها. كما يسمح هذا العرض بالكشف عن أوجه الاتفاق والاختلاف بين الباحثين، وتحديد الفجوات البحثية التي ما تزال قائمة، بما يهيئ الأرضية العلمية لتبرير اختيار المقاربة المعتمدة في هذه الأطروحة.

1. قدّمت جباري لطيفة مصطفى (2015-2016) دراسة بعنوان "طرق اتخاذ القرار باستخدام الذكاء الاصطناعي:

دراسة مقارنة للتنبؤ بالطاقة الكهربائية لولاية تلمسان باستعمال الشبكات العصبية الاصطناعية".

وتهدف هذه الدراسة إلى نمذجة الطلب الكلي على الطاقة الكهربائية لولاية تلمسان اعتمادا على بيانات

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

مؤسسة سونلغاز للفترة الممتدة من 2011/01/01 إلى 2014/12/31 (48 مشاهدة). اعتمدت الباحثة مقاربتين؛ الأولى إحصائية من خلال منهجية Box-Jenkins ، والثانية تقوم على الذكاء الاصطناعي باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية، وذلك بغرض المقارنة بين الطريقتين واختيار النموذج الأكثر كفاءة في التنبؤ.

وأظهرت النتائج أن الشبكات العصبية الاصطناعية قدّمت أداءً أكثر دقة وواقعية مقارنة بالطريقة الإحصائية، مما يساعد على تفادي الانقطاعات المتكررة وتحسين جودة الخدمة. كما أكدت الدراسة إمكانية تعزيز النماذج المستقبلية بإدراج متغيرات إضافية مثل: درجات الحرارة، الرطوبة، المستوى المعيشي، الحالة الاجتماعية والثقافية، عدد الغرف والمكيفات... بما يسمح بزيادة دقة التنبؤات. وخلصت الباحثة إلى أهمية توظيف تقنيات الذكاء الاصطناعي وتفعيل الشراكة بين الأكاديميين وصانعي القرار لضمان التسيير الأمثل للطاقة الكهربائية باعتبارها مورداً استراتيجياً وحيوياً.

2. قدّم بوعروري فاطمة وبودرامه مصطفى (2018) دراسة بعنوان "دور الشبكات العصبية الاصطناعية في التنبؤ بالمبيعات لدعم صنع القرارات الإدارية بالمؤسسات - دراسة حالة مؤسسة الإسمنت بعين الكبيرة"، نُشرت في مجلة دراسات وأبحاث اقتصادية في الطاقات المتجددة، العدد الثامن (جوان 2018).

هدفت الدراسة إلى تطبيق أسلوب الشبكات العصبية الاصطناعية في التنبؤ بحجم مبيعات الإسمنت، وذلك بالاعتماد على البيانات الشهرية لمبيعات الإسمنت البورتلاندي العادي (CPJ) بالطن) خلال الفترة الممتدة من جانفي 2012 إلى ديسمبر 2015.

أظهرت النتائج أن اعتماد الشبكات العصبية الاصطناعية مكّن من الحصول على تنبؤات دقيقة وقريبة من الواقع للفترة من جانفي 2016 إلى ديسمبر 2016، مما ساعد على تقليص فوارق التقدير بين القيم الفعلية والمتوقعة. وخلصت الدراسة إلى أن هذه التقنية تُعد أداة فعالة لدعم صانعي القرار الإداري في المؤسسات الجزائرية، خاصة فيما يتعلق بالتخطيط وتحسين كفاءة التسيير.

3. تُعد دراسة سهاد علي شهيد (2018) الموسومة "دراسة مقارنة للتنبؤ بمعدلات الرطوبة النسبية (RH%) لحافطة نينوى باستخدام نماذج السلاسل الزمنية الموسمية والشبكات العصبية الاصطناعية"، والمنشورة في مجلة الإدارة والاقتصاد، السنة الحادية والأربعون، العدد 115، من الدراسات المهمة التي قارنت بين النماذج الإحصائية (SARMA) والنماذج الذكية (الشبكات العصبية الاصطناعية) في التنبؤ بالمتغيرات المناخية.

وقد أوضحت الدراسة أن أفضل نموذج ضمن الشبكات العصبية كان $NN(12,10,1)$ المكوّن من (12) متغيراً مزاحاً و(10) عقد مخفية، بينما مثّل نموذج $SARMA(1,0,1)(0,1,1)_{12}$ أفضل نماذج السلاسل الزمنية الموسمية.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

واعتمدت المقارنة على مقاييس إحصائية مثل $RMSE$ ، MAE ، $MAPE$ ، MAD ، لتبين النتائج أن أسلوب السلاسل الزمنية الموسمية تفوق على الشبكات العصبية في تحقيق أقل القيم لهذه المقاييس، ما جعله الأنسب للتنبؤ بالرطوبة النسبية لمخطة الموصل.

4. دراسة م.م. إيقان علاء ناظم (جامعة بغداد، كلية الإدارة والاقتصاد).

تناولت هذه الدراسة استخدام نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية في التنبؤ والمقارنة مع النماذج الإحصائية التقليدية، حيث سعى الباحث إلى بناء نموذج قوي للتنبؤ والتحليل والرقابة بعيداً عن الأساليب الكلاسيكية. اعتمدت الدراسة على منهجية $Box-Jenkins$ (ARMA) للمقارنة، وذلك بالاستناد إلى بيانات القدرة المستلمة من الشركة العامة لإنتاج الطاقة باعتبارها متغيرات خارجية مؤثرة.

كما ركزت على نشاط المبيعات في الشركة العامة لتوزيع كهرباء بغداد، والذي يشمل ثلاث مراحل أساسية: حساب الطاقة المباعة، حساب قيمتها المالية، ثم متابعة الإيرادات النقدية.

وأثبتت النتائج فعالية الشبكات العصبية في توفير نموذج أكثر مرونة وقوة للتنبؤ مقارنة بالمنهجيات الإحصائية التقليدية.

5. قدّم رهاد عماد صميوا و ظافر رمضان مطر (2019) دراسة بعنوان "مقارنة أداء التنبؤ بين بعض الشبكات العصبية الاصطناعية ومنهجية بوكس-جنكنز مع التطبيق"، نُشرت في المجلة العراقية للعلوم الإحصائية، العدد (28). هدفت الدراسة إلى مقارنة دقة التنبؤ بين منهجية بوكس-جنكنز (ARIMA) وبعض نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية التي اختلفت من حيث وجود التغذية الراجعة في هيكليتها، مثل:

Feed Forward Neural Network (FFNN) ، و Elman Neural Network (ENN) ، و (Nonlinear Autoregressive Network with Exogenous Input (NARX).

تم التطبيق على بيانات السلاسل الزمنية للمعدلات الشهرية لدرجات الحرارة العظمى في مدينة الموصل للفترة (1983-2009) بواقع (324) مشاهدة، مع تخصيص (12) مشاهدة للمقارنة خارج العينة.

وأظهرت النتائج أن الشبكات العصبية ذات التغذية الراجعة قدّمت أداءً تنبؤياً أفضل من الشبكات بدون تغذية راجعة وكذلك من منهجية بوكس-جنكنز.

6. أنجزت بختاوي فاطيمة الزهراء (2019) أطروحة دكتوراه بجامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان، بعنوان "تحليل فورييه وتقنية الشبكات العصبية الاصطناعية ونماذج ARIMA للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية - دراسة حالة مؤسسة

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

سونلغاز، مقاطعة سعيدة -"، هدفت إلى التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في ولاية سعيدة خلال الفترة الممتدة من جانفي 2010 إلى ديسمبر 2017، بالاعتماد على 96 مشاهدة شهرية.

اعتمدت الدراسة على ثلاثة أساليب:

✓ تحليل فورييه،

✓ منهجية بوكس-جنكنز (ARIMA)،

✓ الشبكات العصبية الاصطناعية.

أثبتت النتائج أنّ تحليل فورييه حقق أداءً تنبؤيًا أفضل مقارنة بالنموذجين الآخرين، حيث سجّل أصغر قيمة

لجذر متوسط مربع الخطأ (RMSE)، مما يؤكد فعاليته في التنبؤ بالظواهر الاقتصادية والموسمية.

7. أجرى ساهد عبد القادر وقهوي حسن (2022) دراسة مقارنة منشورة في مجلة الباحث في العلوم الاقتصادية والتجارية وإدارة الأعمال (Recherchers Économiques Manageriales)، المجلد 16، العدد 2، الصفحات 83-98، بتاريخ 30 ديسمبر 2022، تناولت التنبؤ بأسعار البترول الخام خلال الفترة 1990-2019 باستخدام مقاربتين مختلفتين.

اعتمدت الدراسة على نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية متعددة الطبقات (MLP-ANN) من

جهة، ونماذج الانحدار بأشعة الدعم (SVR) من جهة أخرى، مع تقييم الأداء استنادا إلى مؤشري متوسط مربعات الأخطاء (MSE) وجذر متوسط مربعات الأخطاء (RMSE).

وقد خلصت النتائج إلى أن نماذج الانحدار بأشعة الدعم (SVR) أظهرت كفاءة أعلى وأداء أدق في التنبؤ

بالقيم المستقبلية لأسعار البترول مقارنة بالشبكات العصبية متعددة الطبقات، وهو ما يعكس أهمية دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي المتقدمة في نماذج التنبؤ بالأسواق الطاقوية.

8. قام ساهد عبد القادر وقهوي حسن (2021) بإنجاز دراسة مقارنة بتاريخ 29 جويلية 2021 تناولت التنبؤ بحوادث المرور في ولاية تلمسان خلال الفترة 2011-2019. اعتمدت الدراسة على مقارنة ثلاثة نماذج كمية، وهي: الشبكات العصبية ذات دالة الأساس الشعاعي (RBF)، والشبكات العصبية متعددة الطبقات (MLP)، إضافة إلى نماذج الانحدار الذاتي والمتوسطات المتحركة المتكاملة (ARIMA). تم استخدام مؤشر جذر متوسط مربعات الخطأ (SMSE) كمعيار للمقارنة بين النماذج.

وقد توصل الباحثان إلى أن نموذج RBF يوفر أداءً أفضل ودقة أعلى في التنبؤ بحوادث المرور الشهرية

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

مقارنة بالنموذجين الآخرين (ARIMA و MLP)، مما يبرز فعالية الشبكات العصبية ذات البنية غير الخطية في معالجة السلاسل الزمنية ذات الطابع العشوائي.

9. نُشرت دراسة في مجلة تنمية الموارد البشرية (المجلد 17، العدد 2، الصفحات 495-514، جوان 2022) بعنوان: "التهجين بين شبكة دالة الأساس الشعاعية (RBFN) ونماذج ARIMA في التنبؤ باستهلاك الكهرباء في الجزائر للفترة 1980-2019" للباحثين ساهد عبد القادر وقهوي حسن.

هدفت الدراسة إلى توظيف نماذج هجينة تجمع بين نماذج ARIMA لتمثيل المكونات الخطية، وشبكة RBFN لتمثيل المكونات غير الخطية، وذلك بغرض التقدير والتنبؤ ومقارنتها مع النماذج التقليدية. ولأجل المفاضلة بين النماذج، اعتمد الباحثان على مقاييس متوسط مربعات الأخطاء (MSE) وجذر متوسط مربعات الأخطاء (RMSE)، باستخدام بيانات السلاسل الزمنية لاستهلاك الكهرباء في الجزائر خلال الفترة (1980-2019). وقد توصلت النتائج إلى أن النماذج الهجينة كانت أكثر دقة وملاءمة مقارنةً بنماذج ARIMA المنفردة في التنبؤ باستهلاك الكهرباء في الجزائر.

10. أجرى أمير حسين حمد مسمار (2016) دراسة بعنوان "دراسة مقارنة بين الشبكات العصبية الاصطناعية ومنهجية بوكس-جنكنز في التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية - ولاية الخرطوم"، وهي أطروحة دكتوراه بجامعة السودان للعلوم والتكنولوجيا، كلية العلوم، قسم الإحصاء التطبيقي.

هدفت الدراسة إلى إبراز أهمية التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية من أجل الاستخدام الأمثل للموارد المتاحة، وذلك من خلال مقارنة منهجيتين مختلفتين في بناء النماذج التنبؤية، هما: منهجية (ARIMA) Box-Jenkins والشبكات العصبية الاصطناعية.

اعتمد الباحث على بيانات الاستهلاك السنوي للكهرباء بولاية الخرطوم خلال الفترة الممتدة من 1982 إلى 2014، وتمت عملية التحليل باستخدام برنامجي SPSS و MATLAB. بالنسبة لمنهجية Box-Jenkins، تم تطبيق المراحل الأربع الأساسية لبناء النموذج (تحديد النموذج، تقدير المعلمات، تشخيص صلاحية النموذج، ثم إجراء التنبؤ)، وأسفر التحليل عن ملاءمة نموذج $ARIMA(1,2,0)$ للبيانات بعد التحقق من جودته باستخدام مؤشرات مثل متوسط مربع الخطأ (MSE) ومتوسط الخطأ المطلق (MAE).

أما في ما يتعلق بالشبكات العصبية الاصطناعية، فقد تم بناء النموذج عبر ست خطوات رئيسية، شملت تقسيم البيانات إلى ثلاث مجموعات: بيانات التدريب (70% من السلسلة الزمنية، أي حوالي 23 مشاهدة)، بيانات التحقق (15%، حوالي 5 مشاهدات)، وبيانات الاختبار (15%، حوالي 5 مشاهدات). جرى تدريب الشبكة عدة مرات

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

بهدف الوصول إلى أقل قيمة لمربع الخطأ، ومن خلال التكرار وإعادة الضبط تمكنت الشبكة من تحديد الأوزان المثلى التي تحقق أفضل دقة للتنبؤ.

وقد تمت المقارنة بين نتائج الطريقتين باستخدام مجموعة من المعايير الإحصائية هي: MSE ، و MAE ، و MAD ، و $MAPE$ ، وأظهرت النتائج تفوق الشبكات العصبية الاصطناعية في دقة التنبؤ مقارنةً بنماذج $ARIMA$. كما قامت الأطروحة بتوليد تنبؤات باستهلاك الكهرباء للفترة الممتدة من 2015 إلى 2020، وأوصى الباحث في ضوء النتائج بضرورة اعتماد الشبكات العصبية الاصطناعية كخيار فعال للتنبؤ بالسلاسل الزمنية في قطاع الطاقة وغيره من المجالات.

11. قدمت سهيلة عتروس، عبد الرزاق بن الزاوي، وصبرينة عتروس (2019) دراسة بعنوان "منهجية-Box-Jenkins كأسلوب قياسي فعال للتنبؤ باستهلاك الطاقة - دراسة حالة استهلاك النفط والغاز في الجزائر"، نُشرت في مجلة اقتصاد المال والأعمال (JFBE)، المجلد 03، العدد 03، أكتوبر 2019، الصفحات 586-604.

هدفت الدراسة إلى تسليط الضوء على أهمية الطاقة كمحرك رئيسي لمختلف القطاعات الاقتصادية، مع التركيز على أبرز مصادر الطاقة غير المتجددة في الجزائر، وهما: النفط والغاز الطبيعي، وذلك بالنظر إلى تزايد استهلاكهما في السنوات الأخيرة وما يطرحه ذلك من تحديات على مستوى السياسات الطاقوية. كما سعت الورقة إلى استكشاف الأساليب الإحصائية الملائمة لدراسة السلاسل الزمنية الخاصة باستهلاك النفط والغاز والتنبؤ بالقيم المستقبلية بشكل دقيق وواقعي.

اعتمد الباحثون على منهجية Box-Jenkins (ARIMA) بما تتضمنه من مراحل أساسية: تحديد النموذج المناسب، تقدير معالمه، تشخيص مدى ملاءمته، ثم استخدامه في التنبؤ. وقد طُبقت هذه المنهجية على بيانات السلسلة الزمنية للاستهلاك السنوي من النفط والغاز في الجزائر، من أجل صياغة نموذج قياسي للتنبؤ يعكس الاتجاهات المستقبلية. توصلت الدراسة إلى أن منهجية Box-Jenkins أثبتت فعاليتها وكفاءتها كأداة قياسية للتنبؤ باستهلاك النفط والغاز، مما يجعلها وسيلة عملية تساعد صانعي القرار في رسم الخطط والاستراتيجيات المستقبلية، واتخاذ التدابير والسياسات المناسبة في الوقت الملائم.

12. أجرى زدون جمال وعشوي نصر الدين (2015) دراسة بعنوان "النموذج القياسي الأمثل للتنبؤ بالطلب على الطاقة الكهربائية في تلمسان"، نُشرت في مجلة التكامل الاقتصادي، المجلد 3، العدد 3، الصفحات 246-265، سبتمبر 2015.

هدفت هذه الدراسة إلى تحديد النموذج القياسي الأكثر دقة وملاءمة للتنبؤ بالطلب على الطاقة الكهربائية في

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

ولاية تلمسان، وذلك في ظل تزايد استهلاك الطاقة وتوسع الشبكات الكهربائية.

اعتمد الباحثان على تطبيق أربعة نماذج قياسية مختلفة، هي:

✓ نموذج (ARIMA) Box-Jenkins،

✓ نموذج Holt-Winters للتنبؤ الموسمي،

✓ نموذج الاتجاه العام (Trend Model)،

✓ نموذج الانحدار الخطي البسيط.

أُستخدمت في التحليل سلسلتان زمنيتان:

1. استهلاك الطاقة الكهربائية (CE)،

2. عدد المشتركين في الشبكات الكهربائية (CL)،

وذلك بالاعتماد على بيانات فصلية تغطي الفترة الممتدة من 2007 إلى 2012.

أظهرت نتائج المقارنة بين النماذج أن نموذج Box-Jenkins هو النموذج الأكثر ملاءمة ودقة للتنبؤ بالطلب

على الطاقة الكهربائية في تلمسان، مقارنة بالنماذج الأخرى. وهو ما يعكس فعالية هذه المنهجية في التعامل مع السلاسل الزمنية القصيرة والمتوسطة المدى.

13. قام بن العارية أحمد (2022) بدراسة بعنوان "استخدام نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ بمبيعات

الطاقة الكهربائية بولاية أدرار"، نُشرت في مجلة التكامل الاقتصادي، المجلد 10، العدد 2، الصفحات 92-108، جوان 2022.

هدفت هذه الدراسة إلى التنبؤ بمبيعات الطاقة الكهربائية في ولاية أدرار باستخدام منهجية الشبكات العصبية

الاصطناعية، نظرًا لقدرتها على التعامل مع السلاسل الزمنية المعقدة ذات الخصائص الموسمية.

اعتمد الباحث على البيانات الأسبوعية لمبيعات الطاقة الكهربائية للفترة الممتدة من جانفي 2012 إلى

ديسمبر 2021، حيث تم بناء وتدريب عدة نماذج من الشبكات العصبية بغرض التنبؤ.

أظهرت النتائج أن أداء النموذج كان جيدًا في عملية التنبؤ، إذ تمكن من الاحتفاظ بالخصائص الموسمية لسلسلة

المبيعات، حيث تميزت أشهر جوان، جويلية وأوت بارتفاع ملحوظ في المبيعات نتيجة الزيادة في الاستهلاك خلال فصل

الصيف. كما بينت التنبؤات أن مبيعات سنة 2022 ستعرف ارتفاعًا مقارنة بسنة 2021، وهو ما فسره الباحث

بعاملين رئيسيين:

1. التوسع العمراني الذي يؤدي إلى زيادة الطلب على الكهرباء،

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

2. ارتفاع الأنشطة الصناعية بالمنطقة.

خلصت الدراسة إلى أن نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية تمثل أداة فعالة للتنبؤ بمبيعات الطاقة الكهربائية،

كونها قادرة على محاكاة الأنماط الموسمية والتكيف مع التغيرات في الاستهلاك.

32. قدّمت وسيلة بوفنش (2013-2014) أطروحة دكتوراه بعنوان "الطاقة الكهربائية في الجزائر: محاولة التوقع

بالإنتاج - دراسة حالة الشركة الوطنية للكهرباء والغاز"، بجامعة سطيف 1، تخصص علوم اقتصادية.

تتناول هذه الأطروحة قطاع الطاقة الكهربائية في الجزائر باعتباره قطاعاً استراتيجياً يضطلع بدور محوري في دعم

التنمية الاقتصادية، حيث يرتبط استمرار وتوسع النشاط الاقتصادي بمدى توفر خدمات الكهرباء بشكل كافٍ وبأسعار مناسبة.

وقد ركزت الدراسة على الشركة الوطنية للكهرباء والغاز التي تواجه جملة من التحديات المرتبطة بقدراتها

الإنتاجية، الأمر الذي يفرض عليها تبني تقنيات وأساليب حديثة في التسيير والإدارة، وفي مقدمتها أساليب التنبؤ، بغرض دعم اتخاذ القرار وترشيد السياسات الإنتاجية.

استخدمت الباحثة منهجية بوكس-جنكنز (Box-Jenkins) في نمذجة وتحليل السلسلة الزمنية، مع

مقارنتها بنماذج أخرى مثل نماذج ARCH، وذلك لتحديد النموذج الأكثر دقة وملاءمة للتنبؤ بحجم الإنتاج. وقد

سمحت نتائج التحليل بالتوصل إلى أن نماذج ARIMA المشتقة من منهجية بوكس-جنكنز تقدم أفضل أداء في تمثيل السلوك الديناميكي للإنتاج الكهربائي، حيث أظهرت دقة أعلى في التنبؤ مقارنة بالنماذج الأخرى.

اعتمدت الأطروحة على بيانات شهرية تغطي فترة زمنية تمتد من جانفي 2000 إلى أفريل 2013، والمتعلقة بحجم

إنتاج الكهرباء للشركة الوطنية للكهرباء والغاز. وأثبتت النتائج فعالية منهجية بوكس-جنكنز في التعامل مع التقلبات

الدورية والعشوائية، ما يجعلها أداة عملية لمساعدة متخذي القرار في القطاع الطاقوي على تحديد حجم الإنتاج الأمثل لمواجهة الطلب المتزايد، خاصة في ظل تحرير سوق الكهرباء في الجزائر واشتداد المنافسة.

33. قدّمت عتروس سهيلة (2017-2018) رسالة دكتوراه في علوم التسيير بجامعة محمد خيضر - بسكرة،

بعنوان "استخدام منهجية بوكس جنكنز والشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية بمؤسسة

سونلغاز - دراسة حالة: ولاية بسكرة".

انطلقت الدراسة من ملاحظة التطور الكبير الذي عرفه قطاع الكهرباء في الجزائر نتيجة للنمو الاقتصادي

والتكنولوجي والديموغرافي، وما نتج عنه من تزايد مستمر في الاستهلاك الطاقوي، مما جعل مسألة التنبؤ بالاستهلاك

المستقبلي تحتل أهمية استراتيجية بالنسبة للمؤسسات الطاقوية.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

لذلك هدفت الأطروحة إلى اختبار فعالية كل من منهجية بوكس-جنكينز (Box-Jenkins) والشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs) في التنبؤ بالقيم المستقبلية لاستهلاك الطاقة الكهربائية. تجسدت عينة الدراسة في بيانات شهرية لاستهلاك الكهرباء ذات التواتر المنخفض والمتوسط بولاية بسكرة خلال الفترة الممتدة من جانفي 2014 إلى ديسمبر 2017. وبعد تطبيق المنهجين محل الدراسة ومقارنة نتائجهما، توصلت الباحثة إلى أن منهجية بوكس-جنكينز قدّمت نتائج أكثر دقة وقرباً من القيم الفعلية، مما يجعلها الأداة الأنسب لمؤسسة سونلغاز في مجال التنبؤ، مقارنةً بنتائج الشبكات العصبية الاصطناعية.

أبرزت هذه النتائج أن المنهجيات الإحصائية التقليدية مثل Box-Jenkins ما تزال تحتفظ بقدرتها التفسيرية والدقة العالية في التنبؤ، خصوصاً في حالة السلاسل الزمنية المستقرة نسبياً، على الرغم من الإمكانيات الكبيرة للشبكات العصبية الاصطناعية في معالجة البيانات غير الخطية والمعقدة.

36. غاسمي لعبد، زواوي شيكر المزور، ومحمد عطوش (أفريل 2018)،

"Wind power forecasting using neural network and ARIMA models (field of Kabertene, in southern Algeria)" ،
Geographical and Environmental Modelling، المجلد 39، العدد 2، الصفحات 71-79.

تركزت هذه الدراسة على التنبؤ بقدرة إنتاج طاقة الرياح في حقل كابرتن (Kabertene) الواقع على بعد 70 كم شمال عاصمة ولاية أدرار بالجنوب الجزائري. اعتمد الباحثون على مقارنة بين نموذج الانحدار الذاتي والمتوسطات المتحركة (ARIMA) والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN). وقد تم تقييم أداء النماذج بالاعتماد على مقاييس الخطأ الإحصائية: MAE، RMSE، وMAD.

أظهرت النتائج أن نموذج ANN تفوق بوضوح على نموذج ARIMA في دقة التنبؤ، مما يؤكد فعاليته كبديل عملي للتنبؤ بإنتاج طاقة الرياح، خاصة في الحالات التي تتطلب دقة عالية للتخطيط والتشغيل.

37. صاري حسون صلاح الدين، نعمان محمد عبد الجليل، ومليوي عيد الغاني (2023)، "دراسة تنبؤ الاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر باستعمال منهجية بوكس جنكينز وأسلوب التمليس الأسّي"، مجلة الأصيل للبحوث الاقتصادية والإدارية، المجلد 7، العدد 2، الصفحات 379-398، 31 أكتوبر 2023.

تركزت هذه الدراسة على التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة الممتدة بين 1980 و2021، وذلك باستخدام منهجية بوكس-جنكينز (Box-Jenkins) وأسلوب التمليس الأسّي (Exponential Smoothing). وقد تم تطبيق عدة نماذج للتنبؤ:

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

✓ طريقة التمهيد الآسي (Brown) أظهرت النتائج أن الاستهلاك المتوقع بلغ 76.41 مليار TWh سنة 2022، و 79.85 مليار TWh سنة 2023، ثم 83.29 مليار TWh سنة 2024 و 86.73 مليار TWh سنة 2025.

✓ طريقة Holt: أشارت التنبؤات إلى 74.81 مليار TWh سنة 2022، و 78.21 مليار TWh سنة 2023، ثم 81.64 مليار TWh سنة 2024 و 85.04 مليار TWh سنة 2025.

✓ منهجية بوكس-جنكينز (ARIMA) أظهرت التقديرات أن الاستهلاك بلغ 75.82 مليار TWh سنة 2022، ثم ارتفع إلى 78.99 مليار TWh سنة 2023، ليصل إلى 82.98 مليار TWh سنة 2024 و 87.07 مليار TWh سنة 2025.

خلص الباحثون إلى أن النماذج المستخدمة أثبتت كفاءتها في إعطاء مؤشرات دقيقة حول اتجاهات استهلاك

الكهرباء في الجزائر، مما يوفر أداة مهمة لصانعي القرار في التخطيط لسياسات الطاقة المستقبلية.

الفرع الثاني: الدراسات الأجنبية

1. في مقال بعنوان :

"A comparison of Holt-Winter and Artificial Neural Network approach in forecasting: A case study for tent manufacturing industry"

نُشر في مجلة Results in Engineering (المجلد 21، مارس 2024، ص. 101899)، قام جورج رومي (George Rumbe)، محمد حماسة (Mohammad Hamasha)، وسحر المشاقبة (Sahar Al Mashaqbeh) بدراسة مقارنة بين منهجية Holt-Winters والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) في التنبؤ بالطلب داخل قطاع تصنيع الخيام.

ارتكزت الدراسة على دراسة حالة لشركة تصنيع خيام، حيث تم التركيز على ديناميكيات تذبذب الطلب تحت

تأثير العوامل الموسمية.

أظهرت النتائج أن نموذج ANN قدّم دقة تنبؤية أفضل مقارنةً بمنهجية Holt-Winters، خصوصًا في توقع

الطلب على خيام Elite و Party Canopy، في حين لوحظ هامش خطأ بنسبة 15% في التنبؤ بخيام Vista.

كما تناولت الدراسة السياق الأوسع لسلسلة الإمداد في صناعة الخيام، من خلال استعراض العوامل المؤثرة على

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

مبيعات الخيام التجارية وتحديد أبرز الفاعلين في سلسلة التوريد. خلصت النتائج إلى أن نموذج ANN يتمتع بقدرة عالية على التقاط الأنماط المعقدة في الطلب، مما يجعله أداة واعدة لتطوير ممارسات أكثر دقة في التنبؤ داخل قطاع الصناعات التحويلية.

2. قدّم ماريا ماركوفسكا (Marija Markovska)، أنيتا بوتشكوفسكا (Aneta Bučkovska)، وديميتار تاسكوفسكي (Dimitar Taskovski) من جامعة القديسين كيريل وميتوديووس - سكوبي، مقدونيا الشمالية، دراسة بعنوان:

"Comparative study of ARIMA and Holt-Winters statistical models for prediction of "energy consumption

تناولت مقارنة بين نموذج ARIMA ونموذج Holt-Winters للتنبؤ باستهلاك الطاقة. اعتمدت الدراسة على بيانات استهلاك الطاقة الفعلية الخاصة بكلية الهندسة الكهربائية وتكنولوجيا المعلومات في سكوبي خلال الفترة من 2014-01-01 إلى 2016-05-31. تم تطبيق النماذج على بيانات زمنية يومية، أسبوعية وشهرية للفترة من يناير إلى مايو 2016، مع تقييم الدقة باستخدام مؤشرات RMSE و MAE. أظهرت النتائج أن نموذج ARIMA أكثر دقة عند التعامل مع السلاسل الزمنية اليومية، بينما قدّم نموذج Holt-Winters أداءً أفضل على المستويات الأسبوعية والشهرية. وتبرز أهمية هذه النتائج في كونها تقدم رؤية عملية لاختيار النموذج الإحصائي المناسب بحسب طبيعة البيانات الزمنية المستخدمة في التنبؤ باستهلاك الطاقة.

3. قدّم إيوا تشوداكوفسكا (Ewa Chodakowska)، جوانيسوس نازاركو (Joanicjusz Nazarko)، ووكاوش نازاركو (Łukasz Nazarko)، إضافةً إلى هشام س. ربيعة (Hesham S. Rabayah)، رائد م. أبنده (Raed M. Abendeh) ورامي العوض (Rami Alawneh) دراسة بعنوان :

"ARIMA Models in Solar Radiation Forecasting in Different Geographic Locations"

نُشرت في مجلة Energies (المجلد 16، العدد 13، ص 5029، بتاريخ 28 يونيو 2023). تهدف الدراسة إلى تقييم أداء نموذج ARIMA في التنبؤ بالإشعاع الشمسي تحت ظروف مناخية مختلفة، بالاعتماد على بيانات من الأردن وبولندا. تم بناء نماذج سلاسل زمنية باستخدام بيانات شهرية وساعية لتوليد التنبؤات. أظهرت النتائج أنّ نماذج ARIMA ملائمة للتنبؤ بالإشعاع الشمسي، ويمكن اعتمادها كأداة مرجعية

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

لمقارنة النماذج الأخرى أو كنموذج أساسي لدعم تخطيط وتشغيل أنظمة الطاقة المتجددة. كما أكدت الدراسة أنّ النماذج ينبغي أن تكون خاصة بالموقع الجغرافي نظرًا لاختلاف خصائص الإشعاع الشمسي بين المناطق. تكتسب هذه النتائج أهمية خاصة في سياق السياسات العالمية الهادفة إلى خفض انبعاثات الغازات الدفيئة وتعزيز إدماج الطاقات المتجددة في الشبكات الوطنية.

4. نشر الباحثان جان آدموفسكي (Jan Adamowski) و هيو فونغ شان (Hiu Fung Chan) دراسة بعنوان "Accurate and reliable groundwater level forecasting models" في مجلة Journal of Hydrology، المجلد 407، الأعداد 1-4، صفحات 28-40، سبتمبر 2011.

اقترحت الدراسة أسلوبًا جديدًا للتنبؤ بمستويات المياه الجوفية قائمًا على الدمج بين تحويلات الموجات المتقطعة (Wavelet Transform - WA) والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN). وقد تمت مقارنة أداء النموذج المقترح (WA-ANN) مع نماذج الشبكات العصبية التقليدية (ANN) ونماذج السلاسل الزمنية من نوع ARIMA، وذلك في إطار التنبؤ الشهري بمستويات المياه الجوفية.

اعتمدت الدراسة على بيانات الهطول المطري الشهري، ومتوسط درجة الحرارة، ومستويات المياه الجوفية المسجلة بين نوفمبر 2002 وأكتوبر 2009 في موقعين من حوض Chateauguay بمقاطعة كيبيك - كندا. وأظهرت النتائج أن نموذج (WA-ANN) قدم دقة أعلى في التنبؤ بمستويات المياه الجوفية الشهرية مقارنةً بالنماذج الأخرى، مما يبرز إمكانيته في دعم استراتيجيات أكثر استدامة لإدارة الموارد المائية الجوفية.

5. في دراسة حديثة نُشرت في مجلة Scientific Reports (2025)، تناول Boumediene Ladjal وآخرون موضوع التنبؤ بالإشعاع الشمسي المباشر (Direct Normal Irradiance - DNI) في مدينة غرداية بالجزائر، باعتباره مؤشرًا أساسيًا لتقدير الإمكانيات الشمسية. اعتمد الباحثون على مقارنة أربعة نماذج تنبؤية مبنية على تقنيات الذكاء الاصطناعي، وهي: الشبكة العصبية بالتغذية العكسية (FFBP)، الشبكة العصبية الالتفافية المدججة مع (CFBP) (FFBP)، الانحدار باستخدام آلة الدعم الناقل (SVR)، إضافةً إلى نموذج التعلم العميق الهجين (CNN-LSTM) الذي يجمع بين الشبكات العصبية الالتفافية (CNN) لاستخلاص الخصائص، وشبكات الذاكرة الطويلة قصيرة الأمد (LSTM) لمعالجة الطبيعة الزمنية للبيانات.

ولغرض تقييم دقة هذه النماذج، تم استخدام مجموعة من المؤشرات الإحصائية تشمل: متوسط مربعات الخطأ (MSE)، الجذر التربيعي لمتوسط مربعات الخطأ (RMSE)، متوسط الخطأ المطلق (MAE)، متوسط نسبة الخطأ المطلق (MAPE)، إضافةً إلى القيمة المعيارية للجذر التربيعي لمتوسط مربعات الخطأ (nRMSE).

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

وقد أظهرت النتائج التجريبية تفوق النموذج الهجين CNN-LSTM على بقية النماذج من حيث الدقة والموثوقية، حيث سجل معامل تحديد مرتفع جدًا ($R^2 = 0.99925$) مع أدنى معدلات خطأ، مما يؤكد فعاليته العالية في التنبؤ بالإشعاع الشمسي المباشر.

10. قام Ivan Georgiev ، Slavi Georgiev ، Aleksandar Chikalov ، Fatima Sapundzhi و

بإنجاز دراسة بعنوان:

‘Predictive Modeling of Photovoltaic Energy Yield Using an ARIMA Approach’

نُشرت في مجلة Applied Sciences ، المجلد 14 ، العدد 23 ، المقال رقم 11192 ، بتاريخ 30 نوفمبر 2024.

هدفت هذه الدراسة إلى التنبؤ بمردود الطاقة الكهروضوئية (PV) بالاعتماد على خوارزمية ARIMA.

وقد تم تحليل سلسلتين زمنيتين أساسيتين هما: العائد النوعي (Specific Yield) و العائد الإجمالي (Total Yield)، مع تطوير نموذجين ARIMA لكل سلسلة: أحدهما مختار من طرف الباحثين والآخر تم تحديده باستخدام برنامج SPSS.

تم تقييم أداء النماذج من خلال إحصاءات الملاءمة (Fit Statistics) ، وفحص دوال الارتباط الذاتي (ACF) والارتباط الذاتي الجزئي (PACF) لمتبقيات النماذج للتحقق من كفاءتها، كما تم حساب فترات الثقة لتأكيد صلاحية النماذج. وقد تم توليد توقعات شهرية لكل سلسلة زمنية مرفقة بفترات الثقة لإظهار القدرات التنبؤية للنماذج. أظهرت النتائج فعالية نموذج ARIMA في التنبؤ بمردود الطاقة الكهروضوئية الشهري، مما يوفر أداة مهمة لتحسين أداء الأنظمة الكهروضوئية والتخطيط المستقبلي لها. وتبرز هذه الدراسة أهمية تطبيق نماذج السلاسل الزمنية في مجال الطاقات المتجددة، خصوصاً في التنبؤ بالإنتاج المستقبلي للطاقة الشمسية.

12. في دراسة حديثة بعنوان:

‘Electricity consumption forecasting with outliers handling based on clustering and deep learning with application to the Algerian market’

نُشرت في مجلة Expert Systems with Applications (المجلد 227 ، أكتوبر 2023 ،

ص.120123)، قام José F. Torres ، Abderrazak Sebaa ، Dalil Hadjout ، و Francisco

Martínez-Álvarez بتطوير منهجية متعددة الخطوات للتنبؤ باستهلاك الكهرباء على المدى المتوسط في القطاع الاقتصادي الجزائري.

اعتمدت الدراسة على ثلاث مراحل أساسية:

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

1. تنظيف البيانات (Outliers Handling): عبر خوارزميات Robust Exponential Smoothing و Holt-Winters للتعامل مع القيم الشاذة.

2. التجميع (Clustering): باستخدام طريقتي K-Shape و K-Means لتحديد أنماط استهلاك العملاء.

3. التنبؤ (Forecasting): باستعمال نموذج تعلم عميق مبني على Gated Recurrent Units (GRU).

تم اختبار المنهجية على بيانات 2000 مستهلك كهربائي بولاية بجاية خلال فترة 14 سنة. ولغرض التحقق من دقة النموذج، تمت مقارنة النتائج مع نماذج تقليدية ومتقدمة مثل: ARIMA، Seasonal Grey Model، LSTM، Temporal Convolutional Networks ونماذج تجميعية أخرى.

أظهرت النتائج أن المنهجية المقترحة حققت دقة عالية جداً، حيث بلغ $MAPE = 2.04\%$ ، كما أن 87% من المستهلكين أظهروا نسبة خطأ منخفضة بشكل ملحوظ. وأكدت الدراسة أن الاعتماد على K-Shape Clustering مع GRU يوفر أداءً تنبؤياً متفوقاً مقارنة بالطرق التقليدية، مما يعزز من فعالية إدارة الطلب وتقليل الفاقد الكهربائي.

13. في ورقة بحثية بعنوان:

"Comparison between ARIMA and ANN models used in short-term wind speed forecasting"

قدّمت في المؤتمر الآسيوي-المهادي لهندسة الطاقة والطاقة (Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference – APPEEC 2011) المنعقد في ووهان، الصين خلال شهر مارس 2011، ونُشرت لاحقاً على منصة IEEE Xplore بتاريخ 11 أبريل 2011، قام الباحثان لينغ تشين (Ling Chen) وشو لاي (Xu Lai) بدراسة مقارنة بين النماذج الإحصائية والذكاء الاصطناعي في التنبؤ قصير المدى بسرعة الرياح. تُبرز الدراسة أهمية طاقة الرياح كأحد أهم البدائل لمواجهة أزمة الطاقة العالمية، لكنها في الوقت ذاته تعاني من عدم الاستقرار والتقلبات مما يخلق تحديات تشغيلية لشبكات الطاقة المتصلة بها. اعتمد الباحثان على نموذجين للتنبؤ:

✓ النموذج الإحصائي (ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average).

✓ النموذج الذكي (ANN (Artificial Neural Network).

تم تطبيق النماذج على بيانات سرعة الرياح المسجلة في حديقة رياح بمقاطعة هويي – الصين، وذلك للتنبؤ بسرعة الرياح على المدى القصير (من ساعة واحدة حتى أربع ساعات مسبقاً)، مع تقسيم البيانات شهرياً لتحليل الأداء. أظهرت النتائج أن كلا النموذجين يحققان توافقاً جيداً مع القيم المقاسة، غير أن النموذج العصبي ANN تفوّق

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

بوضوح على ARIMA في دقة التنبؤ بالرياح على المدى القصير. وأكدت الدراسة أن السلاسل الزمنية ذات التباين المرتفع تستلزم بناء نماذج خاصة بها، وفي الحالات التي يكون فيها التباين كبيراً جداً، يصبح من الضروري اللجوء إلى نماذج هجينة أو التنبؤ العددي بالطقس لتحقيق نتائج أكثر موثوقية.

14. في مقال علمي بعنوان:

"Improving forecasting accuracy of time series data using a new ARIMA-ANN hybrid method and empirical mode decomposition" نُشر في مجلة Neurocomputing (المجلد 361، 7 أكتوبر 2019، الصفحات 151-163)، قدّم الباحثان أوميت تشافوش بيويكشاهاين (Ümit Çavuş Büyükşahin) وشيدا إرتكين (Şeyda Ertekin) مقترحاً جديداً لتحسين دقة التنبؤ بالسلاسل الزمنية من خلال طريقة هجينة تجمع بين نموذج ARIMA والنموذج العصبي الاصطناعي ANN مع دمج تقنية التحليل التحويلي النمطي (Empirical Mode Decomposition – EMD).

تأتي أهمية هذا البحث من كون العديد من التطبيقات في مجالات مختلفة (كالطاقة، الاقتصاد، والاتصالات) تولد كميات ضخمة من بيانات السلاسل الزمنية، مما يجعل التنبؤ الدقيق أمراً بالغ الأهمية لصنّاع القرار. ورغم توفر نماذج متعددة للتنبؤ، سواء الخطية مثل (ARIMA) أو غير الخطية مثل ANN، إلا أن الدراسات أثبتت أن دمج النماذج الخطية وغير الخطية غالباً ما يُحسن الأداء.

مع ذلك، فإن الطرق التقليدية للهجينة تواجه بعض القيود بسبب الافتراضات المسبقة التي تحد من فعاليتها في مواقف معينة. ومن هنا، اقترح الباحثان إطاراً أكثر عمومية للهجينة يقوم على:

1. دمج ARIMA للنمط الخطي و ANN للنمط غير الخطي.
 2. استخدام تقنية EMD لتفكيك البيانات الأصلية إلى مكونات أكثر قابلية للتنبؤ قبل مرحلة النمذجة.
 3. إعادة الجمع بين المكونات الخطية وغير الخطية بشكل استراتيجي يراعي خصائص السلسلة الزمنية.
- وقد بينت النتائج التجريبية أن الطريقة الهجينة المقترحة مع EMD تفوقت بوضوح على النماذج التقليدية، سواء النماذج الفردية (ARIMA) أو ANN أو النماذج الهجينة التقليدية، مما يجعلها مقاربة فعالة لرفع دقة التنبؤ.

15. في دراسة رائدة لـ James W. Taylor 2003 من:

Saïd Business School – University of Oxford، والمنشورة في Journal of the Operational Research Society، المجلد 54، الصفحات 799-805، تناول الباحث موضوع التنبؤ قصير الأجل بالطلب على

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

الكهرباء باستخدام بيانات نصف ساعية تغطي آفاقاً زمنية تتراوح بين نصف ساعة ويوم واحد. وقد أوضح أن سلاسل الطلب على الكهرباء تتسم بوجود موسمية يومية، تتجلى في تشابه منحى الاستهلاك من يوم لآخر، وموسمية أسبوعية تظهر من خلال التماثل في الطلب بين الأيام المقابلة للأسابيع المتتالية. واعتماداً على هذه الخصائص، قام الباحث بتطوير نموذج Holt-Winters للتسوية الأسية بحيث يتكيف مع موسمين في آن واحد، مع إدراج عنصر تصحيح للارتباط الذاتي المتبقي عبر نموذج انحدار ذاتي مبسط. وأظهرت النتائج التجريبية أن النموذج الجديد المعروف بـ التسوية الأسية Holt-Winters مزدوجة الموسمية حقق أداءً أدق وتُفوق بوضوح على النماذج التقليدية لـ Holt-Winters وكذلك على نموذج ARIMA المضاعف الموسمية، مما يؤكد فاعليته في التنبؤ بسلاسل الطلب الكهربائي المعقدة متعددة الدورات الموسمية.

16. في إطار الاهتمام المتزايد بضرورة الانتقال إلى الطاقات المتجددة، قدّم Wutthipum Kanchana و Siriroj Sirisukprasert دراسة بعنوان:

PV Power Forecasting with Holt-Winters Metho

عُرضت في (th International Electrical Engineering Congress iEECON8 2020) المنعقد بتشيانغ ماي – تايلاند في مارس 2020، وتم نشرها لاحقاً عبر منصة IEEE Xplore بتاريخ 27 أبريل 2020.

ركزت هذه الدراسة على تطوير تقنية للتنبؤ قصير الأجل بإنتاج الطاقة الكهروضوئية (PV) اعتماداً على

منهجية Holt-Winters Exponential Smoothing.

انطلق الباحثان من الإشكالية الأساسية المتمثلة في الآثار السلبية لعدم استقرار إنتاج الطاقة الشمسية نتيجة التغيرات المناخية اليومية والفصلية، وأهمية التنبؤ الدقيق للتقليل من هذه الآثار وتحسين أداء محطات الطاقة الكهروضوئية. ووضحت الدراسة أن دقة التنبؤ تعتمد بدرجة كبيرة على اختيار القيم المثلى لعنصرين رئيسيين: عدد الأيام (N) ومعامل الوزن (α). وقد اقترح الباحثان مجموعة من القيم المثلى التي يمكن تطبيقها بشكل عام عبر جميع الفصول.

اعتمدت التجربة التطبيقية على بيانات حقيقية لإنتاج الطاقة الشمسية من محطة في المنطقة الشرقية لتايلاند، وتمت المحاكاة باستخدام برنامج MATLAB. وأظهرت النتائج أن الطريقة المقترحة تقدم أداءً مقبولاً وفعالاً في التنبؤ قصير الأجل، مما يجعلها مناسبة للاستخدام في تطبيقات إدارة الطاقة وتسوية الأحمال الكهربائية (Power Smoothing). وتكمن مساهمة هذه الدراسة في كونها أبرزت قدرة نموذج Holt-Winters على التكيف مع خصوصية بيانات

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

الطاقة الشمسية، مقدمة بذلك إطارًا عمليًا يمكن تطويره ليتناسب مع خصوصية البيئات الطاقوية في دول أخرى، بما في ذلك الجزائر.

17. في دراسة حديثة قَدَّمها Alok ،R. Ruliana ،Pawan Kumar Singh ،Ansari Saleh Ahmar و Stuti Gupta و Kumar Pandey بعنوان:

“Comparison of ARIMA, SutteARIMA, and Holt-Winters, and NNAR Models to Predict Food Grain in India”

والمنشورة في مجلة Forecasting، المجلد 5، العدد 1، الصفحات 138-152، بتاريخ 10 جانفي 2023، قام الباحثون بمقارنة عدد من النماذج القياسية والإحصائية للتنبؤ بالإنتاج الزراعي في الهند، خاصةً إنتاج الحبوب الغذائية. هدفت الدراسة إلى تقييم أداء كل من نماذج ARIMA، وSutteARIMA، وHolt-Winters، بالإضافة إلى نموذج الشبكات العصبية ذاتية الارتجاع (NNAR) في التنبؤ بإنتاج الحبوب.

وأظهرت النتائج أن كلاً من نموذج SutteARIMA ونموذج Holt-Winters قدما أداءً جيدًا مقارنةً بالنماذج الأخرى، حيث كانت القيم المتنبأ بها قريبة جدًا من القيم الفعلية، وهو ما تم تأكيده من خلال مؤشرات الدقة مثل MAPE و MSE التي سجلت مستويات منخفضة نسبيًا. وقد أوصى الباحثون باستخدام نموذج SutteARIMA كخيار مفضل للتنبؤ بإنتاج الحبوب في الهند نظرًا لدقته وفعاليته مقارنةً بالنماذج الأخرى، حيث مكّنت التنبؤات من تقدير الإنتاج حتى سنة 2025، مع نتائج متوقعة بلغت 1140.14 مليون قنطار من القمح، و1232.27 مليون قنطار من الأرز، و466.46 مليون قنطار من الحبوب الخشنة، و259.95 مليون قنطار من البقوليات، بإجمالي إنتاج متوقع قدره 3069.80 مليون قنطار من الحبوب الغذائية. وتؤكد هذه النتائج فعالية نماذج التنبؤ الإحصائية وخاصةً SutteARIMA و Holt-Winters في دعم اتخاذ القرار في القطاع الزراعي.

18. Gao, Gao; Lo, Kwoklun; Fan, Fulin (2017). "Comparison of ARIMA and ANN Models Used in Electricity Price Forecasting for Power Market." Energy and Power Engineering, Vol. 9, No. 4B, April.

تناول الباحثون في هذه الدراسة موضوع التنبؤ بأسعار الكهرباء في أسواق الطاقة بوصفه أداة أساسية لصانعي القرار والفاعلين في السوق من أجل إعداد استراتيجيات المزايدة المثلى وتحقيق أقصى قدر من الأرباح. وقد اعتمدت الدراسة على بيانات نصف ساعة لأسعار الكهرباء في السوق البريطانية خلال الفترة الممتدة من 22 مارس إلى 14

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

يوليو 2010، وتم تطبيق منهجية النافذة المنزلقة (Sliding Training Window) بطول ثمانية أسابيع من أجل بناء التوقعات قصيرة الأجل حتى ثلاث خطوات زمنية للأمام (ما يعادل ثمانية أسابيع).

استخدم الباحثون نموذج الانحدار الذاتي المتكامل للمتوسطات المتحركة (ARIMA) بصيغ متعددة لدرجات (AR و MA)، بالإضافة إلى نموذج الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) باختلاف أعداد الخلايا العصبية (20 خلية عصبية) والتأخيرات الزمنية (4 تأخيرات). وقد تمت المقارنة بين النموذجين استناداً إلى معيار جذر متوسط مربعات الخطأ (RMSE) لقياس دقة التنبؤ.

أظهرت النتائج أنّ نموذج (ARIMA (4,1,2 قدّم أداءً أفضل مقارنة بنموذج الاستمرارية (Persistence Model)، كما تفوّق بوضوح على نموذج الشبكات العصبية الاصطناعية (20 خلية عصبية، 4 تأخيرات) من حيث دقة التوقع. خلصت الدراسة إلى أنّ النماذج الإحصائية التقليدية مثل ARIMA قد تكون أكثر ملاءمة في بعض تطبيقات التنبؤ بأسعار الكهرباء على المدى القصير مقارنة بالأساليب الذكية كال ANN، خصوصاً عند التعامل مع بيانات زمنية ذات أنماط خطية قوية.

20. قدّم فريق بحثي دراسة بعنوان:

ARIMA based forecasting of solar and hydro energy consumption with implications for grid stability and renewable policy

نُشرت في مجلة Discover Sustainability، المجلد 6، العدد 663، بتاريخ 18 يوليو 2025.

ركزت هذه الدراسة على التنبؤ باستهلاك كل من الطاقة الشمسية والطاقة الكهرومائية في 140 دولة خلال الفترة الممتدة من 1965 إلى 2023، باستخدام نموذج المتوسطات المتحركة المتكاملة الانحدارية الموسمية (SARIMA).

اعتمد الباحثون على التحسين الفائق للمعلمات (Hyperparameter Tuning) لاختيار أفضل توليفات للنموذج، حيث حُدّدت معاملات (p, d, q) للطاقة الشمسية بـ (2, 1, 2)، بينما كانت للطاقة الكهرومائية (1, 0, 1). وقد تم تقييم أداء النماذج باستخدام مقاييس جذر متوسط مربع الخطأ (RMSE) و معامل التحديد (R^2)، حيث حقق النموذج دقة مرتفعة RMSE: 3.45 للطاقة الشمسية، 4.12 للطاقة الكهرومائية؛ R^2 : 0.87 للطاقة الشمسية، 0.81 للطاقة الكهرومائية.

أظهرت النتائج أن استهلاك الطاقة الكهرومائية يتسم بالاستقرار عبر الزمن، في حين أن اعتماد الطاقة الشمسية يتقلب بشكل ملحوظ تبعاً للتغيرات السياسية والسوقية. وقد اعتبر الباحثون أن هذه التباينات تحمل دلالات مهمة لمديري الشبكات الكهربائية وصناع السياسات، إذ تساعد على وضع استراتيجيات لتقليل مشكلات التقطع المرتبطة

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

بالبطاقات المتجددة، وضمان توجيه الاستثمارات في البنية التحتية بما يتماشى مع الإمكانيات الإقليمية لكل مصدر طاقي.

وتبرز أهمية هذه الدراسة في كونها تجمع بين التحليل الكمي طويل المدى والبعد السياسي، مما يوفر مرجعاً عملياً للباحثين وصناع القرار في مجال استدامة الطاقة.

21. دراسة Hui Liu و Hong-qi Tian و Yan-fei Li (2012) بعنوان:

"Comparison of two new ARIMA-ANN and ARIMA-Kalman hybrid methods for wind speed prediction"

والمنشورة في مجلة Applied Energy، (المجلد 98، الصفحات 424–415 أكتوبر 2012)

ركزت على التنبؤ بسرعة الرياح باعتباره عنصراً أساسياً لأمن دمج طاقة الرياح في الشبكة الكهربائية.

اقترح الباحثون طريقتين هجنتين جديدتين تجمعان بين ARIMA مع الشبكات العصبية الاصطناعية (ARIMA-ANN) و ARIMA مع مرشح كالمان (ARIMA-Kalman).

✓ في النموذج الأول (ARIMA-ANN) استخدم ARIMA لتحديد هيكل شبكة ANN،

✓ بينما في النموذج الثاني (ARIMA-Kalman) استخدم ARIMA لتهيئة معادلات القياس

✓ الاختبار في حالتين دراسيتين أن كلا النموذجين قدما أداءً جيداً، وأن النماذج الهجينة تتفوق على والحالة في مرشح كالمان.

أظهرت نتائج النماذج الفردية في التنبؤ بسلسلة زمنية غير مستقرة مثل سرعة الرياح، مما يجعلها أدوات فعالة لدعم أنظمة طاقة الرياح.

22. أطروحة Connor Rollins (2020) بعنوان:

"Forecasting Energy Demand & Peak Load Days with the Inclusion of Solar Energy Production"

مقدمة لنيل درجة الماجستير في الهندسة الصناعية والنظم (Industrial and Systems Engineering) من معهد Rochester Institute of Technology – RIT، بإشراف Katie McConky و Nasibeh Azadeh Fard.

تناولت الأطروحة إشكالية التنبؤ بالطلب على الطاقة وأيام ذروة الحمل مع إدماج إنتاج الطاقة الشمسية، حيث

يُشكل التباين اليومي في إنتاج الألواح الشمسية وفقاً لأحوال الطقس تحدياً جديداً أمام دقة التنبؤ.

اعتمد الباحث على نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) و ARIMA عبر ثلاثة أساليب

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

مختلفة:

1. التنبؤ المباشر بالطلب الصافي باستخدام بيانات تاريخية مرتبطة بالطقس.
 2. التنبؤ بالطلب الكلي للمبنى ثم تعديل النتائج عبر تقدير متوسط إنتاج الطاقة الشمسية لمجموعات من الأيام (عالية، متوسطة، منخفضة الإنتاج).
 3. التنبؤ بالطلب مع استخدام أسلوب متعدد الأيام (Multiple Day Forecasting) عبر طرح إنتاج شمسي عشوائي من نفس مجموعة الأيام لتحسين دقة تحديد أيام الذروة.
- أظهرت النتائج أن نماذج ANN تفوقت على ARIMA في جميع الحالات، وكان أسلوب التنبؤ متعدد الأيام الأكثر دقة في التنبؤ بالطلب وأيام الذروة، يليه أسلوب الطلب الصافي ثم أسلوب المتوسط. وأكدت الأطروحة أن دقة التنبؤ بالطلب في ظل وجود الطاقة الشمسية تُعد عاملاً أساسياً لتمكين المستهلكين والمؤسسات من خفض تكاليف الطاقة، ولشركات التوزيع من تحسين موثوقية إمداداتها.
23. دراسة Adil Atesongun و Mehmet Gulsen (2024) بعنوان:

"A Hybrid Forecasting Structure Based on Arima and Artificial Neural Network Models"

والمنشورة في مجلة Applied Sciences، المجلد 14، العدد 16، المقالة 7122 14 أغسطس 2024، قدمت إطاراً هجيناً جديداً للتنبؤ يجمع بين نموذج ARIMA ونموذج Artificial Neural Network (ANN) بهدف تحسين دقة التنبؤ في مجموعات البيانات المعقدة.

يقوم النموذج المقترح بتمرير البيانات أولاً عبر ARIMA، ثم تُرسل الأخطاء (Residuals) إلى ANN لمعالجتها بشكل ثانوي. وبين النموذجين، تم إدراج آلية تصنيف تقوم بتقسيم مخرجات ARIMA إلى ثلاث مجموعات قبل إدخالها إلى ANN. وقد تم اختبار الخوارزمية على حالات تنبؤ معروفة من الأدبيات، وأظهرت النتائج أن النموذج الهجين المقترح تفوق على معظم الأساليب التقليدية، مما يؤكد فعالية الدمج بين النماذج البسيطة في تعزيز دقة التنبؤ عند التعامل مع بيانات غير خطية ومعقدة.

24. أطروحة Maryam Khodaverdi (2018) بعنوان:

"Forecasting future energy production using hybrid artificial neural network and ARIMA model"

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

مقدمة ضمن West Virginia University Graduate Theses, Dissertations, and Problem Reports، هدفت إلى تطوير نماذج دقيقة للتنبؤ بكمية الكهرباء (kWh) المنتجة من مختلف مصادر الطاقة الأولية في الولايات المتحدة.

اعتمدت الباحثة على بيانات وكالة Energy Information Administration للفترة (يناير

2004 – ديسمبر 2014)، حيث طورت نموذجين لكل مصدر طاقة: الأول باستخدام Artificial Neural Networks (ANN) والثاني باستخدام Hybrid ARIMA-ANN، ثم تمت مقارنة أدائهما مع البيانات الفعلية للفترة (يناير 2015 – نوفمبر 2017) من خلال مؤشرات دقة التنبؤ.

أظهرت النتائج أن نموذج ANN أكثر دقة في التنبؤ بمصادر الوقود الأحفوري (الفحم، البترول، الغاز الطبيعي)، بينما كان النموذج المجهن ARIMA-ANN أكثر كفاءة للتنبؤ بالطاقة المتجددة (الطاقة الحرارية الجوفية، الكهرومائية، الشمسية، والرياح). وفي النهاية، تم اختيار أفضل نموذج لكل مصدر طاقة أولي لتحديد المساهم المستقبلي في إنتاج الكهرباء، بما يوفر معلومات قيمة لصانعي القرار لتوجيه السياسات واللوائح المستقبلية نحو المصادر الأكثر هيمنة واستدامة.

المطلب الثاني: موقع الدراسة الحالية ضمن المجال البحثي

من خلال مراجعة الأدبيات العربية والأجنبية ذات الصلة، يمكن تحديد موقع هذه الدراسة ضمن السياق البحثي وأوجه تميزها على النحو الآتي:

أولاً: من حيث الموضوع

ركزت معظم الدراسات السابقة إما على التنبؤ باستهلاك الكهرباء فقط (جباري لطيفة مصطفى، 2016؛ بختاوي فاطيمة الزهراء، 2019؛ عتروس سهيلة، 2018) أو التنبؤ بالإنتاج (وسيلة بوفنش، 2014)، أو تطبيق نماذج كمية على مجالات أخرى مثل المبيعات أو المناخ (بوعروري فاطمة وبودرامه مصطفى، 2018؛ سهاد علي شهيد، 2018). في حين تميزت الدراسة الحالية بكونها تجمع بين التنبؤ بالاستهلاك والإنتاج معاً، وهو ما يمنحها شمولية أكبر من الدراسات السابقة، ويتيح فهماً معمقاً للعلاقة الثنائية بين جانبي العرض (الإنتاج) والطلب (الاستهلاك) في قطاع الطاقات المتجددة.

ثانياً: من حيث المجال الجغرافي

أغلب الدراسات العربية ركزت على مناطق أو ولايات محددة داخل الجزائر (تلمسان، سعيدة، بسكرة، أدرار)، أو على قطاعات إنتاجية معينة (سونغاز). أما الدراسة الحالية، فتتفرد بتركيزها على مستوى وطني شامل يغطي الجزائر ككل، مع اعتماد بيانات طويلة المدى تخص الطاقة الكهرومائية، وهي أحد أهم أشكال الطاقات المتجددة في البلاد.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

ثالثا: من حيث البيانات

غالبية الدراسات السابقة اعتمدت على بيانات متعلقة بالطاقة الشمسية أو طاقة الرياح أو على مجاميع إجمالية للطاقات المتجددة ؛ بينما تتميز الدراسة الحالية بتركيزها على بيانات الطاقة الكهربائية في الجزائر، وهو قطاع مهم لكنه لم ينل القدر الكافي من الاهتمام البحثي، ما يضفي على هذه الدراسة بعدا جديدا على مستوى المعالجة التطبيقية.

رابعا: من حيث المنهجية

بينت الدراسات السابقة اعتمادا متنوعا على النماذج الكمية:

✓ منهجية Box-Jenkins (ARIMA) جباري لطيفة، وسيلة بوفنش، عتروس سهيلة، زدون جمال وعشوي نصر الدين.

✓ الشبكات العصبية الاصطناعية (جباري لطيفة، بوعروري فاطمة، بن العارية أحمد).

✓ نماذج هجينة تجمع بين الطريقتين (ساهد عبد القادر وقهوي حسن، 2022).

✓ نماذج أخرى مثل Fourier و Holt-Winters.

أما الدراسة الحالية فتتميز بتوظيف مقارنة مقارنة تجمع بين ثلاث منهجيات مختلفة: نماذج بوكس-جنكنز، نماذج التمهيد الأسّي الثلاثي، والشبكات العصبية الاصطناعية. هذا الدمج يسمح بتقييم دقة النماذج واختيار الأنسب للتنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة المتجددة في الجزائر

خامسا: من حيث الأفق الزمني

غالبية الدراسات ركزت على أفق زمني قصير أو متوسط لا يتجاوز في الغالب 5 إلى 10 سنوات (مثل دراسة بن العارية أحمد، 2022؛ جباري لطيفة، 2016). بينما توسّعت دراستنا الحالية إلى أفق بعيد يصل إلى سنة 2035، مما يتيح مساهمة مباشرة في صياغة السياسات الطاقوية طويلة الأمد.

سادسا: من حيث الإضافة العلمية

تُسجّل الدراسة الحالية عدة إضافات نوعية :

✓ شمولية الموضوع من خلال دراسة الاستهلاك والإنتاج معا.

✓ الاعتماد على بيانات تاريخية طويلة المدى (1965-2024) تمنح النماذج قوة تفسيرية أكبر

✓ استخدام أكثر من منهجية قياسية في آن واحد لتدعيم دقة المقارنات.

✓ التركيز على الطاقة الكهربائية كأحد أشكال الطاقات المتجددة، في حين أن غالبية الدراسات ركزت على الكهرباء التقليدية أو النفط والغاز.

✓ تقديم نتائج تمتد حتى 2035، بما يساهم في رسم استراتيجيات مستقبلية مستدامة لقطاع الطاقة في الجزائر.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

وبذلك، يمكن القول إن هذه الدراسة تمثل مساهمة علمية متميزة ضمن الأدبيات العربية والأجنبية وتسعى إلى سد فجوات معرفية قائمة على المستويين النظري والتطبيقي.

الجدول رقم (13): موقع الدراسة الحالية مقارنة بالدراسات السابقة

البعد المقارن	الدراسات السابقة	الدراسة الحالية
الموضوع	ركزت غالبية الدراسات على جانب واحد فقط: إما الاستهلاك (جباري لطيفة، 2016؛ بختاوي فاطيمة الزهراء، 2019؛ عتروس سهيلة، 2018) أو الإنتاج (وسيلة بوفنش، 2014)، أو مجالات أخرى كالمبيعات والمناخ.	تناولت الاستهلاك والإنتاج معاً في قطاع الطاقات المتجددة، ما يمنح شمولية أكبر وفهماً أعمق للتوازن بين العرض والطلب.
المجال الجغرافي	أغلب الدراسات ركزت على ولايات محددة داخل الجزائر (تلمسان، سعيدة، بسكرة، أدرار) أو على دول أخرى (مصر، الخليج)	تركز على الحالة الجزائرية ككل ضمن منظور وطني، باستخدام بيانات الطاقة الكهرومائية.
البيانات	بيانات قصيرة أو متوسطة المدى، غالباً مرتبطة بالكهرباء التقليدية أو بالطاقة الشمسية والرياح.	بيانات طويلة المدى (1965–2024) خاصة بالطاقة الكهرومائية في الجزائر.
المنهجية	اعتماد منهجية واحدة في الغالب Box-Jenkins : (ARIMA)، الشبكات العصبية الاصطناعية، أو Holt-Winters؛ مع قلة الدراسات التي استخدمت مقاربات هجينة.	الجمع بين ثلاث منهجيات Box-Jenkins :، Holt-Winters، والشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) للمقارنة وتحديد النموذج الأكثر دقة.
الأفق الزمني	توقفت عند آفاق قصيرة أو متوسطة (5–10) سنوات غالباً.	تمتد إلى أفق بعيد (2035)، ما يعزز القيمة الاستراتيجية للدراسة.
الإضافة العلمية	مساهمات مهمة لكنها جزئية ومحدودة من حيث الشمولية والمنهجية.	تقدم إضافة نوعية عبر (1): شمولية الموضوع، (2) استخدام بيانات ممتدة زمنياً، (3) الدمج بين مناهج تقليدية وذكية، (4) التركيز على الطاقة الكهرومائية، (5) استشراف بعيد المدى.

المصدر: من اعداد الباحث

المبحث الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ

التنبؤ ليس مجرد عملية تقنية، بل هو أداة لاتخاذ قرارات رشيدة في ظل عدم اليقين. وبفضل التطور الحاصل في

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

الاقتصاد القياسي، ظهرت عدة نماذج إحصائية تساعد على تقدير القيم المستقبلية بدقة أكبر. ويعرض هذا المبحث أهم هذه النماذج التي يمكن الاعتماد عليها في التنبؤ.

المطلب الأول: نموذج الانحدار الذاتي المتجه (VAR)¹

من بين النماذج القياسية المعتمدة في التنبؤ، نجد نموذج الانحدار الذاتي المتجه (VAR)، الذي يتيح دراسة

العلاقات المتبادلة بين عدة متغيرات في نفس الوقت، ويُستخدم بكثرة في الدراسات الاقتصادية والطاورية للتنبؤ بالاتجاهات المستقبلية.

الفرع الأول: الشكل العام للنموذج

قبل عرض الشكل العام للنموذج، نأخذ مثالا عن نموذج VAR في شكله الهيكلي يحتوي على متغيرين (Y_t) و (X_t) في هذا المثال: تتأثر السلسلة الزمنية (Y_t) بالقيم الحالية والسابقة للسلسلة (X_t) ، وبالقيم السابقة ل (Y_t) في الوقت نفسه، تتأثر السلسلة الزمنية (X_t) بالقيم الحالية والسابقة للسلسلة (Y_t) ، وبالقيم السابقة ل (X_t) . وبناء على ذلك، سيكون لدينا النظام التالي:

$$\begin{cases} Y_t = \beta_{10} - \beta_{12}X_t + \gamma_{11}Y_{t-1} + \gamma_{12}X_{t-1} + \mu_{Yt} \dots (1) \\ X_t = \beta_{20} - \beta_{21}Y_t + \gamma_{21}Y_{t-1} + \gamma_{22}X_{t-1} + \mu_{Xt} \dots (2) \end{cases} \dots (I)$$

حيث يفترض أن X_t و Y_t ساكنتين وأن الأخطاء (μ_{Yt}, μ_{Xt}) غير مرتبطان ويشكلان تشويش أبيض. نظام المعادلات (I) هو عبارة الشكل الهيكلي لنموذج VAR من الرتبة 1 لأن فترة تأخير المتغيرتين هو 1، تسمى الأخطاء μ_t في مثل هذه النماذج بالصدمات (shocks)، يمكن كتابة هذا النظام على الشكل المصفوفي التالي:

$$\begin{bmatrix} 1 & \beta_{12} \\ \beta_{21} & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y_t \\ X_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta_{10} \\ \beta_{20} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} Y_{t-1} \\ X_{t-1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mu_{Yt} \\ \mu_{Xt} \end{pmatrix} \dots (3)$$

لنضع:

$$\beta Z_t = \tau_0 + \tau_1 Z_{t-1} + \mu_t \dots (4)$$

حيث:

$$\beta = \begin{bmatrix} 1 & \beta_{12} \\ \beta_{21} & 1 \end{bmatrix}, Z_t = \begin{pmatrix} Y_t \\ X_t \end{pmatrix}, \tau_0 = \begin{pmatrix} \beta_{10} \\ \beta_{20} \end{pmatrix}, \tau_1 = \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} \end{pmatrix}, \mu_t = \begin{pmatrix} \mu_{Yt} \\ \mu_{Xt} \end{pmatrix}$$

¹ Dimitrios Asteriou and Stephen G. Hall : Applied Econometrics, Amodern Approach, Revised Edition, First edition, 26 New York, 2006, 2007, P278.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

إذا كانت المصفوفة B غير شاذة وبالتالي تقبل معكوس، نضرب المعادلة (4) بـ B^{-1} نحصل على:

$$Z_t = A_0 + A_1 Z_{t-1} + e_t$$

حيث:

$$e_t = B^{-1} \mu_t, A_1 = B^{-1} \tau_1, A_0 = B^{-1} \tau_0$$

$$\begin{bmatrix} e_{1t} \\ e_{2t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \beta_{12} \\ \beta_{21} & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \mu_{Yt} \\ \mu_{Xt} \end{bmatrix}$$

لغرض التبسيط يمكننا رمز a_{i0} للعنصر i في الشعاع A_0 ، العنصر a_{ij} للعنصر الخاص بالسطر i والعمود j للمصفوفة A_1 ، و e_{it} للعنصر i في الشعاع e_t . وباستعمال هذه الرموز يمكننا كتابة النظام (I) السابق على الشكل المختصر التالي:

$$\begin{cases} Y_t = a_{10} + a_{11} Y_{t-1} + a_{12} X_{t-1} + e_{1t} \dots (5) \\ X_t = a_{20} + a_{21} Y_{t-1} + a_{22} X_{t-1} + e_{2t} \dots (6) \end{cases} \dots \dots (II)$$

يمكن أن نلاحظ أن الأخطاء e_{it} (أخطاء الشكل المختصر) مكتوبة بدلالة الصدمات (μ_{Yt}, μ_{Xt}) (أخطاء الشكل الهيكلي)، على الشكل التالي:

$$\begin{aligned} e_{1t} &= (\mu_{Yt} + \beta_{12} \mu_{Xt}) / (1 - \beta_{12} \beta_{21}) \\ e_{2t} &= (\mu_{Xt} + \beta_{21} \mu_{Yt}) / (1 - \beta_{12} \beta_{21}) \end{aligned}$$

بما أن (μ_{Yt}, μ_{Xt}) إذن الأخطاء e_{it} هي أيضا عبارة عن تشويش أبيض.

نلاحظ أيضا من خلال النظام (II) أن كل معادلة تحوي فقط على قيمها المتباطئة والقيم المتباطئة للمتغيرات

الأخرى في النظام.

أحد المتطلبات الأساسية لنموذج VAR هو أن تكون السلاسل قيد الدراسة ساكنة أو مستقرة، في هذه الحالة

لدينا ثلاث حالات¹:

✓ الحالة الأولى: إذا كانت X_t, Y_t كل منهما مستقرة عند المستوى، أي $I(0)$ في هذه الحالة نقدر كل معادلة على

حدا باستخدام طريقة المربعات الصغرى العادية.

¹ Gujarati Damodar, Econometrics by example, Second Edition, New York, USA, 2015, P440

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

✓ الحالة الثانية: كل من X_t , Y_t هي $I(1)$ ، في هذه الحالة يجب تسكين السلسلتين ثم تقدير كل معادلة بطريقة المربعات الصغرى العادية.

✓ الحالة الثالثة: كل من X_t , Y_t هي $I(1)$ ، مع وجود تكامل مشترك بينهما، في هذه الحالة علينا استخدام آلية تصحيح الخطأ (VECM)¹، هذا التصحيح يجمع بين التوازن طويل المدى والديناميكيات قصيرة المدى للوصول إلى هذا التوازن.

الفرع الثاني: إيجابيات و سلبيات نموذج VAR

نماذج VAR تتميز بعدة خصائص تجعلها جذابة للاستخدام في التحليل الاقتصادي والزمني. أولاً، تتميز هذه النماذج بالبساطة، حيث جميع متغيراتها داخلية، مما يجعل بناء النموذج عملية سهلة وواضحة. ثانياً، تقدير المعادلات في نماذج VAR يُعد بسيطاً أيضاً، إذ يمكن تقدير كل معادلة على حدة باستخدام طريقة المربعات الصغرى العادية (OLS) دون أي تعقيد إضافي. ثالثاً، غالباً ما تقدم هذه النماذج تنبؤات دقيقة، تتفوق في كثير من الحالات على التنبؤات المستخلصة من نماذج المعادلات الآتية. رغم هذه المميزات، تواجه نماذج VAR عدة انتقادات. أولاً، يلفت النقد إلى غياب الأساس النظري، إذ لا تعتمد هذه النماذج على أي نظرية اقتصادية محددة، ولا توجد قيود مسبقة على المعلمات، مما يؤدي إلى مفهوم "كل شيء يسبب كل شيء". ومع ذلك، يمكن استخدام الاستدلال الإحصائي لاستبعاد المعاملات غير المهمة، ويتم غالباً تطبيق اختبارات السببية للتحقق من علاقات السبب والنتيجة بين المتغيرات.

ثانياً، قد تؤدي نماذج VAR إلى فقدان درجات الحرية، خصوصاً عند إدراج عدد كبير من الفترات السابقة لكل متغير. على سبيل المثال، إذا احتوى نموذج على ثلاث متغيرات وتم إدراج 12 فترة تأخير لكل متغير في كل معادلة، فسيستلزم ذلك تقدير 36 معلمة لكل معادلة بالإضافة إلى الثابت،² ما يستهلك عدداً كبيراً من درجات الحرية إذا لم يكن حجم العينة كافياً، ويؤدي إلى صعوبات في التقدير.

ثالثاً، توجد صعوبة في تفسير المعاملات المستخرجة من نماذج VAR، نظراً لعدم وجود أساس يربط هذه المعاملات بالواقع الاقتصادي بشكل مباشر. وللتغلب على هذه المشكلة، يتم استخدام دوال الاستجابة النبضية (Impulse Response Functions)، التي تسمح بفحص استجابة المتغير التابع للصدمات الناتجة عن الأخطاء.

¹ Gujarati Damodar, Traduction de la 4ème édition américaine par Bernier Bernard, Économétrie, édition de Boeck, 1ère édition, Bruxelles, Belgique, 2004, P 564.

² * عدد المعلمات الواجب تقديرها في العموم هي $m+pm+2$ معلمة حيث P و m تمثل عدد المعادلات والمتغيرات المتأخرة.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

التحدي الرئيس في هذه العملية يكمن في تحديد الصدمات المناسبة، إذ يُراد عادةً صدم الأخطاء الهيكلية في كل معادلة لتفسيرها بسهولة كصدمة لجزء محدد من النموذج الهيكلي.

الفرع الثالث: نماذج VAR و اختبار السببية

يشكل مسألة السببية أحد أهم المحاور في صياغة النماذج الاقتصادية، إذ يهدف إلى تحديد أسباب الظواهر الاقتصادية وفهمها، وتمييز الظواهر التابعة عن الظواهر المستقلة التي تفسرها. وكما ذكرنا سابقاً، من أبرز ميزات نماذج VAR أنها تتيح إمكانية اختبار اتجاه السببية بين المتغيرات، مما يساعد على فهم العلاقات التبادلية وتأثير كل متغير على الآخر ضمن النظام الاقتصادي محل الدراسة.

أولاً: اختبار جرانجر Granger للسببية

اقترح Granger (1969) معياراً لتحديد العلاقة السببية قائماً على الديناميكية بين السلاسل الزمنية. فإذا كانت X_t و Y_t سلسلتين زمنيتين تمثلان تطور ظاهرتين اقتصاديتين مختلفتين عبر الزمن t ، وكانت السلسلة X_t تحتوي على معلومات تساعد في تحسين التوقعات الخاصة بالسلسلة Y_t ، عندها نقول إن X_t تسبب Y_t وبالتالي، كل متغير يحمل معلومات تساهم في تحسين توقع متغير آخر يُعتبر متغيراً سببياً¹.
ليكن نموذج VAR المتكون من المتغيرتين المستقرتين X_t و Y_t التالي:

$$Y_t = a_1 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^m \gamma_j Y_{t-j} + \mu_{1t} \dots (7)$$

$$X_t = a_2 + \sum_{i=1}^n \theta_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^m \delta_j Y_{t-j} + \mu_{2t} \dots (8)$$

حيث يُفترض أن كلا من μ_{1t} و μ_{2t} غير مرتبطة وتشكل تشويش أبيض. في هذا النموذج يمكن أن يكون

لدينا الحالات المختلفة التالية:

✓ **الحالة 1:** قد تكون X_{t-i} في المعادلة (7) مختلفة معنوياً عن الصفر، والمتغيرات المتأخرة Y_{t-j} في المعادلة (8) لا تختلف معنوياً عن الصفر. في هذه الحالة لدينا X_t تسبب Y_t ، يعني أن ماضي X_t يحسن من تنبؤ Y_t في اللحظة t وهو أفضل من الاعتماد فقط على ماضي Y_t .

✓ **الحالة 2:** قد تكون Y_{t-j} في المعادلة (8) مختلفة معنوياً عن الصفر، والمتغيرات X المتأخرة في المعادلة (7) لا تختلف معنوياً عن الصفر، في هذه الحالة لدينا أن Y_t يسبب X_t ، يعني أن ماضي Y_t يحسن من تنبؤ X_t في اللحظة t وهو أفضل من الاعتماد فقط على ماضي X_t .

¹ شبيخي محمد، طرق الاقتصاد القياسي، محاضرات وتطبيقات، الحامد، الجزائر، الطبعة الأولى، 2011، ص 276.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

✓ الحالة 3: كلتا المجموعتين X_t و Y_t في المعادلتين 7 و 8 تختلفا معنويا عن الصفر، في هذه الحالة لدينا سببية ثنائية الاتجاه، وهذا يعني أن ماضي X_t يحسن تنبؤ Y_t ، وأن ماضي Y_t يحسن تنبؤ X_t .

✓ الحالة 4: كلتا المجموعتين X_t و Y_t في المعادلتين 7 و 8 تختلفا معنويا عن الصفر، في هذه الحالة X_t مستقلة عن Y_t .

يتضمن إختبار GRANGER السببية الاجراء التالي:¹

- أولا، نقوم بتقدير نموذج VAR المعطى بواسطة المعادلتين (7) و (8) .
- ثانيا التأكد من معنوية المعلمات الخاصة بالمتغيرات المتأخرة، وحذف المتغيرات الغير معنوية، ووفقا لنتيجة اختبارات حذف المتغيرات، نستنتج اتجاه السببية بناءً على الحالات الأربع المذكورة أعلاه.
- ولأكثر توضيح نطبق اختبار السببية ل Granger على المعادلة (7) بنفس الطريقة تطبق على النموذج (8) ، بإتباع الخطوات التالية:

✓ الخطوة 1: نقوم بتقدير المعادلة (7) باستخدام طريقة المربعات الصغرى،

$$Y_t = a_1 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^m \gamma_j Y_{t-j} + \mu_{1t}$$

ونحصل على مجموع مربعات البواقي والذي نرمز له ب RSS_U ،

✓ الخطوة 2: نقوم بتقدير المعادلة التالية باستخدام طريقة المربعات الصغرى:

$$Y_t = a_1 + \sum_{j=1}^m \gamma_j Y_{t-j} + \mu_{1t} \dots (9)$$

ونحصل على مجموع مربعات البواقي المقيد والذي نرمز له ب RSS_R ،

✓ الخطوة 3: اختبار الفرضيتين التاليتين:

$$\begin{cases} H_0: \sum_{i=1}^n \beta_i X_{t-i} = 0 \text{ } Y_t \text{ لا تسبب } X_t \\ H_1: \sum_{i=1}^n \beta_i X_{t-i} \neq 0 \text{ } Y_t \text{ تسبب } X_t \end{cases}$$

✓ الخطوة 4: حساب إحصائية F لا اختبار Wald test العادي على قيود المعامل والتي تعطى بالعلاقة التالية:

$$F_C = \frac{(RSS_R - RSS_U)/m}{RSS_U/(n-k)} \sim F(m, n - k)$$

¹ LARDIC S. et MIGNON V.,(2002) "Econométrie des séries temporelles macroéconomiques et financières" Ed. Economica-Paris. pp. 99-101.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

أين k : يمثل عدد المعلمات في المعادلة المعنية.

ففي حالة القيمة المحسوبة ل F أكبر من القيمة المحدولة، فإننا نرفض الفرضية المعدومة وبالتالي X_t تسبب Y_t .
إحدى الآثار المترتبة على نظرية Granger السببية¹ هي أنه في حالة وجود تكامل مشترك بين السلسلتين Y_t و X_t ، وكانت كل منهما $I(1)$ (غير مستقرتين)، إذن إما X_t تسبب Y_t ، أو Y_t تسبب X_t .

ثانياً: اختبار سببية **sims**:

اقترح (Sims 1980) اختباراً بديلاً للسببية باستخدام حقيقة أنه في المفهوم العام للسببية لا يمكن للمستقبل أن يتسبب في الحاضر. لذلك، عندما نريد التحقق مما إذا كان المتغير Y_t يسبب X_t ، يقترح Sims تقدير نموذج VAR التالي:

$$Y_t = a_1 + \sum_{i=1}^n \beta_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^m \gamma_j Y_{t-j} + \sum_{p=1}^k \theta_p X_{t+p} + \mu_{1t} \dots (10)$$

$$X_t = a_2 + \sum_{i=1}^n \theta_i X_{t-i} + \sum_{j=1}^m \delta_j Y_{t-j} + \sum_{p=1}^k \phi_p Y_{t+p} + \mu_{2t} \dots (11)$$

الشيء الإضافي هنا، و بصرف النظر عن القيم المتأخرة ل X_t و Y_t ، نجد أيضاً قيم مستقبلية ل X_t متضمنة في المعادلة الأولى (وقيم مستقبلية مماثلة ل Y_t في المعادلة الثانية).

عند فحص المعادلة الأولى فقط، إذا تسبب Y_t في X_t ، فستوقع وجود علاقة ما بين Y_t والقيم الرئيسية ل X_t . لذلك، بدلاً من اختبار القيم المتأخرة ل X_t ، نختبر $\sum_{p=1}^k \theta_p = 0$ إذا تم رفض هذا القيد فإن السببية تمتد من Y_t إلى X_t وليس العكس، لأن المستقبل لا يمكن أن يسبب الحاضر.

لإجراء الاختبار، نقدر ببساطة نموذجاً بدون القيم التنبؤية (النموذج 7 وهو النموذج المقيد) ثم نقدر النموذج بإضافة القيم المستقبلية وهو النموذج كما يظهر في المعادلة (10) (وهو النموذج غير المقيد)، ثم نحصل على إحصائية F كما في اختبار Granger أعلاه.

من غير الواضح أي الاختبارين هو الأفضل، ومعظم الباحثين يستخدم كليهما. ومع ذلك، فإن اختبار **sims**، باستخدام المزيد من **regressors** (بسبب تضمين القيم المستقبلية)، يؤدي إلى فقدان درجات أكبر من الحرية.

الفرع الرابع: ديناميكية نموذج **VAR**:

أولاً: كتابة نموذج **VAR** على شكل **VMA**:

تمكّن نماذج **VAR** من تحليل تأثيرات السياسات الاقتصادية عبر محاكاة الصدمات العشوائية وتفكيك

¹ Gujarati Damodar, op cit , p842.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

تباين الأخطاء. ومع ذلك، يعتمد هذا التحليل على افتراض ثبات البيئة الاقتصادية، أي أن "كل العوامل الأخرى تبقى ثابتة".

كما توجد علاقة بين نماذج الانحدار الذاتي $AR(p)$ ونماذج المتوسطات المتحركة $MA(q)$ ، حيث يمكن إعادة كتابة نموذج $AR(1)$ على شكل نموذج $MA(\infty)$. وبالمثل، يمكن التعبير عن نموذج $VAR(1)$ في صورة $VMA(\infty)$ هذا التمثيل يتيح لنا قياس أثر الصدمات et على القيم الحالية للمتغيرات، مما يساعد في فهم كيفية انتقال التأثيرات الاقتصادية عبر الزمن. ليكن نموذج $VAR(p)$ التالي:

$$Z_t = A_0 + A_1 Z_{t-1} + A_2 Z_{t-2} + \dots + A_p Z_{t-p} + et$$

كتابته على شكل $VMA(\infty)$ يعطى كما يلي:

$$Z_t = \theta + \sum_{i=0}^{\infty} B_i et - i \dots \dots (12)$$

حيث:

$$B_i = \sum_{j=1}^{\min(p,i)} A_j B_{i-j} \quad i = 1, 2, \dots, \quad B_0 = I \quad \theta = (I - A_1 - A_2 \dots - A_p)^{-1} A_0$$

إذا كانت مصفوفة الانتقال B (Matrice de transition) لها جذور وحدة، فإن B_i لا تؤول إلى الصفر عندما i يؤول إلى ∞ . يترتب عن ذلك استمرار تأثير المتغيرات العشوائية في التأثير على القيمة الحالية Z بغض النظر عن مدى حدوثها في الماضي. بالإضافة إلى ذلك، لن يكون الفرق بين عناصر X محدوداً. لذلك من المهم أن تكون جميع جذور مصفوفة الانتقال B داخل دائرة الوحدة¹.

التغير الذي يحدث في et خلال فترة زمنية يؤثر على القيم المتتالية لـ Z_t وبالتالي فإن أثر الصدمة دائم ويتلاشى تدريجياً.

ثانياً: تحليل الصدمات و دوال استجابة Impulse Response Fonction

تحليل الصدمات يسمح بدراسة أثر صدمة معينة على متغيرات النظام. ليكن نموذج $VAR(1)$ الموضح في

النظام التالي:

¹ Paul Turner, PhD Econometrics in Practice, MERCURY LEARNING AND INFORMATION Dulles, Virginia Boston, Massachusetts, New Delhi p 310.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

$$\begin{cases} Y_t = \hat{a}_{10} + \hat{a}_{11}Y_{t-1} + \hat{a}_{12}X_{t-1} + \hat{e}_{1t} \\ X_t = \hat{a}_{20} + \hat{a}_{21}Y_{t-1} + \hat{a}_{22}X_{t-1} + \hat{e}_{2t} \end{cases}$$

التغير في قيم $\hat{e}_{1t}$ خلال فترة زمنية معينة سيؤثر على Y_t و Y_{t+1} ، ثم على X_{t+1} . على سبيل المثال إذا حدثت صدمة عند اللحظة t على $\hat{e}_{1t}$ تساوي 1 فإن أثرها يكون كالآتي:

$$\begin{pmatrix} \Delta Y_t \\ \Delta X_t \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{عند اللحظة } t$$

$$\begin{pmatrix} \Delta Y_{t+1} \\ \Delta X_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{a}_{11} & \hat{a}_{12} \\ \hat{a}_{21} & \hat{a}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{عند اللحظة } t+1$$

$$\begin{pmatrix} \Delta Y_{t+2} \\ \Delta X_{t+2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{a}_{11} & \hat{a}_{12} \\ \hat{a}_{21} & \hat{a}_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta Y_{t+1} \\ \Delta X_{t+1} \end{pmatrix} \quad \text{عند اللحظة } t+2$$

الخ...

تشكل القيم المحسوبة في نماذج VAR ما يُعرف بـ "دالة الاستجابة النبضية (Impulse Response)"

(Function – IRF) ، وهي عبارة عن معاملات المتوسطات المتحركة لنموذج $VMA(\infty)$ الموضح في المعادلة رقم

12. تأتي أهمية هذه الدالة من كونها حلاً لمشكلة صعوبة تفسير المعاملات المقدرة في نماذج VAR ، إذ تسمح باختبار

استجابة المتغير التابع للصدمات في حد الخطأ، وتوضح التفاعل بين المتغيرات ضمن النموذج، ما يجعلها أداة رئيسية

لفهم ردة فعل النظام الاقتصادي تجاه الصدمات المختلفة.

في الاقتصاد الحديث، تصف دالة الاستجابة النبضية أو ما يُعرف أحياناً بـ دالة الاستجابة الدفعية، كيف

يستجيب الاقتصاد عبر الزمن لصدمات خارجية، وتساعد على توقع القيم المستقبلية للمتغيرات ضمن سياق نماذج

VAR. وفقاً لسيمس، تُظهر هذه الدوال أثر صدمة مفاجئة وفردية على متغير معين على نفسه وعلى باقي المتغيرات في

النظام عبر جميع الفترات الزمنية.

مع ذلك، تفترض هذه الطريقة عادة استقلال البواقي، وهو افتراض نادراً ما يتحقق عملياً، إذ قد توجد

علاقة ارتباط بين الأخطاء العشوائية. على سبيل المثال، إذا كان هناك ارتباط قوي بين صدمتين e_{1t} و e_{2t} ، فإن حدوث

صدمة على e_{1t} غالباً ما يتبعها صدمة على e_{2t} . في هذه الحالة، يوضح معامل الارتباط الصلة المشتركة بين البواقي،

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

لكنه لا يكشف عن اتجاه السببية. لذلك، يصبح من الضروري وضع افتراض إضافي لتحديد العلاقة بين الأخطاء لضمان تفسير دقيق لدالة الاستجابة النبضية¹.

ثالثاً: تفكيك التباين Variance Décomposition

تحت فرضية استقلالية الأخطاء، فإنه من خلال نموذج المتوسطات المتحركة $VMA(\infty)$ يمكننا استخدام المعادلة رقم 12 لاشتقاق مصفوفة تباين التنبؤ للشعاع Z خلال الفترة h .
لدينا:²

$$E(ZhZ') = \sum_{i=0}^h (\theta + \sum_{i=0}^{\infty} Bi) \Omega (A_0^{-1})' (Bi)' \dots (13)$$

حيث Ω : تمثل مصفوفة التباينات والتباينات المشتركة للأخطاء.

يتيح تفكيك تباين خطأ التنبؤ (Forecast Error Variance Decomposition – FEVD)

تقييم مدى مساهمة كل متغير في تباين خطأ التنبؤ ضمن نموذج VAR. رياضياً، يمكن التعبير عن تباين خطأ التنبؤ لفترة معينة h بدلالة تباين الخطأ الخاص بكل متغير على حدة. لتحديد وزن أو نسبة مساهمة كل متغير، نقوم بقسمة تباينه على تباين خطأ التنبؤ الكلي.

الصيغة (13) تمكّننا من تحليل تباين أخطاء كل متغير على الآخر، مثل X_t على Y_t و Y_t على X_t ،

بالنسب المئوية. لفهم هذا التحليل، نحتاج إلى تعريف بعض المفاهيم الأساسية:

✓ يُعتبر المتغير داخلياً بقوة (Strongly Endogenous) إذا كان تأثيره على سلوكه الخاص قوياً، أي يؤثر في نفسه بقوة.

✓ يُعتبر المتغير داخلياً بضعف (Weakly Endogenous) إذا كان تأثيره على نفسه ضعيفاً، بينما يكون تأثير المتغيرات الأخرى في النظام عليه قوياً.

✓ يُعتبر المتغير خارجياً بقوة (Strongly Exogenous) إذا كان تأثيره على المتغير التابع ضعيفاً.

✓ يُقال عن المتغير الأقل خارجية (Least Exogenous) إذا كان تأثيره قوياً على المتغير التابع، بمعنى أن المتغير الداخلي بقوة يكون له أثر قوي على المتغير التابع.

هذا التفكيك يساعد في فهم ديناميكيات النظام وتحديد دور كل متغير داخلي أو خارجي في التأثير على

¹ Bourbonnais régis, Économétrie, édition Dunod, 9ème édition, Paris, France, 2015, P285

² Paul Turner, PhD, op.cit, p313.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

المتغيرات الأخرى ضمن نموذج VAR.

الفرع الخامس: خطوات نمذجة شعاع الانحدار الذاتي VAR

قبل بناء نموذج شعاع الانحدار الذاتي (VAR)، من الضروري إجراء اختبارات أولية للتأكد من صلاحية تطبيق هذا النموذج على البيانات المتاحة. وتشمل هذه الاختبارات تقييم خصائص السلاسل الزمنية، مثل الاستقرار والارتباط الذاتي، للتحقق من أن المعطيات مناسبة لنمذجة VAR.

بعد تقدير النموذج، تُجرى اختبارات لاحقة (Post-Estimation Tests) للتأكد من صحة النموذج وملاءمته للبيانات، مثل فحص بواقي النموذج، واختبارات السببية، وتحليل دقة التنبؤات، لضمان موثوقية النتائج واستنتاجات النموذج.

أولاً: اختبارات قبلية: قبل تقدير نماذج VAR

- ✓ قبل تطبيق منهجية VAR، يجب التأكد من عدة نقاط أساسية لضمان صلاحية النموذج:
- ✓ استقرار السلاسل الزمنية: يجب أن تكون السلاسل مستقرة، أي أن متوسطها وتباينها لا يتغيران مع الزمن.
- ✓ وجود على الأقل سلسلة مستقرة من الدرجة الثانية: لضمان إمكانية بناء نموذج VAR موثوق.
- ✓ التأكد من عدم وجود تكامل مشترك مع وجود سببية: أي يجب أن تكون السلاسل مستقرة من نفس الدرجة، مع إمكانية وجود علاقة سببية بين المتغيرات دون وجود تكامل مشترك.
- ✓ معالجة الآثار الموسمية أو الفترات غير الطبيعية: في حالة وجود تأثيرات موسمية أو تغيرات غير منتظمة، يمكن استخدام متغيرات صورية (Dummy Variables) كمتغيرات مستقلة لتصحيح هذه التأثيرات وتحسين دقة النموذج.¹

ثانياً: اختبارات بعدية

بعد التأكد من استيفاء الشروط الأولية لتطبيق نموذج VAR، يتم الانتقال إلى الاختبارات البعدية (Post-Estimation Tests)، والتي تهدف إلى التحقق من ملاءمة النموذج وصحة النتائج، وتشمل ما يلي:

1- تحديد درجة الإبطاء المثلى للمتغيرات:

لتحديد درجة التأخير المثلى (Lag Length) في نماذج VAR، نلجأ إلى مجموعة من المعايير والإجراءات الإحصائية، نظراً لأن هذه النماذج لا تعتمد على أساس نظري اقتصادي واضح، وبالتالي لا توجد معلومات مسبقة حول الشكل الديناميكي الأمثل أو عدد التأخيرات لكل متغير. من الطرق الشائعة لتحديد درجة التأخير:

¹ Bourbonnais régis, op cit, P 279.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

✓ الطريقة التجريبية للفحص التدريجي:

نبدأ بافتراض درجة تأخير أولية (مثل التأخير من الدرجة الأولى) ثم نفحص فرضية التشويش الأبيض للبواقي. إذا لم تتحقق هذه الخاصية، نضيف درجة تأخير إضافية ونعيد تقدير النموذج، ونكرر العملية حتى نصل إلى عدد التأخيرات المناسب الذي تتحقق فيه فرضية التشويش الأبيض للأخطاء.

✓ استخدام المعايير الإحصائية: (Information Criteria)

من أبرز المعايير المستخدمة:

- Akaike Information Criterion (AIC)
- Schwarz Criterion (SC) أو BIC
- Hannan-Quinn Criterion (HQ)

يتم تقدير نماذج VAR بدءًا من التأخير 0 وحتى الحد الأقصى h المسموح به وفقًا للبيانات المتاحة، ثم نحسب قيم المعايير لكل درجة تأخير. يُختار عدد التأخيرات الذي يعطي أقل قيمة للمعيار باعتباره الأنسب للنموذج. يمكن حساب المعايير الثلاثة لكل درجة تأخير p بالطريقة التالية:

$$\begin{aligned} AIC(p) &= \ln(\det|\Omega|) + \frac{2k^2 p}{n} \\ SC(p) &= \ln(\det|\Omega|) + \frac{k^2 \ln(n)}{n} \\ HQ(p) &= \ln(\det|\Omega|) + \frac{2k^2 p \ln \ln(n)}{n} \end{aligned}$$

K : عدد متغيرات النظام، n : عدد المشاهدات، p : عدد التأخيرات.

2- توصيف وتقدير معالم نماذج:

لتوصيف نموذج VAR، يتم أولاً اختيار أكبر عدد ممكن من التأخيرات، ثم تحديد درجة الإبطاء المثلى لكل متغير. كما يجب اختيار العدد المناسب من المتغيرات الداخلية في النموذج، إذ إن زيادة عدد المتغيرات تؤدي إلى زيادة عدد المعلمات لكل معادلة ولكل فترة تأخير، مما قد يؤثر على دقة التقديرات. ومن الأدوات المفيدة في هذه المرحلة اختبار Granger للسببية لتحديد المتغيرات التي لها تأثير سببي على المتغيرات الأخرى في النظام.

يمكن تقدير معالم كل معادلة في نموذج VAR باستخدام طريقة المربعات الصغرى العادية (OLS).

ولضمان أن تكون التقديرات متسقة، يجب تحقق الشروط التالية:

- متوسط الأخطاء مساوي للصفر،
- استقرار المتغيرات،

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

- احتمال ضئيل لوجود قيم شاذة (Outliers).

كما يمكن أيضا تقدير معلمات النموذج باستخدام طريقة المعقولية العظمى (Maximum Likelihood) كبديل للطريقة السابقة، خاصة في الحالات التي تتطلب تحسين كفاءة التقديرات أو التعامل مع فرضيات إضافية عن الأخطاء.

3- تشخيص النموذج:

بعد تقدير النموذج الأمثل، ننتقل إلى مرحلة التشخيص، والتي تهدف إلى تقييم صلاحية النموذج ودقة تقديراته. تتضمن هذه المرحلة:

✓ **تشخيص المعاملات:** يتم باستخدام اختبار والد (Wald Test) للتحقق من أهمية المعاملات وتأثيرها على المتغيرات التابعة.

✓ **تشخيص البواقي:** يشمل عدة اختبارات للتأكد من صحة الفرضيات المتعلقة بالأخطاء، مثل:

- اختبارات الارتباط الذاتي للبواقي،

- اختبارات عدم ثبات التباين (Heteroscedasticity Tests) ،

- اختبار التوزيع الطبيعي للبواقي،

- اختبارات التغير الهيكلي (Structural Break Tests).

عند اكتشاف أي مخالفات أو مشكلات في هذه الاختبارات، يتم تعديل النموذج لضمان ملاءمته وتحسين دقة التقديرات والتنبؤات.

4- إيجاد دوال الاستجابة النبضية و تفكيك التباين:

كما قد تحدثنا عنها في النقاط السابقة.

5- التنبؤ:

الهدف الرئيسي من تقدير نموذج VAR هو تحقيق أحد الغرضين التاليين:

✓ **التنبؤ (Forecasting):** استخدام النموذج للتوقع بالقيم المستقبلية للمتغيرات ضمن النظام، اعتمادًا على العلاقات الديناميكية التي يحددها النموذج بين المتغيرات والاعتماد على البيانات التاريخية.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

✓ تحليل السببية (Causality Analysis): دراسة العلاقات السببية بين المتغيرات، كما في اختبار Granger للسببية، لتحديد أي المتغيرات تحتوي على معلومات تساعد في تحسين توقع المتغيرات الأخرى، وبالتالي فهم التفاعلات الاقتصادية بين الظواهر المختلفة.

المطلب الثاني: طرق (التمهيد) التلميس الأسّي

تم تقديم طرق التلميس (التمهيد الأسّي لأول مرة من طرف تشارلز هولت (Charles Holt) في عام 1957، ثم تطورت هذه الطرق لاحقاً بفضل أعمال روبرت براون Robert Brown في عام 1962، يُعد التمهيد الأسّي من أكثر الأساليب شيوعاً في نمذجة السلاسل الزمنية، نظراً لمرونته في التعامل مع الأنماط المختلفة للبيانات. ويندرج ضمن هذا الإطار نموذج التلميس الأسّي البسيط (النموذج المستقر)، الذي يُستخدم عندما تكون السلسلة الزمنية خالية من اتجاه أو موسمية. أما في حال وجود اتجاه خطي، فيُعتمد على نموذج التلميس الأسّي المزدوج (النموذج الخطي)، والذي يستند إلى علاقات رياضية تُراعي هذا الاتجاه. ومع تطور النماذج، برز نموذج هولت (Holt) الذي يضيف بعداً أكثر دقة للتنبؤ بالاتجاه، استناداً إلى علاقات خاصة به. أما نموذج هولت-وينترز (Holt-Winters)، فيُستخدم عند وجود موسمية واضحة، ويأخذ شكلين: الصيغة الضريبية والصيغة الجمعية، بحسب طبيعة التغير الموسمي في البيانات.

الفرع الأول: الخصائص الإحصائية لأساليب التمهيد الأسّي¹

➤ المبادئ الأساسية

1- المبدأ الأول: التناقص المتزايد في قيمة المعلومات مع الرجوع في الزمن نحو الماضي (la dévalorisation croissante de l'information avec l'âge)

تعتمد طريقة التلميس الأسّي على الفكرة القائلة بأن المعلومات الحديثة في السلسلة الزمنية تحمل أهمية أكبر عند إجراء التنبؤ، في حين تُعطى المعلومات القديمة، أي تلك القادمة من فترات بعيدة في الماضي، أوزاناً أقل عند الحساب.

2- المبدأ الثاني: تركيب المعلومات (la synthetisation des informations)

نظراً لصعوبة التعامل مع التاريخ الكامل للسلسلة الزمنية، تسمح تقنية التلميس الأسّي بتكثيف هذا التاريخ في عدد محدود من المعلمات (paramètres). وبالتالي، لا يكون من الضروري الاحتفاظ بجميع القيم السابقة في الذاكرة لإجراء التنبؤ، بل يكفي بعض القيم المختارة لتطبيق النموذج بفعالية.

وسوف يتم توضيح هذين المبدأين بشكل عملي فيما يلي:

¹ Bourbonnais. R; Usunier. J-C. (2001). Prévision des ventes : théorie et pratique, 3ème Edit, Economica, Paris, pp. 58-60.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

أ- صياغة العلاقات الضرورية في التحليل:

لنفترض أن (X_t) يمثل المبيعات من منتج ما عند التاريخ (t) . يمكن اعتبار المبيعات (X_t) كنتيجة لتشكيلة خطية غير منتهية من قيمها السابقة، بحيث يتناقص وزن (أو تأثير) الماضي على الحاضر مع الأقدمية (أفضلية الحاضر على الماضي). لنعتبر ما يلي:

X_t : قيمة مشاهدة السلسلة الزمنية (المبيعات) X في الزمن t ، (شهر معين على سبيل المثال).

S_t : القيمة المملسة من السلسلة الزمنية.

$\dot{X}_t$: التنبؤ بالسلسلة الزمنية (X_t) في الزمن $t+1$ محسوبة خلال الزمن t ، أي أن X_t يجب مقارنتها مع $\dot{X}_{t-1}$

α : معامل التمليس، حيث أن $\alpha \in [0; 1]$

يعطينا المبدأ الأساسي للتمهيد الأسّي، المعادلة الموالية للتنبؤ بـ $\dot{X}_t$:

$$\dot{X}_t = S_t = \dot{X}_{t-1} + \alpha(X_t - \dot{X}_{t-1})$$

يمكن كتابة المعادلة السابقة كما يلي:

$$\dot{X}_t = \alpha X_t + (1-\alpha)\dot{X}_{t-1}$$

في هذه الصيغة الأخيرة، يظهر التمليس كوسط مرجح لآخر قيمة محققة X_t ، وآخر قيمة مملسة $\dot{X}_{t-1}$ لأجل رصد تأثير قيمة المعامل α ، نعوض في المعادلة الأخيرة كما يلي:

$0 = \alpha$ إذن: $\dot{X}_t = \dot{X}_{t-1}$ هذا يعني أن المشاهدات الحديثة لا يتم أخذها بعين الاعتبار في حساب التنبؤات هنا نقول أن

التنبؤات تبقى ثابتة.

$1 = \alpha$ إذن $\dot{X}_t = X_t$ هذا يعني أن النموذج يتبع المعلومات الحديثة، أي أن القيمة المملسة الحديثة دائما تساوي آخر

قيمة محققة. هنا نقول أن التمليس شديد التفاعل (hyper-reactif).

يمكن تطوير العلاقة (2) بالعودة بالزمن إلى الوراء $(0, \dots, t-n, \dots, t-2, t-1)$ القيمة الجديدة المملسة X_t عبارة

عن تشكيلة خطية من كل المشاهدات الماضية، يتم ضرب هذه المشاهدات في وزن (ترجيح) يتناقص مع الرجوع بالزمن إلى الماضي.

$$\dot{X}_t = \alpha X_t + \alpha(1-\alpha)X_{t-1} + \alpha(1-\alpha)^2 X_{t-2} + \alpha(1-\alpha)^3 X_{t-3} + \dots + \alpha(1-\alpha)^{n-1} X_{t-n+1} + (1-\alpha)^n X_0$$

- نظرا لأن معامل التمليس (α) يقع بين 0 و 1، فإن الوزن المعطى للقيم يتناقص هندسيًا، كما هو موضح في

الجدول رقم 14 والرسم البياني رقم 45.

- تحتوي القيمة المملسة الأخيرة $(\dot{X}_t)$ بصفة مركبة على كامل المعلومات التاريخية.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

الجدول رقم (14): تراجع قيمة المعلومة كلما توجهنا نحو الماضي مقارنة بين الوسط الكلاسيكي

* وثلاثة قيم لمعامل α

Temps	Moyenne classique	Poids	Pondération géométriquement décroissante pour $\alpha = 0,30$
0	0,1	α	0,30
-1	0,1	$\alpha (1 - \alpha)$	0,21
-2	0,1	$\alpha (1 - \alpha)^2$	0,15
-3	0,1	$\alpha (1 - \alpha)^3$	0,10
-4	0,1	$\alpha (1 - \alpha)^4$	0,07
-5	0,1	$\alpha (1 - \alpha)^5$	0,05
-6	0,1	$\alpha (1 - \alpha)^6$	0,04
-7	0,1	$\alpha (1 - \alpha)^7$	0,02
-8	0,1	$\alpha (1 - \alpha)^8$	0,02
-9	0,1	$\alpha (1 - \alpha)^9$	0,01
-10	0,1	$\alpha (1 - \alpha)^{10}$	0,01

*Moyenne classique = $\frac{1}{10} = 0.1$

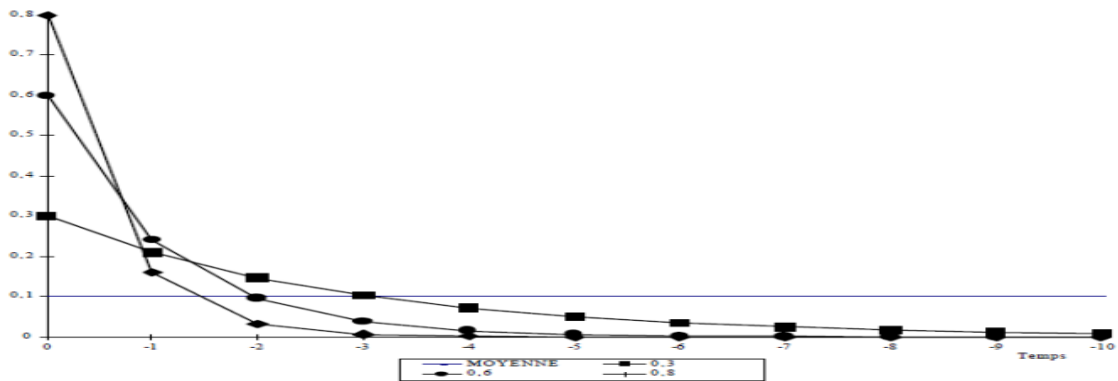
Source: Bourbonnais. R; Usunier. J-C. (2001). Prévision des ventes : théorie et pratique, 3ème Edit, Economica, Paris, p. 59.

✓ شرح الجدول أعلاه:

باعتبار أن قيمة معامل التمهيد الأسّي $\alpha = 0.3$ ، فإن القيمة الأخيرة X_t في السلسلة الزمنية تُعطى وزناً قدره 0.3 عند إجراء التنبؤ. أما القيمة التي تسبقها مباشرة، فتتم ترجيحها بمقدار 0.21، أي أن حوالي 21% من قيمتها تسهم في التنبؤ. ويستمر هذا التناقص التدريجي للأوزان بالنسبة لبقية القيم السابقة في السلسلة، بحيث تصبح مساهمة القيم القديمة ضئيلة جداً. على سبيل المثال، بدءاً من القيمة الثامنة X_{t-8} ، يصبح معامل الترجيح أقل من 0.02، مما يعني أن تأثيرها على التنبؤ يكاد يكون معدوماً.

الشكل الرقم (39): تراجع قيمة المعلومة كلما توجهنا نحو الماضي مقارنة بين الوسط الكلاسيكي

* وثلاثة قيم لمعامل α



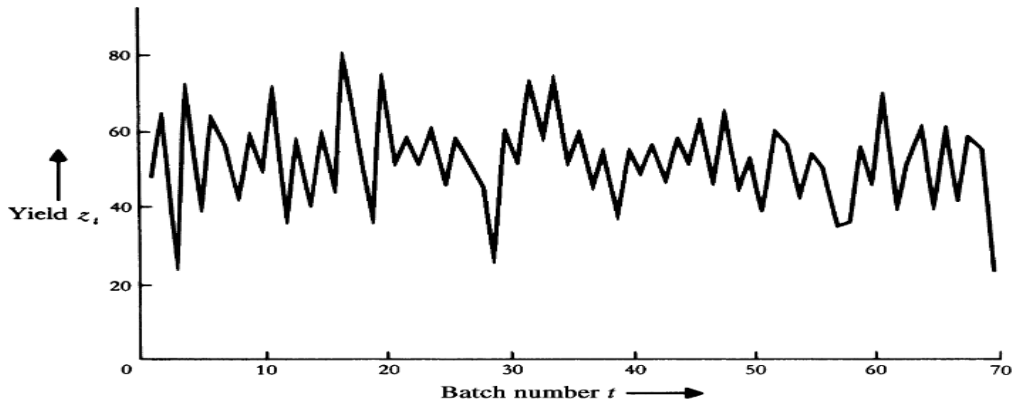
Source: Bourbonnais. R; Usunier. J-C. (2001). Prévision des ventes : théorie et pratique, 3ème Edit, Economica, Paris, p. 60.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

الفرع الثاني: نموذج التمليس الأسّي البسيط (النموذج المستقر)¹

المقصود بالنموذج المستقر هو أن السلسلة الزمنية لا تحتوي على اتجاه عام ولا على مكون موسمي، أي تكون جميع خصائصها الإحصائية ثابتة عبر الزمن (انظر الشكل). إذا لم يتحقق هذا الشرط، فإن طريقة التمليس الأسّي البسيط لن تكون ملائمة للتنبؤ، لأن هذه الطريقة تفترض أن السلسلة مستقرة وخالية من الاتجاهات والتقلبات الموسمية.

الشكل الرقم (40): نموذج لسلسلة زمنية مستقرة (عشوائية)



Source: GEORGE E. P. BOX, GWILYM M. JENKINS, GREGORY C. REINSEL, GRETA M. LJUNG. (2016). Time series analysis: Forecasting and control, 5th Edit, Wiley, USA, p. 22. ,available on:

[http://repo.darmajaya.ac.id/4781/1/Time%20Series%20Analysis %20Forecasting%20and%20Control%2028%20PDFDrive%2029.pdf](http://repo.darmajaya.ac.id/4781/1/Time%20Series%20Analysis%20Forecasting%20and%20Control%2028%20PDFDrive%2029.pdf)

تأخذ العلاقات التي يقوم عليها نموذج التمليس الأسّي البسيط الصيغ الآتية:

$$\hat{X}_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)\hat{X}_{t-1}$$

حيث أن:

$\hat{X}_t$: القيمة المتنبأ بها في الفترة t .

X_t : قيمة الملاحظة في الفترة t .

α : معامل التمليس، حيث أن $\alpha \in [0; 1]$

$\hat{X}_{t-1}$: القيمة المتنبأ بها في الفترة $t-1$.

بحكم عدم توفر قيمة $\hat{X}_{t-1}$ في الفترة الأولى، فإننا نطلق في الحساب من المعادلة التالية:

$$\hat{X}_1 = X_1$$

نطبق المعادلة الأخيرة خلال الفترة الأولى فقط، ثم بعد ذلك نستخدم المعادلة الأولى في الحساب إلى غاية انتهاء

¹ بن معزو محمد زكريا، نماذج التنبؤ، مطبوعة بيداغوجية، قسم العلوم الاقتصادية، كلية العلوم الاقتصادية وعلوم التسيير، جامعة باجي مختار—

عناية، الجزائر، 2021-2022، ص 53-61

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

الملاحظات في السلسلة الزمنية عند المشاهدة n . بعد ذلك، يبدأ أفق التنبؤ والذي نرسم له h horizon (h) تحسب القيم المتنبأ بها وفق المعادلة الآتية:

$$\hat{X}_{n+h} = \hat{X}_n \forall h$$

الفرع الثالث: نموذج التمليس الأسّي المزدوج "النموذج الخطي"

تسمى طريقة التمليس الأسّي المزدوج (LED) كذلك بنموذج Brown. وتطبق هذه الطريقة على السلاسل الزمنية التي تحتوي على اتجاه عام (Trend) والتي هي من الشكل:

$$x_t = a_t + b_t * t$$

تقوم طريقة (LED) على فكرة تمليس سلسلة مملسة (série lissée) من قبل، ومن هنا أنت تسمية "مزدوج".

➤ العلاقات التي يقوم عليها نموذج (LED) :

✓ في مرحلة أولى: نقوم بتمليس السلسلة على مرحلتين باعتماد المعادلتين الآتيتين:

$$S_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)S_{t-1}$$

$$SS_t = \alpha S_t + (1 - \alpha)SS_{t-1}$$

حيث أن :

S_t : القيمة المملسة في الزمن (t)

α : معامل التمليس، حيث أن: $\alpha \in (0; 1)$

x_t : المشاهدة في الزمن (t)

S_{t-1} : القيمة المملسة في الزمن (t-1)

SS_t : إعادة تمليس القيمة S_t في الزمن (t)

✓ في مرحلة ثانية: نحتاج كذلك في تحليلنا إلى حساب قيم الميل b_t والحد الثابت a_t ، واللذان يمكن الحصول عليهما وفق المعادلتين التاليتين:

$$bt = \frac{\alpha}{1 - \alpha} (st - sst)$$

$$at = 2St - SS_t$$

✓ في مرحلة ثالثة: التنبؤ في الأفق h يكون وفق المعادلة التالية:

$$x^{n+h} = an + bn * h$$

$$(où : h = 1, 2, \dots, k)$$

الفرع الرابع: نموذج هولت HOLT

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

النموذج الذي تم تقديمه والمعروف باسم نموذج براون (modèle de Brown)، يُعد أحد نماذج التمليل الأساسي المزدوج (LED). كما يمكننا استخدام تمليل هولت (Holt) الذي ينتمي أيضًا إلى نفس الفئة من النماذج، فهو مشابه لنموذج براون من حيث التمليل المزدوج، ولكنه يُطبق فقط على السلاسل الزمنية التي تحتوي على اتجاه عام دون مكونات موسمية.

يقوم نموذج هولت على عمليتي تمليل منفصلتين هما¹:

✓ تمليل الحد الثابت (المتوسط) (at) بمعامل تمليل $\alpha \in [0; \alpha_1]$

✓ تمليل الميل (b) بمعامل تمليل $\beta \in [0; 1]$ ،

في الحالة الخاصة أين يكون $(\alpha = \beta)$ يتحول نموذج هولت إلى نموذج التمليل الأساسي المزدوج لبراون (كلا النموذجين يعطيان نفس النتائج في هذه الحالة).²

➤ العلاقات التي يقوم عليها نموذج Holt:

✓ تمليل المتوسط (الحد الثابت): $a_t = \alpha x_t + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1})$

✓ تمليل الاتجاه العام (الميل): $b_t = \beta(a_t - a_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1}$

التنبؤ في الزمن (t) عند الأفق (h) يكون وفقا للصيغة التالية:

$$\hat{x}_{n+h} = a_n + h * b_n \quad ; \quad (où: h = 1, 2, \dots, k)$$

حيث أن:

$\hat{x}_{n+h}$: القيمة المتنبأ بها في الزمن (n+h)

a_n : المتوسط المملس (moyenne lissée) عند الزمن (n) (وهو تاريخ نهاية المشاهدات الأصلية للسلسلة).

b_n : الاتجاه العام المملس (tendance lissée) عند الزمن (n) (وهو تاريخ نهاية المشاهدات الأصلية للسلسلة).

✓ إنطلاق عملية الحساب بالنسبة للفترة (t = 1):

انطلاقة المتوسط المملس: $X_1 = a_1$

انطلاقة الاتجاه العام المملس: $b_1 = 0$

الفرع الخامس: نموذج هولت-وينترز Holt-winters

تم اقتراح طريقة Holt-Winters من قبل Holt et Winters في عام 1960، وتقوم على نموذج

¹ Bourbonnais. R., Usunier. J-C. Ibid, p. 66.

² Bourbonnais. R., Terraza. M. (2010). Analyse des séries temporelles : Applications à l'économie et la gestion, Paris, DUNOD, 3ème Edit, p. 65.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

التمليس الأسّي المزدوج (LED) الذي يحتوي على معلمتين a_t, b_t كما قدمه Holt للجزء غير الموسمي من السلسلة، بالإضافة إلى تمليس أسّي لمعلمة موسمية S_t أدرجها Winters¹. لمعالجة المكون الموسمي.

تكمن الميزة الأساسية لهذا النموذج في إدراج المكون الموسمي في عملية التنبؤ، وبناءً عليه يُطبق نموذج Holt-Winters على السلاسل الزمنية التي تحتوي على اتجاه عام ومكون موسمي معًا. تتضمن طريقة التمليس الأسّي هذه ثلاثة معلمات رئيسية يجب تقديرها، كما يوجد للنموذج صيغتان: صيغة النموذج الجمعي وصيغة النموذج الضريبي.

أولاً: صيغة النموذج الضريبي الخاصة بنموذج Holt-Winters

في مثل هذه الحالة نعبر عن السلسلة الزمنية كما يلي:

$$x_t = (a_t + b_t * t)S_t + \varepsilon_t$$

يقوم النموذج على ثلاثة عمليات تمليس هي:

- تمليس الحد الثابت المتوسط (Alpha) (a) بمعامل تمليس (ألفا) α ، $\alpha \in [0; 1]$
- تمليس الميل (b) بمعامل تمليس (Beta) β $\beta \in [0; 1]$
- تمليس الموسمية (S) بمعامل تمليس (Gamma) γ $\gamma \in [0; 1]$

✓ العلاقات المستخدمة:

- تمليس المتوسط (الحد الثابت):

$$a_t = \alpha \left(\frac{x_t}{S_{t-p}} \right) + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1})$$

- تمليس الاتجاه العام الميل:

$$b_t = \beta (a_t - a_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1}$$

- تمليس الموسمية:

$$S_t = \gamma \left(\frac{x_t}{a_t} \right) + (1 - \gamma)S_{t-p}$$

التنبؤ في الزمن (t) عند الأفق (h) يكون وفقاً للصيغة التالية:

$$\hat{x}_{n+h} = (a_n + h * b) * S_i \quad ; \quad (où: h = 1, 2, \dots, k)$$

حيث أن:

¹ Bourbonnais. R., Usunier. J-C, Op. cit, p. 66

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

$\hat{x}_{n+h}$: القيمة المتنبأ بها في الزمن $(n+h)$.

a_n : المتوسط المملس (moyenne lissée) عند الزمن (n) (وهو تاريخ نهاية المشاهدات الأصلية للسلسلة).

n : الاتجاه العام المملس (tendance lissée) عند الزمن (n) (وهو تاريخ نهاية المشاهدات الأصلية للسلسلة).

i : المؤشر (المعامل) الموسمي (coefficient saisonnier) الملائم لفترة التنبؤ.

h : أفق التنبؤ، والذي تتغير قيمته من 1 إلى غاية K .

للتنبؤ في الفترة من $(t = 1)$ إلى غاية $(t = n)$ ، أي الفترة التي تسبق الأفق h نستخدم العلاقة التالية:

$$PREV_t = (a_{t-1} + b_{t-1}) * S_{t-p}$$

تشتد بعض نماذج التنبؤ التأكد من تحقق الشرط التالي:

$$\sum_{i=1}^p S_i = p$$

حيث أن (p) يعبر عن دورية البيانات (périodicité des données) و هي ، $(p = 12 \text{ en mensuel}, P = 4 \text{ en trimestriel})$

في حال عدم تحقق هذا الشرط فإن التصحيح يكون باستخدام الصيغة الآتية:

$$S_i^* = \frac{S_i}{\bar{S}} \quad \text{où: } \bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^p S_i}{p}$$

ثانيا: صيغة النموذج الجمعي الخاصة بنموذج Holt-Winters

في مثل هذه الحالة نعبر عن السلسلة الزمنية كما يلي:

$$x_t = a_t + b_t * t + S_t + \varepsilon_t$$

✓ العلاقات المستخدمة:

- تمليس المتوسط (الحد الثابت):

$$a_t = (x_t - S_{t-p}) + (1 - \alpha)(a_{t-1} + b_{t-1})$$

- تمليس الاتجاه العام الميل:

$$b_t = (a_t - a_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1}$$

- تمليس الموسمية :

$$S_t = (x_t - a_t) + (1 - \gamma)S_{t-p}$$

التنبؤ في الزمن (t) عند الأفق (h) يكون وفقا للصيغة التالية:

$$\hat{x}_{n+h} = (a_n + h * b) + S_i \quad ; \quad (\text{où: } h = 1, 2, \dots, k)$$

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

للتنبؤ في الفترة من (t = 1) إلى غاية (t = n)، أي الفترة التي تسبق الأفق h نستخدم العلاقة التالية:

$$PREV_t = a_{t-1} + b_{t-1} + S_{t-p}$$

تتطلب بعض نماذج التنبؤ التأكد من تحقق الشرط التالي:

$$\sum_{i=1}^p S_i = 0$$

حيث أن (p) يعبر عن دورية البيانات (périodicité des données) و هي ، (P = 12 en mensuel ،
(p = 4 en trimestriel

في حال عدم تحقق هذا الشرط فإن التصحيح يكون باستخدام الصيغة الآتية:

$$S_i^* = S_i - \bar{S} \text{ où: } \bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^p S_i}{p}$$

✓ انطلاق عملية الحساب بالنسبة للفترة (t = 1, 2, ..., p)

على غرار بقية طرق التمليس الأسّي، نجد أنفسنا في مواجهة مشكلة انطلاق بداية الحساب بسبب عدم توفر

القيم المبدئية، وعليه يمكن اعتماد القيم الآتية كبداية للحساب (هذا بالنسبة للسنة الأولى فقط):

✓ بداية حساب الموسمية:

- بالنسبة لصيغة النموذج الجمعي: يتم تقدير المؤشرات الموسمية للسنة الأولى بطرح القيم المشاهدة (x_t) في كل مرة

من المتوسط الحسابي ($\bar{X}$) لجميع مشاهدات السنة الأولى، أي:

- بالنسبة لصيغة النموذج الضريبي: يتم تقدير المؤشرات الموسمية للسنة الأولى بقسمة القيم المشاهدة (X) في كل مرة

على المتوسط الحسابي ($\bar{X}$) لجميع مشاهدات السنة الأولى، أي:

$$S_t = \frac{x_t}{\bar{x}} \text{ pour } t = 1, 2, \dots, p$$

بداية (a et b) تكون متماثلة بالنسبة للنموذجين الجمعي أو الضريبي على حد سواء، وتكون كما يأتي:

- بداية المتوسط المملس: $a_p = \bar{x}$

- بداية الاتجاه العام المملس: $b_p = 0$

المطلب الثالث: التنبؤ من خلال استخدام منهجية Box and Jenkins:

يُعد التنبؤ الكمي أحد الأعمدة الأساسية التي تستند إليها السياسات الاقتصادية الحديثة، خاصة في ما

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

يتعلق بتخطيط الموارد، ورصد التقلبات، وتقدير الاتجاهات المستقبلية. ومن بين المنهجيات الرائدة في هذا المجال نجد منهجية بوكس-جنكنز (Box & Jenkins)، التي تمثل إطاراً منهجياً لتطوير نماذج تحليل السلاسل الزمنية ذات الخصائص العشوائية، وذلك عبر سلسلة من الخطوات المتكاملة تشمل التحديد، والتقدير، والتشخيص، والتنبؤ.

وتعتمد هذه المنهجية على النماذج الذاتية (AR)، ونماذج المتوسطات المتحركة (MA)، والنماذج المختلطة (ARMA) أو (ARIMA)، مع ضرورة التحقق من استقرارية السلسلة الزمنية عبر أدوات اختبارية مثل اختبار Dickey-Fuller واختبار Phillips-Perron. وتستخدم في هذا السياق أدوات تحليلية حاسمة، منها دالة الارتباط الذاتي (ACF) ودالة الارتباط الذاتي الجزئي (PACF)، والتي تساهم في اختيار بنية النموذج الملائمة.

وانطلاقاً من هذه الاعتبارات، يهدف هذا المطلب إلى تقديم عرض تفصيلي لعناصر منهجية Box & Jenkins، من خلال التطرق إلى وظائف الارتباط، والنماذج المستخدمة، وشروط تطبيقها، مروراً باختبارات استقرارية السلاسل الزمنية، وانتهاءً بمراحل بناء النموذج التنبؤي وتقييم فعاليته

الفرع الأول: تعريف منهجية box-jenkins

تعتبر منهجية بوكس-جنكنز (Box-Jenkins) منهجاً عملياً لمعالجة الظواهر الزمنية بدقة، بهدف التوصل إلى نماذج محكمة تصلح للتنبؤات قصيرة المدى وتعتمد على نماذج ذات ذاكرة قصيرة. من أهم شروط هذه المنهجية الاستقرارية، حيث يجب أن تتذبذب السلاسل الزمنية حول متوسط ثابت وتباین بشكل مستقل عن الزمن، وتُعد هذه الخاصية أساسية لتطبيق المنهجية بشكل صحيح، ويتم التحقق منها باستخدام مجموعة من الاختبارات مثل التمثيل البياني، دالة الارتباط الذاتي، واختبارات الجذر الأحادي.¹

كما يشترط أن تحتوي السلسلة الزمنية على 48 مشاهدة أو أكثر، وأن يمتلك الباحث القدرة على تحديد النموذج المناسب للسلسلة.² تعتمد منهجية Box-Jenkins على استخدام نماذج ARMA بمختلف أشكالها، حيث كان العالمان Box و Jenkins أول من حدد كيفية استخدام هذه النماذج ووضعاً طرُقاً فعالة لحسابها باستخدام

¹ فتيحة بن سعدي، مصطفى طويطي، ذهيبية بن عبد الرحمان، التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في المملكة العربية السعودية إلى غاية 2030-دراسة قياسية باستخدام منهجية بوكس و جنكنز، مجلة الإدارة و التنمية للبحوث و الدراسات، المجلد 12/العدد: 02 (ديسمبر 2023)، ص 294-312، ص 301

² مختار حميدة، بن سليمان يحي، دراسة تحليلية تنبؤية لحجم إنتاج مؤسسة مدبغة الهضاب العليا بالجلفة للفترة بين شهر جانفي 2010 وشهر ديسمبر 2013، مجلة إدارة الأعمال والدراسات الاقتصادية، كلية العلوم الاقتصادية والتجارية وعلوم التسيير، جامعة زيان عاشور بالجلفة، الجزائر، العدد الأول، مارس 2015، ص

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

الحاسوب.¹ الهدف الأساسي من هذه المنهجية هو إيجاد النماذج الملائمة من نماذج $ARIMA(p,d,q)$ واستخدامها في التنبؤ.²

يتم تطبيق منهجية Box-Jenkins عبر أربع مراحل رئيسية:³

✓ **مرحلة التعرف:** تهدف هذه المرحلة إلى تحديد درجة النموذج المناسب للسلسلة الزمنية، ويعتمد في ذلك على أدوات مثل دالة الارتباط الذاتي والارتباط الذاتي الجزئي.

✓ **مرحلة التقدير:** وهي مرحلة تقدير معالم النماذج المختارة بناءً على نتائج مرحلة التعرف.

✓ **مرحلة الاختبار:** يتم التحقق من ملاءمة النموذج عن طريق اختبار ما إذا كانت بواقي التقدير عبارة عن تشويش أبيض، فإذا تحققت هذه الخاصية يُقبل النموذج، وإذا لم تتحقق تُعاد العملية مرة أخرى، لذلك تُعد هذه المنهجية عملية تكرارية.

✓ **مرحلة التنبؤ:** وهي المرحلة النهائية للتحقق من الأداء الجيد للنموذج في التنبؤ بالقيم المستقبلية للسلسلة الزمنية.

يوضح الشكل التالي المراحل السابقة لمنهجية Box-Jenkins في نمذجة السلاسل الزمنية.

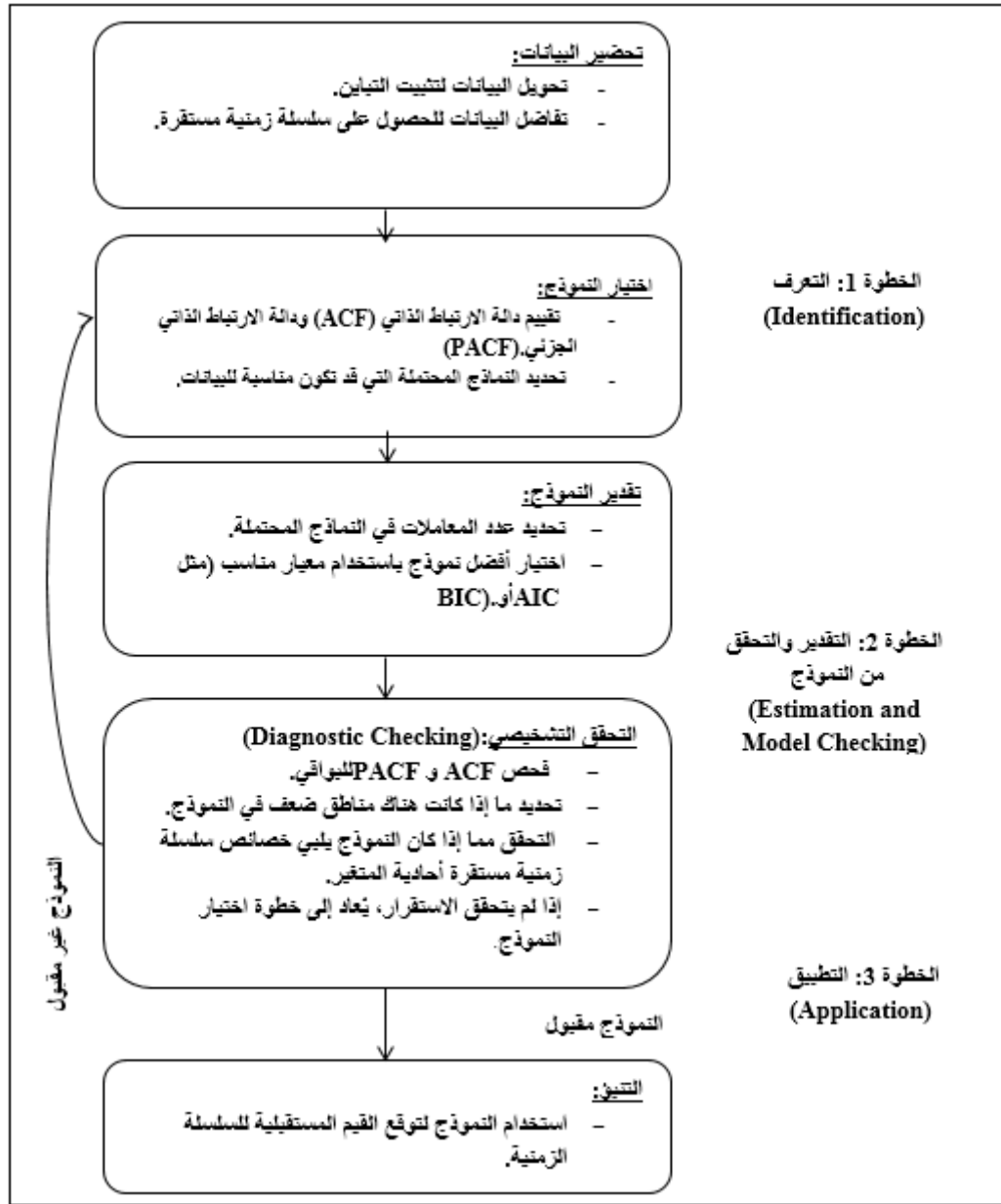
الشكل رقم (41): مراحل تطبيق منهجية بوكس جينكنز box-jenkins

¹ خلود موسى عمران ريسان عبد الامام زعلان، استخدام بعض الأساليب الاحصائية للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في المملكة العربية السعودية، مجلة العلوم الاقتصادية، جامعة البصرة، العراق، المجلد الثامن، العدد 29، 2012، ص 279

² Christian francq, Jean-Michel Zakoian, GARCH Models structure, statistical inference and financial applications, first publication, John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom, 2010, P 5.

³ عتروس سهيلة، نفس المرجع السابق، ص 121

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة



Source : Nikolaos Dritsakakis, Paraskevi Klazoglou, Forecasting unemployment rate in USA using Box-Jenkins methodology, International Journal of Economics and financial issues, Vol 8, issue 1, 2018, p 11 available on : <https://www.econjournals.com/index.php/ijefi/article/view/55550>

الفرع الثاني: نماذج المستخدمة في منهجية بوكس - جنكينز:

تتميز منهجية Box-Jenkins بكونها تركز على النمذجة العشوائية، أي دراسة تطور السلسلة الزمنية باعتبارها نتاج عملية عشوائية معينة.¹ وتعتمد هذه المنهجية على ثلاثة نماذج رئيسية لتحليل السلاسل الزمنية، والتي تُستخدم على نطاق واسع في تفسير الظواهر المختلفة:

¹ Burtschy, B., & Menendian, c. (1980). apropos de la prévision à court terme de la production industriel. revue de statistique appliquée, n06, p06.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

- ✓ نموذج الانحدار الذاتي (AR) يصف العلاقة بين قيمة السلسلة الحالية والقيم السابقة لها.
- ✓ نموذج المتوسطات المتحركة (MA) يعتمد على العلاقة بين القيمة الحالية للسلسلة والزلات العشوائية السابقة.
- ✓ نموذج ARMA: يجمع بين خصائص النموذجين السابقين، حيث يدمج تأثيرات الانحدار الذاتي والمتوسطات المتحركة في نموذج واحد قادر على تمثيل السلسلة الزمنية بدقة أكبر.¹

أولاً: نماذج الارتباط الذاتي Autoregressive Model AR:

يمكن كتابة نموذج (AR) كمجموع من القيم الحالية التي تكون مرتبطة خطياً بالقيم السابقة² والتي تكتب على الشكل التالي:

$$AR(p) : X_t = \theta_1 y_{t-1} + \theta_2 y_{t-2} + \dots + \theta_p y_{t-p} + \varepsilon_t$$

$$AR(P) : X_t = \varepsilon_t - \theta_1 y_{t-1} + \varepsilon_t$$

حيث $\theta_1 \theta_2 \theta_3 \dots \theta_p$ معاملات مقدرة موجبة أو سالبة و ε_t الحد العشوائي θ_t يمثل معامل يعبر عن قوة العلاقة الخطية بين قيمتين متتاليتين³ وتشير P إلى رتبة الانحدار الذاتي وهي عبارة عن عدد القيم الماضية المستخدمة أو بعبارة أخرى فترات التباطؤ؛ فإذا كانت (p=1) يطلق على النموذج نموذج الانحدار الذاتي من الرتبة الأولى (1) AR.⁴

كما أن نموذج الانحدار الذاتي يمكن أن يستخدم لتمثيل السلاسل الزمنية المستقرة وغير المستقرة وأن شروط

استقرارية النموذج يجب أن تقع جذور المعادلة خارج حدود دائرة الوحدة أي أن تكون $-1 < \theta < 1$.⁵

ثانياً: نماذج المتوسطات المتحركة MA Moving Average Model :

وفقاً لهذا النموذج فإن المتغير التابع X_t يكون دالة للمتوسط المرجح للقيم السابقة للحد العشوائي إلى

غاية الفترة q حيث $q > 1$ و تكون الكتابة كالتالي:

¹ Kadri, F., Chaabane, S., & Tahon, C. (2014). modélisation et prévision des flux quotidiens des pations aux urgence hospitaliers en utilisant l'analyse de series chronologique. 7eme conference de gestion et ingénierie hospitaliers (GISEH), (p. 03). LIEGE, Belgium.

² Dor, E. (2009). économétrie. france: Pearson education, p153

³ دربال أمينة ، محاولة التنبؤ بمؤشرات الأسواق المالية العربية باستعمال النماذج القياسية دراسة حالة : مؤشر سوق دبي المالي أطروحة دكتوراه في العلوم الاقتصادية ، جامعة تلمسان ، الجزائر ، 2014، ص 66

⁴ حمد بن عبد الله بن ناصر الغنام، تحليل السلسلة الزمنية لمؤشر أسعار الأسهم في المملكة العربية السعودية باستخدام منهجية بوكس جنكينز (Box-Jenkins) مجلة جامعة الملك عبد العزيز للاقتصاد والإدارة، العدد 02 المجلد 17، ص 03-26، 2003، ص 07.

⁵ سعدية عبد الكريم طعمة، استخدام تحليل السلاسل الزمنية للتنبؤ بأعداد المصابين بالاورام الخبيثة في محافظة الأنبار مجلة جامعة الأنبار للعلوم الاقتصادية والإدارية، المجلد 04 العدد 08 ص 371-393، ص 376

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

$$MA(q): X_t = \varepsilon_t - v_1 \varepsilon_{t-1} - v_2 \varepsilon_{t-2} - \dots - v_q \varepsilon_{t-q}$$

في دالة الارتباط الذاتي للنموذج $MA(q)$ فقط المعاملات q و الأولى هي التي تختلف جوهريا عن الصفر.

يتميز بيان الارتباط الذاتي الجزئي بانخفاض أسي للتأخرات.

ثالثا: نموذج انحدار ذاتي بمتوسط متحرك (ARMA) Autoregressive Moving Average Model :

هذا النوع من النماذج هو تركيبة بين القيم السابقة و الاخطاء العشوائية و يتصف برتبتين يعرف كالتالي:

$$ARMA(p, q): X_t = \theta_1 x_{t-1} + \dots + \theta_p x_{t-p} + \varepsilon_t - v_1 \varepsilon_{t-1} - v_p \varepsilon_{t-p}$$

يتميز النموذج $ARMA(p, q)$ بالخصائص التالية:

✓ دالة الارتباط الذاتي البسيطة لا تنعدم و تبقى مستمرة في التناقص.

✓ دالة الارتباط الذاتي الجزئية لا تنعدم و تبقى مستمرة في التناقص.

رابعا: نموذج انحدار ذاتي بمتوسط متحرك متكامل Autoregressive Integrated Moving Average Model (ARIMA):

تختلف هذه النماذج عن النماذج السابقة بأنها غير مستقرة، ويطلق عليها في هذه الحالة أنها متكاملة

(Integrated). وللتغلب على عدم الاستقرار، يتم تطبيق سلسلة من الفروقات بدرجات مختلفة على البيانات حتى

نصل إلى سلسلة زمنية مستقرة. وعند تحقيق الاستقرار، تُسمى السلسلة متكاملة من الدرجة d ، حيث يمثل d عدد مرات الفروقات المطلوبة لجعل السلسلة مستقرة.¹

الفرع الثالث: مراحل تحليل السلسلة الزمنية وفق منهجية بوكس-جنكينز

تتمثل منهجية بوكس-جنكينز في المراحل التالية:

أولا: مرحلة التعرف

تعتمد منهجية Box-Jenkins على نماذج ARMA ومشتقاتها، وتبدأ أولى مراحل هذه المنهجية بمرحلة

¹ دربال أمينة، نفس المرجع السابق ص 67

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

التعرف. وتهدف هذه المرحلة إلى دراسة السلاسل الزمنية من خلال تحليل دالة الارتباط الذاتي (ACF) ودالة الارتباط الذاتي الجزئي (PACF) للسلاسل المستقرة. ومن خلالها يتم تقييم استقرار السلسلة الزمنية وتحويل السلسلة غير المستقرة إلى مستقرة إذا لزم الأمر، بالإضافة إلى تحديد النموذج الأنسب لتلك السلسلة وفق خصائصها.

1- دراسة استقرار السلسلة الزمنية:

تفترض معظم الدراسات التطبيقية الاقتصادية التي تعتمد على بيانات السلاسل الزمنية أن هذه السلاسل مستقرة، بينما في الواقع غالبية السلاسل الزمنية الاقتصادية تتصف بعدم الاستقرار نتيجة التغيرات المستمرة في الظروف المحيطة. ويمكن تقييم استقرار السلسلة من خلال رسم انتشار القيم الزمنية، وكذلك تحليل دالة الارتباط الذاتي (ACF) ودالة الارتباط الذاتي الجزئي (PACF). ويعود عدم الاستقرار عادةً إلى أحد العوامل التالية: وجود اتجاه عام، أو تقلبات موسمية، أو عدم استقرار التباين والوسط الحسابي. ويُقصد بالاستقرار من الناحية الإحصائية أن يكون الوسط الحسابي والتباين للسلسلة الزمنية ثابتين على طول الفترة الزمنية.¹

كما أنه بالإضافة إلى دالة الارتباط الذاتي والجزئي فإنه يتم القيام باختبار الجذر الوحدوي وهذا من أجل دراسة الاستقرار في السلسلة.

أ- دالة الارتباط الذاتي البسيطة (Fonction d'autocorrelation simple) و دالة الارتباط الذاتي الجزئي (Fonction d'autocorrelation partielle):

✓ دالة الارتباط الذاتي البسيطة:²

تركز هذه الدالة على دراسة العلاقة الداخلية للسلسلة الزمنية مع نفسها، أي الكشف عن الارتباطات الذاتية ضمن السلسلة. على سبيل المثال، إذا كانت Y_t تمثل سلسلة زمنية مستقرة و k هو معامل التأخير، فإن معاملات الارتباط تُحسب بدءاً من الدرجة الأولى وحتى الدرجة k ، لتحديد مدى تأثير القيم السابقة للسلسلة على قيمها الحالية. حيث :

$$\frac{n}{6} \leq k \leq \frac{n}{3}$$

¹ ناظم عبد الله عبد الحمدي، سعدية عبد الكريم طعمه، استخدام نماذج السلاسل الزمنية الموسمية للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في مدينة الفلوجة، مجلة جامعة الأنبار للعلوم الاقتصادية والإدارية، جامعة الأنبار، العراق، المجلد 4، العدد 7، 2011، ص 26-27

² جباري لطيفة مصطفى، طرق اتخاذ القرار باستخدام الذكاء الاصطناعي: دراسة مقارنة للتنبؤ بالطاقة الكهربائية لولاية تلمسان باستعمال الشبكات العصبية الاصطناعية، أطروحة لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم الاقتصادية تخصص: بحوث العمليات و تسير المؤسسات، جامعة أبي بكر بلقايد تلمسان، الجزائر، 2015-2016، ص 193-194

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

أما إذا كان: $n \geq 30$ فإن $k = \frac{n}{5}$

و يحدد الارتباط الذاتي من الدرجة k العلاقة التالية حيث: n عدد المشاهدات.

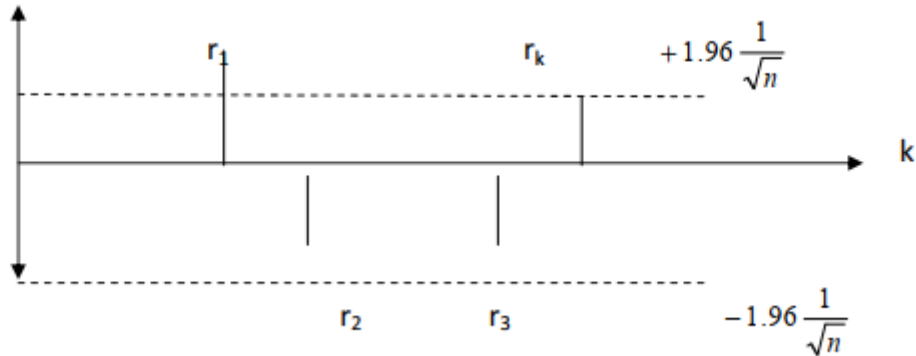
$$r(k) = \frac{\sum_{t=k+1}^n (y_t - \bar{y})(y_{t-k} - \bar{y}_2)}{\sum_{t=k+1}^n (y_t - \bar{y})^2 \sum_{t=k+1}^n (y_{t-k} - \bar{y}_2)^2}$$

$$\bar{y}_1 = \frac{1}{n-k} \sum_{t=k+1}^n y_t$$

$$\bar{y}_2 = \frac{1}{n-k} \sum_{t=k+1}^n y_{t-k} \quad \text{حيث:}$$

و الشكل التالي يمثل ما يعرف ببيان الارتباط الذاتي corrélograme .

الشكل رقم (42) بيان الارتباط الذاتي لمعاملات الارتباط الذاتي البسيط.



source R.Bourbonnais, J.C.Usunier, Manuel et exercices corrigés Econométrie, 5ème édition, Dunod, Paris, 1998,P83

بهدف الإبقاء على المعاملات التي تختلف جوهريا عن 0 يمكن استخدام اختبار معنوية للمعاملات r_k و

ذلك ستستخدم اختبار student التالي:

$$t_{cal} = \frac{|r_k|}{\sqrt{1 - r_k^2}} \sqrt{n - 2}$$

و تحدد قيمة t_{tab} الجدولية ، و ذلك عن طريق:

معنوية $\alpha = 5\%$
درجات حرية $n - 2$.

إذا كان $t_{cal} > t_{tab}$ فهذا يعني أن المعامل r_k يختلف جوهريا عن 0.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

أثبت Quenouille 1947 أنه إذا كان حجم العينة $n > 30$ فان معامل الارتباط الذاتي يخضع لتوزيع طبيعي وسطه الحسابي 0 و انحرافه المعياري $\frac{1}{\sqrt{n}}$ ، وبالتالي تكون فترة الثقة كالآتي:

$$ICr_{kk} = \pm 1.96 \frac{1}{\sqrt{n}}$$

و يتم التمثيل البياني للحد الأعلى والحد الأدنى مثل الشكل () السابق و من خلاله يتم معرفة معاملات

الارتباط الذاتي التي يختلف جوهريا عن 0 وبالتالي فدالة الارتباط الذاتي تساعد على:

- تكشف مدى وجود الارتباط بين المشاهدات للظاهرة المدروسة .
- تكشف مدى استقرارية السلسلة الزمنية فإذا وقعت معظم المعاملات داخل حدود الثقة تكون مستقرة.
- تكشف عن أسباب عدم الاستقرار كالاتجاه العام بحث تتناقص المعاملات خارج مجال الثقة دلالة على وجود اتجاه عام أو الموسمية من خلال ظهور معامل ارتباط يختلف جوهريا عن 0 كل 12 شهر فهذا يعني وجود موسمية.

✓ دالة الارتباط الذاتي الجزئي¹:

يمثل معامل الارتباط الذاتي العلاقة بين قيم متتالية لمتغير ما خلال فترتين مع ثبات قيم الفترات الأخرى ،

و يرمز له ب Γ_{kk} بحيث يتم استبعاد القيم التي تقع بين القيمتين المطلوبتين حيث إذا أرد حساب معامل الارتباط بين Y_t, Y_{t-k} يجب استبعاد القيم

$$Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-k+1}$$

و لحساب معامل الارتباط الجزئي نستعين بحساب المصفوفات ، لتكن المصفوفة r_k المتماثلة لنسبة

$k-1$ معاملات الارتباط الذاتي ل y_t كما يلي:

$$r_k = \begin{vmatrix} 1 & \dots & r_1 & \dots & r_{k-1} \\ & \ddots & & \ddots & \\ & & 1 & \dots & r_1 \\ & & & \ddots & \\ r_{k-1} & \dots & r_1 & \dots & 1 \end{vmatrix} \quad k \in N$$

و بالتالي يكون معامل الارتباط الذاتي بين Y_t, Y_k كالآتي:

¹ جباري لطيفة مصطفى، نفس مرجع سابق، ص 194

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

$$r_k^* = \frac{|r_k^*|}{|r_k|} :$$

حيث: r_k^* / محدد المصفوفة r_k

ب- اختبار الجذر الحدودي:

يعتمد اختبار الجذر الحدودي على دعم نتائج دالة الارتباط الذاتي في تحديد طبيعة عدم استقرار السلسلة الزمنية، ويساعد في اختيار الطريقة الأنسب لإزالة عدم الاستقرار، وذلك لتفادي مشكلة التقدير المزيف والحفاظ على صحة الاختبارات الإحصائية. ويستند هذا الاختبار على الفرضيتين التاليتين:¹

$$\begin{cases} H_0: \phi = 1 \\ H_1: |\phi| < 1 \end{cases}$$

$$\hat{\phi} = \frac{\sum_{t=1}^n y_{t-1} y_t}{\sum_{t=1}^n y_{t-1}^2} \quad \text{حيث: } \phi \text{ يمثل الجذر الحدودي ويحسب بالعلاقة التالية:}$$

H_0 : هي فرضية عدم الاستقرار .

وعليه يُعرف هذا الاختبار باختبار الجذر الحدودي، حيث تفترض الفرضية الصفرية أن الارتباط الخطي للسلسلة الزمنية يحتوي على جذر يساوي الواحد.² ومن أجل قبول أو رفض الفرضية الصفرية، يمكن استخدام عدة اختبارات من أبرزها: اختبار ديكي-فولر البسيط (Dickey-Fuller)، اختبار ديكي-فولر المطور، واختبار فيليبس-بيرون (Phillips-Perron).

✓ اختبار Phillips -perron:

يعتبر هذا الاختبار تصحيحيا لاختبار AF بحيث يأخذ بعين الاعتبار مشكلة عدم ثبات التباين

Heterisciedasticité و يتم هذا الاختبار عبر أربعة مراحل هي:

- تقدير النماذج الثلاثة ل AF بطريقة المربعات الصغرى البسيطة MCO .

- تقدير التباين في المدى القصير من خلال :

¹ عتروس سهيلة نفس المرجع السابق، ص125

² Roman Kozhan, Financial econometrics-with Eviews, Ventus Publishing APS, toun, 2010, P 70.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

$$\hat{\delta}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2$$

- تقدير معامل التصحيح Si^2 أو ما يعرف بالتباين في المدى الطويل

$$S_i^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i^2 + 2 \sum_{i=1}^l 1 + \left(\frac{i}{l+1} \right) \frac{1}{n} \sum_{i=i+1}^n e_i e_{i-i}$$

لحساب هذا التباين في المدى الطويل يجب تحديد أولاً معامل التأخر | و ذلك من خلال

$$l = 4 \left(\frac{n}{100} \right)^{\frac{2}{5}} \text{ حيث } n : \text{ عدد المشاهدات}$$

- حساب الإحصائية PP التالية :

$$PP = t_{\Phi_1}^* = \sqrt{k} X \frac{(\Phi_1 - 1)}{\hat{\delta}\Phi_1} + \frac{n(k-1)\hat{\delta}\Phi_1}{\sqrt{k}}$$

$$k = \frac{\hat{\delta}}{S_i^2} \text{ حيث}$$

يتم مقارنة هذه النتيجة مع القيمة الجدولية المقروءة من جدول Mackinnon .

✓ اختبار **Dickey-Fuller** البسيط :

قدم العالمان ديكلي وفولر (Dickey & Fuller) في سنة 1979 اختباراً يتيح الكشف عن وجود جذر

وحدوي في السلسلة الزمنية، ويهدف إلى تحديد ما إذا كانت السلسلة الزمنية مستقرة أم لا. ولتحقيق هذا الهدف، اقترح

العالمان ثلاثة نماذج للاختبار، هي كما يلي:¹

-النموذج الأول (01): $y_t = \phi y_{t-1} + \varepsilon_t$ نموذج الانحدار الذاتي من الدرجة 1؛

-النموذج الثاني (02): $y_t = \phi y_{t-1} + c + \varepsilon_t$ نموذج الانحدار الذاتي بوجود الثابت؛

-النموذج الثالث (03): $y_t = \phi y_{t-1} + c + bt + \varepsilon_t$ نموذج الانحدار الذاتي مع اتجاه عام.

ومن أجل إجراء هذا الاختبار فإنه يتم الاعتماد على طريقة المربعات الصغرى لتقدير النماذج الثلاث

السابقة التي يصبح شكلها كما يلي:

¹ Régis Bourbonnais , Econométrie –cours et exercices corrigés, 9eme édition, Dunod, Paris-France, 2015, P 249.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

$$\Delta y_t = \lambda y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (01) \text{ -النموذج الأول}$$

$$\Delta y_t = \lambda y_{t-1} + c + \varepsilon_t \quad (02) \text{ -النموذج الثاني}$$

$$\Delta y_t = \lambda y_{t-1} + c + bt + \varepsilon_t \quad (03) \text{ -النموذج الثالث}$$

مع $\lambda = 0 - 1$ وبالتالى تأخذ فرضيات الاختبار الشكل التالى

$$\begin{cases} H_0: \lambda = 0 \\ H_1: \lambda \neq 0 \end{cases}$$

وعليه، فإن الفرضية الصفرية في اختبار الجذر الحدودي تفترض وجود الجذر الحدودي في السلسلة الزمنية، أي افتراض عدم الاستقرار. ويتم تقدير معاملات النماذج الثلاث السابقة باستخدام طريقة المربعات الصغرى العادية (OLS)، ومن ثم الحصول على القيمة المحسوبة $t\phi^{\wedge}$ ومقارنتها بالقيم الجدولية. إذا كانت القيمة المحسوبة أكبر من القيمة الجدولية، فهذا يشير إلى أن السلسلة الزمنية تحتوي على جذر وحدوي، أي أنها غير مستقرة. وبمعنى آخر، قبول الفرضية الصفرية في أي من النماذج الثلاثة يعني أن السلسلة الزمنية غير مستقرة.¹

✓ اختبار Dickey-Fuller المطور²:

قام العالمان Dickey و Fuller بتطوير اختبارهم السابق وأطلقا عليه اسم اختبار Dickey-Fuller المطور (Augmented Dickey-Fuller – ADF)، وذلك نظرًا لملاحظتهما أن النماذج السابقة تفترض أن الأخطاء عشوائية ومستقلة، بينما في الواقع قد توجد ارتباطات ذاتية بين الأخطاء لم يتم أخذها بعين الاعتبار. يظل مبدأ الفرضيات كما هو؛ أي أن قبول الفرضية الصفرية يشير إلى وجود جذر وحدوي، وبالتالي السلسلة غير مستقرة، وعندها يصبح من الضروري حساب الفروق لجعل السلسلة مستقرة، والعكس صحيح. يعتمد هذا الاختبار المطور على تقدير النماذج الثلاثة الأساسية التالية:

$$\Delta y_t = \lambda y_{t-1} - \sum_{j=2}^p \phi_j \Delta y_{t-j+1} + \varepsilon_t \quad (04) \text{ -النموذج}$$

¹ عتروس سهيلة، نفس المرجع السابق، ص 126، 128

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

$$\Delta y_t = \lambda y_{t-1} - \sum_{j=2}^p \phi_j \Delta y_{t-j+1} + c + \varepsilon_t \quad \text{النموذج (05)}$$

$$\Delta y_t = \lambda y_{t-1} - \sum_{j=2}^p \phi_j \Delta y_{t-j+1} + c + bt + \varepsilon_t \quad \text{النموذج (06)}$$

2- معالجة عدم استقرارية السلاسل الزمنية:¹

بعد التأكد من عدم استقرارية السلسلة الزمنية باستخدام الأساليب الإحصائية المناسبة، يصبح من الضروري تطبيق مجموعة من التحويلات لجعل السلسلة مستقرة، تمهيداً لبناء نموذج تنبؤي دقيق. وتختلف أساليب المعالجة باختلاف نوع عدم الاستقرارية، سواء كان ناجماً عن تباين غير ثابت، أو عن اتجاه عام، أو عن مكون موسمي متكرر، ويمكن توضيحها كما يلي:

أ. معالجة عدم ثبات التباين: (Heteroscedasticity)

عندما تظهر السلسلة تبايناً غير ثابت، تُستخدم التحويلات غير الخطية لتثبيت التباين، ومن أبرزها:

- ✓ تطبيق اللوغاريتم الطبيعي على القيم الموجبة للسلسلة.
- ✓ استخدام الجذر التربيعي للبيانات.
- ✓ تحويل البيانات إلى مقلوبها $X1$ ، حسب طبيعة التوزيع الأصلي للقيم.

ب. إزالة الاتجاه العام: (Detrending)

عند وجود اتجاه واضح في السلسلة الزمنية، يُعزل هذا الاتجاه للحصول على سلسلة مستقرة حول المتوسط،

باستخدام:

- ✓ طريقة الانحدار الخطي: تقدير الاتجاه العام بنموذج خطي بسيط، ثم إزالة هذا الاتجاه من السلسلة الأصلية، مع اعتبار البواقي كسلسلة جديدة خالية من الاتجاه.

- ✓ طريقة الفروق: (Differencing) طرح القيم المتتالية للسلسلة (أو على فترات محددة) من بعضها البعض، مع إمكانية تكرار العملية لعدة درجات d للوصول إلى الاستقرارية.

ت. إزالة الموسمية: (Deseasonalizing)

في حال وجود نمط موسمي دوري، تُستخدم طريقة الفرق الموسمي (Seasonal Differencing)، والتي تعتمد

¹ ناظم عبد الله عبد الحمدي، سعدية عبد الكريم طعمه، مرجع سبق ذكره، ص 27

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

على طرح القيم المتكررة على فترات ثابتة (مثل أشهر السنة أو أرباعها)، لإزالة المكون الموسمي مع الحفاظ على الاتجاهات الأساسية للسلسلة.

تُعد هذه التحويلات خطوات أساسية في منهجية Box-Jenkins لبناء نماذج ARIMA، إذ لا يمكن استخدام هذه النماذج إلا بعد التأكد من استقرارية السلسلة من حيث المتوسط والتباين.

3- تحديد درجة النماذج الملائمة:

تجدر الإشارة إلى أن التنبؤ الدقيق يعتمد على اختيار النموذج الأنسب للسلسلة الزمنية قيد الدراسة خلال فترة معينة. في هذه المرحلة، وبعد الحصول على سلاسل مستقرة من المرحلة السابقة، يتم الاعتماد على تحليل دالة الارتباط الذاتي (ACF) ودالة الارتباط الذاتي الجزئي (PACF) لتحديد النماذج الخطية الملائمة، أي لتحديد خصائص نموذج $ARIMA(p,i,q)$. ففي هذا الإطار، تُستخلص قيمة q من آخر نقطة تنعدم عندها معاملات ACF، بينما تُحدد قيمة p من آخر نقطة تكون عندها معاملات PACF مساوية للصفر.

والجدول الموالي يوضح كيفية الاعتماد على كل من دالة الارتباط الذاتي (ACF) ودالة الارتباط الذاتي الجزئي (PACF) في تشخيص النموذج أو النماذج الملائمة كما يلي¹:

الجدول رقم(15): كيفية تشخيص النموذج

النموذج	دالة الارتباط الذاتي (ACF)	دالة الارتباط الذاتي و الجزئي (PACF)
AR(p)	تضاؤل تدريجي للصفر أو متذبذب	نلاحظ نتؤ خلال التباطؤ p و جميع القيم الأخرى للمعاملات منعدمة
MA(q)	وجود نتؤ موجب أو سالب عند التباطؤ q وباقي القيم الأخرى للمعاملات داخل مجال الثقة أو منعدمة	تضاؤل تدريجي أو متذبذب
ARMA(p,q)	تضاؤل تدريجي سواء مباشر أو متذبذب بداية من التباطؤ q	تضاؤل تدريجي سواء مباشر أو متذبذب بداية من التباطؤ p

المصدر: حمد بن عبد الله بن ناصر الغنام، تحليل السلسلة الزمنية لمؤشر أسعار الأسهم في المملكة العربية السعودية باستخدام منهجية بوكس جنكينز (Box-Jenkins) مجلة جامعة الملك عبد العزيز للاقتصاد والإدارة، العدد 02 المجلد 17، ص3-26، 2003، ص11.

ثانياً: مرحلة تقدير النموذج

و يتم ذلك حسب نوع السلسلة الزمنية النموذج.

¹ عتروس سهيلة، نفس المرجع السابق، ص129

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

3- المفاضلة بين النماذج المقدرية:¹

بعد تقدير النماذج، يصبح من الضروري المفاضلة بينها لاختيار الأنسب، ويعتمد في ذلك على مجموعة من المعايير الإحصائية مثل معيار أكايك (AIC)، معيار شوارز (SC)، ومعيار هاتان-كوين (HQ). ويتم اختيار النموذج الذي يعطي أقل قيمة لهذه المعايير، حيث يُعد مؤشراً على ملائمة النموذج للسلسلة الزمنية المدروسة.

أ- معيار (AIC)AKAIKE (1969): اقترح العالم الياباني أكايك معياراً عاماً لتطوير ونمذجة السلاسل الزمنية، يُعرف باسم Akaike's Information Criterion (AIC). يُستخدم هذا المعيار لتشخيص رتب نماذج السلاسل الزمنية وللمقارنة بين النماذج المختلفة، كما يمكن استخدامه في مجالات إحصائية أخرى. ويُعتبر AIC من أكثر المعايير استخداماً لتحديد النموذج الملائم للسلسلة الزمنية، ويُحسب وفق العلاقة التالية:

$$AIC = \hat{\sigma}^2 \exp \left(2 \left(\frac{p+q}{t} \right) \right)$$

حيث⁴:

$$\hat{\sigma}^2 = \frac{\sum e_t^2}{t}$$

البواقي على عدد المشاهدات فقط؛

(p+q) يشير إلى عدد معالم النموذج وليس مجموع درجتي النموذج.

عند إعادة صياغة النموذج وفق الشكل اللوغاريتمي فإنه يأخذ الصيغة التالية⁵:

$$AIC = \ln(\hat{\sigma}^2) + \left(2 \left(\frac{p+q}{t} \right) \right)$$

ب- معيار (Shwarz) (1979): يُعرف هذا المعيار باسم (Schwarz Information Criterion (SIC)، ويُطلق عليه أيضاً Bayesian Information Criterion (BIC) وقد قام شوارز بتعديل معيار أكايك السابق ليأخذ هذا المعيار صيغة رياضية مختلفة، تهدف إلى تقييم ملائمة النموذج مع مراعاة عدد المعلومات، بحيث يُفضل النموذج الذي يعطي أقل قيمة لـ SIC/BIC، مما يعكس التوازن بين جودة الملاءمة وبساطة النموذج:

¹ عتروس سهيلة، نفس المرجع السابق، ص 133

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

$$BIC = Ln\hat{\sigma}^2 + \frac{(p+q)}{t} Ln(t)$$

ت- معيار (Hannan-Quinn) (1979): يحسب هذا المعيار وفق العلاقة التالية :

$$HQ(p, q) = Ln(\hat{\sigma}^2) + (p + q)C \frac{LnLnT}{T}$$

ثالثاً: مرحلة الفحص و اختبار النموذج¹

بعد الانتهاء من مرحلة تقدير النموذج، تأتي المرحلة الثالثة في منهجية Box-Jenkins، وهي مرحلة التشخيص أو اختبار النموذج. تهدف هذه المرحلة إلى التأكد من ملاءمة النموذج للبيانات وقبوله نهائياً، مع مراعاة أن تكون مربعات البواقي صغيرة قدر الإمكان، ومعامل R^2 كبيراً قدر الإمكان. ويشمل هذا التشخيص اختبار معنوية معالم النموذج كل على حدة، بالإضافة إلى تحليل بواقي التقدير للتأكد من كونها عبارة عن تشويش أبيض، مما يضمن جودة النموذج وملاءمته للسلسلة الزمنية.

1- اختبار معنوية معالم النموذج:

يقصد به التحقق مما إذا كانت معاملات النموذج تختلف معنوياً عن الصفر، أي اختبار دلالة المعاملات إحصائياً. ويتم ذلك باستخدام اختبار (test de Student) t ، وفي حالة وجود معامل لا يتمتع بالدلالة الإحصائية، يجب حذفه وإعادة صياغة النموذج بدون هذا المعامل، سواء كان تابعاً لرتبة AR أو MA.

2- تحليل البواقي (اختبار بواقي التقدير):

بعد التأكد من ملاءمة النموذج، يتم تحليل بواقي التقدير الناجمة عن نموذج $ARMA(p, q)$ للتأكد

من أنها تشكل تشويشاً أبيض. ويشمل هذا الاختبار عدة جوانب:

أ. اختبار استقرارية البواقي:

يتم اختبار الاستقرارية عبر فحص معاملات الارتباط الذاتي لمربعات البواقي، فإذا كانت جميعها داخل مجال الثقة فهذا يعني أن التباين الشرطي للأخطاء متجانس. كما يمكن الاستعانة باختبار ARCH للتحقق من تجانس التباين.

¹ عتروس سهيلة، نفس المرجع السابق، ص 133-136

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

ب. اختبار استقلالية البواقي:

للتحقق من استقلالية البواقي، يتم الاعتماد على دالة الارتباط الذاتي من خلال رسم منحني ACF وملاحظة ما إذا كانت المعاملات داخل مجال الثقة، حيث تشير داخل المجال إلى غياب الارتباط الذاتي بين الأخطاء. كما يمكن استخدام اختبار Durbin-Watson للكشف عن الارتباط من الدرجة الأولى، أو اختبارات Box-Pierce و Ljung-Box لاختبار مجموع الارتباطات الذاتية للبواقي.

أ- اختبار التوزيع الطبيعي للبواقي:

من أجل اختبار فيما إذا كانت البواقي تخضع للتوزيع الطبيعي أم لا نعلم على إحصائية Jarque-Bera والتي بدورها تعتمد على معامليين هما: معامل التفرطح (Kurtosis (K ومعامل التناظر (Skewness (S) الذين يكتبان كما يلي:

$$S = \frac{\left[\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (y_t - m)^3 \right]^2}{\left[\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (y_t - m)^2 \right]^3} = \beta_1$$

$$K = \frac{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (y_t - m)^4}{\left[\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (y_t - m)^2 \right]^2} = \beta_2$$

حيث: m هي المتوسط الحسابي للسلسلة الزمنية المستقرة، ومنه تحسب إحصائية Jarque-Bera

كما يلي :

$$JB = \frac{T}{6} \beta_1 + \frac{T}{24} (\beta_2 - 3)^2$$

ويتم مقارنتها مع القيمة الجدولة لـ χ^2 بدرجة حرية 2 ونسبة معنوية α فإذا كانت المحسوبة أكبر من

الجدولة فإننا نرفض التوزيع الطبيعي، تصاغ الفرضية الصفرية لهذا الاختبار كما يلي :

$$H_0 : B_1^{1/2} = \beta_2 = 0$$

رابعاً: مرحلة التنبؤ

تعد مرحلة التنبؤ آخر مرحلة في منهجية بوكس-جنكنز وأهمها، حيث تهدف إلى استخدام النموذج النهائي

الذي يمثل الظاهرة المدروسة (السلسلة الزمنية) للتنبؤ بالقيم المستقبلية لهذه الظاهرة، بعد المرور بالمراحل السابقة من التعرف على البيانات، المعالجة، والتقدير والفحص.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

وفي هذه المرحلة، يمكن التمييز بين نوعين من التنبؤ:

- ✓ تنبؤ بخطوة واحدة للأمام: يتم فيه توليد التنبؤ للقيمة الموالية فقط مباشرة بعد آخر نقطة في السلسلة.
- ✓ تنبؤ بعدة خطوات للأمام: يسمح بإنتاج تنبؤات للقيم المستقبلية على مدى عدة خطوات، مثل $1, 2, 3, \dots, k$ خطوة إلى الأمام.

وقد أثبتت العديد من الدراسات أن منهجية بوكس-جنكنز تقدم نماذج دقيقة وموثوقة للتنبؤ، إذ يعتمد التنبؤ الأمثل على تقليل الخطأ إلى أقل حد ممكن وتقليل التباين، مما يضمن جودة ودقة التنبؤات المستقبلية.

الفرع الرابع: مميزات وعيوب منهجية بوكس-جنكنز¹

أولاً: مميزات منهجية بوكس-جنكنز

تعتبر منهجية بوكس-جنكنز من أهم الأساليب الحديثة لتحليل السلاسل الزمنية، لما تتمتع به من

خصائص ومميزات، أهمها:

- ✓ شمولية وموثوقية: فهي تقدم أسلوباً منظماً لتحليل السلاسل الزمنية، بدءاً من اختيار النموذج الأولي المناسب وحتى التنبؤ بالقيم المستقبلية.

- ✓ استغلال أنماط الارتباط: لا تفترض استقلال مشاهدات السلسلة الزمنية، بل تستفيد من أنماط الارتباط الكامنة في البيانات عبر نماذج ARMA، مما يتيح الحصول على تنبؤات متسقة إحصائياً.

- ✓ الدقة عند توفر البيانات: تعطي المنهجية تنبؤات دقيقة إذا كانت البيانات كافية للتطبيق.

- ✓ الكفاءة الحسابية: تعتمد على آليات حسابية فعالة، وتدعمها العديد من الحزم الإحصائية القادرة على تنفيذ جميع مراحل التحليل بسهولة.

ثانياً: عيوب منهجية بوكس-جنكنز

رغم مميزاتهما، إلا أن منهجية بوكس-جنكنز لها بعض القيود والعيوب، أهمها:

- ✓ الاعتماد على الخبرة الشخصية: تتطلب مهارات وخبرات خاصة، خصوصاً عند اختيار النموذج المناسب للبيانات، مما يجعل تطبيقها نوعاً من العلم والفن معاً.

¹ سمير مصطفى شعراوي، مقدمة في التحليل الحديث للسلاسل الزمنية، الطبعة الأولى، مركز النشر العلمي، مطابع جامعة الملك عبد العزيز، المملكة العربية

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

✓ تعقيد العمليات الحسابية: تحتاج إلى عدد كبير من العمليات الحسابية المعقدة التي لا يمكن تنفيذها إلا باستخدام الحاسوب.

✓ صعوبة التحديث عند توفر بيانات جديدة: عند إضافة مشاهدة جديدة، يجب إعادة كل مراحل التحليل من البداية، مما يجعل استخدامها أكثر تكلفة مقارنة بطرق أخرى.

لا بد من الإشارة أن نمذجة السلاسل الزمنية والتنبؤ لا تقتصر على منهجية Box-Jenkins فقط، بل هناك أساليب أخرى مثل الشبكات العصبية الاصطناعية التي نالت اهتمامًا واسعًا من الباحثين مؤخرًا. وفي المطلب الموالي، سيتم عرض أهم المفاهيم الخاصة بها.

المبحث الثالث : نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية ونماذج الذكاء الاصطناعي

شهدت السنوات الأخيرة تطورًا ملحوظًا في أساليب التنبؤ بفضل إدماج تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي، والتي أثبتت فعاليتها في معالجة البيانات الكبيرة والمعقدة بدقة أعلى من النماذج التقليدية. وانطلاقًا من هذه الأهمية، يهدف هذا المبحث إلى دراسة بعض نماذج الذكاء الاصطناعي والشبكات العصبية الاصطناعية، باعتبارها من بين أبرز الأدوات الحديثة المستخدمة في التنبؤ وتحليل السلاسل الزمنية.

المطلب الأول: نماذج الذكاء الاصطناعي AI & Machine Learning Models

في ظل التحولات العالمية المتسارعة في مجال الطاقة، أصبحت الحاجة إلى أدوات تنبؤية دقيقة وفعالة أكثر إلحاحًا من أي وقت مضى، لا سيما في البلدان الناشئة التي تراهن على الطاقات المتجددة لتحقيق الاستقلال الطاقوي وضمان استدامة الموارد. ومن بين أبرز هذه الأدوات تبرز نماذج الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة التي أصبحت تمثل ثورة حقيقية في طرق تحليل البيانات والتنبؤ بالمستقبل، بما في ذلك استشراف إنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة.¹

يمثل الذكاء الاصطناعي جيلًا جديدًا من النماذج التحليلية التي تحاكي الذكاء البشري من خلال خوارزميات قادرة على التعلم الذاتي، والتكيف مع المعطيات، واستنتاج الأنماط من بيانات ضخمة ومتغيرة. وقد أثبتت تطبيقاته في ميدان الطاقة، من خلال عدة دراسات وتجارب علمية، قدرة كبيرة على تحسين دقة التنبؤات مقارنة بالنماذج الاقتصادية التقليدية.²

ويُعد استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) والتعلم العميق (Deep Learning) من أكثر

¹ Khan, M. A., Ali, M., & Alotaibi, M. F. (2021). Artificial intelligence-based forecasting models in energy sector: Recent advances, challenges, and future outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 139, 110712, pp. 4–8. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110712>,p4

² IEA. (2023). *AI and the Future of Energy*. International Energy Agency. [No pagination]. <https://www.iea.org/reports/ai-and-the-future-of-energy>

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

النماذج شيوعًا ونجاعة في هذا السياق، نظرًا لقدرتها على اكتشاف العلاقات غير الخطية التي تعجز النماذج التقليدية عن كشفها.¹

في هذا المطلب، سنسعى إلى تقديم إطار نظري شامل حول الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة، من خلال التطرق إلى الجوانب المفاهيمية والتاريخية، والخصائص والمجالات التطبيقية، وصولًا إلى تصنيف العائلات البرمجية والنماذج المستخدمة في هذا الحقل. ويأتي هذا المطلب تمهيدًا لبناء الجزء التطبيقي لاحقًا من الدراسة، والذي سيركز على استخدام إحدى نماذج الذكاء الاصطناعي في التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة المتجددة في الجزائر لآفاق 2035.²

الفرع الأول: الإطار المفاهيمي للذكاء الاصطناعي

يشكل الذكاء الاصطناعي إحدى أبرز الثورات المعرفية والتقنية في القرن الحادي والعشرين، حيث انتقل من نطاقه الأكاديمي إلى تطبيقات عملية تمس مختلف القطاعات الحيوية، ومنها قطاع الطاقة. ويقوم هذا الفرع على بناء أنظمة قادرة على محاكاة الذكاء البشري من خلال خوارزميات متقدمة تتعلم من البيانات وتتخذ قرارات ذاتية. ويكتسي فهم الإطار المفاهيمي للذكاء الاصطناعي أهمية خاصة في هذه الدراسة، باعتباره حجر الأساس في تحليل فعالية نماذجه في التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة المتجددة. لذلك، سيتم في هذا الفرع تقديم تعريف شامل للذكاء الاصطناعي، أهدافه، وظائفه، وتطوره التاريخي، تمهيدًا لاختيار النماذج الأكثر ملاءمة لحالة الجزائر.

أولاً: تعريف أهداف ووظائف الذكاء الاصطناعي

1- تعريف الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence):

✓ أول من صاغ مصطلح الذكاء الاصطناعي عام 1956 هو العالم الأمريكي جون مكارثي (John McCarthy)، وقد عرفه بأنه:

"The science and engineering of making intelligent machines"

أي: هو علم وهندسة صناعة الآلات الذكية، وخصوصًا برامج الحاسوب القادرة على أداء مهام ذكية.

ويُعد الذكاء الاصطناعي فرعًا من فروع علوم الحاسوب يهدف إلى إنشاء أنظمة وآلات قادرة على محاكاة بعض جوانب الذكاء البشري.

أما الذكاء الطبيعي (Intelligence)، فهو مفهوم يصعب تحديده بدقة، ويمكن اعتباره القدرة

¹Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press, pp. 12–14.

<https://www.deeplearningbook.org>, p12

² Ahmed, R., & Khalid, S. (2020). Forecasting renewable energy generation using artificial intelligence: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109779, pp. 2–5. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109779>, p3

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

الحسابية التي تمكّن الكائن الحي أو الآلة من تحقيق أهدافه في البيئة المحيطة. وتختلف درجات الذكاء بين البشر والحيوانات وبعض الآلات وفق قدراتها المختلفة.

كما أننا نستطيع تعريف الذكاء الاصطناعي بأكثر من تعريف منها :

✓ الذكاء الاصطناعي (AI) هو دراسة كيفية تمكين الحواسيب من أداء مهام يقوم بها الإنسان بشكل أفضل وفي الوقت الحالي، أي تطوير أنظمة قادرة على محاكاة القدرات الذهنية البشرية وتحسين الأداء في مختلف المجالات.

✓ الذكاء الاصطناعي (AI) هو دراسة القدرات الذهنية ومحاكاة عمليات التفكير البشري عن طريق استخدام النماذج الحسابية (Computational Models) ، بهدف تمكين الآلات من أداء مهام تتطلب ذكاءً يشبه الذكاء البشري.

✓ الذكاء الاصطناعي (AI) هو دراسة وتصميم الوكلاء الأذكياء (Intelligent Agents)، حيث يُعرّف الوكيل الذكي على أنه نظام قادر على إدراك بيئته واتخاذ أفعال تزيد من فرص تحقيق أهدافه بنجاح.¹

الذكاء الاصطناعي يقوم على الفرضية القائلة بأنه يمكن وصف ومحاكاة الذكاء البشري داخل أنظمة وأجهزة تقنية. ويُعرف أيضًا بأنه دراسة وتصميم أنظمة وأجهزة قادرة على إدراك البيئة المحيطة بها واتخاذ قرارات وتصرفات تحاكي السلوك البشري.² كما يُعد الذكاء الاصطناعي فرعًا من فروع علوم الحاسوب (Computer Science)، وهو علم هندسة وتصميم الآلات الذكية القادرة على أداء مهام تتطلب ذكاءً يشبه الذكاء البشري.

✓ وفي تعريف آخر، يُعرف الذكاء الاصطناعي بأنه مجال يختص ببناء آلات وأنظمة قادرة على أداء المهام التي تتطلب ذكاءً بشريًا.³

✓ كما يعرف Barr و Feigenbaum الذكاء الاصطناعي بأنه حقل من علوم الحاسوب يركز على تصميم نظم حاسوبية ذكية تظهر خصائص الذكاء في السلوك البشري.⁴

✓ ظهر مصطلح الذكاء الاصطناعي بكثرة مؤخرًا مع النهضة التقنية العالمية وتطور الآلات، فعلى الرغم من أنه كان مجرد حلم في أفلام الخيال العلمي حتى منتصف القرن العشرين، إلا أنه أصبح اليوم جزءًا من حياتنا اليومية، حتى وإن لم ندرك ذلك أحيانًا. ويصعب تحديد ما إذا كانت آلة معينة تمتلك ذكاءً اصطناعيًا بشكل دقيق، لأن الذكاء الطبيعي

¹ فهد آل قاسم، مدخل الى علم الذكاء الاصطناعي، نقلا عن الرابط: www.myreaders.info/html/artificial_intelligence.html ص 03

² Apports de l'intelligence artificielle au génie logiciel. DEREK PATRIDGE ed MASSON. 1990. P 57

³ OP Cit Apports de l'intelligence artificielle au génie logiciel P 58

⁴ سرور على سرور ، نظم دعم الادارة نظم القرارات و نظم الخبرة ،الرياض دار المريخ، 2000، ص 82

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

نفسه ليس له تعريف محدد. باختصار، الذكاء الاصطناعي هو فرع من فروع العلم يختص بتصميم آلات وأنظمة قادرة على حل المسائل التي يحتاج الإنسان إلى ذكائه لحلها.¹

✓ الذكاء الاصطناعي يُعد أحد فروع علوم الحاسوب الحديثة، ويهتم بتطوير أساليب وتقنيات لتمكين الآلات من أداء مهام واستنتاجات تحاكي، ولو جزئياً، الذكاء البشري. يقوم على وضع خوارزميات تمكن الحاسوب من حل المشكلات بطريقة شبيهة بطريقة تفكير الإنسان. تُبرمج أنظمة الذكاء الاصطناعي باستخدام لغات البرمجة العامة، كما توجد لغات متخصصة تسهل عملية كتابة البرامج ومعالجة البيانات، مثل Prolog و Lisp و #C وغيرها. ويعتمد الذكاء الاصطناعي على مبدأ مضاهاة التشكيلات والوصف المنطقي والرياضي للبيانات، بحيث يتمكن الحاسوب من معالجة المعلومات واتخاذ القرارات بشكل ذكي وفعال، محاكياً سلوك الإنسان في حل المشكلات واتخاذ القرارات.²

✓ على هذا الأساس، يُعرف الذكاء الاصطناعي بصفة عامة على أنه الذكاء الذي يصنعه الإنسان في الآلة أو الحاسوب. باختصار، يمكن اعتباره علماً وتكنولوجيا تهدف إلى تمكين الآلات من التصرف بذكاء يشبه الذكاء البشري، ويستند في تطويره إلى مجموعة من الحقول العلمية مثل علوم الحاسوب، علم النفس، اللسانيات، الرياضيات، والهندسة.³

2- وظائف الذكاء الاصطناعي:⁴ يمكن تقسيم الذكاء الاصطناعي إلى نوعين من الوظائف أو المهام حسب كالتالي:

✓ النوع الأول:

- وظائف حياتية ذكية: والتي تعني كل تلك المهام التي يمكن أن يقوم بها الفرد بشكل دوري لكي يتصرف ويتفاعل في العالم، كالرؤية والقدرة على فهم اللغة الطبيعية أي القدرة على التواصل التخطيط والحركة؛

✓ النوع الثاني:

¹ مروة زهواني، تطبيقات نماذج الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بمخاطر التعثر المالي في المؤسسة الاقتصادية-دراسة حالة-، أطروحة دكتوراه الطور الثالث في العلوم الاقتصادية، جامعة غرداية، السنة 2021-2022، ص10

² أحمد عادل جميل، و عثمان حسين عثمان، إمكانية استخدام تقنيات الذكاء الصناعي في ضبط جودة التدقيق الداخلي (دراسة الميدانية في الشركات المساهمة العامة الأردنية)، 1-14، ص5-9

<https://www.scribd.com/document/862845926/%D8%A5%D9%85%D9%83%D8%A7%D9%86%D9%8A%D8%A9-%D8%A7%D8%B3%D8%AA%D8%AE%D8%AF%D8%A7%D9%85-%D8%AA%D9%82%D9%86%D9%8A%D8%A9-%D8%A7%D9%84%D8%B0%D9%83%D8%A7%D8%A1-%D8%A7%D9%84%D8%B5%D9%86%D8%A7%D8%B9%D9%8A>

³ سعيد غالب ياسين، نظم مساندة القرار. دار المنهاج للنشر والتوزيع الطبعة الأولى، 2006، ص165.

⁴ صالح، ف. أثر تطبيق الذكاء الاصطناعي و الذكاء العاطفي علي جودة اتخاذ القرار "رسالة ماجستير" 143-1، الأردن، الأردن/عثمان: جامعة الشرق الأوسط، ص34-35.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

- وظائف ومهام خبيرة: يعني الذكاء الاصطناعي بالمهام التي ينفذها بعض الناس بشكل جيد والتي تتطلب تدريباً شاملاً ومن أمثلتها المطبقة: التشخيص الطبي، صيانة الأجهزة، ترتيب الحاسوب والتخطيط المالي.

3- أهداف الذكاء الاصطناعي: وتتمثل هذه الوظائف في نقطتين رئيسيتين:

✓ استيعاب العمليات الذهنية المعقدة: أي القدرة على محاكاة طريقة عمل العقل البشري أثناء التفكير وحل المشكلات؛

✓ فهم طبيعة الذكاء البشري: من خلال تصميم برامج الحاسوب التي تحاكي السلوك الإنساني الذكي، بحيث يتمكن البرنامج من حل مسألة أو اتخاذ قرار في موقف معين بناء على فهم الآلة لطبيعة هذا الموقف.¹

ثانياً: نبذة تاريخية عن الذكاء الاصطناعي²

لقد أبدى الإنسان منذ القدم اهتماماً كبيراً بفهم كيفية عمل العقل البشري، وتشير السجلات التاريخية إلى محاولات عديدة لتقليد مستوى الذكاء البشري، رغم أن بعض هذه المحاولات لم تحقق أهدافها بالكامل. تعود فكرة محاكاة الذكاء البشري إلى القصص الخرافية لدى اليونانيين، ثم تطورت عبر الزمن. في القرن التاسع عشر، اكتسبت هذه الفكرة مصداقية أكبر حين اعتبر تشارلز باباج أن اختراع الحاسوب خطوة أولية نحو تطوير آلة قادرة على محاكاة قدرات العقل البشري إلى حد ما، وهو ما شجع الباحثين على تطوير الحاسبات الآلية الرقمية، ممهدة الطريق لتحويل الذكاء الاصطناعي إلى حقيقة ممكنة.

في الخمسينيات، طور آلان تورينغ آلة حاسبة ذكية تناولت التساؤل: "هل يمكن للآلة أن تفكر؟"، وتحولت هذه التجربة إلى أساس جوهري لبناء الآلة الذكية. وفي منتصف نفس العقد، انعقد مؤتمر الذكاء الاصطناعي في كلية دارموث بالولايات المتحدة الأمريكية صيف عام 1956، مسجلاً بداية عصر جديد لهذا العلم، حيث أصبح بالإمكان وصف عمليات التعلم بدقة كافية لصناعة آلات تحاكي الذكاء البشري.

إلا أن الأبحاث واجهت صعوبات كبيرة في السبعينيات، ولمواجهة الفشل في حل بعض المشاكل ونتيجة انتقادات James Lighthill والضغط من قبل الكونغرس، قررت الحكومتان الأمريكية والبريطانية قطع تمويل الأبحاث الاستكشافية في عام 1974، وهو ما شكل أول انتكاسة للذكاء الاصطناعي.

¹ عمر ملوكي، وأحمد الصالح سباع، تطبيق استراتيجيات الذكاء الاصطناعي على المستوى (الإمارات العربية المتحدة نموذجاً)، الملتقى الدولي حول: التفكير الاستراتيجي و استشراف المستقبل (الأنماط الممارسات المعوقات)، الصفحات 1-18، ص 05.

² جباري لطيفة مصطفى، طرق اتخاذ القرار باستخدام الذكاء الاصطناعي: دراسة مقارنة للتنبؤ بالطاقة الكهربائية لولاية تلمسان بإستعمال الشبكات العصبية الاصطناعية، أطروحة لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم الاقتصادية، جامعة أبي بكر بلقايد تلمسان، 2015-2016، ص 185.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

شهدت أوائل الثمانينيات صحة جديدة من خلال النجاح التجاري للنظم الخبيرة، وهي برامج تحاكي المعرفة والمهارات التحليلية لخبراء بشريين. غير أن هذا النجاح لم يستمر طويلاً، إذ واجهت الأبحاث انتكاسة أخرى بدءاً من عام 1987 مع سوق آلة Lisp Machine.

في التسعينيات وأوائل القرن الحادي والعشرين، حقق الذكاء الاصطناعي إنجازات أكبر، وإن كانت غالباً في الخلفية، إذ أصبح يستخدم في اللوجستيات واستخراج البيانات والتشخيص الطبي والعديد من المجالات الأخرى. ومن أبرز هذه الإنجازات، فوز الحاسوب Deep Blue على بطل الشطرنج غاري كاسباروف في عام 1997.

ساهم رواد كبار في تطوير هذا العلم، من بينهم John McCarthy وAllen Newell وHerbert Simon وNorbert Wiener وMarvin Minsky وWarren McCulloch وWalter Pitts وEdward Feigenbaum وAlan Turing وFrank Rosenblatt وRoger Schank وغيرهم. ويُعد الذكاء الاصطناعي نتاج التقاء العلوم الحديثة والتكنولوجيا، ونتاج جهود العقل الإنساني عبر العصور والمكان.

الفرع الثاني: خصائص الذكاء الاصطناعي و مجالات استخدامه

يمتاز الذكاء الاصطناعي بجملة من الخصائص التقنية والوظيفية التي تجعل منه أداة فعالة في التعامل مع البيانات الضخمة والمعقدة، أبرزها قدرته على التعلم الذاتي، التكيف مع المتغيرات، واستنتاج الأنماط من معلومات غير منظمة. وتتيح هذه الخصائص توسيع نطاق استخدامه ليشمل قطاعات متعددة كالصناعة، الصحة، النقل، والأمن، إلى جانب مجالات الطاقة التي تشهد اهتماماً متزايداً بتطبيقات الذكاء الاصطناعي في التنبؤ بالإنتاج والاستهلاك. سيتناول هذا الفرع تحليلاً لأهم خصائص الذكاء الاصطناعي، تليها دراسة لأبرز مجالات استخدامه، مع التركيز على تطبيقاته في القطاع الطاقوي، تمهيداً لربط الجانب النظري بالتطبيق العملي في سياق الدراسة

أولاً: خصائص الذكاء الاصطناعي¹

أهم خصائص الذكاء الاصطناعي يمكن تلخيصها في النقاط التالية:

✓ القدرة على التعلم من التجربة وإنتاج أفكار جديدة مبتكرة.

¹ هاجر بوعوة، تطبيقات الذكاء الاصطناعي الداعمة للقرارات الإدارية في منظمات الأعمال (الإصدار الطبعة الأولى)، برلين، ألمانيا: المركز الديمقراطي العربي للدراسات الإستراتيجية والسياسية والاقتصادية، 2019، ص 27-28

¹ أحمد عادل جميل، و عثمان حسين عثمان، إمكانية استخدام تقنيات الذكاء الصناعي في ضبط جودة التدقيق الداخلي (دراسة الميدانية في الشركات المساهمة العامة الأردنية)، 1-14، ص 10

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

- ✓ محاكاة الإنسان في التفكير والإدراك، وتحليل الخبرة البشرية عبر نسخ متعددة للنظام.
 - ✓ استخدام المعرفة لحل المشكلات، مع غياب التعب والملل، وتمثيل واكتساب المعرفة وتطبيقها.
 - ✓ القدرة على الاجتهاد (heuristics) في التعامل مع الحالات المعقدة والفرضيات بدقة وسرعة، مع اختيار حلول قابلة للتعديل.
 - ✓ الاستجابة السريعة والفعالة للحالات والظروف الجديدة.
 - ✓ معالجة المعلومات غير الكاملة أو الغامضة، بما في ذلك البيانات الرمزية غير الرقمية، عبر التحليل والمقارنة المنطقية.
 - ✓ تمييز الأهمية النسبية لعناصر الحالة ودعم عملية اتخاذ القرارات الإدارية
- ثانياً: مجالات الذكاء الاصطناعي وخدماته

- يرتبط الذكاء الاصطناعي بعدة حقول معرفية مثل علم الحاسب، علم النفس، الرياضيات، اللسانيات، وهندسة المعرفة، ويخدم مجموعة واسعة من المجالات العملية. من أبرز تطبيقاته:
- ✓ تمثيل المعرفة آلياً من خلال النظم الخبيرة: وهي برامج تحتوي على كم هائل من المعلومات التي يمتلكها خبير إنساني في مجال معين، حيث يقوم النظام الخبير بتنفيذ مهام عادةً ما تتطلب خبرة بشرية، مثل الحكم واتخاذ القرارات.
 - ✓ معالجة اللغات الطبيعية: ويختص هذا المجال بتطوير برامج ونظم قادرة على فهم اللغة البشرية أو توليدها، بحيث يمكن للمستخدم إدخال البيانات بصيغتها الطبيعية ويقوم الحاسوب بفهمها واستخلاص المعلومات منها.
 - ✓ تكنولوجيا الإنسان الآلي (Robotics): تطبيقات الذكاء الاصطناعي في تصميم وتشغيل الروبوتات لأداء مهام متنوعة.
 - ✓ ألعاب الحاسوب الذكية: حيث يتم وضع تحديات أمام اللاعب، وبعض هذه الألعاب مصممة بحيث يصعب على الإنسان العادي حلها، لكن الحاسوب باستخدام الذكاء الاصطناعي يمكن أن يصبح منافساً قوياً، مع مستويات صعوبة متدرجة لتناسب قدرات اللاعب.
 - ✓ التدريس بواسطة الحاسب الآلي: من خلال برامج قابلة للتعليم تساعد على التعليم الذاتي والتفاعل مع المتعلم بشكل ذكي.¹

الفرع الثالث: البرمجيات ونماذج الذكاء الاصطناعي

¹ منال محمد البكري ، جلال ابراهيم العبد "مقدمة في نظم المعلومات الادارية المفاهيم الاساسية و التطبيقات" دار الجامعة الحديدة للنشر 381.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

يشكل فهم البنية البرمجية للذكاء الاصطناعي خطوة أساسية لتوظيفه بفعالية في النمذجة والتحليل، إذ تعتمد كفاءة النماذج التنبؤية بشكل كبير على خصائص الأدوات البرمجية المستخدمة. وتتميز برمجيات الذكاء الاصطناعي بالمرونة، والقدرة على التعلم، فضلاً عن إمكانية معالجة البيانات المتعددة المصادر، خاصة البيانات الزمنية. كما تختلف عائلات النماذج الذكية من حيث التركيب والخوارزميات المستخدمة، وتشمل على سبيل المثال الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، وآلات الدعم الناقل (SVM)، ونماذج التعلم العميق (Deep Learning). في هذا السياق، سيتم التركيز على ملامح برمجيات الذكاء الاصطناعي، مع تصنيف أكثر النماذج استخداماً في مجال الطاقة، تمهيداً لاختيار النموذج الأنسب لتطبيق الدراسة على الحالة الجزائرية.

أولاً: ملامح و خصائص برمجيات الذكاء الاصطناعي

يلعب الذكاء الاصطناعي دوراً محورياً في العديد من المجالات الحساسة، مثل المساعدة في تشخيص الأمراض ووصف الأدوية، وتقديم الاستشارات القانونية والمهنية، والتعليم التفاعلي، والمجالات الأمنية، فضلاً عن دعم عمليات اتخاذ القرار. تتميز هذه الأنظمة بالاستقلالية والدقة والموضوعية، ما يجعل قراراتها بعيدة عن الخطأ والانحياز والعنصرية أو الأحكام المسبقة، وكذلك التدخلات الخارجية أو الشخصية. كما يقلل الذكاء الاصطناعي من المخاطر والضغط النفسي على متخذ القرار، مما يسمح له بالتركيز على الأمور الأكثر أهمية.

وتستند برمجيات الذكاء الاصطناعي إلى مجموعة من الخصائص والميزات، من أهمها:

1. **التمثيل الرمزي (Symbolic Representation)** حيث تستخدم هذه البرمجيات رموزاً غير رقمية لمعالجة المعلومات، مع القدرة على إجراء العمليات الحسابية رغم اعتماد الحواسيب على النظام الثنائي (0 و 1).
2. **الاجتهاد (Heuristics)** تتميز بعدم وجود حل خوارزمي محدد للمشاكل، لذا يتم اختيار طرق الحل المناسبة مع إمكانية تعديلها إذا لم تكن فعالة، كما يفعل الطبيب عند تشخيص المرض.
3. **التعامل مع المعلومات غير الكاملة (Imperfect Information)** تستطيع البرامج اتخاذ قرارات وحلول حتى عند نقص البيانات أو عدم اليقين، بما يضمن تحقيق الأهداف المطلوبة.¹
4. **تمثيل المعرفة (Knowledge Representation)** تعكس العلاقة بين العالم الخارجي والعمليات الاستدلالية الرمزية داخل الحاسوب.

¹ محمد احمد حسان نظم المعلومات الادارية الدار الجامعية 2008 ص233

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

5. معالجة البيانات المتضاربة: تتميز بالقدرة على التعامل مع المعلومات التي قد تتناقض مع بعضها البعض دون فقدان الدقة.

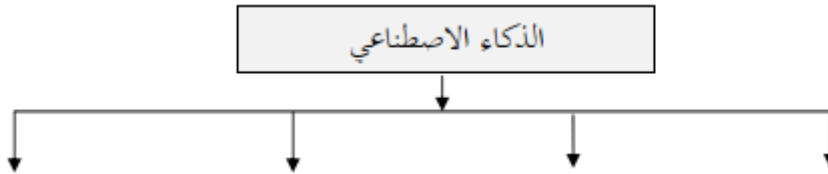
6. القدرة على التعلم: (The Ability to Learn) تعتمد على استراتيجيات تعلم الآلة لاكتساب المعرفة من التجارب والملاحظات السابقة، مما يعزز من كفاءة الأنظمة الذكية.¹

ثانيا: عائلة الذكاء الاصطناعي

تضم عائلة الذكاء الاصطناعي مجموعة من التطبيقات الرئيسية والمتنوعة، والتي تشمل معالجة اللغة الطبيعية (Natural Language Processing) لفهم وتوليد اللغة البشرية، والنظم الخبيرة (Expert Systems) التي تحاكي خبرة الإنسان في مجالات محددة، والشبكات العصبية (Neural Networks) القادرة على التعلم والتعرف على الأنماط، والمنطق الضبابي (Fuzzy Logic) لمعالجة المعلومات غير الدقيقة، واستخدام الحالات السابقة (Case-Based Reasoning) لاتخاذ القرارات، بالإضافة إلى الوكلاء الأذكياء (Intelligent Agents) القادرين على إدراك البيئة واتخاذ إجراءات تعزز من فرص نجاحهم في تحقيق الأهداف المحددة.²

و الشكل التالي يحتوي على أربعة مجالات رئيسية للذكاء الاصطناعي تمثل الشكل الراهن لهذا المجال:

الشكل رقم (43): عائلة الذكاء الاصطناعي



¹ جباري لطيفة مصطفى، نفس المرجع السابق، ص 186 ص 187.

² MocklerRoberty, information system for management Ohio bell and Howell ,1974 P11

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

تطبيقات العلوم Cognitive science	تطبيقات علم الحاسوب Computer science application	تطبيقات الآلات الذكية Robotics	تطبيقات الواجهة البيئة الطبيعية Natural interface application
النظم الخبيرة Expert systems نظم تستند على المعرفة Knowledge based systems المنطق الغامض Fuzzy logic الوكيل الذكي Intelligent agent	حاسوب الجيل الخامس Fifth generation computers المعالجة المتوازية Parallel processing المعالجة الرمزية Symbolic processing الشبكات العصبية Neural Networks	الإدراك المرئي Visual perception	اللغات الطبيعية Natural language تمييز الخطاب speech recognition الواجهات البيئية المتعددة multisensory interfaces

Source : Obrien James A introduction to information systems Chicago IRWIN 8th ed 1997,p170

تشمل مجالات تطبيق الذكاء الاصطناعي العديد من الجوانب، سواء على مستوى علوم الحاسوب المتعلقة بالعتاد والبرمجيات، أو في تطبيقاته المتقدمة في مجالات أخرى مثل البيولوجيا، علم النفس، الرياضيات، وغيرها. وتركز هذه التطبيقات على فهم بنية ووظائف الدماغ البشري وقدراته الأصلية في التفكير، التعلم، الاستنتاج، تخزين المعلومات ومعالجتها، واكتساب المعرفة. كما تمتد تطبيقاته إلى تصميم واجهات العمل البيئية وابتكار عوالم افتراضية قادرة على محاكاة الذكاء الإنساني وسلوكياته.¹

المطلب الثاني: الشبكات العصبية الاصطناعية

تمثل الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks - ANN) إحدى أبرز أدوات الذكاء الاصطناعي المستخدمة في تحليل البيانات المعقدة والتنبؤ بالمتغيرات غير الخطية، خاصة في المجالات الاقتصادية والطاوية. وقد تطورت هذه النماذج على غرار البنية العصبية للدماغ البشري، ما مكنها من التعلم الذاتي والتكيف مع التغيرات في البيانات. يهدف هذا المطلب إلى تسليط الضوء على المفاهيم النظرية الأساسية المتعلقة بالشبكات العصبية، من حيث النشأة، التعريف، الخصائص، الأهداف، والمميزات، إضافة إلى استعراض تطبيقاتها المختلفة. كما يتم التطرق إلى مكوناتها الداخلية وآليات التعلم والتدريب فيها، مع التركيز على استخداماتها في التنبؤ بالسلاسل الزمنية. ويُختتم المطلب بتحليل إشكالية المفاضلة بين هذه الشبكات والنماذج الإحصائية التقليدية كـ ARIMA والتمهيد الأسّي.

الفرع الأول: الإطار المفاهيمي للشبكات العصبية الاصطناعية

¹ جباري لطيفة مصطفى، نفس المرجع السابق، ص 189

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

يُعد الإطار المفاهيمي للشبكات العصبية الاصطناعية خطوة ضرورية لفهم الأسس النظرية التي تقوم عليها هذه النماذج، لا سيما في سياقات التنبؤ وتحليل البيانات. ويُستند في بناء هذه الشبكات إلى محاكاة البنية العصبية للدماغ البشري، مما يمنحها قدرة كبيرة على التعلم من البيانات وتوليد علاقات غير خطية معقدة. يتناول هذا الفرع الخلفية التاريخية لتطور هذه التقنية، ويعرض تعريفات دقيقة لها من زوايا متعددة. كما يوضح الخصائص البنيوية والوظيفية التي تميزها، ويستعرض أهداف استخدامها في السياقات الاقتصادية والتقنية. كذلك يتم إبراز أبرز المزايا التي تجعل منها بديلاً واعداً للنماذج الإحصائية التقليدية.

أولاً: التطور التاريخي لنشأة الشبكات العصبية الاصطناعية

يمكن القول أن بداية تاريخ التفكير في الشبكات العصبية الاصطناعية قد بدأ في القرن العشرين حيث قام سيقمند فرويد (Sigmund Freud) بالتعرض للفلسفي للفكرة العامة لها. ويعتبر أول تطبيق عمل للشبكات البدائية في عام 1914م حيث نفذ بارتند روسل (Bertrand Russel) جهازاً هيدوليكيًا معتمداً على الفكرة العامة لهذه الشبكات، ويمكن اعتبار فترة الأربعينيات هي البداية الحقيقية لتطور هذه الشبكات حيث ساهم الكثير من العلماء والمهندسين في تطويرها. أما القفزة الحقيقية في التطوير فقد تجسدت خلال العقد الأخير من القرن العشرين لما أعلن البيت الأبيض الأمريكي أن الفترة 1990-2000 هي عقد المخ والشبكات العصبية والحساب العصبي وذلك نظراً للزيادة الكبيرة في عدد المهتمين بها. وعلى هذا الأساس فإن التطور التاريخي للشبكات العصبية مر بثلاثة مراحل أساسية وهي:

- ✓ علم النورون؛

✓ نظرية التعلم - الشبكات العصبية الاصطناعية المتكيفة - النمذجة؛

✓ التنبؤ¹.

وفيما يلي التسلسل الزمني لأهم الإنجازات في تطور الشبكات العصبية الاصطناعية:

1. البداية الشبكات العصبية الاصطناعية:

✓ في عام 1943، قدّم كل من وارن مكيلوتش ووالتر بيتس (Warren McCulloch and Walter Pitts) نماذج لشبكات عصبية عصبية، حيث أعادوا تشكيل مفاتيح عتبية مستندة إلى الخلايا العصبية، وأظهر أن حتى الشبكات البسيطة من هذا النوع قادرة على حساب أي دالة منطقية أو حسابية تقريباً. علاوة على ذلك، تم تطوير أولى طلائع الحواسيب ("العقول الإلكترونية")، بدعم من شخصيات مثل كونراد تسوزه، الذي كان قد سئم من حساب المسارات الباليستية يدوياً.

¹ عدالة العجال، استخدامات العمليات العشوائية و نماذج الشبكات العصبية في التنبؤ الاقتصادي، و دورها في دراسة الآفاق المستقبلية للواقع التقني و التسويقي

للمؤسسة الصناعية بالجزائر، أطروحة لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم الاقتصادية، جامعة وهران، الجزائر، 2010-2011، ص42

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

✓ 1947: أشار والتر بيتس ووارن مكلوتش (Walter Pitts and Warren McCulloch) إلى مجال تطبيقي عملي (لم يُذكر في عملهما سنة 1943)، وهو التعرف على الأنماط المكانية باستخدام الشبكات العصبية.

✓ 1949: صاغ دونالد أو. هيب (Donald O. Hebb) القاعدة الهيئية الكلاسيكية، والتي تُعد في شكلها المعمم أساسًا لمعظم إجراءات التعلم العصبي. وتنص هذه القاعدة على أن الاتصال بين خليتين عصبيتين يتقوى عندما تكون الخليتان نشطتين في الوقت نفسه، وتكون هذه الزيادة في القوة متناسبة مع حاصل ضرب نشاط الخليتين. وقد تمكّن هيب من صياغة هذه القاعدة، غير أنه لم يكن قادرًا على التحقق منها بسبب غياب البحوث العصبية اللازمة آنذاك.

✓ 1950: دافع عالم النفس العصبي كارل لاشلي (Karl Lashley) عن أطروحة مفادها أن تخزين المعلومات في الدماغ يتم على نحو موزّع. وقد استندت أطروحته إلى تجارب على الفئران، حيث تبين أن أداء الفئران في إيجاد طريقها للخروج من المتاهة يتأثر بمدى التلف في الأنسجة العصبية وليس بمكان هذا التلف.

2. العصر الذهبي للشبكات العصبية الاصطناعية:

✓ 1951: في أطروحته للدكتوراه، طوّر مارفن مينسكي (Marvin Minsky) الحاسوب العصبي "سُنارك" (Snark)، الذي كان قادرًا بالفعل على تعديل أوزانه تلقائيًا. ومع ذلك، لم يُنقذ هذا النظام عمليًا أبدًا، إذ كان قادرًا على إجراء حسابات مكثفة، لكن لم يكن أحد يعلم حقًا ما الذي يقوم بحسابه.

✓ 1956: اجتمع علماء مشهورون وطلبة طموحون في مشروع دارتموث الصيفي للبحوث (Dartmouth Summer Research Project)، وناقشوا - بصيغة مبسطة - كيفية محاكاة الدماغ. وقد ظهرت في هذا اللقاء الفروقات بين مقاربات البحث من الأعلى إلى الأسفل (Top-down) ومن الأسفل إلى الأعلى (Bottom-up). ففي حين سعى أنصار الذكاء الاصطناعي المبكر إلى محاكاة القدرات العقلية باستخدام البرمجيات، كان أنصار الشبكات العصبية يهدفون إلى تحقيق سلوك النظام من خلال تقليد أبسط مكوناته - أي الخلايا العصبية.

✓ 1957-1958: في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا (MIT)، طوّر فرانك روزنبلات، وتشارلز وايتمان، وفريق عملهم (Frank Rosenblatt, Charles Wightman and their coworkers)، أول حاسوب عصبي ناجح Perceptron Mark I.، الذي كان قادرًا على التعرف على أرقام بسيطة باستخدام حساس صور مكون من 20×20 بكسل، وكان يعمل ميكانيكيًا باستخدام 512 مقاومة متغيرة تعمل بمحركات - تمثل كل واحدة منها وزنًا متغيرًا.

✓ 1959: وصف فرانك روزنبلات (Frank Rosenblatt) عدة نسخ من نموذج "بيرسيبترون"، وصاغ وأثبت مبرهنة تقارب البيرسيبترون. كما وصف طبقات من الخلايا العصبية تحاكي شبكية العين، ومفاتيح العتبة، وقاعدة تعلم تقوم بتعديل الأوزان الرابطة.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

✓ 1960: قدم كل من برنارد ويدرو ومارسيان إي. هوف (Bernard Widrow and Marcian E. Hoff) نظام ADALINE (الخلية العصبية الخطية التكيفية)، وهو نظام تعلم تكيفي سريع ودقيق، يُعد أول شبكة عصبية تُستخدم على نطاق تجاري واسع. وقد استُخدم هذا النظام في تقريبًا جميع الهواتف التناظرية لغرض تصفية الصدى في الزمن الحقيقي، وتم تدريبه باستخدام قاعدة "ويدرو-هوف" أو ما يُعرف بـ "قاعدة دلتا". في ذلك الوقت، كان هوف - الذي أصبح لاحقًا من مؤسسي شركة إنتل - طالب دكتوراه لدى ويدرو، الذي يُعرف بدوره كمخترع المعالجات الدقيقة الحديثة. وكانت إحدى ميزات قاعدة دلتا على خوارزمية تعلم بيرسيبترون الأصلية هي قدرتها على التكيف: فكلما كان الفرق بين المخرجات الفعلية والنتائج الصحيحة كبيرًا، زادت تغييرات الأوزان الرباطية. أما في حال قرب المخرجات من الهدف، فإن التعديلات تصبح صغيرة. ومن عيوب هذه القاعدة أنه عند سوء استخدامها، قد تؤدي إلى تغييرات ضئيلة جدًا تجعل عملية التعلم تتوقف تقريبًا. وبسبب هذا الركود، ومن الخشية من التهميش العلمي، تم تغيير اسم ADALINE إلى العنصر الخطي التكيفي - وهو تغيير تم التراجع عنه لاحقًا.

✓ 1961: قدّم كارل شتاينبوخ (Karl Steinbuch) تطبيقات تقنية للذاكرة الترابطية (Associative Memory)، والتي تُعتبر من أسلاف الشبكات العصبية الترابطية الحديثة. كما وصف مفاهيم لتقنيات عصبية وقام بتحليل إمكاناتها وحدودها.

✓ 1965: في كتابه "آلات التعلم" (Learning Machines)، قدّم نيلس نيلسون (Nils Nilsson) عرضًا لتطورات وأعمال تلك الفترة من بحوث الشبكات العصبية. وقد كان يُعتقد آنذاك أن المبادئ الأساسية للتعلم الذاتي - وبالتالي لأنظمة "ذكية" بوجه عام - قد تم اكتشافها بالفعل. ورغم أن هذا الافتراض يُعد اليوم مبالغة كبيرة، إلا أنه في ذلك الوقت أسهم في انتشار واسع للفكرة وتوفير تمويلات بحثية كافية.

✓ 1969: نشر كل من مارفن مينسكي وسيمور بابرت (Marvin Minsky and Seymour Papert) تحليلًا رياضيًا دقيقًا لنموذج بيرسيبترون، أظهر فيه أن هذا النموذج غير قادر على تمثيل العديد من المسائل الهامة (الكلمات المفتاحية: مشكلة XOR، القابلية للفصل الخطي). وقد أدى هذا التحليل إلى الحد من التقدير المبالغ فيه لهذا النموذج، وانخفضت شعبيته، وتراجعت التمويلات البحثية. كما أدى الاستنتاج بأن النماذج الأقوى قد تواجه نفس القيود، والتنبؤ بأن هذا المجال البحثي قد يكون طريقًا مسدودًا، إلى توقف شبه كامل للتمويلات على مدى الخمسة عشر عامًا التالية - رغم أن هذه التوقعات، من منظورنا الحالي، كانت خاطئة إلى حد كبير.

3. سنوات التراجع وبوادر النهوض:

كما ذكر سابقًا، كانت التمويلات المخصصة للبحوث في هذا المجال شحيحة للغاية. وعلى الرغم من

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

استمرار الأبحاث في أماكن متعددة، لم تُعقد مؤتمرات أو فعاليات علمية تُذكر، وبالتالي نُشرت فقط القليل من الأعمال. وقد أدى هذا العزل بين الباحثين إلى ظهور العديد من نماذج الشبكات العصبية التي تم تطويرها بشكل مستقل. بمعنى أنهم كانوا يجرون أبحاثًا، ولكن دون وجود أي حوار أو تواصل علمي بينهم. ورغم قلة التقدير الذي حظي به هذا المجال في تلك الفترة، فقد وُضعت خلال هذه السنوات الأسس النظرية للنهضة التي ما تزال مستمرة حتى اليوم:

✓ 1972: قدّم تيفو كوهونن (Teuvo Kohonen) نموذج "المرتبط الخطي" (Linear Associator)، وهو نموذج لذاكرة ترابطية. (Associative Memory) وفي نفس السنة، قدّم جيمس أ. أندرسون (James A. Anderson) نموذجًا مشابهًا، ولكن من منظور فيزيولوجي عصبي.

✓ 1973: استخدم كريستوف فون دير مالمسبرغ (Christoph von der Malsburg) نموذجًا عصبيًا غير خطي أكثر قربًا من البيولوجيا في تفسيره.

✓ 1974: طور بول ويربوس (Paul Werbos)، ضمن أطروحته في جامعة هارفارد، خوارزمية "الانتشار العكسي للخطأ" (Backpropagation of Error) كإجراء تعليمي. إلا أن هذه الخوارزمية لم تزل الأهمية المعروفة اليوم إلا بعد مرور عقد من الزمن.

✓ 1976 – 1980 وما بعدها: نشر ستيفن غروسبرغ (Stephen Grossberg) العديد من الأوراق البحثية التي قدّم فيها تحليلات رياضية لنماذج عصبية مختلفة. كما تناول مسألة كيفية تمكين الشبكة العصبية من التعلم دون فقدان الترابطات التي تعلمتها سابقًا. وبالتعاون مع غيل كاربنتر (Gail Carpenter)، أدى هذا إلى تطوير نماذج نظرية الطين التكيفي. (ART: Adaptive Resonance Theory).

✓ 1982: وصف تيفو كوهونن (Teuvo Kohonen) خرائط السمات ذاتية التنظيم، المعروفة باسم "خرائط كوهونن". (Self-Organizing Feature Maps - SOM) "كان يبحث في الآليات التي تنطوي على التنظيم الذاتي في الدماغ، إذ كان يعلم أن المعلومات الخاصة بتكوين الكائن الحي مخزنة في الجينوم، الذي لا يحتوي على سعة كافية لتشفير بنية معقدة كالدماع، وبالتالي فإن الدماغ يحتاج إلى أن ينظّم ذاته بنفسه بدرجة كبيرة.

كما ابتكر جون هوبفيلد (John Hopfield) ما يُعرف بـ "شبكات هوبفيلد" (Hopfield Networks)، المستوحاة من قوانين المغناطيسية في الفيزياء. ورغم أنها لم تُستخدم على نطاق واسع في التطبيقات التقنية، فإن مجال الشبكات العصبية بدأ يستعيد أهميته تدريجيًا.

✓ 1983: قدّم كل من كونيهيكو فوكوشيما (Kunihiko Fukushima)، ومياكي (Miyake)، وإيتو (Ito) النموذج العصبي المعروف بـ "النيوكونيترون" (Neocognitron)، والذي كان قادرًا على التعرف على الأحرف المكتوبة يدويًا، ويمثل تطويرًا لشبكة "الكوغنيترون" (Cognitron) التي تم تطويرها في عام 1975.

4. النهضة:

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

بفضل تأثير جون هوبفيلد (John Hopfield) ، الذي أقنع العديد من الباحثين شخصيًا بأهمية هذا المجال، وبفضل النشر الواسع لخوارزمية الانتشار العكسي للخطأ (Backpropagation of Error) من قبل كل من ديفيد روميلهارت (David Rumelhart) ، وجيفري هينتون (Geoffrey Hinton) ، ورونالد ويليامز (Ronald Williams)، بدأت ملامح الانتعاش تظهر تدريجيًا في مجال الشبكات العصبية.

✓ 1985: نشر جون هوبفيلد (John Hopfield) مقالًا وصف فيه طريقة لإيجاد حلول مقبولة لمشكلة البائع المتجول (Travelling Salesman Problem) باستخدام شبكات هوبفيلد (Hopfield Nets).

✓ 1986: تم تطوير خوارزمية الانتشار العكسي للخطأ كنوع معمم من قاعدة دلتا (Delta Rule) بشكل مستقل من قبل مجموعة المعالجة المتوازية الموزعة (Parallel Distributed Processing Group) ، وتم نشرها على نطاق واسع. وقد مكّن ذلك من حل المشاكل غير القابلة للفصل الخطي (Non-linearly-separable problems) باستخدام بيرسيبترونات متعددة الطبقات (Multilayer Perceptrons) ، وهو ما فند بشكل قاطع التقييمات السلبية التي سبق أن طرحها مارفن مينسكي (Marvin Minsky) في الوقت ذاته، بدأ نوع من الفتور ينتشر في مجال الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence)، نتيجة سلسلة من الإخفاقات والآمال غير المحققة¹.

✓ ريفنز (Refens 1993) أوضح كيف تستطيع الشبكات العصبية والتي يمكن تغذيتها يوميًا بالتغير في معدلات أسعار العملات أن تتنبأ على معدلات هذا التغير في المستقبل وذلك بناءً على التغيرات السابقة، كما يجري استخدامها في التعرف والتنبؤ بالدورات الاقتصادية واتجاه هذه الاقتصاديات على المستوى العالم ؛

✓ عام 1993 قام رينيه بيوالد (Rene Biewald) بتطوير أنظمة ملاحية باستخدام هذه الشبكات يمكنها تفادي العقبات أثناء الملاحية في الأماكن الضيقة، وذلك من خلال إنسان آلي تمثل الشبكة العصبية التي تم تغذيتها من قبل العمود الفقري لهذا النظام؛

✓ علماء آخرون خلال الفترة 1994 إلى العقد الأول من القرن 21: يعتبر التعرف والتنبؤ الاقتصادي أهم التطبيقات للشبكات العصبية الاصطناعية حيث يمكن تدريب وتعليم هذه الشبكات على التعرف على أشكال معينة للشبكة وذلك بتغذيتها بسلاسل زمنية للظاهرة المراد دراستها، مما يجعلها تتعرف على آفاقها المستقبلية أوتوماتيكيا حتى في وجود المركبة العشوائية².

ومنذ تلك اللحظة، شهد هذا المجال البحثي تطورًا شبه انفجاري، بحيث لم يعد من الممكن تتبعه أو حصره تفصيليًا. ومع ذلك، سيتم استعراض بعض نتائجه في الأجزاء التالية³.

¹ David Kriesel, A brief introduction to Neural network, 2005, electronic book published in: http://www.dkriesel.com/en/science/neural_networks, p1-226, p 8-12

² عدالة العجال، مرجع سبق ذكره، ص 44.

³ David Kriesel, A brief introduction to Neural network, 2005, electronic book published in: http://www.dkriesel.com/en/science/neural_networks, p1-226, p 8-12

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

ثانياً: التعريف العلمي للشبكات العصبية الاصطناعية

الشبكة العصبية الاصطناعية هي إحدى عناصر الذكاء الاصطناعي، وظهرت كمحاولة طموحة لمحاكاة أسلوب الدماغ البشري في اتخاذ القرارات الذكية. استلهمت فكرتها من دراسة علم التشريح والخلية العصبونية، حيث تمثل بمعادلات غير خطية ومعقدة. وتقدم هذه الشبكات نموذجاً معرفياً قادراً على التعلم من المعلومات التي تقوم بمعالجتها، فهي تستطيع تحليل كمية كبيرة من البيانات، ثم وضع خصائصها في مواقع أو قواعد منطقية لم تكن معروفة مسبقاً. تعمل الشبكات العصبية بشكل متوازي ومتفاعل ديناميكياً لتحليل البيانات في بيئة تعتمد على الطبيعة المعقدة للدماغ البشري، مما يجعل أداؤها يحاكي أداء خلايا الدماغ. وبفضل العلاقات التي تربط بين حجم البيانات الكبير، تحتوي هذه الشبكات على عدد كبير من العقد (Nodes) التي تمثل تفرعات تؤدي إلى اتخاذ قرارات مختلفة، وهي بذلك قادرة على معالجة بيانات ضخمة، مثل تقدير قيم العقارات لأكثر من 40,000 حالة في الوقت نفسه وتحديد الأسعار المناسبة لها.

ويصف Kasabov الشبكة العصبية الاصطناعية بأنها نموذج مستوحى من المزج بين علم البيولوجيا ونماذج علوم الحاسوب لتمثيل وتجهيز المعلومات في أي مجال علمي. تتكون الشبكة من عناصر معالجة (الخلايا العصبية) مرتبطة بأوزان تحدد العلاقات التي تشكل الهيكل العصبي، وتساعد هذه العلاقات في عمليات التدريب والتذكر باستخدام أساليب حسابية تدعى الحسابات العصبية¹ (Neurocomputation).

تُعرف الشبكات العصبية أيضاً كنظام حسابي يتكون من عدد من وحدات المعالجة (Processing Elements) المترابطة مع بعضها البعض، وتوصف بطبيعتها الديناميكية والمتوازية في معالجة البيانات الداخلة إليها. وتُسمّى بالشبكات العصبية الاصطناعية لأنها بُنيت لمحاكاة عمل الشبكات العصبية في الكائنات الحية وفق المعرفة المتوافرة عنها. ولها مسميات متعددة منها: الحاسب الحي (Biological Computer) والدماغ الإلكتروني (Electronic Brain)².

وتُسمّى الشبكات العصبية بهذا الاسم لأنها تمثل شبكة من وحدات الاتصالات الداخلية، مستوحاة من دراسة

¹ احمد عبد الحسين الإمارة، تصميم نظام معلوماتي مقترح لدعم كفاءات الكادر الواسطي باستخدام تقنية الشبكات العصبية /دراسة حالة في جامعة الكوفة،مجلة الغزي للعلوم الاقتصادية و الادارية،المجلد 09 العدد 27 (2013)،ص134 متوفر على الموقع:

DOI: <https://doi.org/10.36325/gbjec.v9i27.5817>

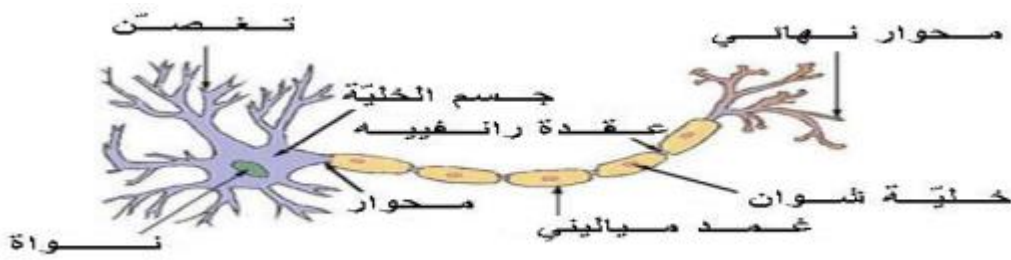
² هيام عبد المجيد حياوي، قصي احمد طه، دراسة سلسلة الاوراق المالية باستخدام PMRS و ANN و "ARIMA"، المجلة العراقية للعلوم الإحصائية،المجلد 13 العدد 23 ص99-2013،118،ص07

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

أنظمة الأعصاب الحيوية. وتعتمد فكرة عمل الشبكات العصبية الاصطناعية على محاكاة البيانات للوصول إلى نموذج لها، بهدف التحليل أو التصنيف أو التنبؤ أو أي معالجة أخرى، دون الحاجة إلى نموذج مقترح مسبقاً. وبفضل هذه الخصائص، حازت الشبكات العصبية الاصطناعية على اهتمام واسع من الباحثين والعلماء، لما تتمتع به من مرونة عالية مقارنة بالأساليب الرياضية التقليدية في التعلم على نموذج البيانات، وخزن المعلومات، وبشها داخل الشبكة العصبية الاصطناعية.¹

ويمكن تعريف الشبكة العصبية الاصطناعية (ANN) على أنها آلية لمعالجة البيانات بطريقة تحاكي شبكات الأعصاب الطبيعية في الإنسان أو الكائن الحي، أي النظام العصبي البيولوجي. كما يمكن اعتبارها نموذجاً رياضياً يصف كيفية عمل الخلايا العصبية البيولوجية للإنسان، وذلك من خلال تبادل الإشارات العصبية بين الخلايا العصبية المختلفة²

الشكل رقم (44): بنية خلية عصبية اصطناعية



المصدر: قارة سامي، أثر الطرق الحديثة لتسيير المخاطر البنكية على الأداء المالي للبنوك التجارية العمومية -دراسة ميدانية بالوكالات العمومية البنكية بولاية

المسيلة -، أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه العلوم الثالث في: علوم التسيير، جامعة محمد بوضياف بالمسيلة، الجزائر، 2022-2023، ص 91

كما يمكن تعريف الشبكة العصبية الاصطناعية على أنها مجموعة من العناصر الهيكلية المتشابهة، والتي تُعرف بالعصبونات أو الخلايا العصبية، المترابطة فيما بينها لتشكيل ما يشبه النظام العصبي للفقاريات. وقد كانت العصبونات البيولوجية مصدر إلهام لإيجاد العصبونات الاصطناعية، لذا أصبح من الضروري محاكاة خصائص العصبونات البيولوجية في نظيراتها الاصطناعية. ويوضح الشكل الموالي ذلك.

الشكل رقم (45): مقارنة بين العصبون البيولوجي والعصبون الاصطناعي

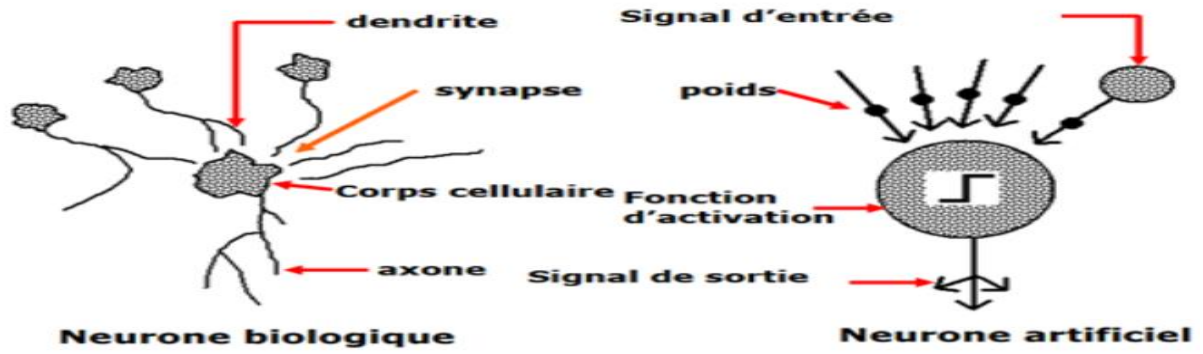
¹ يفان علاء ناظم وقصي عصام حميد، دراسة و تحليل مستوى التذبذب للتضخم في الأرقام القياسية بالاعتماد على السلاسل الزمنية (ARIMA) مقرونة

مع نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNM)، مجلة كلية الرافدين الجامعة للعلوم، مج. 2013، ع. 31، ص. 75-96، ص 80

² عبد العظيم عبد الكريم، فوزية غالب عمر، استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ من النموذج للاقتصاد الكلي متعدد الأبعاد في العراق للمدة

1996-2007، مجلة الاقتصادي الخليجي العدد (24) 2013 ص 1-38، ص 12

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة



Koffi Yao Blaise, Ahoussi Kouassi Ernest, Kouassi Amani Michel, Kouassi Ouattrra, Kpangui Loukou Christophe, Biemi Jean, Application des réseaux de neurones formels pour la prévision des débits mensuels du Bandama blanc à la station de Tortiya (Nord de la cote d'ivoire), Afrique Science, L'ENS d'Abijan, Cote d'ivoire, 10(3), 2014, p138
[https://www.afriquescience.net/article.php?nid=1601&&code=Vol.10,%20N%C2%B03%20\(2014\)&id=13](https://www.afriquescience.net/article.php?nid=1601&&code=Vol.10,%20N%C2%B03%20(2014)&id=13)

تُعرف الشبكات العصبية الاصطناعية أيضًا بأنها العلم الذي يدرس أنظمة الضبط والاتصالات في الكائنات الحية بهدف إنشاء نموذج يحاكي العقل البشري. فهي تراكيب حسابية مستوحاة من الخلايا البيولوجية، وتشابه مع الدماغ البشري في قدرتها على اكتساب المعرفة بالتدريب وتخزينها باستخدام روابط داخل العصبونات تُعرف بالأوزان التشابكية. تُعد الشبكات العصبية الاصطناعية نظامًا لمعالجة المعلومات يتميز بأداء فريد يحاكي الشبكات العصبية الحية، حيث تمثل العلاقات بين المتغيرات بطريقة مختلفة عن الأساليب التقليدية. وأظهرت الدراسات أن هذه الشبكات توفر مستويات تنبؤ أفضل مقارنة بالطرق الإحصائية التقليدية، كما تنفذ المهام التحليلية والتنبؤية بسرعة أكبر، مما يحسن من استغلال البعد الزمني للبيانات.¹

تتكون الشبكة العصبية الاصطناعية من مجموعة من الوحدات البسيطة المترابطة، والتي تُعرف بالخلايا العصبية الاصطناعية، وتشبه الخلايا العصبية البيولوجية في الدماغ. ترتبط هذه الخلايا ببعضها بروابط تنقل الإشارات، حيث يستقبل كل خلية عصبية عددًا من الإشارات الواردة من خلال الروابط، ثم تنتج إشارة واحدة كإخراج تنتقل إلى خلايا

*على اليسار: العصبون البيولوجي

Dendrite: التغصنات

Synapse: المشبك

Corps cellulaire: جسم الخلية

Axone: -محور العصبي

*على اليمين: العصبون الاصطناعي

Signal d'entrée (pluie): المطر: إشارة الإدخال مثال

Poids: الأوزان

Fonction d'activation: دالة التفعيل

Signal de sortie (débit): التدفق: إشارة الخرج مثال

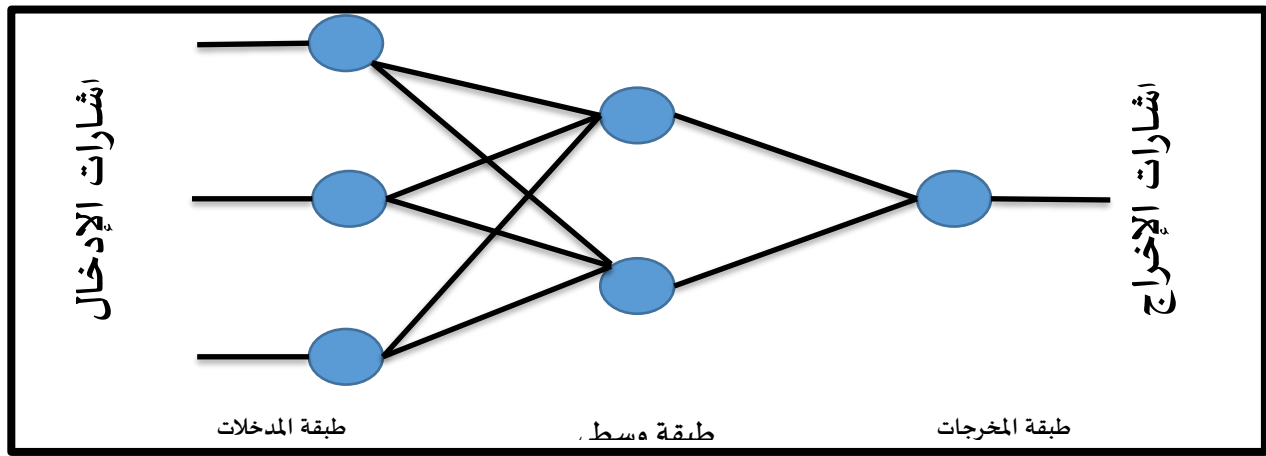
¹ حادة مدوري، محمد مكيديش. (2017). دراسة مقارنة بين نماذج الذاكرة الطويلة ARFIMA، والشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ بسعر صرف الدينار

الجزائري، مجلة الباحث، المجلد/17 العدد/ 159، 171-164، ص <https://asjp.cerist.dz/en/article/34422>

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

أخرى عبر عدة فروع تنتهي عند اتصالها بالخلايا العصبية التالية. يرتبط كل رابط بين الخلايا العصبية برقم يُسمى الوزن، والذي يعكس قوة وأهمية كل مدخل. تتعلم الشبكة العصبية من خلال تعديلات متكررة لهذه الأوزان. كما تتشكل الشبكات العصبية النموذجية من تسلسل طبقات متتالية كما هو موضح في الشكل (46)، حيث تُرتب الخلايا العصبية على طول هذه الطبقات. وتشكل الطبقات الأولى والأخيرة خلايا الإدخال والإخراج، بينما تُعدل الأوزان بما يتوافق مع سلوك المدخلات والمخرجات للبيئة الخارجية. تُعتبر كل خلية عصبية وحدة أساسية لمعالجة المعلومات، وتمتلك وسيلة حسابية تعتمد على المدخلات والأوزان المرتبطة بها¹.

الشكل رقم (46) الشبكات العصبية الاصطناعية ANN



SOURCE: Kenji Suzuki, ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS METHODOLOGICAL ADVANCES AND BIOMEDICAL APPLICATIONS, INTECH OPEN JOURNAL FOUND AT www.intechopen.com, 2011, P4

استنادًا إلى التعاريف السابقة، يمكن القول إن الشبكة العصبية الاصطناعية تمثل نموذجًا رياضيًا يحاكي النظام العصبي البيولوجي، حيث تعالج البيانات الداخلة عبر مجموعة من العناصر المتشابهة بهدف إنتاج المخرجات المطلوبة وفق الغرض من تصميم هذا النموذج.

ثالثًا: الخصائص التقنية للشبكات العصبية الاصطناعية

تمتلك الشبكات العصبية الاصطناعية مجموعة من الخصائص التقنية التي تجعلها أداة قوية لمعالجة البيانات وحل المشكلات المعقدة، ومن أهم هذه الخصائص:²

- ✓ القدرة على استخلاص المعنى من البيانات المعقدة أو غير الدقيقة.
- ✓ القدرة على التعلم من خلال التدريب أو التجربة الأولية لأداء مهام محددة.

¹ بن العارية أحمد. (2022). استخدام نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ بمبيعات الطاقة الكهربائية بولاية أدرار، مجلة التكامل الاقتصادي، المجلد: 10- العدد: 02، 92-108، ص 96 <https://asjp.cerist.dz/en/article/199369>

² فروم محمد الصالح، بوجعادة إلياس، سليمان عز الديف، مداخلة بعنوان: "دور أنظمة المعلومات المعتمدة على الذكاء الاصطناعي في عملية صنع القرارات الإدارية"، الملتقى الوطني السادس حول: الأساليب الكمية ودورها في اتخاذ القرارات الإدارية، كلية العلوم الاقتصادية والتجارية وعلوم التسيير، جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة، الجزائر، 27-28 جانفي 2009، ص 8-9

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

- ✓ القدرة على تنظيم نفسها ذاتيا وتمثيل البيانات التي تتلقاها أثناء عملية التعلم.
- ✓ إمكانية تنفيذ حسابات الشبكة بشكل متوازي، مما يسرع عملية المعالجة.
- ✓ تعتمد على أساس رياضي متين يدعم موثوقية نتائجها.
- ✓ تمثل أحد تطبيقات تكنولوجيا التشغيل الذكي للمعلومات.
- ✓ تقبل جميع أنواع البيانات سواء كانت كمية أو نوعية.
- ✓ تمتلك القدرة على تخزين المعرفة المكتسبة من الحالات التي تم تشغيلها.
- ✓ لها تطبيقات واسعة في مختلف المجالات العلمية والصناعية والتكنولوجية.¹

رابعاً: الأهداف الوظيفية للشبكات العصبية الاصطناعية²

تهدف الشبكات العصبية الاصطناعية إلى محاكاة عمليات الذكاء الاصطناعي التي تتم داخل العقل البشري، بحيث يصبح الحاسوب قادراً على حل المشكلات بأسلوب منطقي وبطريقة مشابهة لتفكير الإنسان، واتخاذ القرارات المناسبة في الوقت الملائم.

كما تمتد أهداف الشبكات العصبية الاصطناعية لتشمل مجموعة واسعة من التطبيقات العملية في مجالات مختلفة، ومن أبرز هذه الأهداف:

- ✓ تصنيف المشاهدات والبيانات.
- ✓ التنبؤ بالأحداث المستقبلية اعتماداً على المعلومات التاريخية.
- ✓ الكشف المبكر عن الأخطاء والمشكلات.
- ✓ تشفير وحماية المعلومات.
- ✓ التعرف على الأنماط والاتجاهات المخفية في البيانات.
- ✓ حل المشكلات المعقدة مثل تخصيص الموارد واختبار التوزيع الأمثل لها.
- ✓ معالجة البيانات المشوشة أو غير الواضحة وتقريبها للمستخدم النهائي.
- ✓ دعم التشخيص الطبي واتخاذ القرارات الصحية.

¹ بن عبد العزيز سفيان . مراس محمد . غربي صباح ، فعالية النماذج الذكية في بناء وتطوير الأنظمة التنبؤية في مجال التسيير، استخدام نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية ANN للنمذجة والتنبؤ، مجلة البشائر الاقتصادية، المجلد السادس، العدد 02 الصفحة 1-16، الجزائر، ديسمبر 2020، ص05.

<https://asjp.cerist.dz/en/article/133475>

² قارة سامي، نفس المرجع السابق، ص92

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

خامسًا: المزايا النظرية والعملية للشبكات العصبية الاصطناعية¹

ما يميز الشبكات العصبية الاصطناعية عن المداخل التقليدية هو قدرتها على معالجة البيانات دون الحاجة إلى فرض أي شكل وظيفي محدد لهذه البيانات، ودون اشتراط أي فرضية حول توزيع المتغيرات المستخدمة.

وبشكل عام، يمكن تلخيص أهم الصفات التي تميز الشبكات العصبية عن بعضها البعض فيما يلي:

✓ شكل الترابط بين العصبونات: ويعرف بالمعمارية (Architecture) التي تحدد كيفية اتصال الخلايا العصبية ببعضها البعض داخل الشبكة.

✓ طريقة تحديد الأوزان للترابطات: والتي تعرف بعملية التدريب أو التعليم (Training / Learning Algorithm)، حيث تُحدد الأوزان التي تتحكم في قوة الإشارات بين العصبونات.

✓ نوع دالة التنشيط المستخدمة: والتي تحدد طريقة معالجة الإشارات الداخلة وإنتاج المخرجات لكل خلية عصبية.

الفرع الثاني: مجالات وتطبيقات الشبكات العصبية الاصطناعية

تستخدم الشبكات العصبية الاصطناعية في العديد من المجالات، ونوجز أهمها فيما يلي:

✓ المجال الطبي: تُطبق الشبكات العصبية في التشخيص الطبي الفوري، حيث يتم الاستفادة من مبدأ العلامات المرضية وتحليل الأعراض بطريقة مشابهة للذاكرة البشرية.

✓ مجال الاتصالات السلكية واللاسلكية: تُستخدم الشبكات العصبية للتخلص من صدى الصوت في خطوط الهواتف، وكذلك في أنظمة الرادار لتحديد الأهداف بدقة.

✓ مجال الأعمال المصرفية:

- فتح الحسابات البنكية باستخدام تقنيات التعرف على بصمة العين أو التوقيع أو اللمس.

- البحث عن فرص الأسواق المالية وتحديد الأسواق غير الكفوءة.

- دعم التحليل المالي واتخاذ قرارات قبول أو رفض القروض.

- منع التلاعب ببطاقات الائتمان والبطاقات الأخرى بمختلف أنواعها.

✓ المجال الأمني: تُستخدم الشبكات العصبية في التنبؤ بمسارات الجرائم وكشف الجرائم المحتملة مثل جرائم القتل، وتزويد الجهات المختصة بالمعلومات اللازمة لاستنتاج النتائج بطريقة مشابهة للتفكير البشري.

¹ عتروس سهيلة ، استخدام منهجية بوكس جنكر و الشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية بمؤسسة سونلغاز -دراسة حالة:ولاية

بسكرة- رسالة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه علوم في علوم تسيير، جامعة محمد خيضر بسكرة، الجزائر 2017-2018، ص151-152

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

✓ **المجال الآلي:** تُطبق الشبكات العصبية في التحكم الآلي وتحويل النص المكتوب إلى منطوق، وحل مشاكل التحكم المعقدة.

✓ **المجال الاقتصادي والأعمال:**

- قياس مستوى رضا العملاء وتحسين خدمات الزبائن.
- مساعدة شركات التأمين في منع حالات التلاعب ومراقبة عمليات الشراء وطلبات العملاء.
- بناء نماذج بحوث العمليات والنماذج الإحصائية.
- التنبؤ بالقيم المستقبلية مثل المبيعات، الأسعار، وكميات الاستهلاك، حيث تُعتبر الشبكات العصبية وسيلة فعالة للوصول إلى تنبؤات دقيقة.¹

الفرع الثالث: البنية الداخلية والمكونات الأساسية للشبكات العصبية الاصطناعية

تتميز الشبكات العصبية الاصطناعية بأنها نموذج رياضي أو حسابي مستوحى من الشبكات العصبية الحيوية، إذ تحاكي الطريقة التي تعمل بها النظم العصبية في الكائنات الحية. وتتكون هذه الشبكات من مجموعة من الخلايا العصبية الاصطناعية المترابطة التي تقوم بعمليات معالجة المعلومات، مع القدرة على التكيف والتعلم من خلال البيانات الداخلة إليها والخبرات المكتسبة أثناء عملية التدريب.²

تتألف الخلية العصبية الاصطناعية من جزأين أساسيين:

الجزء الأول: (Net) يمثل مجموع المدخلات الداخلية مضروبة في أوزانها، أي مقدارًا جامعيًا لقيم المتغيرات

الداخلية، ويعبر عنه رياضياً بالمعادلة التالية:³

$$Net = \sum_{i=1}^n WtXt \quad \dots\dots\dots(1)$$

أما الجزء الثاني فيمثل دالة مستمرة لا خطية تسمى دالة التنشيط (التفعيل) تتولى نشر القيمة الداخلة

إليها وفق المقياس المحدد لها في القيمة الخارجة ويعبر عنها رياضياً بالمعادلة الآتية:

$$Y=f(Net) \quad \dots\dots\dots(2)$$

¹ عتروس سهيلة، نفس مرجع سابق، ص 153-155

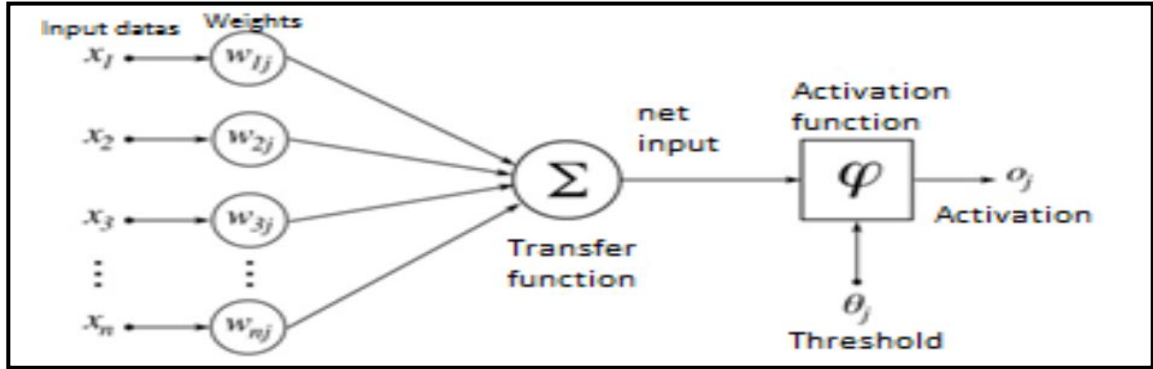
² هدى خلل إبراهيم الحسني، علي محمد ثجل المعموري، استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية في تطوير دور مراقب الحسابات في اكتشاف الأخطاء الجوهرية بحث تطبيقي في الشركة العامة للصناعات الكهربائية وشركة نصر العامة للصناعات الميكانيكية، مجلة دراسات محاسبية ومالية، جامعة بغداد العراق، المجلد العاشر، العدد 31، ص 78

³ زكريا يحيى الجمال، عمر صابر، مقارنة التنبؤ باستخدام شبكة الانحدار العصبية المعممة بأسلوب الشبكات العصبية وتحليل الانحدار، المجلة العراقية للعلوم

الاحصائية، المجلد 12/العدد 21، 2012، ص 236-237. <https://search.emarefa.net/ar>

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

الشكل رقم (47): يبين نموذج الرياضي للشبكة العصبية الاصطناعية



SOURCE: Bayram KÖSE, SERKAN ANSAY, Precipitation Forecast with Artificial Neural Networks Method, Journal of AI, 2023, p19

تواصل الخلايا العصبية الاصطناعية فيما بينها عبر وحدات توصيل تحمل الإشارات من عصبون إلى آخر، مصحوبة بأوزان عددية تحدد قوة وأهمية كل إشارة. يستقبل كل عصبون مجموعة كبيرة من المدخلات، ويقوم بمعالجتها لإنتاج إشارة واحدة فقط كمخرج، تنتقل هذه الإشارة بعد ذلك إلى عدة فروع توصلها إلى العصبونات التالية في الشبكة. بهذه الطريقة، يشكل هذا النظام الهيكل العام للشبكة العصبية الاصطناعية، حيث تتكون أي شبكة من مجموعة من الطبقات المتتابعة بالإضافة إلى الوصلات البينية التي تربط العصبونات ببعضها البعض، مما يسمح بتمرير المعلومات ومعالجتها بشكل متسلسل أو متوازي وفق بنية الشبكة.¹

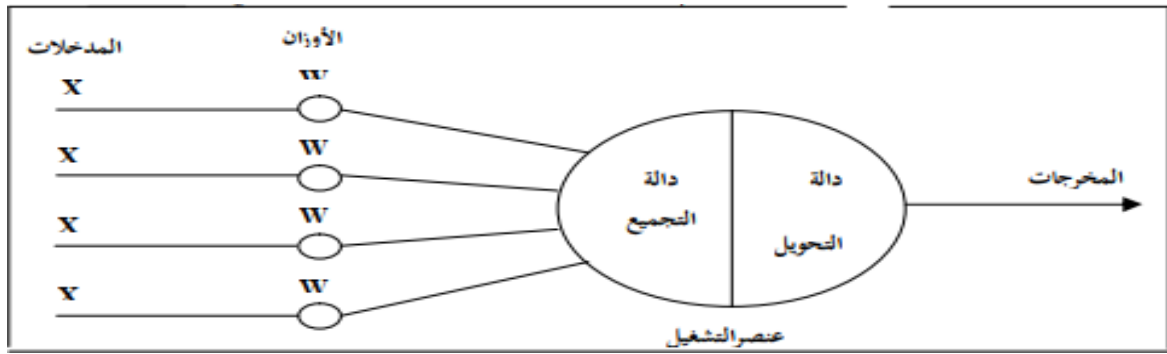
و تتكون خلاية الشبكات العصبية من الأربعة الأقسام وهي كالآتي:

- ✓ المدخلات .
- ✓ قناة الإخراج.
- ✓ عنصر المعالجة.
- ✓ الأوزان.

الشكل رقم (48): مكونات العصبون الاصطناعي

¹ قارة سامي، نفس المرجع السابق، ص93

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة



المصدر: بوعروري فاطمة، بو درامة مصطفى ، دور الشبكات العصبونية الاصطناعية في التنبؤ بالمبيعات لدعم صنع القرارات الإدارية بالمؤسسات - دراسة حالة مؤسسة الأسمنت بعين الكبيرة، مجلة دراسات وأبحاث اقتصادية في الطاقات المتجددة العدد الثامن جوان ،2018،ص107

✓ المدخلات (input data): $x_1, x_2, \dots, x_n$

وتقوم باستقبال البيانات من مصادرها المختلفة بحيث يمثل كل مدخل صفة مميزة واحدة، وتحتوى على مجموعة من العناصر المعالجة التي تعد متساوية لعدد المتغيرات المستقلة التي تعتبر مداخل للنموذج.

✓ الأوزان (weights): $W_1, W_2, \dots, W_n$

تعبّر الأوزان عن الأهمية النسبية لكل مدخل إلى عنصر المعالجة فهي التي تحدد قوة العلاقة بين إثنين من عناصر المعالجة ، كما تبين مدى فاعلية الإتصال بين المدخلات ومنطقة التشغيل.

✓ عنصر المعالجة:

وتنقسم إلى :

- دالة التجميع (Summation Function): مهمة هذه الدالة جمع او توحيد الإشارات الداخلة في إشارة واحدة.
- دالة التحويل (دالة التنشيط) (Activation function): مهمة هذه الدالة نشر القيمة الداخلة إليها على وفق نوع الدالة المستعملة على وفق مقياس حدود القيمة الخارجة.

هناك عدة انواع من دوال التنشيط منها :

1. الدالة الأسية أو السجماوية: تأخذ هذه الدالة قيم المدخلات المحصورة بين $-\infty$ و $+\infty$ وتجعل المخرجات محصورة بين 0 و 1 وهي أكثر الدوال إستخداما بسبب سهولة إشتقاقها .

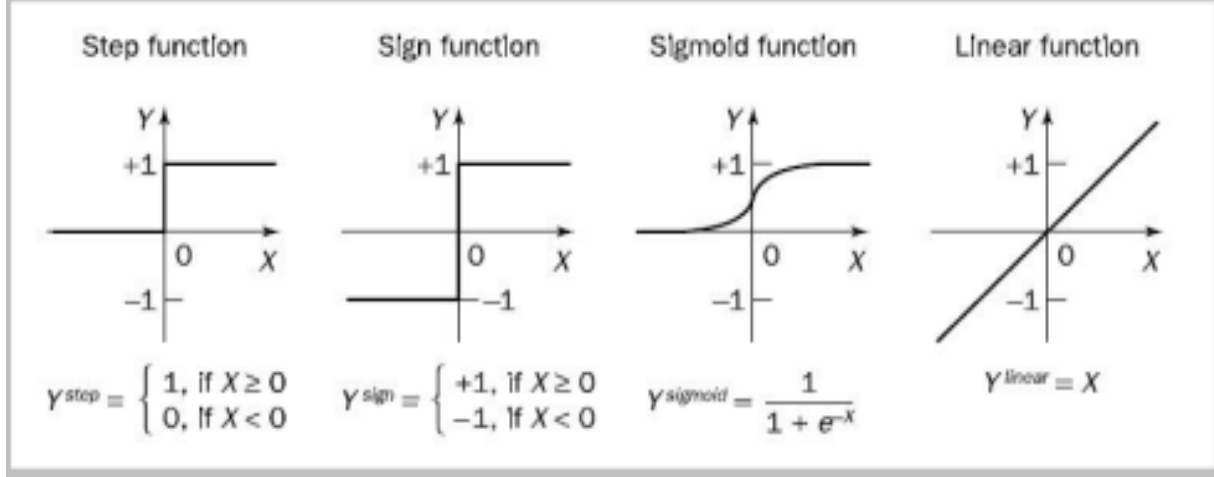
2. الدالة الخطية : (Linear Function) وهي الدالة التي تكون فيها صورة المخرجات مثل صورة المدخلات وتعطي تصنيفات متعددة وغير محدودة.

3. دالة الإشارة (Sign Function) حيث يكون فيها صورة المخرجات بين $[-1, 1]$ وتستخدم في التصنيف والتعرف على الأنماط.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

4. دالة الخطوة: (Step Function) وهي الدالة التي تكون مخرجاتها بين $[0, 1]$.¹

الشكل رقم (49): أنواع دوال تنشيط



المصدر: بن العارية أحمد (2022)، استخدام نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ بمبيعات الطاقة الكهربائية بولاية أدرار، مجلة التكامل الاقتصادي، المجلد: 10 - العدد: 02/ (جوان 2022)، ص 98.

✓ قناة الإخراج (Axone path's): تقوم هذه القناة بإرسال إشارة الإخراج إلى خلايا عصبية أخرى وتعد إشارة ادخال لتلك الخلايا وتسمى إشارة الإخراج بالمخرجات.²

الفرع الرابع: الشبكات العصبية الاصطناعية كأداة للتنبؤ.

في ظل التطورات المتسارعة في مجال الذكاء الاصطناعي وتعلم الآلة، برزت الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs) كأحد أكثر الأدوات فعالية في مجال التنبؤ، لاسيما في معالجة البيانات غير الخطية والمعقدة التي تتسم بها الظواهر الاقتصادية والمالية. لقد مكّنت هذه الشبكات الباحثين والممارسين من تجاوز القيود التي تفرضها النماذج الإحصائية التقليدية، من خلال قدرتها على التعلم من البيانات التاريخية، والتكيف مع أنماط سلوك معقدة دون الحاجة إلى فرض افتراضات صارمة حول طبيعة توزيع البيانات.

يهدف هذا الفرع إلى استكشاف الإمكانيات التنبؤية للشبكات العصبية الاصطناعية، من خلال تناول الجوانب النظرية والتطبيقية التي تُشكّل جوهر استخدامها. ويتضمن ذلك عرضاً للتصنيفات الأساسية لهذه الشبكات، وآليات التعلم والتدريب التي تقوم عليها، إلى جانب استعراض لأهم الأنماط الشبكية المعتمدة في التنبؤ بالسلاسل الزمنية. كما سيتم التطرق إلى المنهجية العامة لبناء نموذج تنبؤ باستخدام الشبكات العصبية، واختتاماً بمقارنة تحليلية بين أدائها

¹ بن نور فريد، نايت مرزوق محمد العربي. استخدام نماذج الذكاء الاصطناعي للتنبؤ باحتياجات الصرف الأجنبي في الجزائر- نموذج الشبكات العصبية الاصطناعية ANN، مجلة اقتصاديات شمال إفريقيا، المجلد 15/ العدد 01، 67-82، 2019، ص 74

² مروان عبدول حمد عشور. (2016). الشبكات العصبية الاصطناعية، المؤتمر العلمي الدولي الخامس لاتحاد الإحصائيين العرب- القاهرة. DOI: 10.13140/RG.2.2.28012.18563، ص 11

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

وأداء بعض النماذج الإحصائية الكلاسيكية، مثل نموذج بوكس-جنكينز، وأساليب التمهيد الآسي، وذلك بهدف تحديد مدى فعالية الشبكات العصبية كمقاربة بديلة وواعدة في ميدان التنبؤ الكمي.

أولاً: التصنيفات الأساسية للشبكات العصبية الاصطناعية

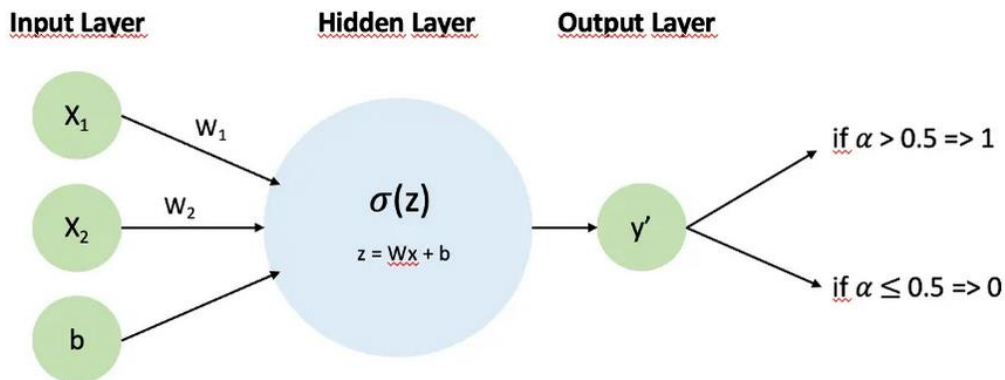
يمكن تصنيف الشبكات العصبية الاصطناعية وفقاً لعدة معايير رئيسية، نعرضها كما يلي:

1. حسب بنية أو هيكل الشبكة العصبية:

أ- الشبكات أحادية الطبقة: (Single-Layer Networks)

الشبكة العصبية ذات الطبقة الواحدة، والتي تُعرف غالباً باسم البيرسيبترون (Perceptron)، هي نوع من الشبكات العصبية المتقدمة إلى الأمام (Feed-Forward Neural Network) وتتكوّن فقط من طبقة إدخال وطبقة إخراج. تُستخدم هذه الشبكة لمعالجة مدخلات متعددة الأبعاد، حيث تقوم طبقة الإدخال بنقل الإشارات مباشرة إلى طبقة الإخراج دون المرور بطبقات مخفية. يتم في كل خلية عصبية حساب مجموع حاصل ضرب الأوزان المرتبطة بكل مدخل من المدخلات. هذه الشبكة غير دورية بطبيعتها (أي لا تحتوي على دورات أو تغذية راجعة)، وتُجري طبقة الإخراج العمليات الحسابية اللازمة لتوليد النتائج. تجدر الإشارة إلى أن البيرسيبترون قادر فقط على تعلّم الدوال الخطية، ولذلك فهو محدود في معالجة المسائل غير الخطية. ومع ذلك، يتميز هذا النوع من الشبكات بسهولة التدريب، كما أن ناتجه يكون غالباً ثنائياً، أي يمثّل بالقيمتين 0 أو 1 كما يوضحه الشكل أسفله¹.

الشكل رقم (50) : شبكات عصبية ذات الطبقة الوحيدة



source : Buse Şenol,medium, One Layer Neural Network From Scratch — Classification

Available on : <https://busesenol.medium.com/one-layer-neural-network-from-scratch-classification-b6c71481f992>

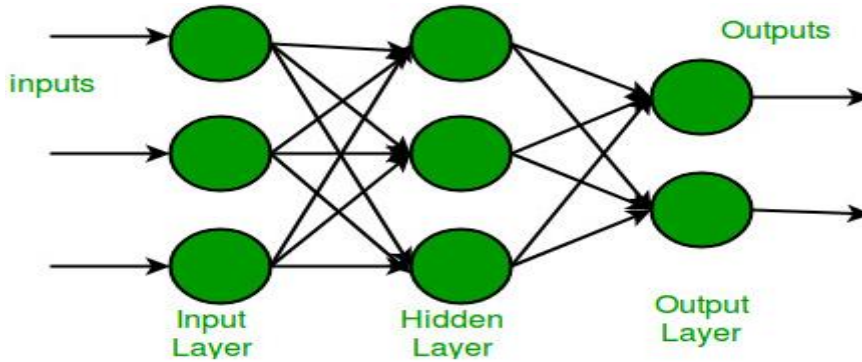
¹ Geeksforgeeks, Single Layered Neural Networks in R Programming, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/r-language/single-layered-neural-networks-in-r-programming/>

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

ب- الشبكات متعددة الطبقات (Multi-Layer Neural Network أو Multi-Layer Perceptron):

بشكل دقيق، تُعرف الشبكة العصبية متعددة الطبقات والمتراصة بالكامل باسم شبكة بيرسيبترون متعددة الطبقات (MLP). وتتكون من عدة طبقات من الخلايا العصبية الاصطناعية أو العقد. وعلى عكس الشبكات العصبية ذات الطبقة الواحدة، أصبحت الشبكات متعددة الطبقات هي الأكثر استخدامًا في الآونة الأخيرة. ويوضح الرسم التخطيطي التالي تصورًا لشبكة عصبية متعددة الطبقات¹.

الشكل رقم (51): شبكة عصبية متعددة الطبقات



Source : Geeksforgeeks, Multi-Layer Perceptron Learning in Tensorflow, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/deep-learning/multi-layer-perceptron-learning-in-tensorflow/>

- ✓ طبقة الإدخال : كل عُقدة (أو خلية عصبية) في هذه الطبقة تمثل ميزة من ميزات الإدخال. على سبيل المثال، إذا كان لديك ثلاث ميزات إدخال، فستكون طبقة الإدخال من ثلاث خلايا عصبية.
- ✓ الطبقات المخفية : يمكن أن تحتوي MLP على أي عدد من الطبقات المخفية، وكل طبقة قد تحتوي على عدد مختلف من الخلايا العصبية. تعمل هذه الطبقات على معالجة المعلومات التي تستقبلها من طبقة الإدخال.
- ✓ طبقة الإخراج : تولد طبقة الإخراج التنبؤ النهائي أو النتيجة. إذا كان هناك أكثر من مخرج، فستحتوي طبقة الإخراج على عدد من الخلايا العصبية يساوي عدد المخرجات².

2. حسب اتجاه تدفق البيانات وطبيعة الترابط بين العقد:

أ- الشبكات ذات التغذية الأمامية³ (Feedforward Networks):

¹ Geeksforgeeks, Multi Layered Neural Networks in R Programming, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/r-language/multi-layered-neural-networks-in-r-programming/>

² Geeksforgeeks, Multi-Layer Perceptron Learning in Tensorflow, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/deep-learning/multi-layer-perceptron-learning-in-tensorflow/>

³ Geeksforgeeks, Feedforward Neural Network, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/nlp/feedforward-neural-network/>

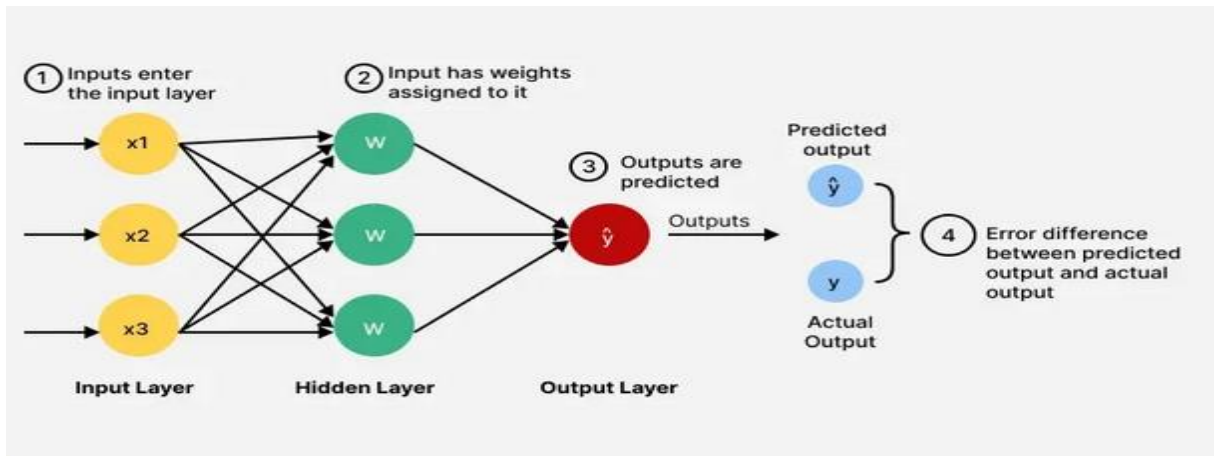
الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

الشبكة العصبية المتقدمة إلى الأمام (FNN) هي نوع من الشبكات العصبية الاصطناعية يتم فيه تدفق المعلومات في اتجاه واحد فقط، أي من طبقة الإدخال مروراً بالطبقات المخفية وصولاً إلى طبقة الإخراج، دون وجود دورات أو تغذية راجعة (Loops or Feedback). يُستخدم هذا النوع من الشبكات بشكل أساسي في مهام التعرف على الأنماط، مثل تصنيف الصور وتصنيف الأصوات.

على سبيل المثال، في نظام تقييم الجدارة الائتمانية، تستخدم البنوك شبكة عصبية متقدمة إلى الأمام (FNN) لتحليل الملفات المالية للمستخدمين، مثل الدخل، وسجل الائتمان، وعادات الإنفاق، من أجل تحديد مدى أهليتهم للحصول على الائتمان.

تمر كل معلومة من هذه المعلومات عبر طبقات الشبكة، حيث يتم تنفيذ حسابات متعددة في كل طبقة، وصولاً إلى إنتاج النتيجة النهائية التي تُمثل درجة الجدارة الائتمانية.

الشكل رقم(52) : الشبكات ذات التغذية الأمامية



Source : Geeksforgeeks, Feedforward Neural Network, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/nlp/feedforward-neural-network/>

تتميز الشبكات العصبية المتقدمة إلى الأمام ببنية طبقية منظمة، حيث تتدفق البيانات بشكل تسلسلي عبر كل

طبقة من طبقات الشبكة.

✓ **طبقة الإدخال (Input Layer):** تتكوّن من خلايا عصبية (Neurons) تستقبل بيانات الإدخال. ويمثل كل خلية عصبية في هذه الطبقة ميزة (Feature) من ميزات البيانات المدخلة.

✓ **الطبقات المخفية (Hidden Layers):** توضع طبقة أو أكثر بين طبقتي الإدخال والإخراج. وتُعد هذه الطبقات مسؤولة عن تعلّم الأنماط المعقدة في البيانات. كل خلية عصبية في الطبقة المخفية تقوم بحساب مجموع وزني للمدخلات، ثم تطبق دالة تفعيل غير خطية (Non-linear Activation Function) على الناتج.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

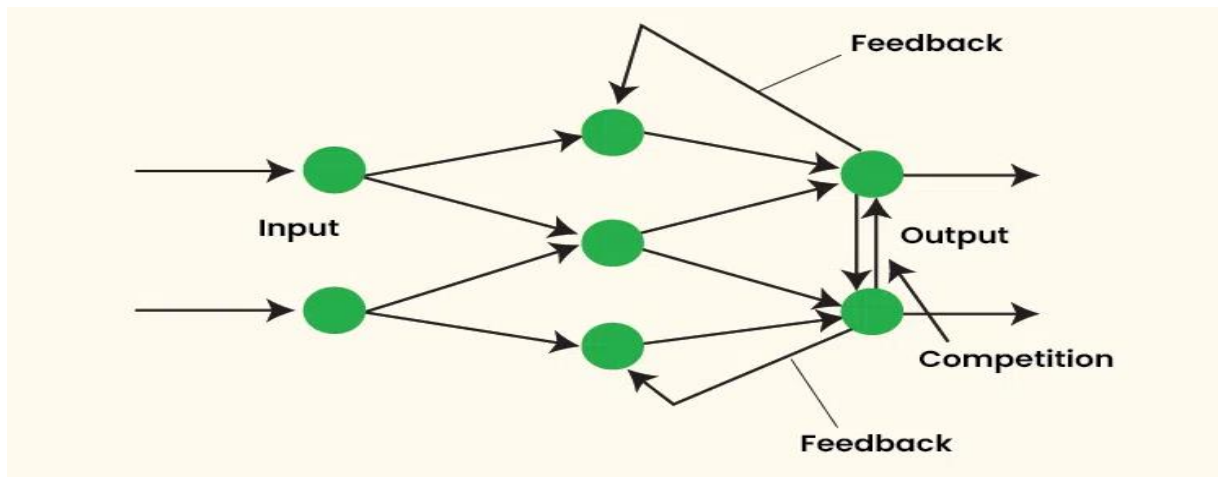
✓ طبقة الإخراج (Output Layer): تُنتج المخرجات النهائية للشبكة. ويعتمد عدد الخلايا العصبية في هذه الطبقة على نوع المسألة:

- في حالة التصنيف (Classification)، يتوافق عدد الخلايا مع عدد الفئات.
 - في حالة الانحدار (Regression)، يتوافق مع عدد القيم المطلوب التنبؤ بها.
- كل اتصال بين الخلايا العصبية في هذه الطبقات يرتبط بوزن معين يتم تعديله أثناء عملية التدريب، بهدف تقليل الخطأ بين القيم المتوقعة والقيم الحقيقية.

ب- الشبكات ذات التغذية الراجعة: (Feedback Networks)¹

تُعد الشبكات العصبية، وهي من الركائز الأساسية لتقنيات التعلم العميق، نماذج مصممة لمحاكاة سلوك الدماغ البشري في معالجة البيانات واتخاذ القرارات. ومن بين الأنواع المختلفة للشبكات العصبية، تحتل الشبكات العصبية الراجعة (Feedback Neural Networks) والمعروفة أيضًا باسم الشبكات العصبية التكرارية (Recurrent Neural Networks - RNNs) دورًا مهمًا في التعامل مع البيانات المتسلسلة والديناميكيات الزمنية. وتحتوي الشبكات العصبية الراجعة على وصلات تُغذي نفسها (Loops)، مما يسمح بارجاع المعلومات إلى داخل الشبكة. تُتيح هذه البنية للنموذج التعامل مع البيانات المتسلسلة والاعتماديات الزمنية، ما يجعلها مناسبة لمهام مثل التنبؤ بالسلاسل الزمنية ونمذجة اللغة.

الشكل رقم (53): الشبكات العصبية الراجعة



Source : Geeksforgeeks, Feedback Neural Networks: Structure, Training, and Applications, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/deep-learning/feedback-neural-networks-structure-training-and-applications/>

¹ Source : Geeksforgeeks, Feedback Neural Networks: Structure, Training, and Applications, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/deep-learning/feedback-neural-networks-structure-training-and-applications/>

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

تتميز الشبكات العصبية الراجعة (RNNs) بقدرتها على الحفاظ على حالة داخلية (State) تحتفظ بمعلومات حول المدخلات السابقة. ويتم ذلك من خلال روابط تكرارية (Recurrent Connections) تعيد إرسال المخرجات إلى مدخلات نفس الطبقة أو طبقات سابقة.

المكونات الأساسية لشبكة RNN تشمل:

✓ **طبقة الإدخال (Input Layer):** تستقبل بيانات الإدخال.

✓ **الطبقات المخفية (Hidden Layers):** تحتوي على خلايا عصبية ذات وصلات تكرارية، تسمح بالحفاظ على الحالة مع مرور الزمن.

✓ **طبقة الإخراج (Output Layer):** تُنتج المخرجات النهائية بناءً على المعلومات المعالجة عبر الزمن.

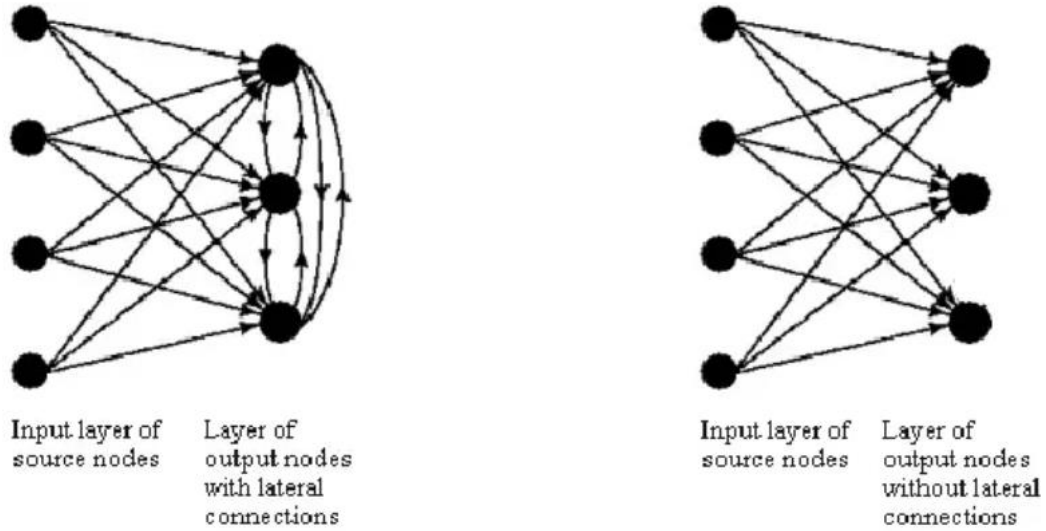
ت- الشبكات التنافسية¹ (Competitive Networks):

تكون شبكة التعلم التنافسي (Competitive Learning Neural Network) من طبقة إدخال تحتوي على وحدات خطية (Linear Units). يتم إرسال مخرجات كل واحدة من هذه الوحدات إلى جميع الوحدات في الطبقة الثانية (طبقة الإخراج) عبر أوزان أمامية قابلة للتعديل (Adaptive Forward Weights). تكون دوال الإخراج لوحدة الطبقة الثانية إما خطية أو غير خطية، حسب المهمة التي صُممت الشبكة لأجلها. يتم تغذية مخرجات كل وحدة في الطبقة الثانية مرة أخرى إلى نفسها بطريقة تنشيط ذاتي (Self-Excitatory)، وكذلك إلى بقية الوحدات في نفس الطبقة بشكل تنشيطي أو تثبيطي حسب طبيعة المهمة. أما الأوزان على الوصلات في طبقة التغذية الراجعة فهي ثابتة (غير قابلة للتعديل). هذا الدمج بين التوصيلات الأمامية والتغذية الراجعة يؤدي إلى تنافس بين تنشيطات الوحدات في طبقة الإخراج، ومن هنا جاءت تسمية الشبكات بشبكات التعلم التنافسي.

الشكل رقم (54): الشبكات التنافسية

¹ A.ASLESHA LAKSHMI ASSISTANT PROFESSOR,CSE VNRVJIET ,NEURAL NETWORKS ,CHAPTER-6 Competitive Learning Neural Networks,p1-10,p1-2,available on : <https://www.scribd.com/document/63715985/Competitive-Learning-Neural-Networks>

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة



Source :A.ASLESHA LAKSHMI ASSISTANT PROFESSOR,CSE VNRVJIET ,NEURAL NETWORKS ,CHAPTER-6 Competitive Learning Neural Networks,p1-10,p1,available on :

<https://www.scribd.com/document/63715985/Competitive-Learning-Neural-Networks>

يمكن استخدام خيارات مختلفة لدوال الإخراج والتراطات في طبقة التغذية الراجعة داخل الشبكة لأداء مهام مختلفة في تمييز الأنماط.

✓ فإذا كانت دوال الإخراج خطية، فإن الشبكة تؤدي وظيفة تخزين نمط الإدخال مؤقتًا.

✓ أما إذا كانت دوال الإخراج في وحدات طبقة التغذية الراجعة غير خطية، فيمكن عندها استخدام الشبكة في جميع الأنماط. (Clustering) الهدف من جميع الأنماط هو تصنيف أنماط الإدخال المعطاة بطريقة غير خاضعة للإشراف (Unsupervised)، ويتم تحديد المجموعة التي ينتمي إليها النمط من خلال وحدة الإخراج التي يكون ناتجها غير صفري عند الوصول إلى حالة التوازن.

تُسمى الشبكة في هذه الحالة شبكة جميع الأنماط (Pattern Clustering Network)، وتُسمى طبقة التغذية الراجعة الطبقة التنافسية (Competitive Layer)، أما الوحدة التي تعطي الناتج غير الصفري في التوازن فتُسمى الوحدة الفائزة. (Winner).

وإذا كانت دوال الإخراج في طبقة التغذية الراجعة غير خطية، وتم توصيل الوحدات بطريقة تجعل الاتصالات مع الوحدات المجاورة تنشيطية (Excitatory)، والاتصالات مع الوحدات البعيدة تثبيطية (Inhibitory)، فإن الشبكة يمكنها أداء مهمة رسم خريطة السمات. (Feature Mapping).

وتُسمى الشبكة الناتجة في هذه الحالة شبكة التنظيم الذاتي. (Self-Organization Network).

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

يمكن استخدام شبكة التنظيم الذاتي للحصول على تمثيل للسّمات الموجودة في أنماط الإدخال على مساحة سمات ذات بعد واحد أو بعدين.

3. حسب طبيعة المشكلة المستهدفة:

أ- شبكات مخصصة للتنبؤ¹: (Predictive Neural Networks)

تحاكي الشبكات العصبية التنبؤية المتقدمة وظائف الدماغ البشري من خلال التعرف على الأنماط في مجموعات البيانات التاريخية أو الحديثة وغير المكتملة — مما يتيح لك التنبؤ الذكي بالمستقبل واتخاذ قرارات تساعدك على تحقيق أهدافك.

ب- شبكات مخصصة للتصنيف²: (Classification Neural Networks)

نموذج الشبكة العصبية للتصنيف هو إطار حسابي مصمم لتصنيف البيانات ضمن فئات محددة مسبقاً. يتكوّن هذا النموذج من طبقات مترابطة من "العقد" أو "الخلايا العصبية"، حيث تقوم كل خلية بتنفيذ عملية رياضية على مدخلاتها ثم تمرر النتيجة إلى الطبقة التالية.

يتضمن النموذج عادةً:

✓ طبقة إدخال تستقبل البيانات الخام،

✓ وطبقة أو أكثر مخفية تتعلم الأنماط المعقدة من خلال الروابط الموزونة ووظائف التفعيل (Activation Functions)

✓ وطبقة إخراج تنتج التنبؤ النهائي بالفئة.

تُعَدّ قدرة الشبكات العصبية على اكتشاف الأنماط غير الخطية باستخدام دوال تفعيل غير خطية عاملاً أساسياً في فعاليتها. خلال التدريب، يقوم النموذج بتعديل الأوزان باستخدام عملية تُعرف باسم الانتشار العكسي (Backpropagation)، وهي تهدف إلى تقليل الفارق بين التوقعات والنتائج الفعلية.

تُستخدم شبكات التصنيف العصبية على نطاق واسع نظرًا لقدرتها على معالجة البيانات المعقدة وعالية الأبعاد، مما يجعلها فعّالة في مهام مثل:

- تمييز الصور،

- تصنيف النصوص،

¹ Lumivero, Predictive Neural Networks, available on : <https://lumivero.com/software-features/predictive-neural-networks/>

² Zahra zolghadr, Kaggle, Neural Network Model for Classification, available : <https://www.kaggle.com/code/zahrazolghadr/neural-network-model-for-classification>

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

- وتشخيص الأمراض الطبية.

ت- شبكات مخصصة للتحسين¹: (Optimization Neural Networks):

في التعلم الآلي، تُعد خوارزميات التحسين (Optimizers) من العناصر الحيوية التي تُستخدم لتحسين أداء النماذج عن طريق تعديل معايير النموذج، مثل الأوزان والانحيازات، بهدف الوصول إلى أدق التنبؤات الممكنة. تقوم خوارزميات التحسين بتحديث هذه المعايير تدريجيًا أثناء التدريب، وذلك بالاعتماد على اتجاه الانحدار لتقليل الأخطاء وتحسين نتائج النموذج. من بين أشهر هذه الخوارزميات:

✓ SGD (Stochastic Gradient Descent): طريقة بسيطة وفعالة تعتمد على تحديث الأوزان باستخدام عينة واحدة أو مجموعة صغيرة من البيانات في كل خطوة.

✓ ADAM (Adaptive Moment Estimation): خوارزمية متقدمة تجمع بين مزايا كل من SGD وRMSProp، وتستخدم متوسطات متحركة لتسريع عملية التعلم.

✓ RMSProp: تقوم بتعديل معدل التعلم تلقائيًا اعتمادًا على حجم التدرج، مما يجعلها مناسبة للتعامل مع البيانات غير المتجانسة.

تُستخدم هذه الخوارزميات بشكل واسع في تدريب الشبكات العصبية لتحسين سرعة ودقة النموذج، خاصة في المهام المعقدة مثل تصنيف الصور أو الترجمة الآلية.

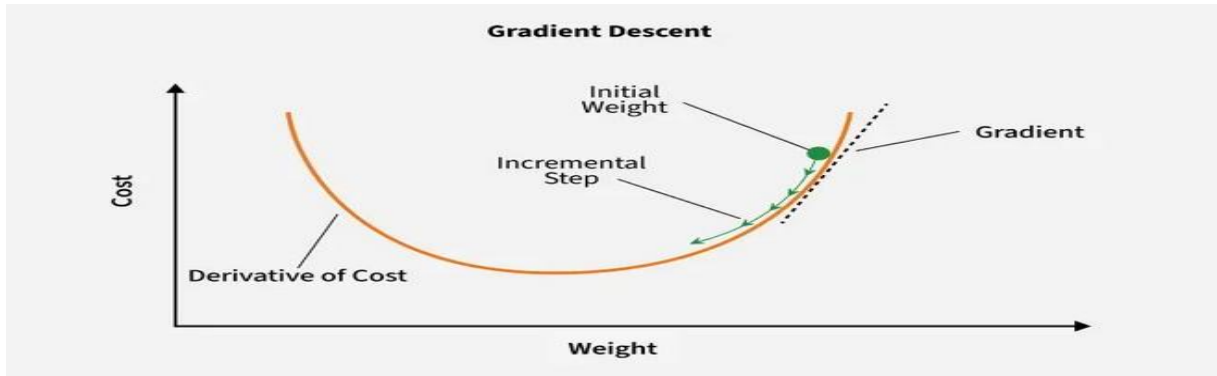
الانحدار التدرجي (Gradient Descent) هو طريقة تحسين شائعة تُستخدم في تدريب نماذج التعلم

الآلي. تعتمد هذه الطريقة على تعديل معاملات النموذج تدريجيًا في كل خطوة تدريب، وذلك في الاتجاه الذي يقلل من قيمة دالة الخطأ (أو الخسارة)، حتى يتم الوصول إلى القيم المثلى التي تعطي أفضل أداء ممكن للنموذج.

الشكل رقم(55): الانحدار التدرجي (Gradient Descent)

¹ Source : Geeksforgeeks, Optimization Rule in Deep Neural Networks, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/deep-learning/optimization-rule-in-deep-neural-networks/>

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة



Source : Geeksforgeeks, Optimization Rule in Deep Neural Networks, Available on :

<https://www.geeksforgeeks.org/deep-learning/optimization-rule-in-deep-neural-networks/>

4. حسب طريقة حساب المخرجات¹:

أ- الشبكات ذات النماذج الثابتة (Static Neural Networks)

من أمثلة هذا النوع من الشبكات العصبية نجد الشبكات العصبية المتعددة الطبقات أمامية التغذية ولكن بدون تغذية عكسية حيث المخرجات تحسب مباشرة اعتمادا على ارتباطاتها مع مدخلات التغذية الأمامية وتكون استجابة هذه الشبكة في أي مرحلة زمنية تعتمد فقط على قيمة تسلسل المدخلات في المرحلة الزمنية نفسها أي تتدفق باتجاه واحد من المدخلات إلى المخرجات؛

ب- الشبكات ذات النماذج الديناميكية (Dynamic Neural Networks)

حيث نجد أن مخرجات هذا النوع من الشبكات العصبية الاصطناعية تعتمد على القيم الحالية والسابقة للمدخلات والمخرجات أو على هيكل الشبكة حيث تكون استجابة هذه الشبكة في أي زمن معطى تعتمد ليس على القيمة الحالية فقط وإنما على القيم السابقة لسلسلة المدخلات، ويمكن أن تصنف الشبكات العصبية الديناميكية إلى العديد من الشبكات أهمها : الشبكات العصبية ذات تأخير زمني، الشبكات العصبية مع النوافذ المتحركة والشبكات العصبية الإرجاعية.

ثانياً: آليات معالجة المعلومات في الشبكة العصبية: التعلم والتدريب²

تعتمد آلية التعلم في الشبكة العصبية على إيجاد الأوزان المثالية للوصلات بين العصبونات في طبقات الشبكة، إذ

¹ نشات جاسم محمد، هادي طلال جعفر، بناء نظام للتنبؤ بطلب الحمل الكهربائي في بغداد ،مجلة كلية مدينة العلم الجامعة، كلية مدينة العلم الجامعة، العراق ، المجلد 9 العدد 1 ، 2017، ص 79-80

² بختاوي فاطيمة الزهراء، تحليل فوريه و تقنية الشبكات العصبية الاصطناعية و نماذج ARIMA للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية-دراسة حالة مؤسسة سونلغاز-مقاطعة سعيادة-، أطروحة تدخل ضمن متطلبات نيل شهادة الدكتوراه علوم في العلوم الاقتصادية، جامعة أبي بكر بالقائد -تلمسان، 2018- 2019، ص30-33

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

يعتبر تحديد عدد الطبقات وعدد العصبونات في كل طبقة خطوة مهمة، لكن الأهم هو ضبط الأوزان بطريقة تحقق الهدف المطلوب من الشبكة.

بشكل عام، يمكن تصنيف طرق التعلم في الشبكات العصبية إلى صنفين رئيسيين:

1. التعلم الخاضع للإشراف (Supervised Learning)

2. التعلم غير الخاضع للإشراف (Unsupervised Learning)

ويطلق على هذين الصنفين أيضاً مصطلح التعليم المراقب وغير المراقب.

أ- التعلم غير المراقب (Unsupervised Learning of ANN)

في هذه الطريقة، تقوم الشبكة بتعلم الأنماط دون الحاجة إلى مخرجات محددة مسبقاً، أي أنها لا تتطلب تحديد القيم الصحيحة للمخرجات أثناء التدريب. ويُستخدم هذا النوع في الشبكات الأحادية والمتعددة الطبقات. تتم عملية التعلم هنا عبر تعديل أوزان الشبكة بشكل آلي، لاستخلاص الخصائص المتواجدة في الإشارات الداخلة وتجميعها على شكل مجموعات. إذ تُقوَّى أوزان العصبونات التي تستجيب لخاصية معينة في البيانات الداخلة، بحيث تتخصص هذه العصبونات في تمييز هذه الخاصية أكثر من غيرها من العصبونات. وتتم صياغة آلية تعديل الأوزان رياضياً وفق العلاقة الآتية:

$$W^{new} = W^{old} + YX^t$$

و أن $Y = [Y1, Y2 \dots Yn]$ متجه المخرجات

ب- التعلم المراقب (Supervised Learning of ANN):

تبدأ عملية تعلم الشبكة العصبية بإدخال البيانات إليها على شكل متجهات (Exemplars) تتكون من جزئين:

1. الجزء الأول: يمثل مجموعة المتغيرات التوضيحية. (Input Variables)

2. الجزء الثاني: يمثل المتغيرات المعتمدة أو الهدف. (Criterion Section)

بعد إدخال البيانات، تقوم الشبكة بالتدرب عليها للوصول إلى الأوزان المثلى التي تعطي أفضل تقدير لقيم المعيار،

والتي تمثل مخرجات الشبكة العصبية.

ثم تُقارن هذه المخرجات المولدة بواسطة الشبكة مع مخرجات الهدف (المتغيرات المعتمدة) لحساب خطأ التدريب

(Training Error)، وهو الفرق بين المخرجات الفعلية للشبكة والقيم المرغوبة للمخرجات. يُستخدم هذا الخطأ

كأساس لتعديل أو تحديث أوزان الشبكة بهدف تحسين الأداء.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

الهدف الأساسي من تدريب الشبكة العصبية على البيانات هو تقليل خطأ التدريب قدر الإمكان، وبالتالي الحصول على الأوزان المثلى التي يمكن الاعتماد عليها لاحقاً في التنبؤ ببيانات جديدة لم تُشمل في عملية التعلم. وتتم صياغة عملية تعديل الأوزان رياضياً وفق العلاقة التالية:

$$W^{\text{new}} = W^{\text{old}} + Y X^t$$

وأن $T = [T1, T2 \dots Tn]$ متجه المخرجات الهدف.

$X^t = [X1, X2 \dots Xn]$ متجه متغيرات الإدخال.

إن التعليم بوجود معلم (بإشراف) يمكن أن يتم إما بتصحيح الخطأ أو بالاعتماد على الذاكرة.

✓ التعليم بواسطة معلم على نمط تصحيح الخطأ :

يُستخدم هذا النوع من التدريب لتعليم الشبكات العصبية الخطية ذات الطبقة الواحدة، والتي تُستعمل لحل مسائل التقابل الخطي بين الدخل والمخرج.

في هذه الطريقة، تقوم الشبكة بحساب إشارة الخطأ عبر الفرق بين خرج العصبون الفعلي والخرج المطلوب. بعد ذلك، يتم تعديل قيم الأوزان باستخدام دالة الخطأ المعروفة بـ تابع الكلفة (Cost Function)، بهدف تصغير الفارق بين المخرجات الفعلية والمطلوبة.

تتم هذه العملية عن طريق اشتقاق تابع الكلفة بالنسبة للأوزان الشبكية، وتُعد هذه الطريقة واحدة من أهم أساليب التعليم الموجه (Supervised Learning) في الشبكات العصبية الاصطناعية.

✓ التعليم بواسطة معلم المعتمد على الذاكرة:

يتم في هذا النوع من التعلم، تخزين المعلومات المتوفرة عن البيئة داخل الشبكة العصبية، أي تخزين مجموعة التدريب التي تتكون من شعاع الدخل وشعاع المخرج المقابل له. يتطلب هذا النوع من التعليم وجود معيار لتحديد تشابه الأشعة، بالإضافة إلى وجود قاعدة تعليم محددة لتوجيه عملية التعلم.

كما يوجد نمط مختلط يجمع بين التعليم المراقب وغير المراقب، حيث يتم الاستفادة من مخرجات التدريب المراقب لتوجيه التعلم غير المراقب داخل الشبكة العصبية، ما يُعزز من كفاءة اكتساب المعرفة وتحسين الأداء.

ت - التعليم بإعادة التدعيم (Reinforcement Learning):

تعتمد عملية التدعيم (Reinforcement Learning) على مزيج من التعليم المراقب وغير المراقب. ففي هذا

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

الأسلوب، لا تُكشف القيم الحقيقية للمخرجات للشبكة كما يحدث في التعليم غير المراقب، إلا أنه يتم توجيه الشبكة بشأن صحة نتائجها أو خطئها كما في طريقة التعليم المراقب.

ثالثاً: الأنماط الشبكية المستخدمة في التنبؤ بالسلاسل الزمنية

أصبحت الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNs) واسعة الاستخدام في التنبؤ بالسلاسل الزمنية، وذلك لقدرتها الكبيرة على التعامل مع السلاسل الزمنية غير الخطية، على عكس الأساليب التقليدية الأخرى، مما يجعلها بديلاً أو مكماً لتلك الأساليب. تعود بدايات استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية في التنبؤ بالسلاسل الزمنية إلى نهاية الثمانينات، حيث قامت أول محاولة في عام 1987م بواسطة Lapeds & Farber باستخدام شبكة بيرسبترون متعدد الطبقات (MLP) وخوارزمية الانتشار الخلفي (Backpropagation) للتنبؤ بسلسلة زمنية غير مستقرة. وفي عام 1988م قدم Werbos دراسة دعمت استخدام الشبكات العصبية في التنبؤ بالسلاسل الزمنية وشرح فيها كيفية استخدام خوارزمية الانتشار الخلفي في تدريب الشبكة.

عند دراسة السلاسل الزمنية، تعتمد الشبكات العصبية الاصطناعية خلال عملية التعلم على البيانات التاريخية للظاهرة المدروسة، أي القيم الحالية والماضية لمشاهدات السلسلة، بهدف بناء نموذج قادر على التنبؤ بالقيم المستقبلية لتلك المشاهدات.

هناك العديد من أنواع معماريات الشبكات العصبية الاصطناعية التي يمكن استخدامها في التنبؤ بالسلاسل الزمنية،

من أهمها:

- ✓ شبكة بيرسبترون متعدد الطبقات (MLP)
- ✓ شبكات دالة القاعدة الإشعاعية (RBF)
- ✓ شبكة الاسترجاع الخلفي (Recurrent Network)
- وتعتبر من بين أهم الشبكات المستخدمة أيضاً:
- ✓ شبكة بيرسبترون متعدد الطبقات (MLP)
- ✓ شبكات دالة القاعدة الإشعاعية (RBF)
- ✓ الشبكة العصبية أيلمان (Elman Network)
- ✓ شبكة الإنحدار الذاتي غير الخطي مع مدخلات إضافية أو خارجية (NARX)

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

وفيما يلي نوجز أهم ميزات هذه الشبكات :¹

1- الشبكة العصبية إيلمان (Elman Neural Network (ENN)²:

تتألف شبكة إيلمان (Elman Network) على الأقل من أربع طبقات من الخلايا العصبية:

1. طبقة الإدخال: (Input Layer) تستقبل البيانات الأولية للمعالجة.
 2. الطبقة المخفية: (Hidden Layer) تقع بين طبقة الإدخال وطبقة الإخراج، وتقوم بمعالجة المعلومات المرسلّة من طبقة الإدخال.
 3. طبقة السياق: (Context Layer) تعمل على إنشاء اتصالات متكررة (Recurrent Connections) مع الطبقة المخفية، حيث تُستخدم مخرجات طبقة السياق كمدخلات إضافية للطبقة المخفية نفسها، مما يسمح للشبكة بتذكر المعلومات السابقة وتحليل التسلسلات الزمنية.
 4. طبقة الإخراج: (Output Layer) تمثل مخرجات الشبكة النهائية بعد معالجة المعلومات.
- يرتبط كل عنصر في الشبكة ارتباطاً أمامياً (Feedforward) مع الطبقة التي تليه، بينما تساهم طبقة السياق في إعطاء الشبكة قدرة ديناميكية على التعامل مع التسلسلات الزمنية. يعتمد عدد الخلايا في الطبقة المخفية على درجة تعقيد المسألة وحجم المعلومات الداخلة، حيث كلما زادت التعقيدات أو البيانات، زادت الحاجة لعدد أكبر من الخلايا.
- إذ أن :

W : هي الأوزان المستخدمة weights.

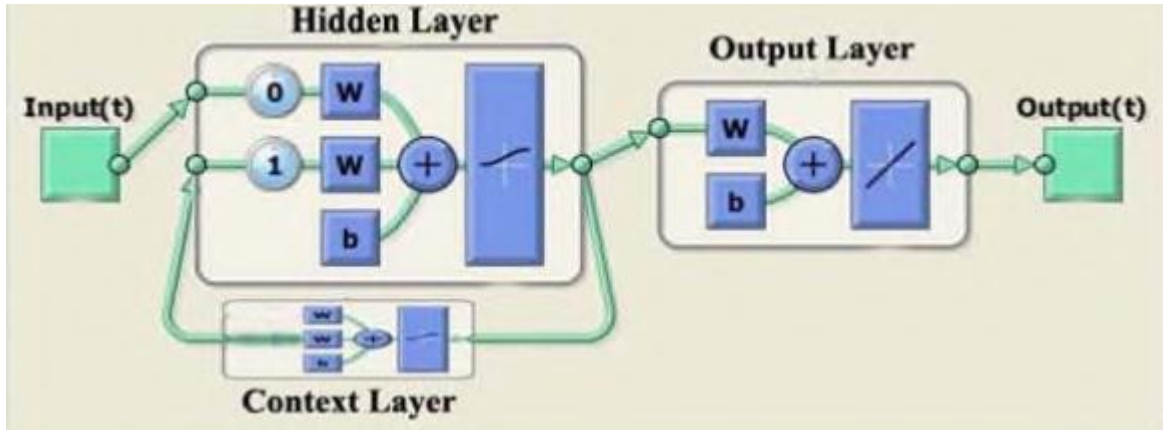
b : هو مقدار التحيز bias

الشكل الرقم(56):التركيب العام لشبكة ELMAN

¹ عتروس سهيلة، نفس المرجع السابق، ص 169-170

² بختاوي فاطيمة الزهراء، نفس المرجع السابق، ص 37

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة



المصدر: بختاوي فاطيمة الزهراء، نفس المرجع السابق، ص37

2- شبكة الإنحدار الذاتي غير الخطي بمدخلات إضافية أو خارجية (Nonlinear Autoregressive with Exogenous Input (NARX)¹:

تعد هذه الشبكة نوعاً من الشبكات العصبية الحركية المتكررة (Recurrent Neural Networks) القوية والمستخدم في التنبؤ بالسلاسل الزمنية، إذ تتميز بوجود تأخير زمني (Delay Time) يسمح لها بمعالجة المعلومات التاريخية.

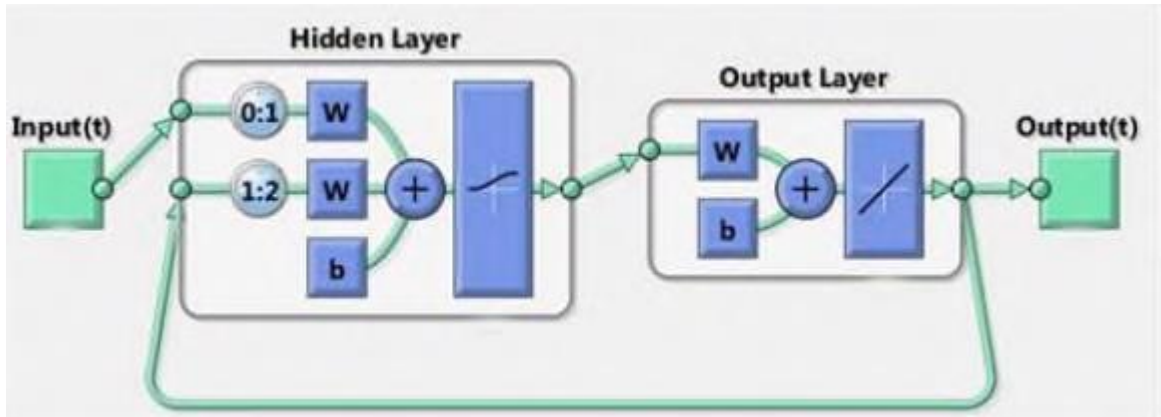
معمارية الشبكة مستوحاة من الشبكات العصبية متعددة الطبقات (MLP)، وتتألف من ثلاث طبقات رئيسية:

1. طبقة الإدخال (Input Layer): تستقبل البيانات الأولية.
 2. الطبقة المخفية (Hidden Layer): تقوم بمعالجة المعلومات الداخلة وتوليد الأنماط اللازمة للتنبؤ.
 3. طبقة الإخراج (Output Layer): تمثل المخرجات النهائية للشبكة.
- ترتبط كل طبقة في الشبكة بالطبقة التالية ارتباطاً أمامياً (Feedforward). بالإضافة إلى ذلك، تُعتبر الإشارات الخارجة من طبقة الإخراج كمدخلات إضافية (External) للطبقة الأولى عبر اتصالات التغذية العكسية (Feedback)، مما يعزز سرعة استقرار الشبكة ويزيد دقة التنبؤ. كما تستخدم الشبكة خوارزمية الانتشار الخلفي (Backpropagation – BP) لتصحيح الأخطاء وتحسين أداء النموذج.

الشكل الرقم (57): التركيب العام لشبكة (NARX)

¹ بختاوي فاطيمة الزهراء، نفس المرجع السابق، ص38

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة



المصدر: بختاوي فاطيمة الزهراء، نفس المرجع السابق، ص38

والوصف الرياضي لنموذج شبكة ال NARX يتلخص في المعادلة الآتية:

$$y(t) = f(x(t-1), x(t-2), \dots, x(t-d), y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-d))$$

إذ أن:

f : هي دالة غير خطية Nonlinear Function

y : إشارة الإخراج Output Signal

x : تمثل إشارة الإدخال Input Signal

d : زمن التأخير delay time إذا استخدم [1:2,0:1] بوصفه تأخيرًا.

3- البيروسترون متعدد الطبقات (MLP) (Multilayer perceptron):¹

تعتبر هذه الشبكة من أكثر الشبكات استخدامًا في التنبؤ بالسلاسل الزمنية، إذ تعتمد فكرتها على استعمال القيم السابقة للسلسلة كمدخلات. في الطبقة المخفية، يتم جمع المدخلات مع الأوزان المرتبطة بها، ثم تمر عبر دالة غير خطية (Sigmoid) لتوليد المخرجات الوسيطة. بعد ذلك، تستقبل طبقة الإخراج مخرجات الطبقة المخفية وتطبق عليها دالة تحويل خطية (Linear Transformation)، بحيث يتم الحصول على التنبؤ بالقيم المستقبلية للسلسلة الزمنية بدقة؛

والنموذج العام لشبكة البيروسترون (MLP) المستخدم في التنبؤ يعطى بالصيغة التالية:

$$\dot{X}(t) = W_0 + \sum_{j=1}^n W_j f_j \left[\sum_{i=1}^n W_{ij} X(k-i) \right]_j + W_{j0}$$

حيث :

¹ عتروس سهيلة، نفس المرجع السابق، ص170-171

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

H: تمثل عدد وحدات الطبقة الخفية؛

N: عدد وحدات المدخلات

W_j : وتمثل الأوزان بين الطبقة الخفية وطبقة المخرجات؛

W_{ij} : وهي تمثل الأوزان بين المدخلات والطبقة الخفية؛

f_j : وتمثل دالة تحفيز سيغمويد في الوحدات الخفية.

4- شبكات دالة القاعدة الإشعاعية (RBF) (Radial Basis Function):

يتكون هذا النوع من الشبكات من طبقتين أساسيتين:

1. الطبقة الخفية، والتي تحتوي على دوال تحفيز قاعدية إشعاعية (Radial Basis Functions)، حيث تعمل على معالجة المدخلات واستخراج الأنماط المميزة.

2. طبقة المخرجات، التي تستخدم دوال تحفيز خطية لتوليد النتائج النهائية للشبكة.

تتميز شبكات القاعدة الإشعاعية (RBF) بعدة ميزات، أبرزها بساطة معماريتها مقارنة بشبكات البيرسبترون متعددة الطبقات (MLP)، مما يسهل تدريبها وتطبيقها على مشكلات التنبؤ.

رابعا: منهجية التنبؤ باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية¹

يُعد التنبؤ باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية أحد الأساليب الحديثة التي حظيت باهتمام واسع في العديد من المجالات، مثل التنبؤ بأسعار العملات، وإدارة الموارد المائية، وأحوال الطقس، وتدفق المياه في الأنهار، واستهلاك الطاقة الكهربائية. ويرجع ذلك إلى قدرتها على التعامل مع البيانات غير الخطية دون الحاجة لشروط صارمة ودقيقة للتنبؤ.

خطوات عمل الشبكات العصبية للتنبؤ يمكن تلخيصها كما يلي:

1. اختيار المتغيرات: في هذه الخطوة يتم تحديد المشاهدات أو البيانات التي تمثل المشكلة المراد التنبؤ بها بشكل مناسب.

2. معالجة البيانات: تشمل العمليات اللازمة على البيانات، مثل تحديد الاتجاه العام للسلسلة الزمنية، ومعرفة توزيع البيانات، ومعالجة القيم الشاذة أو المفقودة إذا وجدت.

3. تقسيم البيانات: تُقسم البيانات المتوفرة إلى مجموعات لضمان تدريب واختبار الشبكة بشكل فعال، وهي:

¹ يختاوي فاطيمة الزهراء، نفس المرجع السابق، ص 35-37

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

- ✓ مجموعة التدريب (Training Set) لتعليم الشبكة وتحديد نموذج البيانات.
 - ✓ مجموعة الاختبار (Testing Set) لتقييم مهارة الشبكة وقدرتها على التنبؤ بالقيم المستقبلية.
 - ✓ مجموعة التحقق أو الشرعية (Validation Set) لإجراء اختبار نهائي لأداء الشبكة والتحقق من ملاءمتها.
 - 4. تصميم نموذج الشبكة العصبية: عند تحديد نموذج الشبكة يجب مراعاة:
 - ✓ عدد الطبقات المخفية: يُحدد بناءً على قيمة الخطأ المطلوب تحقيقه.
 - ✓ عدد العصبونات المخفية: يُحدد عادةً بالتجربة والخطأ.
 - ✓ عصبون الإخراج: غالبًا يكون واحدًا، خاصة في التنبؤ بسلسلة زمنية واحدة.
 - ✓ دالة التحويل (Activation Function) تستخدم للتحكم في مخرجات العصبونات ومنعها من الوصول إلى قيم عالية جدًا، ويمكن اختيار دوال مختلفة حسب طبيعة المشكلة.
 - 5. معيار التقييم: يُستخدم غالبًا متوسط مربعات الخطأ (Mean Squared Error – MSE) لتقييم دقة الشبكة.
 - 6. تدريب الشبكة (Training): تشمل هذه المرحلة:
 - ✓ تعليم النموذج: تحديد الأوزان الأولية بين العصبونات وتحسينها تدريجيًا من خلال التدريب للوصول إلى أقل قيمة ممكنة لمربع الخطأ.
 - ✓ خوارزمية التدريب: عادةً تُستخدم خوارزمية الانتشار الخلفي للخطأ (Backpropagation) مع انحدار الميل Gradient Descent لتصحيح الأخطاء وتحسين أداء الشبكة.
 - 7. تنفيذ النموذج (Implementation): في هذه الخطوة يتم اختبار الشبكة من حيث قدرتها على التكيف مع تغير البيانات، وضمان وصولها إلى أقل مربع خطأ، وتحقيق الاستقرار في التنبؤ بالقيم المستقبلية.
- خامسًا: المفاضلة بين نموذج بوكس-جنكينز، أسلوب التمهيد الأسّي، والشبكات العصبية الاصطناعية في التنبؤ¹

من خلال النقاط الموالية نبرز أهم العناصر التي تُبنى عليها المفاضلة بين الشبكات العصبية الاصطناعية ومنهجية

بوكس-جنكينز في التنبؤ بالسلاسل الزمنية:

✓ خطية السلاسل الزمنية:

¹ عتروس سهيلة، نفس المرجع السابق، ص 179-182

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

- تُظهر منهجية بوكس-جنكنز كفاءة عالية في النماذج الخطية مثل نماذج الانحدار الذاتي (AR)، المتوسطات المتحركة (MA)، النماذج المختلطة (ARIMA) والنماذج الموسمية، خاصة عندما يتوزع الخطأ توزيعاً طبيعياً بمتوسط صفر وتباين يساوي واحد. لكنها تفشل أمام النماذج شبه الخطية أو غير الخطية.
 - في المقابل، تتميز الشبكات العصبية الاصطناعية بقدرتها على معالجة النماذج شبه الخطية وغير الخطية بفاعلية أكبر.
- ✓ التنبؤ:

- الهدف الأساسي في كلتا الطريقتين هو التنبؤ بالقيم المستقبلية.
 - غير أن الشبكات العصبية جاءت لمعالجة أوجه القصور في أساليب الجيل الثاني (مثل بوكس-جنكنز)، حيث تتميز بقدرتها على التنبؤ بالسلاسل غير الخطية سواء بوجود التشويش الأبيض أو بدونه.
- ✓ شروط الاستخدام:

- لا تتطلب الشبكات العصبية افتراضات أو شروطاً مسبقة قبل تطبيقها.
 - أما منهجية بوكس-جنكنز فتشترط تحقق بعض الفرضيات مثل شرط الاستقرار قبل بناء النموذج.
- ✓ نوع البيانات:

- تعمل الشبكات العصبية بكفاءة أكبر عندما تكون بيانات المدخلات والمخرجات مطبّعة ضمن المجال $[0,1]$ ، مما يستدعي إجراء تحويل للبيانات قبل استخدامها.
- بينما يمكن لمنهجية بوكس-جنكنز التعامل مباشرة مع البيانات دون الحاجة إلى تعديلها.

✓ استقرار السلسلة الزمنية:

- يفضل استخدام الشبكات العصبية في حالة وجود مشكلة عدم ثبات التباين.
- أما عند تحقق الاستقرار بشكل أكبر، فتكون منهجية بوكس-جنكنز أكثر ملاءمة.

✓ حجم البيانات:

- كلما كان طول السلسلة الزمنية أكبر، ازدادت كفاءة الشبكات العصبية بسبب ارتفاع درجة التعلم.
- أما في حالة قلة البيانات، فمن الأفضل اعتماد منهجية بوكس-جنكنز.

✓ تعقيد البيانات:

- في السلاسل البسيطة أو الأقل تعقيداً، تكون منهجية بوكس-جنكنز أكثر ملاءمة.
- بينما يفضل استخدام الشبكات العصبية عند ارتفاع درجة التعقيد في السلسلة الزمنية.

الفصل الثاني: النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة

خلاصة :

لقد حاول هذا الفصل تقديم عرض شامل ومفصل لأبرز النماذج القياسية المستخدمة في التنبؤ، وذلك من خلال استعراض الأدبيات والدراسات السابقة ذات صلة بعملية التنبؤ أولاً، ثم الانتقال إلى عرض النماذج الإحصائية والقياسية الأكثر استخداماً، بما في ذلك نماذج السلاسل الزمنية، نماذج VAR، فضلاً عن النماذج الحديثة المستندة إلى الذكاء الاصطناعي. كما تم التركيز بشكل خاص على المنهجيات المتقدمة مثل أسلوب التمهيد الأسّي الثلاثي، منهجية بوكس-جنكينز، والشبكات العصبية الاصطناعية، لما لها من فعالية مثبتة في مجال التنبؤ في البيئات المعقدة. هذا التناول النظري يمثل خطوة تمهيدية ضرورية قبل الانتقال إلى الدراسة التطبيقية التي ستعتمد هذه النماذج لتقييم القدرة التنبؤية في سياق إنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة في الجزائر، وهو ما سيتم التطرق إليه في الفصل القادم.

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

تمهيد:

يشكل التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقات المتجددة أحد المحاور الجوهرية في ميدان اقتصاديات الطاقة، لما له من دور حاسم في دعم صانعي القرار وتوجيه السياسات العمومية نحو استراتيجيات أكثر كفاءة واستدامة. فالتحول الطاقوي الذي يشهده العالم اليوم، في ظل الضغوط المتزايدة الناجمة عن التغيرات المناخية والتقلبات في أسواق المحروقات التقليدية، جعل من الاستثمار في الطاقات النظيفة خيارًا استراتيجيًا لا مفر منه لضمان أمن الطاقة وتحقيق التنمية المستدامة. وتكتسي الطاقات المتجددة، بما فيها الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، الطاقة الحيوية والطاقة الكهربائية، أهمية خاصة كونها تمثل البديل الاستراتيجي لتقليل الاعتماد على المصادر التقليدية الناضبة والمكلفة بيئيا.

على الصعيد الجزائري، ورغم التحديات المرتبطة بارتفاع الاستهلاك الداخلي للطاقة، برزت الحاجة الملحة إلى بناء نماذج كمية دقيقة للتنبؤ بمستويات إنتاج واستهلاك الطاقات المتجددة، بما يساهم في بلورة تصورات مستقبلية واقعية تدعم الأمن الطاقوي الوطني. وبين مختلف مصادر الطاقات المتجددة، تحتل الطاقة الكهربائية مكانة متميزة نظرًا لارتباطها الوثيق بالإمكانات المائية المتاحة من جهة، ولدورها التاريخي والفعال في المزيج الطاقوي الوطني من جهة أخرى. ومن ثم، فإن التركيز في هذا الفصل سينصب على التنبؤ بمستويات إنتاج واستهلاك الطاقة الكهربائية، بوصفها نموذجًا تطبيقيًا يسمح باختبار فعالية النماذج الإحصائية والذكاء المختارة في التعامل مع السلاسل الزمنية الطاقوية.

ويهدف هذا الفصل إلى تقديم معالجة تطبيقية تعتمد على توظيف ثلاثة نماذج رئيسية للتنبؤ، هي: منهجية بوكس-جنكنز (Box-Jenkins) لتحليل السلاسل الزمنية، وأسلوب التمهيد الأسي الثلاثي لرصد الاتجاهات المستقبلية، إضافة إلى الشبكات العصبية الاصطناعية باعتبارها أداة متقدمة لمعالجة العلاقات غير الخطية والأنماط المعقدة في البيانات.

وسيتم عرض نتائج هذه النماذج وتحليلها بشكل نقدي بالاعتماد على مؤشرات كمية دقيقة لقياس الأداء والمفاضلة بينها، مثل متوسط مربع الخطأ (MSE)، والجذر التربيعي لمتوسط الخطأ (RMSE)، ومتوسط الخطأ المطلق (MAE). ويسمح هذا التحليل بتحديد النموذج الأكثر ملاءمة للتنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر، وصياغة سيناريوهات مستقبلية واقعية يمكن أن تساهم في توجيه السياسات الطاقوية الوطنية وتعزيز متطلبات التنمية المستدامة.

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر

المبحث الأول: عرض لإنتاج واستهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر

تُعدّ الطاقة الكهرومائية أحد أقدم مصادر الطاقة المتجددة التي تم استغلالها في الجزائر، نظرًا لتوفر الموارد المائية وتشييد عدد من السدود ومحطات التوليد منذ مرحلة ما بعد الاستقلال. وقد مثلت هذه الطاقة ركيزة مكمّلة لمنظومة الطاقة الوطنية، خاصة قبل التوسع الكبير في قطاع المحروقات. غير أنّ مسار إنتاجها واستهلاكها عرف تقلبات حادة على امتداد العقود الماضية، متأثرًا بجملة من المحددات الطبيعية (كالجفاف والتغيرات المناخية)، والاقتصادية (أزمات أسعار النفط)، والسياسية (الاضطرابات الأمنية). وانطلاقًا من ذلك، يهدف هذا المبحث إلى عرض تطور إنتاج واستهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة (1965-2024)، بالاستناد إلى البيانات التاريخية وتحليل أبرز محطاتها.

المطلب الأول: تطور إنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر

شهد إنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر مسارًا متذبذبًا عبر مختلف المراحل الزمنية، حيث عرفت بعض الفترات زيادات معتبرة ارتبطت بإنجاز مشاريع كبرى للسدود ومحطات التوليد، في حين تميزت فترات أخرى بانخفاضات حادة نتيجة الأزمات الاقتصادية أو شح الموارد المائية. ويُبرز الجدول (16) التطور التاريخي لإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة (1965-2024) معبرًا عنه بال(GWh).

الجدول الرقم(16): كمية إنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة 1965 - 2024

السنوات	إنتاج طاقة الكهرومائية GWh	السنوات	إنتاج طاقة الكهرومائية GWh
1965	400	1995	193
1966	355	1996	135
1967	410	1997	75
1968	563	1998	215
1969	361	1999	203
1970	580	2000	50
1971	330	2001	70
1972	495	2002	60

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

260	2003	752	1973
250	2004	497	1974
550	2005	328	1975
220	2006	389	1976
220	2007	269	1977
280	2008	250	1978
300	2009	291	1979
170	2010	257	1980
500	2011	366	1981
620	2012	479	1982
330	2013	235	1983
250	2014	452	1984
140	2015	646	1985
220	2016	250	1986
60	2017	499	1987
120	2018	183	1988
150	2019	226	1989
50	2020	135	1990
10	2021	293	1991

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

20	2022	199	1992
20	2023	353	1993
51,18	2024	166	1994

المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على البيانات <https://ourworldindata.org/country/algeria>

يُظهر الجدول تذبذبا واضحا في إنتاج الطاقة الكهربائية بالجزائر خلال الفترة 1965-2024، نتيجة تداخل عوامل طبيعية واقتصادية وسياسية.

ففي المرحلة الأولى (1965-1975)، ارتبطت الزيادات الملحوظة بمرحلة ما بعد الاستقلال التي تميزت بمشاريع استثمارية كبرى في البنية التحتية الطاقوية، حيث بلغ الإنتاج 400 GWh سنة 1965 وارتفع إلى 563 GWh سنة 1968. غير أن الجزائر سرعان ما شهدت تقلبات حادة بفعل الأزمات الاقتصادية العالمية وصددمات أسعار النفط، خصوصا أزمة 1973 وما تلاها من اهتزازات.

خلال ثمانينيات القرن الماضي، تراجع الإنتاج بشكل لافت ليسجل 250 GWh سنة 1986 و 183 GWh سنة 1988، نتيجة الانهيار الحاد لأسعار النفط سنة 1986 وما تبعه من أزمة اقتصادية داخلية، إضافة إلى شح الموارد المائية بسبب سنوات الجفاف، وهو ما انعكس مباشرة على قدرة السدود ومحطات التوليد الكهربائية. أما في التسعينيات، فقد ازداد الوضع تعقيدا بفعل الاضطرابات السياسية والأمنية، إذ لم يتجاوز الإنتاج 135 GWh سنة 1990 و 166 GWh سنة 1994، مما أثر على الاستقرار الاقتصادي وأعاق تنفيذ مشاريع طاقة كبرى. ومع مطلع الألفية الجديدة، ظهر بعض التحسن في المؤشرات حيث ارتفع الإنتاج إلى 550 GWh سنة 2005 و 620 GWh سنة 2012، إلا أن هذه المستويات بقيت محدودة مقارنة بالإمكانات المائية المتاحة، وهو ما يعكس غياب استراتيجية متكاملة لتطوير الطاقات المتجددة خلال تلك الفترة.

ابتداء من 2010، برزت بعض الطفرات نتيجة التحولات السياسية وبداية التوجه نحو إدماج الطاقات المتجددة ضمن السياسات الوطنية، غير أن جائحة كوفيد-19 وما أعقبها من أزمات اقتصادية عالمية أعادت إظهار هشاشة المنظومة الطاقوية، حيث سجل الإنتاج انخفاضات قياسية بلغت 50 GWh سنة 2020، ثم تراجع إلى 10 GWh سنة 2021، قبل أن يرتفع قليلا إلى 20 GWh سنة 2022.

المطلب الثاني: تطور استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر

أما على صعيد الاستهلاك، فقد عرف المنحنى مسارا أكثر حدة في تقلباته مقارنة بالإنتاج، حيث تأثر بشكل

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

مباشر بالعرض المتاح من الطاقة الكهربائية، فضلاً عن تغيير أولويات السياسة الطاقوية التي ظلت متركزة أساساً على قطاع المحروقات. ويوضح الجدول (17) مستويات استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة (1965-2024) بال(kWh)، مما يسمح برصد التطور التاريخي وتحليل المحددات المؤثرة فيه.

الجدول الرقم(17): كمية استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة 1965 - 2024

السنوات	استهلاك طاقة الكهرباء kwh	السنوات	استهلاك طاقة الكهرباء kwh
1965	89,85262000	1995	18,83063700
1966	78,32481400	1996	12,91633800
1967	88,45005000	1997	7,04322600
1968	118,72322000	1998	19,87157200
1969	74,41255000	1999	18,50374400
1970	116,88541000	2000	4,85376400
1971	65,01694000	2001	6,08364530
1972	95,30723600	2002	4,91844100
1973	141,41725000	2003	22,44145000
1974	91,22536000	2004	20,84749000
1975	58,11195400	2005	45,08539600
1976	65,85090000	2006	17,30393600
1977	43,91307000	2007	17,58042700
1978	39,66683000	2008	21,44652700
1979	44,81626000	2009	25,29241200

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

1980	38,36643200	2010	12,44938800
1981	52,89448000	2011	26,53621300
1982	66,95527000	2012	26,63162400
1983	31,75286000	2013	6,59124370
1984	59,02411000	2014	12,52631700
1985	81,53419000	2015	9,17274950
1986	30,53113200	2016	4,42843400
1987	59,12540000	2017	3,35817900
1988	21,08437200	2018	6,84731050
1989	25,36020900	2019	8,69019300
1990	14,77788400	2020	2,78073260
1991	31,31800500	2021	0,51174855
1992	20,75886300	2022	0,86443144
1993	35,94807400	2023	1,53217770
1994	16,53485000	2024	2,66648030

المصدر: من اعداد الباحث اعتمادا على البيانات <https://ourworldindata.org/country/algeria>

يوضح الجدول (17): استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة 1965–2024 معبراً عنه بـ

(kWh) مسارا متقلاً يُظهر محدودية هذا المصدر أمام جملة من المحددات الطبيعية والاقتصادية والسياسية.

فمنذ منتصف الستينيات، سُجلت مستويات معتبرة نسبياً (89.85 kWh سنة 1965 و118.72

kWh سنة 1968)، وهو ما ارتبط بمرحلة ما بعد الاستقلال التي تميزت بإطلاق مشاريع كبرى في مجال السدود ومحطات

التوليد، ضمن السياسة الدولة والاستجابة لاحتياجات التنمية الصناعية والاجتماعية.

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

غير أنّ المنحنى سرعان ما أظهر تقلبات حادة، إذ عرف تراجعًا في السبعينيات رغم تسجيل بعض القمم مثل سنة 1973 (kWh. 141.41) ويمكن تفسير ذلك أساسًا بعاملين:

- ✓ الأول يرتبط بالطبيعة غير المستقرة للموارد المائية نتيجة فترات الجفاف وعدم انتظام التساقطات المطرية،
- ✓ والثاني بالتحويلات الاقتصادية التي أعقبت الطفرة النفطية منتصف السبعينيات، حيث تحوّل تركيز الدولة نحو الاستثمار في النفط والغاز باعتبارهما المورد الأساسي للعملة الصعبة وأداة تمويل النمو.

وفي الثمانينيات، استمر التراجع ليصل الاستهلاك إلى مستويات متدنية (kWh 21.08 سنة 1988)، وهو ما ارتبط باختيار أسعار النفط سنة 1986 وأزمة المديونية، التي حدّت من قدرة الدولة على الاستثمار وأضعفت صيانة الهياكل الكهربائية.

أما في التسعينيات، فقد عمّقت الأزمة الأمنية والاجتماعية (العشرية السوداء) هذا التراجع، إذ انخفض الاستهلاك بشكل ملحوظ (kWh 14.77 سنة 1990 و kWh 16.53 سنة 1994)، نتيجة تقلص الاستثمارات وتراجع الأولويات التنموية.

مع مطلع الألفية، ورغم بعض المحاولات لتدارك الفجوة، كما في سنتي 2003 و 2005 (22.44 و kWh 45.08 على التوالي)، ظل الإنتاج الكهربائي محدودًا، حيث بقي الاستثمار متركزًا على قطاع المحروقات، ومع ذلك، فإن الطفرة النفطية في الفترة 2000–2014 لم تُترجم إلى توسع نوعي في استغلال الطاقة الكهربائية، بل ظلت النتائج ضعيفة مقارنة بالقدرات الممكنة.

أما خلال السنوات الأخيرة (2015–2024)، فقد سلك الاستهلاك منحىً تنازليًا حادًا، ليلبغ أدنى مستوى له سنة 2021 (kWh 0.51)، قبل أن يسجل ارتفاعًا طفيفًا في 2023 و 2024 (1.53 و kWh 2.66 على التوالي). ويؤدل هذا الانخفاض أساسًا إلى عاملين: أولهما التأثير المباشر للتغيرات المناخية وتواتر موجات الجفاف التي حدّت من منسوب السدود، وثانيهما غياب الاهتمام الاستراتيجي بهذا المصدر ضمن السياسات الطاقوية التي ظلت مرتبطة بالغاز الطبيعي لتغطية الحاجيات الداخلية والتصدير.

بناءً على ما سبق، يتضح أن استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر لم يتمكن من مواكبة النمو الاقتصادي والاجتماعي، بل ظل رهينة العوامل المناخية والاختيارات الاقتصادية والسياسية القائمة على الربح النفطي. وهو ما يكشف عن محدودية مساهمة هذا المصدر في المزيج الطاقوي الوطني، ويؤكد ضرورة إعادة توجيه السياسات الطاقوية نحو تنويع أكبر، يتماشى مع تحديات التغير المناخي ومتطلبات الانتقال الطاقوي.

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

المبحث الثاني: التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية باستخدام النماذج الكمية

بعد استعراض تطور إنتاج واستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر وتحليل مؤشراتها الأساسية في المبحث الأول، يركز هذا المبحث على الجانب الكمي من الدراسة من خلال توظيف أساليب تحليل السلاسل الزمنية للتنبؤ بمستويات الإنتاج والاستهلاك المستقبلية.

وينطلق هذا التحليل أولاً بدراسة خصائص السلاسل الزمنية محل الدراسة، سواء من حيث الوصف الإحصائي أو من حيث استقرار البيانات، تمهيداً لتطبيق مجموعة من النماذج الكمية المتقدمة. وتشمل هذه النماذج: منهجية بوكس-جنكنز (Box-Jenkins) كإطار تقليدي لتحليل السلاسل الزمنية، وأسلوب التمهيد الأسّي الثلاثي (Holt-Winters) لرصد الاتجاهات المستقبلية، إضافة إلى الشبكات العصبية الاصطناعية التي تمثل إحدى الأدوات الذكية القادرة على التعامل مع العلاقات غير الخطية والأنماط المعقدة في البيانات.

ويهدف هذا المبحث إلى اختبار كفاءة هذه النماذج في التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية، بما يسمح بالمفاضلة بينها وفق مؤشرات كمية لقياس الدقة، وصولاً إلى اختيار النموذج الأكثر ملاءمة لصياغة سيناريوهات مستقبلية تدعم صناع القرار في مجال السياسات الطاقوية.

المطلب الأول: دراسة خصائص السلسلة الزمنية محل الدراسة

يهدف المطلب الأول إلى تقديم دراسة معمقة لخصائص السلاسل الزمنية المتعلقة بإنتاج واستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر. إذ يتم في الفرع الأول التركيز على سلسلة إنتاج الطاقة من خلال وصف بياناتها الأساسية، وتحليل تمثيلها البياني، واستعراض أهم المؤشرات الإحصائية الخاصة بها، إضافة إلى التحقق من استقراريتها عبر دراسة دوال الارتباط الذاتي والذاتي الجزئي، وكذا الكشف عن مركبة الاتجاه العام ونزوعها. أما الفرع الثاني فيعالج سلسلة استهلاك الطاقة الكهربائية بنفس المنهجية، ما يسمح بتكوين صورة دقيقة عن طبيعة هذه السلاسل، ويمهد لاحقاً لتطبيق النماذج التنبؤية عليها.

الفرع الأول: خصائص سلسلة إنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

يعرض الفرع الأول دراسة خصائص سلسلة إنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر، حيث يتم الانطلاق من تحديد المعطيات التاريخية المتوفرة حول الإنتاج، ثم تمثيلها بيانياً للكشف عن تطورها عبر الزمن، إضافة إلى تحليل المؤشرات الإحصائية الأساسية التي تعكس طبيعة السلسلة. كما يتم التحقق من استقراريتها من خلال دراسة دوال الارتباط الذاتي والذاتي الجزئي، مع التركيز على تحديد الاتجاه العام ونزعه من السلسلة عند الحاجة.

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر

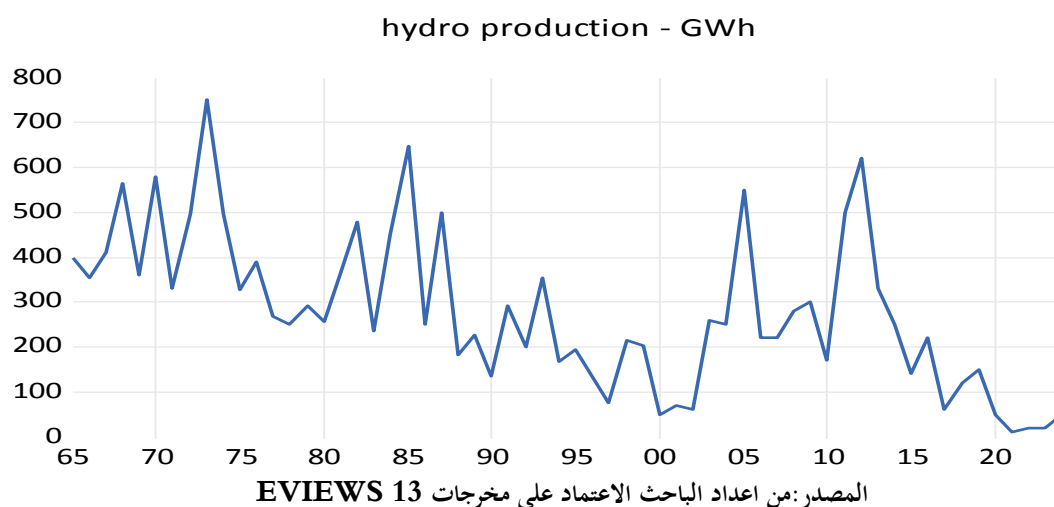
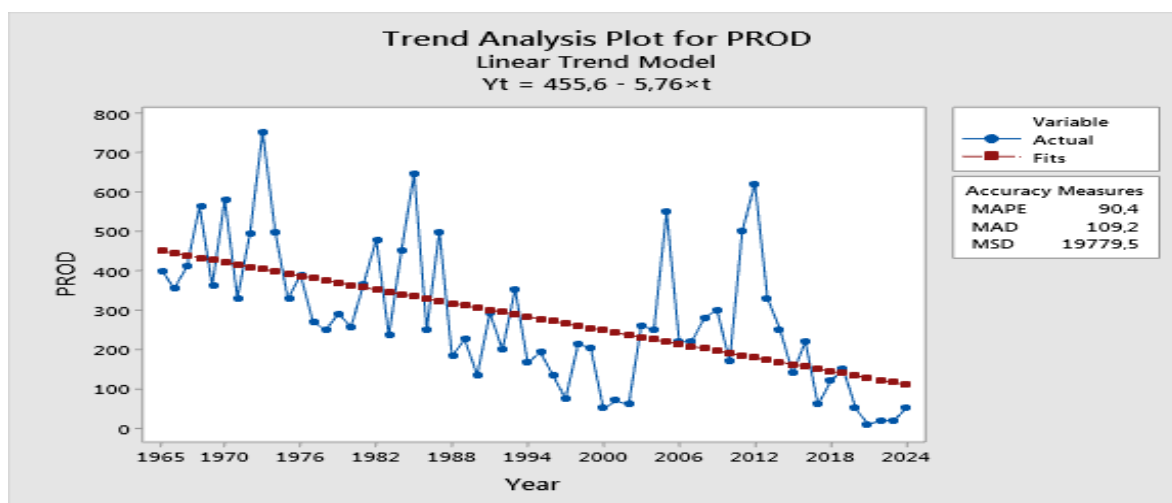
أولاً: الدراسة الوصفية للسلسلة الزمنية

1- تحديد معطيات السلسلة الزمنية محل الدراسة :

تتكون السلسلة الزمنية الخاصة بإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر من 60 مشاهدة سنوية تغطي الفترة الممتدة من 1965 إلى 2024، ويُرمز إليها بالمتغير (PROD) الذي يعكس القيم السنوية للإنتاج الكهرومائي خلال هذه المدة.

2- التمثيل البياني للسلسلة إنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر:

الشكل الرقم(58):التمثيل البياني لسلسلة إنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر



يكشف تحليل منحني إنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة محل الدراسة عن مسار متذبذب تحكمه بالأساس محددات طبيعية (تذبذب الموارد المائية) وأخرى اقتصادية والسياسية.

غير أنّ الاتجاه العام للإنتاج يظهر منحنيّ تنازلياً واضحاً على المدى الطويل. فقد شهدت المرحلة الممتدة من

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

أواخر الستينيات إلى منتصف السبعينيات مستويات إنتاج مرتفعة نسبيًا، تجاوزت في بعض السنوات عتبة 600 GWh، تلتها فترة اتسمت بتراجع تدريجي رافقه بروز تذبذبات حادة، لاسيما خلال عقدي الثمانينيات والتسعينيات. ومع مطلع الألفية الثالثة، تعمق الانخفاض وأصبح أكثر انتظامًا، حيث استقر الإنتاج في معظم السنوات تحت سقف 300 GWh، باستثناء بعض الارتفاعات الظرفية (على غرار سنتي 2005 و2012).

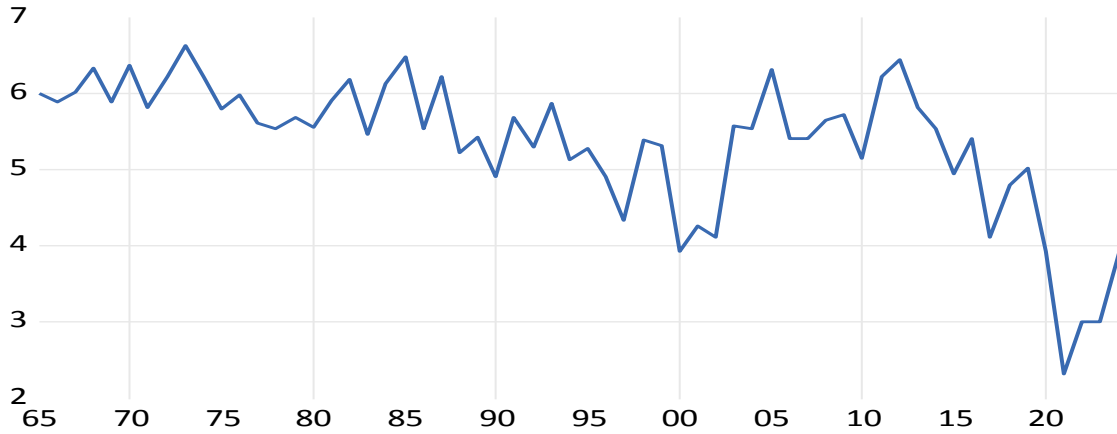
أما في السنوات الأخيرة، فقد عرفت المستويات تراجعًا حادًا لتسجل في كثير من الأحيان أقل من 100 GWh، وهو ما يؤكد مسارًا تنازليًا طويل الأمد يعكس هشاشة الاعتماد على الطاقة الكهربائية ضمن مزيج الطاقة الوطني، رغم الارتفاعات المؤقتة المسجلة في بعض الفترات.

تُظهر السلسلة الزمنية لإنتاج الطاقة الكهربائية اتجاهًا تنازليًا مصحوبًا بتذبذبات واضحة وتباينًا غير ثابت عبر الزمن. وبالنظر إلى هذه الخصائص، تم ادخال اللوغاريتم على البيانات الأصلية من أجل تقليل عدم تجانس التباين وجعلها أكثر ملاءمة للتقدير والنمذجة باستخدام الأساليب الإحصائية للسلاسل الزمنية، كما موضح في الشكل الموالي:

الشكل الرقم(59): التمثيل البياني لسلسلة إنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر بعد ادخال اللوغاريتم

LPROD

LPROD

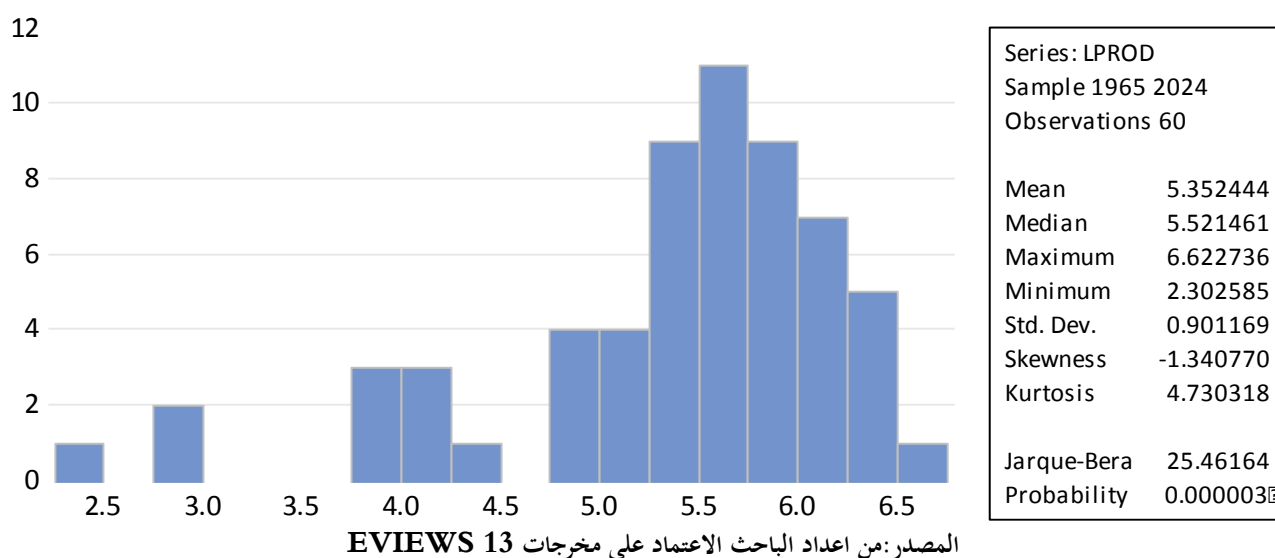


المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EViews

3- عرض وتحليل المعطيات الإحصائية للسلسلة LPROD

الشكل رقم (60): البيانات الإحصائية للسلسلة LPROD

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر



يبين الشكل أعلاه خصائص الإحصائية لسلسلة LPROD خلال الفترة 1965–2024، حيث يتضح أن البيانات تتركز بشكل ملحوظ بين القيم [5.0–6.0] مع وجود تشتت محدود في المشاهدات عند الأطراف. و يبلغ المتوسط الحسابي للسلسلة حوالي (5.35) وهو قريب نسبياً من الوسيط (5.52)، مما يوحي بدرجة من التوازن حول المركز، غير أن معامل الالتواء ($Skewness = -1.34$) يشير إلى وجود ميل سلمي في التوزيع، أي أن الذيل الأيسر أطول نسبياً، وأن بعض القيم المنخفضة تؤثر على الشكل العام للسلسلة. أما معامل التفلطح ($Kurtosis = 4.73$) فيشير إلى وجود ذيول أكثر سمكاً مقارنة بالتوزيع الطبيعي (leptokurtic distribution)، بما يعكس احتمال تواجد مشاهدات متطرفة.

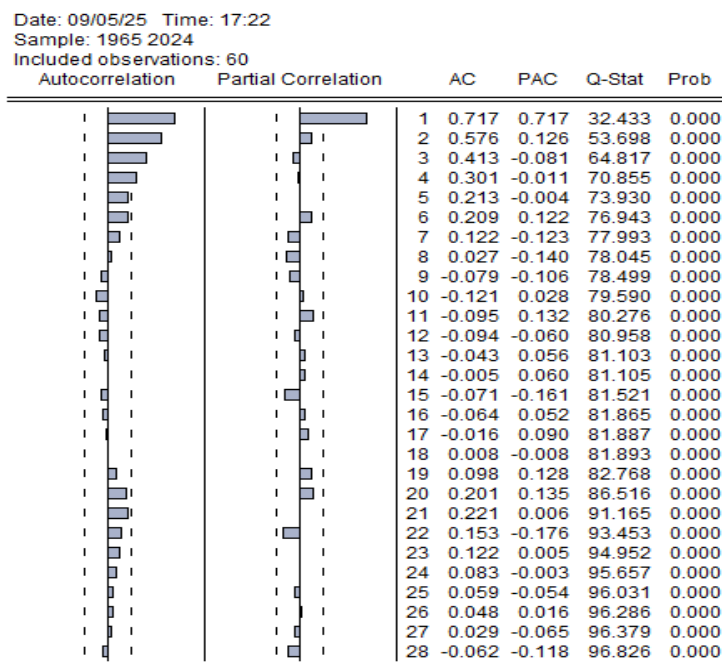
وقد أكد اختبار Jarque-Bera هذه النتيجة، حيث بلغت إحصائيته (25.46) باحتمالية (0.000003)، ما يسمح برفض فرضية التوزيع الطبيعي عند مستويات معنوية تقليدية (1% و 5%). وبالتالي فإن السلسلة محل الدراسة لا تتبع التوزيع الطبيعي، وهو ما يتطلب أخذ الحذر عند تطبيق النماذج القياسية التي تفترض الطبيعية في بوابها.

إضافة إلى ذلك، فإن انحراف التوزيع عن الشكل الطبيعي يعكس فترات تراجع حاد أو صدمات خارجية أثرت بشكل استثنائي على الإنتاج. بينما يبرز تركيز القيم في المستويات المرتفعة نسبياً يبرز مرحلة الاستقرار الطاقوي خلال العقود الأخيرة، في حين أن القيم المنخفضة جداً في بداية الفترة تعكس ظروف التوسع الصناعي المبكر وضعف البنية التحتية في مرحلة ما بعد الاستقلال. ويشير هذا التحليل كذلك إلى ضرورة اختبار استقرارية السلسلة (stationarity) قبل الشروع في بناء نماذج التنبؤ، مع إمكانية استخدام تحويلات إضافية أو نماذج أكثر مرونة لمعالجة الانحراف عن التوزيع الطبيعي.

ثانياً: دراسة استقرارية السلسلة الزمنية

1- دراسة دالة الارتباط الذاتي والارتباط الذاتي الجزئي

الشكل رقم (61): دالة الارتباط الذاتي والجزئي لسلسلة $lprod$



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EVIEWS

يوضح الشكل رقم (61)، الممثل لدالتي الارتباط الذاتي (ACF) والارتباط الذاتي الجزئي (PACF) الخاصة بسلسلة $LPROD$ خلال الفترة (1965–2024)، خصائص احصائية تعكس طبيعة و سلوك السلسلة الزمنية عبر الزمن. حيث تبين أن معاملات الارتباط الذاتي تسجل قيماً مرتفعة ومعنوية أي أنها تختلف عن الصفر وتقع خارج مجال الثقة عند الإزاحات الأولى ($lag\ 1=0.717$) قبل أن تتناقص تدريجياً مع زيادة عدد الفجوات الزمنية، مما يشير إلى عدم استقرار السلسلة الزمنية $LPROD$.

أما معاملات الارتباط الذاتي الجزئي (PACF) فتظهر بوضوح ارتفاعاً معنوياً يختلف عن الصفر ويقع خارج مجال الثقة عند الإزاحة الأولى، في حين تتراجع إلى مستويات غير معنوية عند بقية الإزاحات أي تقع ضمن مجال الثقة، الأمر الذي يدل بأن النموذج الأنسب كبداية لتمثيل السلسلة هو نموذج $AR(1)$.

ويمكن استنتاج ذلك من قيمة $prob$ لإحصائية $Ljung-Box\ Q-Stat$ ، فمن خلال مقارنة قيمة

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

prob مع 5%، نجد أن جميع القيم أقل من مستوى المعنوية، وهذا ما يشير إلى عدم استقرار السلسلة الزمنية وبالتالي فهي خاضعة للمركبة الاتجاه العام وتحتاج إلى معالجة إضافية مثل حساب الفروقات من الدرجة الأولى (First Difference) قبل استخدامها في التنبؤات.

2- الكشف عن مركبة الاتجاه العام ونزعها من السلسلة محل الدراسة

أ. الكشف عن مركبة الاتجاه العام:

للتأكد من وجود مركبة الاتجاه العام في سلسلة LPROD، تم إجراء اختبار ديكي-فولر الموسع (PP) باستخدام برنامج EViews 13 وقد أظهرت النتائج أن السلسلة الزمنية الخاصة بإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر (LPROD) غير مستقرة وتحتوي على جذر وحدوي، كما هو موضح في الأشكال التالية:

الشكل رقم (62): اختبار ديكي فولر المطور لسلسلة LPROD

<u>At Level</u>		
		LPROD
With Constant	t-Statistic	-2.7480
	Prob.	0.0722
		*
With Constant & Trend	t-Statistic	-3.8690
	Prob.	0.0196
		**
Without Constant & Trend	t-Statistic	-0.8679
	Prob.	0.3358
		n0

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EViews

الشكل رقم (63): اختبار فليب بيرون لسلسلة LPROD

At Level

LPROD

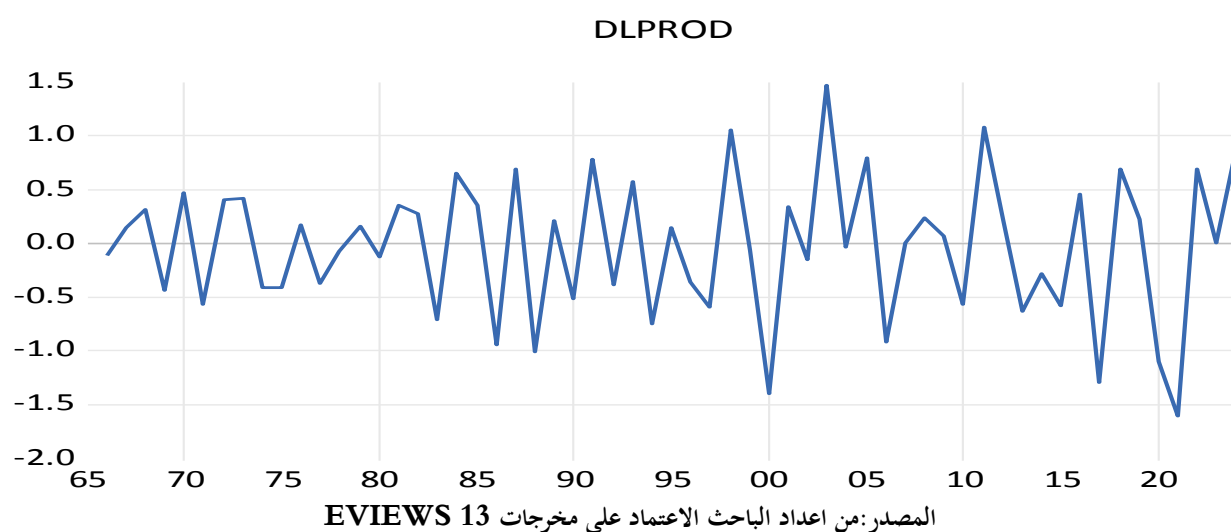
الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

With Constant	t-Statistic	-2.7480
	Prob.	0.0722
		*
With Constant & Trend	t-Statistic	-3.7664
	Prob.	0.0255
		**
Without Constant & Trend	t-Statistic	-1.0806
	Prob.	0.2503
		n0

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

استنادا إلى تحليل النتائج ، يتضح أن معظم القيم الاحتمالية عند المستوى (Level) للنماذج الثلاثة تفوق قيمة 0.05، مما يعني عدم رفض فرضية العدم ، وهو ما يشير إلى أن السلسلة الزمنية غير مستقرة وتحتوي على جذر وحدوي، أي أنها تضم مركبة اتجاه عام ، و لإزالة هذه المركبة وجعل السلسلة مستقرة يتم القيام بحساب الفروقات من الدرجة الأولى و من ثم إعادة تطبيق اختباري ديكي-فولر الموسع (ADF) وفيلبس-بيرون (PP) على السلسلة LPROD ذات الفروقات من الدرجة الأولى (DLPROD) لنحصل على النتائج التالية:

الشكل رقم (64): تمثيل البياني لسلسلة DLPROD



يُعد تحليل الرسم البياني للسلسلة المعدلة (DLPROD) خطوة أولية يمكن من خلالها استنتاج استقرارية

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

السلسلة الزمنية ، غير أن التأكد من مدى صحة هذه النتائج يستلزم إجراء اختبارات إحصائية للاستقرارية (اختباري ديكي-فولر الموسع (ADF) وفيلبس-بيرون (PP)) على السلسلة DLPROD ذات الفروقات من الدرجة الأولى.

ب. اختبارات الاستقرارية:

الشكل رقم (65): اختبار فليب بيرون لسلسلة dLprod

<u>At First Difference</u>		
		d(LPROD)
With Constant	t-Statistic	-12.9784
	Prob.	0.0000

With Constant & Trend	t-Statistic	-14.1520
	Prob.	0.0000

Without Constant & Trend	t-Statistic	-11.9740
	Prob.	0.0000

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EVIEWS

الشكل رقم (66): اختبار ديكي فولر المطور لسلسلة dLprod

<u>At First Difference</u>		
		d(LPROD)
With Constant	t-Statistic	-10.4711
	Prob.	0.0000

With Constant & Trend	t-Statistic	-10.4148
	Prob.	0.0000

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

Without Constant & Trend t-Statistic -10.5116

Prob. 0.0000

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EVIEWS

تُبين نتائج الاختبارات المعروضة في الأشكال السابقة أنّ جميع القيم الاحتمالية جاءت أقل من مستوى الدلالة 5%، وهو ما يؤكد استقرار سلسلة إنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر (DLPROD) بعد أخذ الفروقات من الدرجة الأولى.

الفرع الثاني: خصائص سلسلة استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر

خصص الفرع الثاني لدراسة سلسلة استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر بنفس النهج، حيث يتم استعراض معطياتها التاريخية وتحليلها وصفيًا وإحصائيًا، مع تمثيلها في شكل بياني لتوضيح مسارها الزمني. كما يشمل التحقق من استقرارية السلسلة ودراسة الاتجاهات التي تتحكم في تطورها. ويسمح هذا التحليل المزدوج لكل من الإنتاج والاستهلاك بفهم أعمق لخصائص السلاسل المدروسة، ما يشكل الأساس العلمي لتطبيق النماذج التنبؤية في المباحث اللاحقة.

أولاً: الدراسة الوصفية للسلسلة الزمنية

1- تحديد معطيات السلسلة الزمنية محل الدراسة

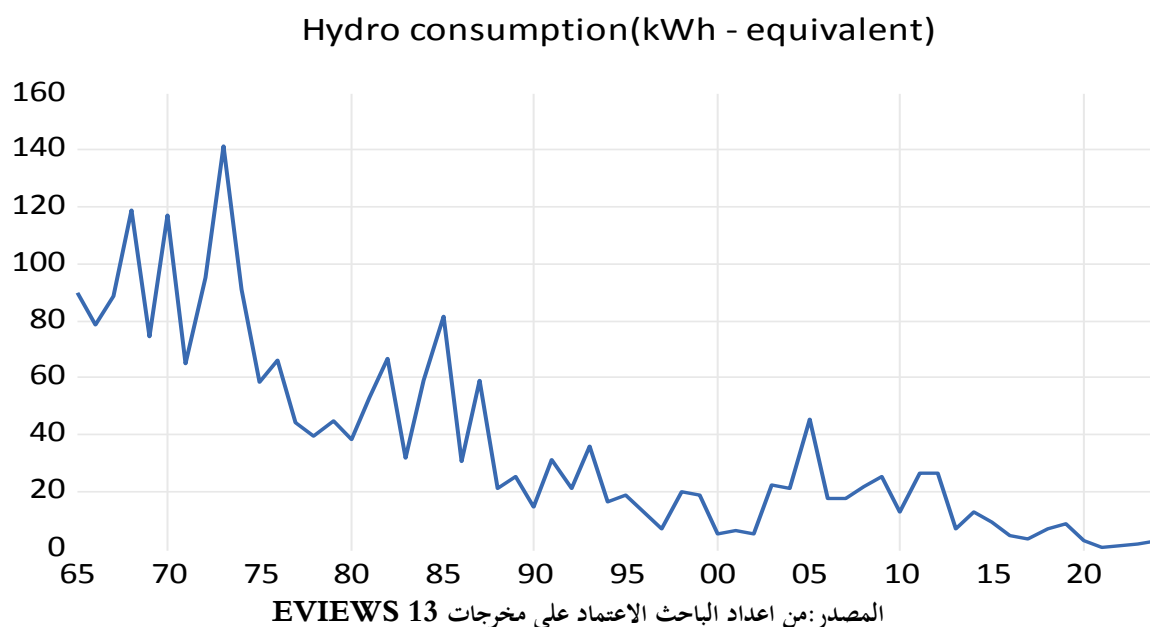
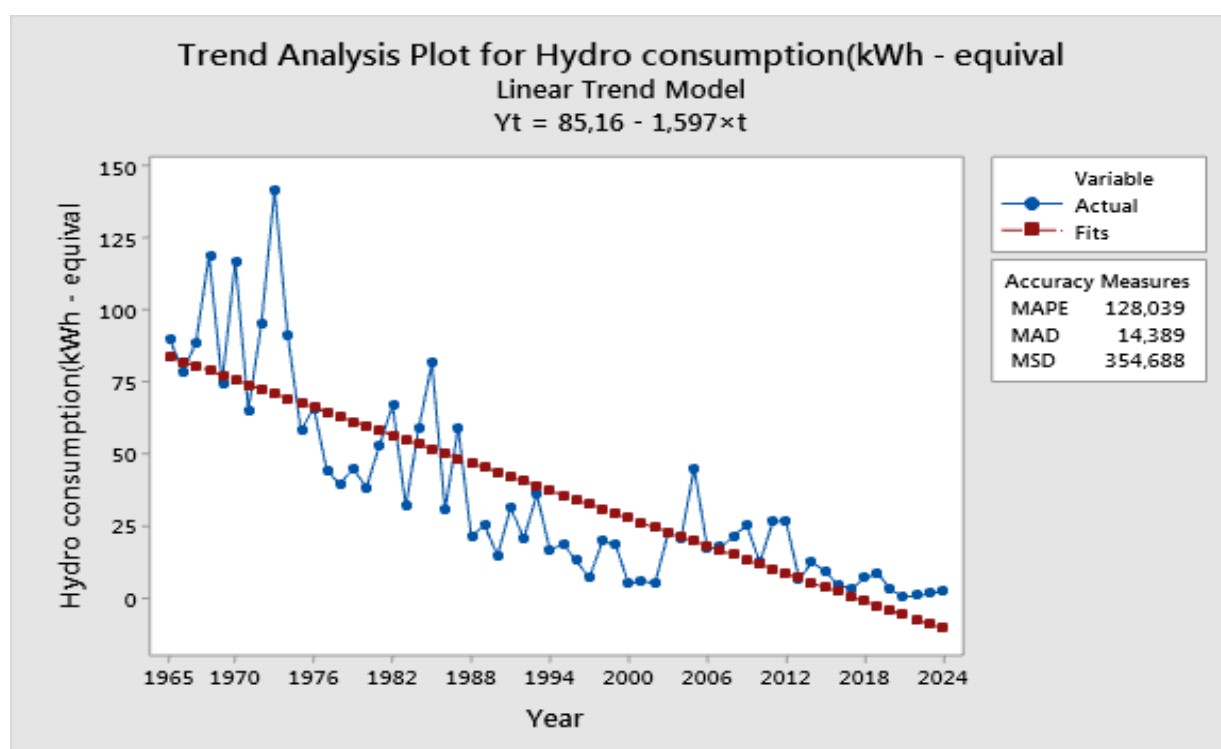
تشمل بيانات استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر 60 مشاهدة سنوية تغطي الفترة الممتدة من 1965 إلى

2024، ويُرمز لها بالمتغير (CONSU) الذي يعكس القيم السنوية للاستهلاك واتجاهاته عبر الزمن.

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر

2- التمثيل البياني للسلسلة استهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر

الشكل الرقم(67):التمثيل البياني لسلسلة CONSU إستهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر 1965-2024



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات MINITAB19

يوضح الشكل (67): التمثيل البياني لاستهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة 1965-2024 أنّ

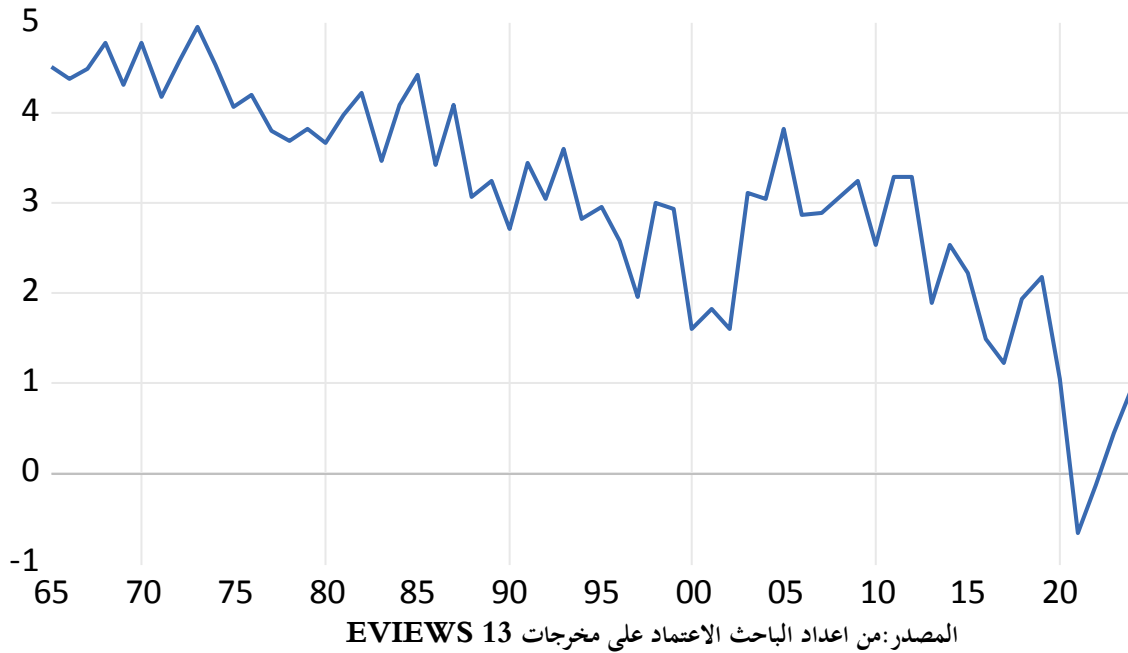
الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

السلسلة الزمنية عرفت تذبذبات حادة مع اتجاه عام تنازلي واضح، حيث سجلت مستويات مرتفعة في مطلع السبعينيات تجاوزت 140 (kWh) قبل أن تتراجع تدريجيًا لتصل إلى مستويات منخفضة جدًا في السنوات الأخيرة. ويرتبط هذا التراجع بعوامل طبيعية، أهمها الجفاف ونقص الموارد المائية، إلى جانب عوامل اقتصادية وسياسية مثل هيمنة المحروقات وضعف الاستثمار في مجال الطاقات المتجددة. كما تم إدخال اللوغاريتم على البيانات الأصلية للسلسلة CONSU بغرض تقليص الفوارق الكبيرة بين المشاهدات، وتثبيت التباين، والتقليل من أثر القيم الشاذة، بما يجعل السلسلة أكثر ملاءمة لعمليات النمذجة والتحليل الإحصائي كما هو مبين في الجدول الموالي:

الشكل رقم (68): التمثيل البياني لسلسلة استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر بعد ادخال اللوغاريتم

LCONSU

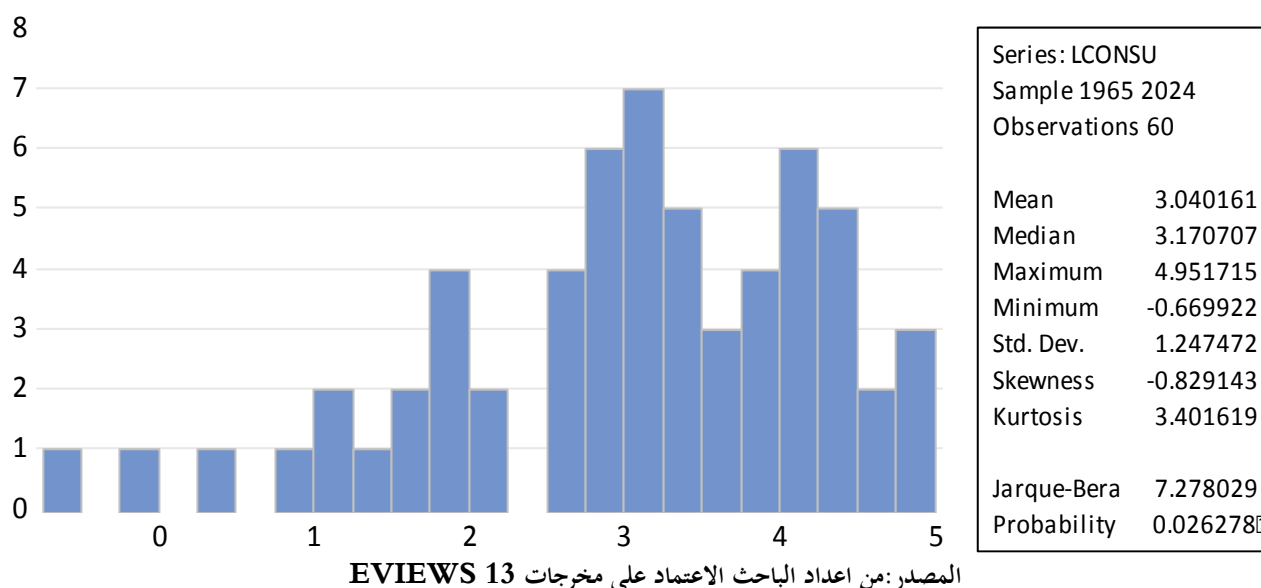
LCONSU



3- عرض وتحليل المعطيات الإحصائية للسلسلة LCONSU

الشكل رقم (69): البيانات الإحصائية للسلسلة LCONSU

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر



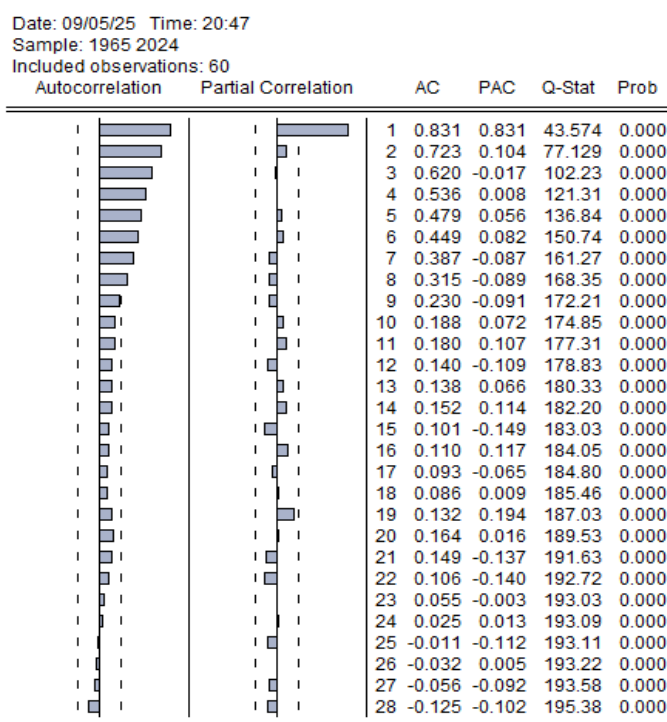
يبين الشكل (69): التوزيع الإحصائي للمتغير اللوغاريتمي LCONSU ، الذي يمثل استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة 1965-2024. ويظهر من خلال المخطط أن القيم تتجمع بشكل رئيسي في المجال ما بين 2 و 4، حيث بلغ المتوسط الحسابي 3.04 والوسيط 3.17، وهو ما يعكس درجة من التقارب بين القيم. غير أن معامل الالتواء (-0.82) يكشف عن ميل التوزيع نحو الجهة اليسرى، في حين يشير معامل التفلطح (3.40) إلى أن القيم أكثر حدة من التوزيع الطبيعي الذي يأخذ القيمة 0.3. كما يوضح اختبار جاك-بيرا (Jarque-Bera)، الذي بلغت قيمته 7.27 مع احتمال إحصائي 0.026، أن البيانات لا تتبع توزيعاً طبيعياً عند مستوى معنوية 5%. وهو ما يعني أن السلسلة، حتى بعد تحويلها باللوغاريتم، هذا يعني أن الفرضية العدمية (التي تقول إن البيانات تتبع توزيعاً طبيعياً) يتم رفضها.

ثانياً: دراسة استقرار السلسلة الزمنية

1- دراسة دالة الارتباط الذاتي والارتباط الذاتي الجزئي:

الشكل رقم (70): دالة الارتباط الذاتي والسلسلة LCONSU

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

يوضح الشكل رقم (70)، الممثل لدالتي الارتباط الذاتي (ACF) والارتباط الذاتي الجزئي (PACF) الخاصة بسلسلة LCONSUS خلال الفترة (1965–2024)، خصائص إحصائية تعكس طبيعة وسلوك السلسلة الزمنية عبر الزمن. حيث تبين أن معاملات الارتباط الذاتي تسجل قيماً مرتفعة ومعنوية تختلف عن الصفر وتقع خارج مجال الثقة عند الإزاحة الأولى ($\text{lag } 1 = 0.831$)، قبل أن تتناقص تدريجياً مع زيادة عدد الفجوات الزمنية، مما يشير إلى أن السلسلة الزمنية LCONSUS غير مستقرة.

أما معاملات الارتباط الذاتي الجزئي (PACF) فتظهر بوضوح ارتفاعاً معنوياً يختلف عن الصفر ويقع خارج مجال الثقة عند الإزاحة الأولى، في حين تتراجع إلى مستويات غير معنوية عند بقية الإزاحات أي تقع ضمن مجال الثقة، الأمر الذي يدل على أن النموذج الأنسب كبداية لتمثيل السلسلة هو نموذج $\text{AR}(1)$. ويمكن استنتاج ذلك من قيمة Prob لإحصائية Ljung–Box Q–Stat، فمن خلال مقارنة قيمة

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

الاحتمال بمستوى المعنوية 5%، نجد أن جميع القيم أقل من هذا المستوى، وهو ما يؤكد عدم استقرار السلسلة الزمنية وخضوعها للمركبة الاتجاه العام، وبالتالي فهي تحتاج إلى معالجة إضافية مثل حساب الفروقات من الدرجة الأولى (First Difference) قبل استخدامها في التنبؤات.

2- الكشف عن مركبة الاتجاه العام ونزعها من السلسلة محل الدراسة:

أ. الكشف عن مركبة الاتجاه العام:

من أجل التحقق من وجود المركبة الاتجاه العام في سلسلة LCONSUS، تم تطبيق اختباري ديكي-فولر الموسع (ADF) وفيلبس-بيرون (PP) بالاعتماد على برنامج EViews 13. وقد أظهرت نتائج الاختبارين أن السلسلة الزمنية الخاصة باستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر (LCONSUS) غير مستقرة وتحتوي على جذر وحدوي، كما هو موضح من الأشكال البيانية المرفقة أدناه.

الشكل رقم (71): اختبار ديكي فولر المطور لسلسلة LCONSUS

<u>At Level</u>		
		LCONSUS
With Constant	t-Statistic	-1.8726
	Prob.	0.3427
		n0
With Constant & Trend	t-Statistic	-4.2248
	Prob.	0.0075

Without Constant & Trend	t-Statistic	-1.3464
	Prob.	0.1633
		n0

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EViews 13

الشكل رقم (72): اختبار فليب بيرون لسلسلة LCONSUS

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

<u>At Level</u>		
		LCONS
With Constant	t-Statistic	-1.5404
	Prob.	0.5064
		n0
With Constant & Trend	t-Statistic	-4.1947
	Prob.	0.0082

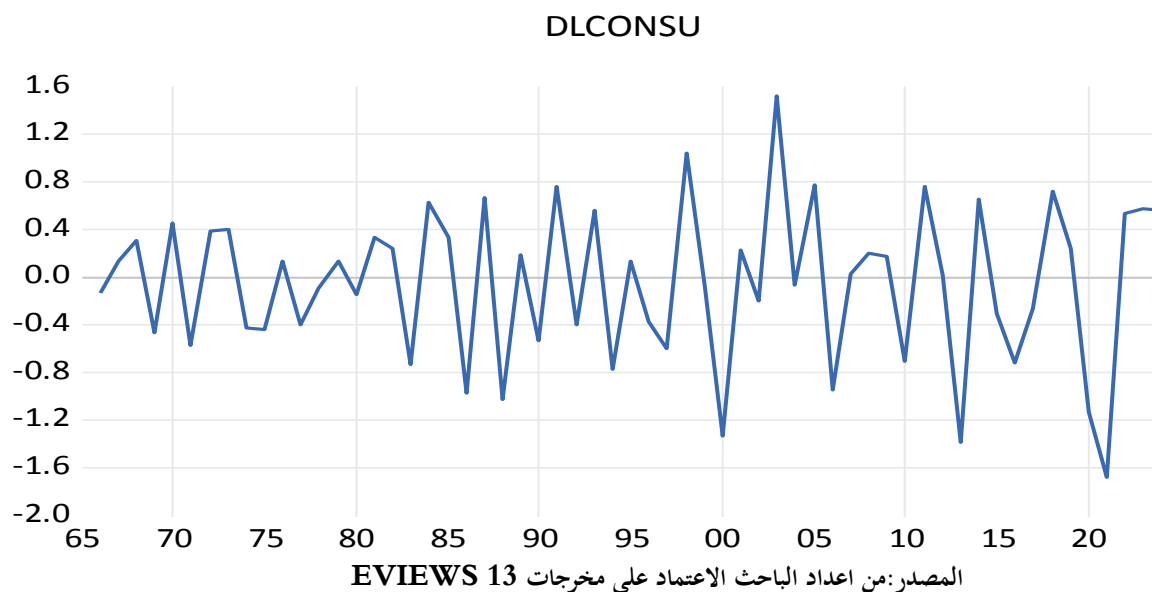
Without Constant & Trend	t-Statistic	-1.5109
	Prob.	0.1215
		n0

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EVIEWS

بناء على تحليل النتائج، يتبين أن معظم القيم الاحتمالية عند المستوى (Level) في النماذج الثلاثة جاءت أكبر من 0.05، الأمر الذي يؤدي إلى عدم رفض فرضية العدم، مما يدل على أن السلسلة الزمنية غير مستقرة وتحتوي على جذر وحدوي، أي أنها تتضمن مركبة اتجاه عام. ولإزالة هذه المركبة وتحويل السلسلة إلى حالة الاستقرار، تم حساب الفروقات من الدرجة الأولى، ثم إعادة تطبيق اختبار ديكي-فولر الموسع (ADF) وفيلبس-بيرون (PP) على السلسلة ذات الفروقات الأولى (DLCONS)، لنحصل على النتائج المبينة فيما يلي:

الشكل رقم (73): تمثيل البياني لسلسلة DLCONS

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر



يمثل تحليل الرسم البياني للسلسلة المعدلة (DLCONSU) خطوة أولية تسمح باستخلاص دلائل حول استقرار السلسلة الزمنية، غير أن التحقق من دقة هذه النتائج يستلزم إجراء اختبارات إحصائية للاستقرار، والمتمثلة في اختباري ديكي-فولر الموسع (ADF) وفيلبس-بيرون (PP)، على السلسلة (DLCONSU) بعد أخذ الفروقات من الدرجة الأولى.

ب. اختبارات الاستقرار:

الشكل رقم (74): اختبار ديكي فولر المطور لسلسلة DLCONSU

<u>At First Difference</u>	
	d(LCONSU)
With Constant	t-Statistic -9.9042
	Prob. 0.0000

With Constant & Trend	t-Statistic -9.8331
	Prob. 0.0000

Without Constant & Trend	t-Statistic -9.8727
	Prob. 0.0000

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13
الشكل رقم (75): اختبار فليب بيرون لسلسلة DLCONSU

<u>At First Difference</u>		
		d(LCONSU)
With Constant	t-Statistic	-21.4101
	Prob.	0.0001

With Constant & Trend	t-Statistic	-28.1754
	Prob.	0.0001

Without Constant & Trend	t-Statistic	-11.8179
	Prob.	0.0000

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

توضح نتائج الاختبارات المبينة في الأشكال السابقة أن جميع القيم الاحتمالية كانت أقل من مستوى الدلالة 5%، مما يؤكد استقرار سلسلة استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر (DLCONSU) بعد إجراء الفروقات من الدرجة الأولى.

المطلب الثاني: تطبيق نموذج بوكس-جينكينز (Box-Jenkins) في التنبؤ بالطاقة الكهربائية

يهدف المطلب الثاني إلى تطبيق نموذج بوكس-جينكينز (Box-Jenkins) في التنبؤ بالطاقة الكهربائية، وذلك استنادًا إلى خصائص السلاسل الزمنية المدروسة. ويعد هذا النموذج من أهم الأساليب الإحصائية الكلاسيكية التي تعتمد على دراسة الارتباطات الداخلية للسلسلة لاختيار الصيغة المثلى للتنبؤ بالإنتاج والاستهلاك.

الفرع الأول : اعتماد منهجية بوكس-جينكينز (Box-Jenkins) في التنبؤ بإنتاج الطاقة الكهربائية

من أجل تطبيق منهجية بوكس-جينكينز (Box-Jenkins) على البيانات قيد الدراسة، ينبغي المرور

بمجموعة من المراحل الأساسية، سيتم عرضها في النقاط التالية:

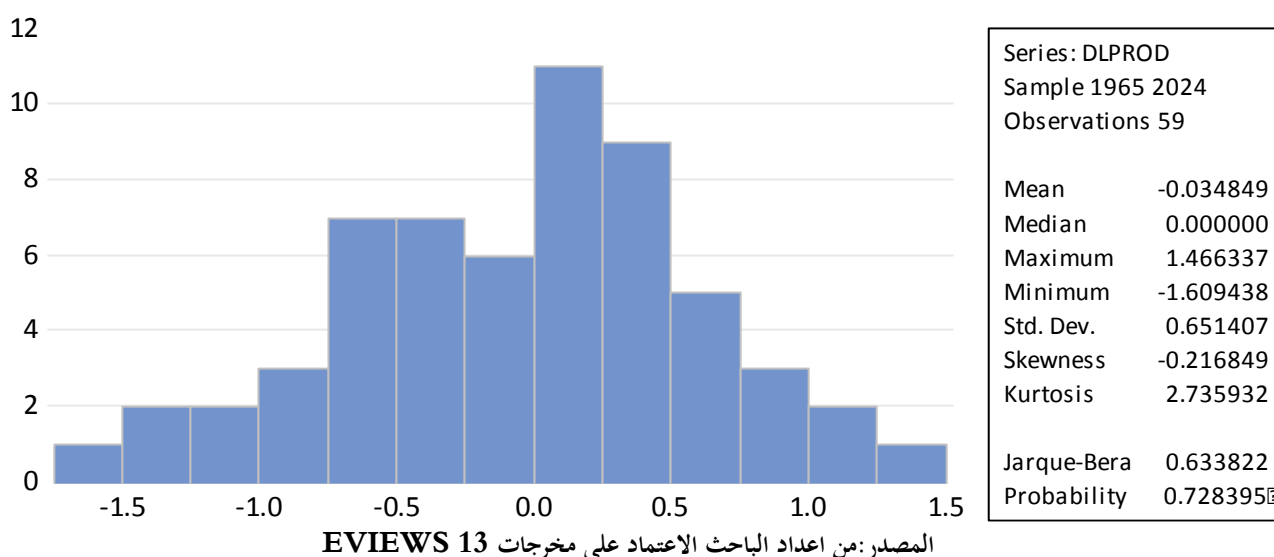
أولاً: مرحلة التعرف

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

بعد التأكد من استقرار السلسلة الزمنية DLPROD، تبدأ الخطوة الأولى في منهجية بوكس-جينكنز (Box-Jenkins)، والمتمثلة في مرحلة التعرف، حيث يتم تحديد النماذج الملائمة لتطبيقها على السلسلة الزمنية المستقرة.

1- اختبار التوزيع الطبيعي لسلسلة DLPROD :

الشكل رقم (76) البيانات الإحصائية للسلسلة DLPROD



من خلال الشكل أعلاه، نلاحظ أن قيمة احتمالية اختبار Jarque-Bera بلغت حوالي 0.728، وهي

أكبر من مستوى الدلالة 5%. وعليه، يمكن استنتاج أن السلسلة الزمنية DLPROD تتبع توزيعاً طبيعياً.

2- تحليل دالة الارتباط الذاتي والجزئي لسلسلة DLPROD

الشكل رقم (77): دالة الارتباط الذاتي والجزئي لسلسلة DLPROD

Date: 09/07/25 Time: 20:20

Sample (adjusted): 1966 2024

Included observations: 59 after adjustments

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1 -0.330	-0.330	6.7732	0.009
		2 0.034	-0.084	6.8462	0.033
		3 -0.155	-0.193	8.3854	0.039
		4 0.056	-0.070	8.5933	0.072
		5 -0.115	-0.159	9.4765	0.092
		6 0.161	0.049	11.244	0.081
		7 -0.038	0.023	11.342	0.124
		8 0.083	0.077	11.826	0.159
		9 -0.142	-0.063	13.269	0.151
		10 -0.090	-0.187	13.859	0.180
		11 0.059	-0.020	14.120	0.226
		12 -0.050	-0.124	14.314	0.281
		13 0.015	-0.095	14.332	0.351
		14 0.135	0.086	15.799	0.326
		15 -0.108	-0.064	16.746	0.334
		16 -0.093	-0.134	17.471	0.356
		17 0.024	-0.057	17.521	0.420
		18 -0.113	-0.208	18.643	0.414
		19 0.012	-0.219	18.656	0.479
		20 0.104	-0.079	19.647	0.480
		21 0.197	0.197	23.326	0.327
		22 -0.179	-0.082	26.434	0.234
		23 0.049	0.029	26.678	0.270
		24 -0.060	0.052	27.044	0.302

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EVIEWS

يتضح من الشكل أن معاملات الارتباط الذاتي البسيط (AC) تُظهر دلالة معنوية عند LAG 1، حيث يقع المعامل خارج حدود الثقة. وبالمثل، فإن معاملات الارتباط الذاتي الجزئي (PAC) تكشف عن قيمة معنوية واحدة عند LAG 1 أيضا.

وبناء على ذلك، يمكن استنتاج أن السلسلة الزمنية تميل إلى ملائمة نموذج من نوع ARIMA، حيث يمثل الجزء (AR) الانحدار الذاتي العلاقة بين القيم الحالية والسابقة، في حين يعكس الجزء (MA) المتوسطات المتحركة أثر الصدمات العشوائية.

ولتحديد النموذج الأمثل، تتم المفاضلة بين عدة نماذج محتملة وفقاً لعدد التأخيرات (LAGs) الظاهرة، وذلك باستخدام معايير المقارنة الإحصائية مثل AIC، BIC، HQ، بغرض اختيار الفجوة الزمنية المثلى وتقليل قيم تلك المعايير المذكورة سابقاً، كما هو موضح في الجدول و الشكل أذناه:

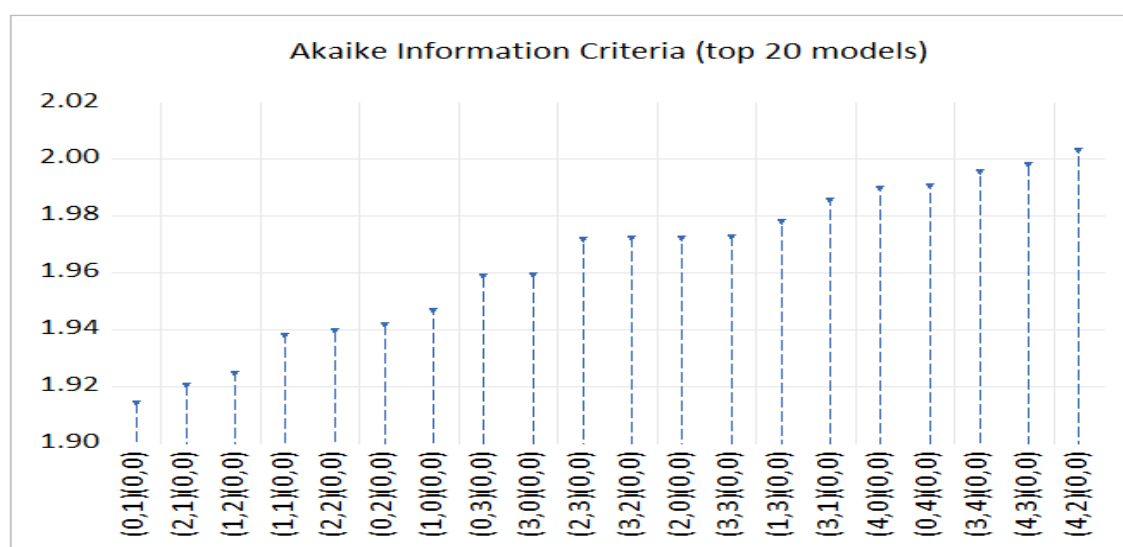
الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

الجدول رقم (18): اختبار النموذج الملائم حسب معايير المفاضلة

Model Selection Criteria Table				
Dependent Variable: D(LPROD)				
Date: 09/07/25 Time: 20:51				
Sample: 1965 2024				
Included observations: 59				
Model	LogL	AIC*	BIC	HQ
(0,1)(0,0)	-53.468471	1.914185	2.019823	1.955422
(2,1)(0,0)	-51.651984	1.920406	2.096469	1.989134
(1,2)(0,0)	-51.766905	1.924302	2.100364	1.993030
(1,1)(0,0)	-53.171248	1.938008	2.078858	1.992991
(2,2)(0,0)	-51.213689	1.939447	2.150722	2.021920
(0,2)(0,0)	-53.277559	1.941612	2.082462	1.996594
(1,0)(0,0)	-54.427792	1.946705	2.052342	1.987941
(0,3)(0,0)	-52.783762	1.958772	2.134834	2.027499
(3,0)(0,0)	-52.789504	1.958966	2.135029	2.027694
(2,3)(0,0)	-51.170885	1.971894	2.218382	2.068113
(3,2)(0,0)	-51.179518	1.972187	2.218675	2.068406
(2,0)(0,0)	-54.182594	1.972291	2.113141	2.027273
(3,3)(0,0)	-50.191550	1.972595	2.254295	2.082559
(1,3)(0,0)	-52.346302	1.977841	2.189116	2.060314
(3,1)(0,0)	-52.567038	1.985323	2.196598	2.067797
(4,0)(0,0)	-52.692290	1.989569	2.200844	2.072042
(0,4)(0,0)	-52.724319	1.990655	2.201930	2.073128
(3,4)(0,0)	-49.871908	1.995658	2.312570	2.119368
(4,3)(0,0)	-49.938507	1.997915	2.314828	2.121625
(4,2)(0,0)	-51.093124	2.003157	2.284857	2.113121
(2,4)(0,0)	-51.094790	2.003213	2.284913	2.113178
(1,4)(0,0)	-52.344710	2.011685	2.258173	2.107904
(4,1)(0,0)	-52.567038	2.019222	2.265709	2.115440
(0,0)(0,0)	-57.924430	2.031337	2.101762	2.058828
(4,4)(0,0)	-50.268300	2.042993	2.395118	2.180449

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

الشكل رقم (78): المقارنة البيانية بين النماذج وفق قيم معيار أكايكي (AIC)



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

الأشكال المعروضة تمثل مرحلة أساسية في عملية اختيار النموذج الأمثل للسلاسل الزمنية بالاعتماد على نماذج ARIMA. يوضح الشكل الأول (الجدول) نتائج تقدير مجموعة من النماذج المختلفة باعتماد تركيبات متعددة للمعاملات (p, d, q) . وقد تضمن الجدول قيم دالة اللوغاريتم العظمى (LogL)، إضافة إلى معايير المفاضلة الإحصائية الثلاثة: معيار أكايكي (AIC)، معيار شوارتز (BIC)، ومعيار هانن-كوين (HQ)، وتعد هذه المعايير أدوات أساسية للمفاضلة بين النماذج، حيث إن انخفاض قيمتها يُشير إلى تحقيق توازن أفضل بين جودة الملاءمة وبساطة النموذج.

ومن خلال النتائج يتضح أن النموذج $(0, 1)(0, 0)$ يحقق أدنى قيمة لمعيار AIC وأعلى قيمة لـ LogL، مما يجعله النموذج الأكثر ملاءمة بين النماذج المرشحة.

أما الشكل الثاني فيعرض أفضل عشرين نموذجاً وفق معيار أكايكي (AIC). إذ يوضح المحور الأفقي النماذج المختلفة، بينما يُمثل المحور العمودي قيم AIC الخاصة بها. ويلاحظ أن النموذج الأول $(0, 1)(0, 0)$ يحقق القيمة الأدنى لمعيار AIC، الأمر الذي يدعم النتائج المستخلصة من الجدول.

وبناء على ما سبق، يمكن الاستنتاج أن النموذج $ARIMA(0, 1, 0)$ هو الخيار الأنسب لتفسير السلسلة

الزمنية قيد الدراسة والتنبؤ بتطوراتها المستقبلية، لكونه يحقق أدنى قيمة لمعايير المفاضلة الإحصائية.

ثانياً: مرحلة التقدير

بعد تحديد النموذج الأمثل و الأكثر ملاءمة واستخلاص قيمتي (p, q) ، تأتي المرحلة التالية والمتمثلة في تقدير النموذج وشرح نتائجه على النحو الآتي:

الجدول رقم (19): تقدير النموذج $ARIMA(0.1.1)$

Dependent Variable: D(LPROD)
Method: ARMA Maximum Likelihood (BFGS)
Date: 09/08/25 Time: 21:50
Sample: 1966 2024
Included observations: 59
Convergence achieved after 3 iterations
Coefficient covariance computed using outer product of gradients

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.042789	0.043838	-0.976075	0.3332
MA(1)	-0.454611	0.128750	-3.530956	0.0008
SIGMASQ	0.357253	0.058988	6.056355	0.0000
R-squared	0.143562	Mean dependent var	-0.034849	
Adjusted R-squared	0.112975	S.D. dependent var	0.651407	
S.E. of regression	0.613508	Akaike info criterion	1.914185	
Sum squared resid	21.07794	Schwarz criterion	2.019823	
Log likelihood	-53.46847	Hannan-Quinn criter.	1.955422	
F-statistic	4.693556	Durbin-Watson stat	1.889741	
Prob(F-statistic)	0.013046			
Inverted MA Roots	.45			

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EVIEWS

وبناء على الجدول رقم (19)، يمكن صياغة معادلة النموذج على النحو الآتي:

$$DLPROD = -0.042789 - 0.454611 e_{t-1} + \varepsilon_t$$

ثالثاً: مرحلة الاختبار و التشخيص

تهدف هذه الخطوة إلى فحص مدى قبول النموذج المحدد بشكل نهائي، وذلك عبر إجراء اختبارات متنوعة تساعد على التحقق من دقته وصلاحيته للتنبؤ.

- 1- اختبار المعنوية الكلية: يتضح لنا أن القيمة الحرجة لاختبار فيشر جاءت أقل من مستوى المعنوية 5%، مما يدل على أن النموذج ذو دلالة إحصائية، وبالتالي يتم رفض فرضية العدم وقبول الفرضية البديلة التي تؤكد معنوية النموذج.
- 2- اختبار معامل التحديد: يظهر أن القدرة التفسيرية للنموذج بلغت 14.35%، وهي نسبة مقبولة، ، في حين تعود النسبة المتبقية البالغة 85.65% إلى عوامل أخرى لم يشملها النموذج.
- 3- تحليل دالة الارتباط الذاتي البسيط والجزئي لسلسلة البواقي: في هذه المرحلة يتم فحص دالتي الارتباط الذاتي البسيط والجزئي الخاصة بسلسلة البواقي بغرض التأكد من استقرارها. فإذا كانت جميع معاملات الارتباط الذاتي محصورة داخل حدود الثقة، تُعد السلسلة مستقرة. أما إذا تجاوزت هذه القيم حدود الثقة، فإن ذلك يدل على عدم استقرار السلسلة، مما يشير إشكالاً حول ملائمة النموذج الذي جرى اعتماده مسبقاً.

الشكل رقم (79): دالة الارتباط الذاتي البسيط والجزئي للسلسلة البوافي

Date: 09/08/25 Time: 22:31
Sample (adjusted): 1966 2024
Q-statistic probabilities adjusted for 1 ARMA term

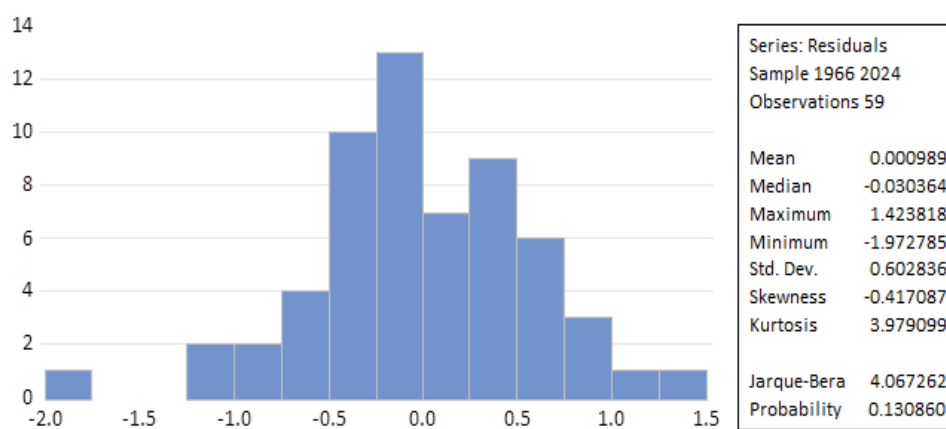
Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1	0.033	0.033	0.0668
		2	-0.019	-0.020	0.0898
		3	-0.168	-0.167	1.9139
		4	0.005	0.015	1.9153
		5	-0.036	-0.044	2.0029
		6	0.146	0.125	3.4539
		7	0.021	0.014	3.4838
		8	0.039	0.032	3.5927
		9	-0.187	-0.153	6.1127
		10	-0.150	-0.145	7.7621
		11	-0.006	0.017	7.7653
		12	-0.031	-0.111	7.8367
		13	0.026	-0.006	7.8895
		14	0.071	0.056	8.2880
		15	-0.135	-0.143	9.7895
		16	-0.179	-0.143	12.486
		17	-0.097	-0.087	13.300
		18	-0.128	-0.207	14.736
		19	0.049	-0.057	14.950
		20	0.185	0.133	18.113
		21	0.215	0.200	22.493
		22	-0.122	-0.125	23.931
		23	-0.008	0.096	23.937
		24	-0.031	0.019	24.035

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EViews

استنادا إلى الشكل المبين أعلاه، يتضح أن سلسلة البوافي مستقرة، حيث إن معاملات الارتباط الذاتي تقع جميعها داخل حدود الثقة. كما أن القيمة الاحتمالية عند الفجوة الزمنية $k=24$ جاءت أكبر من مستوى الدلالة 5%، مما يشير إلى أن سلسلة البوافي تتسم بتباين ثابت.

4- اختبار التوزيع الطبيعي لسلسلة البوافي: من خلال الشكل الموضح أدناه، نلاحظ أن قيمة احتمالية اختبار جاك-بيرا تساوي 0.130860، وهي تفوق مستوى المعنوية 0.05. وبناءً على ذلك، يمكن استنتاج أن بوافي النموذج تتبع توزيعًا طبيعيًا. ويؤكد هذا الاستنتاج أن النموذج المقدر مناسب لتنبؤ بالقيم المستقبلية لإنتاج الطاقة الكهربائية.

الشكل رقم (80) اختبار التوزيع الطبيعي لسلسلة البواقي



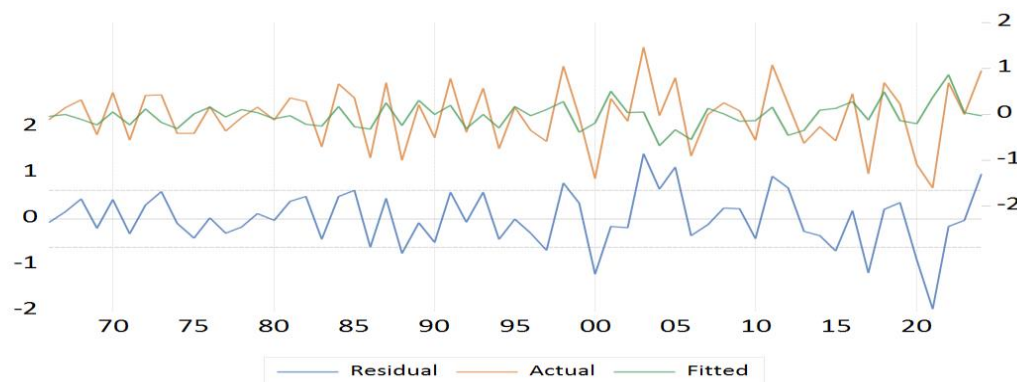
المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

رابعا: مرحلة التنبؤ

بعد استكمال عملية تشخيص واختبار النموذج المقدر $ARIMA(0,1,1)$ ، تم الانتقال إلى مرحلة التنبؤ،

وهي المرحلة النهائية ضمن خطوات منهجية بوكس-جنكينز، حيث تهدف إلى تقدير القيم المستقبلية المتوقعة لإنتاج الطاقة الكهربائية.

الشكل رقم (81) السلسلة الحقيقية والمتوقعة وسلسلة البواقي لكمية المنتجة من الطاقة الكهربائية

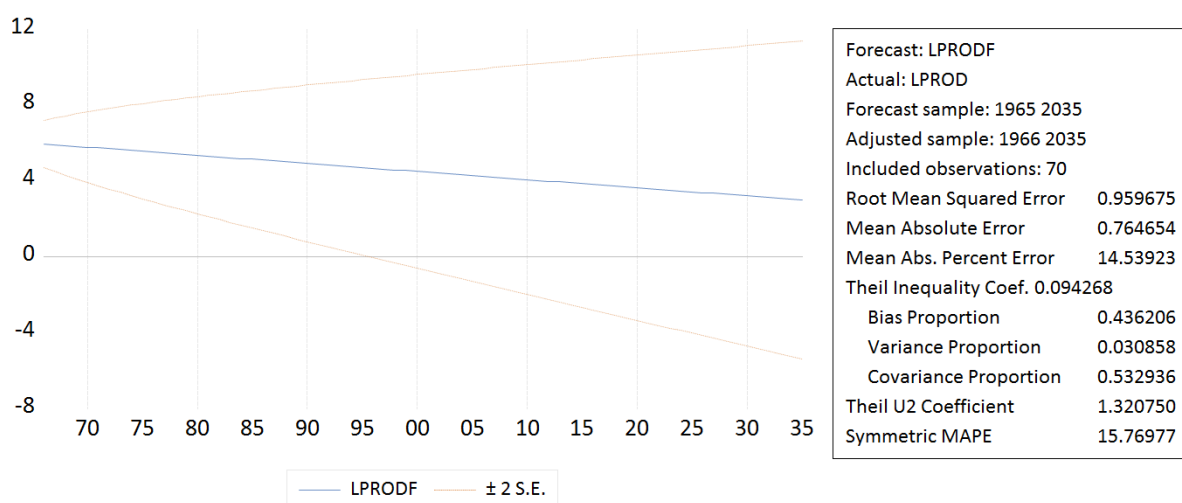


المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

يوضح الشكل السابق عرض السلسلة الأصلية مع القيم المتوقعة إضافة إلى سلسلة البواقي، حيث نلاحظ أن

القيم المتوقعة تسير بشكل متقارب مع مسار السلسلة الأصلية، وهو ما يعكس كفاءة النموذج ودقته في عملية التنبؤ.

الشكل الرقم (82): تمثيل البياني للسلسلة المتنبأ به



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

يبين الشكل أعلاه مخرجات التنبؤ لسلسلة الإنتاج (LPRODF) مقارنة بالقيم الفعلية (LPROD) خلال الفترة 1965–2035. يظهر المنحنى الأزرق اتجاهاً تنازلياً طفيفاً مع حدود ثقة $\pm 2 \text{ S.E.}$ ، ما يشير إلى وجود تراجع تدريجي في القيم المتوقعة مستقبلاً. أما من حيث جودة النموذج، فقد بلغت قيمة الجذر التربيعي لمتوسط الخطأ (RMSE) حوالي 0.95، في حين بلغ متوسط الخطأ المطلق (MAE) نحو 0.74، ومتوسط الخطأ النسبي المطلق (MAPE) حوالي 14.53%، وهي نسبة مقبولة نسبياً وتدل على دقة جيدة للتنبؤ. كما أن معامل عدم المساواة لـ Theil (0.094) منخفض مما يعكس قدرة مناسبة للنموذج في تقدير السلسلة. وتحليل مكونات معامل Theil، يتبين أن الأخطاء تعود بدرجة أكبر إلى التباين المشترك (0.53)، مع مساهمة محدودة لكل من الانحياز (0.43) والتباين (0.03). أما معامل Theil U2 (1.32) فيشير إلى أن أداء النموذج قريب من النموذج المرجعي البسيط لكنه لا يتفوق عليه بشكل واضح. بصفة عامة، يظهر الشكل أن النموذج يوفر توقعات مقبولة على المدى الطويل، حيث تظل القيم المستقبلية ضمن حدود الثقة، ما يعكس موثوقية نسبية في تقدير الاتجاه العام لإنتاج الطاقة حتى سنة 2035. استبدال كلمات في محاكاة السلسلة.

الجدول رقم (20): القيم التنبؤية لإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية

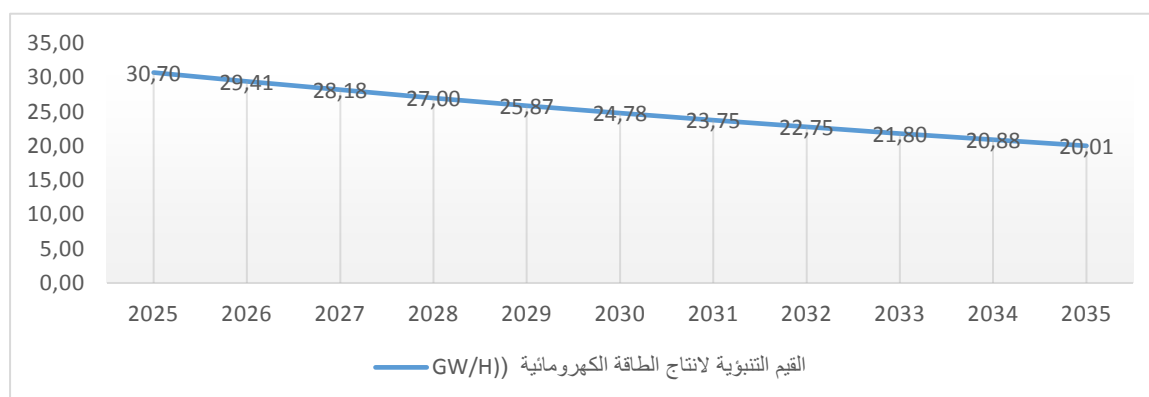
2035

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

السنوات	القيم التنبؤية لإنتاج الطاقة الكهربائية (GW/H)
2025	30.69530988182616
2026	29.40958453270644
2027	28.17771398028801
2028	26.99744242466018
2029	25.86660855393463
2030	24.78314158645366
2031	23.74505747877724
2032	22.75045529250499
2033	21.79751371327997
2034	20.88448771560005
2035	20.00970536732917

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

الشكل الرقم (83): القيم التنبؤية لإنتاج الطاقة الكهربائية (GW/H)



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EXCEL

يُظهر الجدول رقم (20) القيم التنبؤية لإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة الممتدة من سنة

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

2025 إلى غاية 2035، حيث يُلاحظ وجود منحى تنازلي تدريجي في حجم الإنتاج، إذ يتراجع من حوالي 30.69 GWh سنة 2025 ليصل إلى قرابة 20.01 GWh فقط في أفق سنة 2035. هذا التراجع يعكس بوضوح محدودية الموارد المائية المتاحة لإنتاج الكهرباء، إضافة إلى التأثيرات المتزايدة للتغيرات المناخية التي تقلص من وفرة السدود والأنهار القابلة للاستغلال الطاقوي.

من منظور استراتيجي، فإن هذا الانخفاض يتماشى مع التوجهات الوطنية في إطار أهداف التحول الطاقوي، حيث لم تعد الطاقة الكهربائية خياراً أساسياً لتغطية الطلب المتزايد على الكهرباء، بل أصبحت تشكل مورداً مكملًا ضمن مزيج طاقي أكثر تنوعاً، يعتمد بالدرجة الأولى على الطاقات المتجددة الأخرى كالطاقة الشمسية والرياح. وبذلك، فإن التراجع الكهربائي لا يُعتبر عائقاً بقدر ما يُمثل دافعاً لتسريع الاستثمار في الطاقات النظيفة الأكثر استدامة والمتوفرة بوفرة في الجزائر، خصوصاً الطاقة الشمسية التي تُعد ميزة تنافسية عالمية للبلاد.

اقتصادياً، فإن انخفاض الإنتاج الكهربائي قد تكون له انعكاسات مزدوجة. فمن جهة، قد يؤدي إلى زيادة الأعباء على الشبكة الكهربائية الوطنية إذا لم يتم تعويضه بمصادر بديلة، مما يرفع من تكاليف التوليد ويؤثر على أسعار الطاقة. ومن جهة أخرى، يُمكن أن يكون هذا التراجع فرصة لإعادة توجيه الاستثمارات نحو مشاريع كبرى في الطاقات المتجددة، وهو ما يُسهم في خلق مناصب شغل جديدة، تنويع الاقتصاد الوطني، وتقليل التبعة للمحروقات. كما أن تعزيز استغلال الطاقات البديلة سيساعد الجزائر على الوفاء بالتزاماتها الدولية في مجال خفض الانبعاثات الكربونية وتحقيق التنمية المستدامة.

وعليه، يمكن القول إن الأرقام المتوقعة لإنتاج الطاقة الكهربائية خلال الفترة (2025-2035) تحمل دلالات مهمة، فهي تُبرز محدودية هذا المورد في الأجل الطويل، لكنها في الوقت ذاته تفتح آفاقاً واسعة لتحجيد التحول الطاقوي المنشود، بما يعزز مكانة الجزائر كفاعل إقليمي في مجال الطاقات المتجددة.

الفرع الثاني: استخدام منهجية بوكس-جينكنز (Box-Jenkins) للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية

لتطبيق منهجية بوكس-جينكنز (Box-Jenkins) على البيانات محل الدراسة، يتوجب المرور بعدة مراحل

أساسية، يمكن تلخيصها في النقاط التالية:

أولاً: مرحلة التعرف

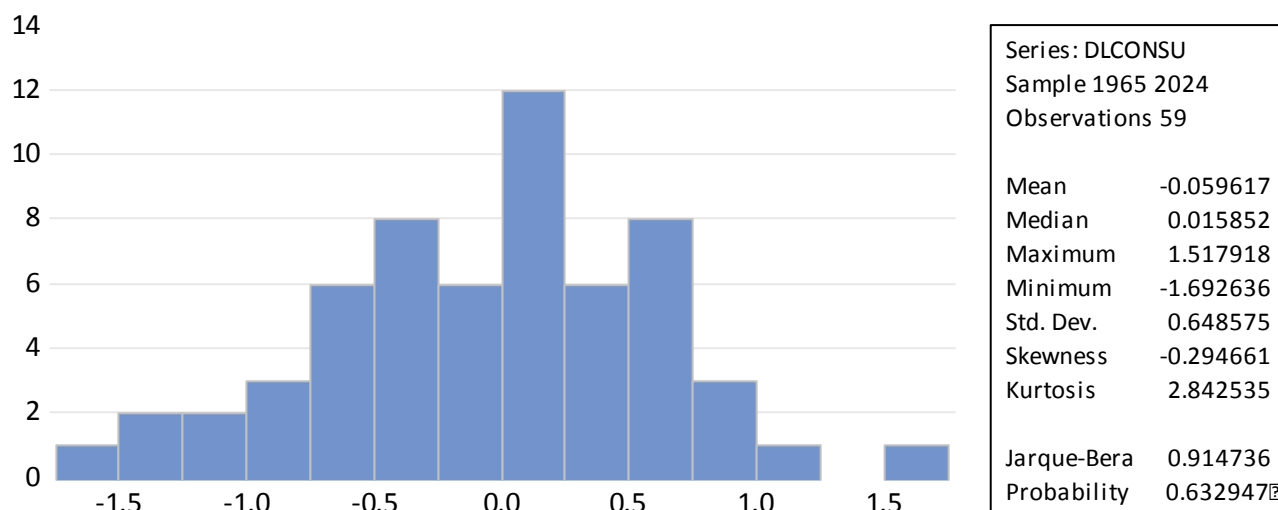
بعد التحقق من استقرار السلسلة الزمنية DLCONSUS، تنطلق الخطوة الأولى ضمن منهجية بوكس-جينكنز

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

(Box-Jenkins)، والمتمثلة في مرحلة التعرف، حيث يتم خلالها تحديد النماذج الأنسب لتطبيقها على السلسلة الزمنية المستقرة.

1- اختبار التوزيع الطبيعي لسلسلة DLCONSUS :

الشكل رقم (84) البيانات الإحصائية للسلسلة DLCONSUS



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

استنادا إلى الشكل أعلاه، يتبين أن قيمة احتمالية اختبار Jarque-Bera تقدر بحوالي 0.632، وهي تفوق

مستوى الدلالة البالغ 5%. وبناءً على ذلك، يمكن الاستنتاج أن السلسلة الزمنية DLCONSUS تتبع توزيعاً طبيعياً.

2- تحليل دالة الارتباط الذاتي والجزئي لسلسلة DLCONSUS

الشكل رقم (85): دالة الارتباط الذاتي والجزئي لسلسلة DLCONS

Date: 09/10/25 Time: 18:54

Sample (adjusted): 1966 2024

Included observations: 59 after adjustments

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob	
		1	-0.277	-0.277	4.7470	0.029
		2	-0.086	-0.176	5.2113	0.074
		3	-0.146	-0.249	6.5807	0.087
		4	0.058	-0.103	6.7991	0.147
		5	-0.038	-0.132	6.8958	0.229
		6	0.128	0.042	8.0106	0.237
		7	-0.051	-0.015	8.1910	0.316
		8	0.035	0.040	8.2762	0.407
		9	-0.079	-0.028	8.7282	0.463
		10	-0.081	-0.138	9.2075	0.513
		11	0.053	-0.036	9.4177	0.583
		12	-0.004	-0.091	9.4187	0.667
		13	-0.059	-0.150	9.6897	0.719
		14	0.170	0.100	12.004	0.606
		15	-0.162	-0.131	14.139	0.515
		16	0.059	0.014	14.430	0.567
		17	-0.074	-0.076	14.895	0.603
		18	-0.157	-0.325	17.048	0.520
		19	0.090	-0.133	17.769	0.538
		20	0.089	-0.158	18.492	0.555
		21	0.164	0.143	21.047	0.456
		22	-0.146	-0.071	23.120	0.395
		23	-0.008	0.002	23.127	0.453
		24	-0.012	0.089	23.141	0.511

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EVIEWS

من خلال بيانات الجدول، يتضح أن معامل الارتباط الذاتي (AC) ومعامل الارتباط الذاتي الجزئي (PAC) عند التأخر الأول (LAG 1) يظهران دلالة معنوية، حيث يقع المعامل خارج حدود الثقة، كما أن قيمة الاحتمال (Prob) المرتبطة بإحصائية Q-Stat في نفس التأخر أقل من 5%، مما يؤكد معنويته. أما بقية الفجوات الزمنية (LAGs) فلا تُظهر دلالة معنوية، إذ أن معظم قيم الاحتمال تتجاوز مستوى 5%.

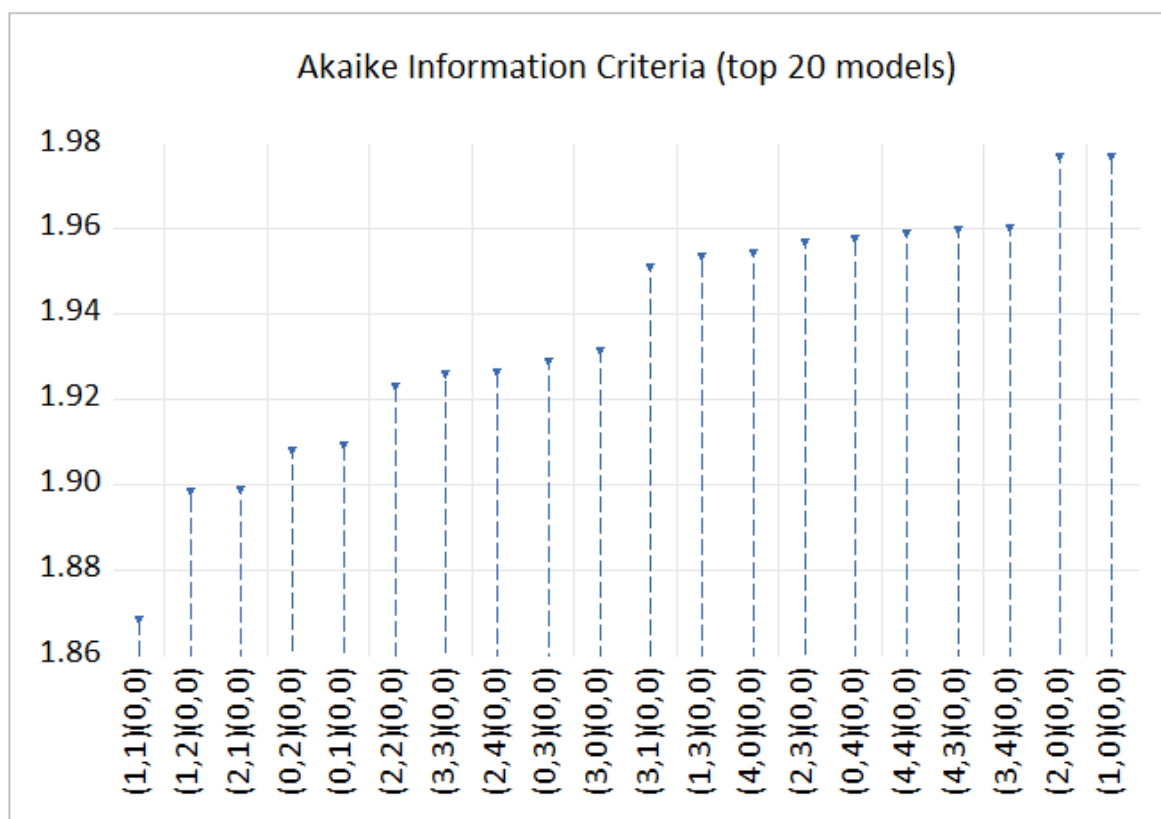
وبناء على ذلك، يمكن استنتاج أن السلسلة الزمنية تميل إلى ملائمة نموذج من نوع ARIMA، حيث يشير الجزء AR إلى العلاقة بين القيم الحالية والسابقة، بينما يعكس الجزء MA أثر الصدمات العشوائية. ولأجل تحديد النموذج الأمثل، تتم المفاضلة بين عدة نماذج محتملة وفقاً لعدد الفجوات الزمنية الظاهرة في الجدول، وذلك بالاعتماد على معايير المقارنة الإحصائية مثل AIC، BIC، HQ، بهدف الوصول إلى الصيغة الأكثر ملائمة والتي تحقق أقل القيم لتلك المعايير، وهذا ما يؤكد الجدول و الشكل أذناه:

الجدول رقم (21): اختبار النموذج الملائم حسب معايير المفاضلة

Model Selection Criteria Table				
Dependent Variable: D(LCONSU)				
Date: 09/10/25 Time: 19:00				
Sample: 1965 2024				
Included observations: 59				
Model	LogL	AIC*	BIC	HQ
(1,1)(0,0)	-51.108214	1.868075	2.008925	1.923057
(1,2)(0,0)	-51.003199	1.898414	2.074476	1.967141
(2,1)(0,0)	-51.008499	1.898593	2.074656	1.967321
(0,2)(0,0)	-52.279085	1.907766	2.048616	1.962748
(0,1)(0,0)	-53.324315	1.909299	2.014936	1.950535
(2,2)(0,0)	-50.730895	1.923081	2.134356	2.005554
(3,3)(0,0)	-48.811844	1.925825	2.207525	2.035789
(2,4)(0,0)	-48.820564	1.926121	2.207821	2.036085
(0,3)(0,0)	-51.898859	1.928775	2.104837	1.997503
(3,0)(0,0)	-51.976922	1.931421	2.107484	2.000149
(3,1)(0,0)	-51.548482	1.950796	2.162071	2.033269
(1,3)(0,0)	-51.622601	1.953308	2.164583	2.035782
(4,0)(0,0)	-51.655677	1.954430	2.165705	2.036903
(2,3)(0,0)	-50.728079	1.956884	2.203372	2.053103
(0,4)(0,0)	-51.753229	1.957737	2.169012	2.040210
(4,4)(0,0)	-47.785967	1.958846	2.310971	2.096302
(4,3)(0,0)	-48.806521	1.959543	2.276456	2.083253
(3,4)(0,0)	-48.820286	1.960010	2.276922	2.083719
(2,0)(0,0)	-54.312288	1.976688	2.117538	2.031670
(1,0)(0,0)	-55.320576	1.976969	2.082606	2.018205
(3,2)(0,0)	-51.523590	1.983850	2.230338	2.080069
(4,1)(0,0)	-51.538151	1.984344	2.230832	2.080563
(1,4)(0,0)	-51.728553	1.990798	2.237286	2.087017
(4,2)(0,0)	-51.424230	2.014381	2.296081	2.124345
(0,0)(0,0)	-57.667410	2.022624	2.093049	2.050115

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

الشكل رقم (86): المقارنة البيانية بين النماذج وفق قيم معيار أكايكي (AIC)



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

تمثل النتائج الواردة في الجدول والشكل مرحلة محورية في تحديد النموذج الأمثل للسلاسل الزمنية باستخدام نماذج ARIMA. حيث يوضح الجدول قيم تقدير مجموعة من النماذج ذات التركيبات المختلفة للمعاملات (p, d, q) ، متضمنا كلا من قيمة اللوغاريتم العظمى (LogL) ومعايير المقارنة الإحصائية الثلاثة: أكايكي (AIC)، شوارز (BIC)، وهانن-كوين (HQ). وتُعد هذه المؤشرات أدوات أساسية في المفاضلة بين النماذج، إذ أن انخفاض قيمها يشير إلى تحقيق توازن أمثل بين جودة الملاءمة وبساطة النموذج.

يتضح من نتائج الجدول أن النموذج $(1,1)(0,0)$ يحقق أدنى قيمة لمعيار أكايكي ($AIC = 1.868$) إضافةً إلى قيمة مرتفعة نسبياً للوغاريتم العظمى ($LogL = -51.108$)، مما يجعله الأكثر كفاءة مقارنةً بالنماذج الأخرى. أما الشكل الثاني، الذي يعرض أفضل عشرين نموذجاً وفق معيار أكايكي، فيبين بوضوح أن النموذج $(1,1)(0,0)$ يحتل المرتبة الأولى بتحقيقه أقل قيمة لـ AIC، يليه مباشرةً النموذج $(1,2)(0,0)$ ثم بقية النماذج بترتيب تصاعدي.

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

وبناء على ما سبق، يمكن الاستنتاج أن النموذج الأمثل لتفسير السلسلة الزمنية المدروسة والتنبؤ بمسارها المستقبلي هو $ARIMA(1,1,1)$ ، لكونه النموذج الذي حقق أفضل أداء إحصائي وفق معايير المقارنة المعتمدة.

ثانياً: مرحلة التقدير

بعد تحديد النموذج الأنسب واستخلاص القيمتين (p, q) ، تأتي الخطوة التالية المتمثلة في تقدير النموذج وشرح نتائجه وتفسيرها على النحو الآتي:

الجدول رقم (22): تقدير النموذج $ARIMA(1.1.1)$

Dependent Variable: D(LCONSU)				
Method: ARMA Maximum Likelihood (OPG - BHHH)				
Date: 09/10/25 Time: 19:12				
Sample: 1966 2024				
Included observations: 59				
Failure to improve objective (non-zero gradients) after 12 iterations				
Coefficient covariance computed using outer product of gradients				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	-0.060637	0.010419	-5.819942	0.0000
AR(1)	0.536277	0.147689	3.631120	0.0006
MA(1)	-1.000000	790.1573	-0.001266	0.9990
SIGMASQ	0.315017	5.578232	0.056472	0.9552
R-squared	0.238207	Mean dependent var	-0.059617	
Adjusted R-squared	0.196654	S.D. dependent var	0.648575	
S.E. of regression	0.581315	Akaike info criterion	1.868075	
Sum squared resid	18.58598	Schwarz criterion	2.008925	
Log likelihood	-51.10821	Hannan-Quinn criter.	1.923057	
F-statistic	5.732690	Durbin-Watson stat	2.072412	
Prob(F-statistic)	0.001736			
Inverted AR Roots	.54			
Inverted MA Roots	1.00			

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EVIEWS

استناداً إلى الجدول رقم (22)، تُكتب معادلة النموذج على النحو الآتي:

$$DLCONSU = -0.060637 + 0.536277 DLCONSU_{t-1} - 1.000000 e_{t-1} + \varepsilon_t$$

ثالثاً: مرحلة الاختبار والتشخيص

ترمي هذه المرحلة إلى التحقق من مدى صلاحية النموذج المختار نهائياً، وذلك من خلال إجراء اختبارات مختلفة تساهم في تقييم دقته وملاءمته لأغراض التنبؤ.

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

1- اختبار المعنوية الكلية: ظهرت نتائج اختبار فيشر أن القيمة الاحتمالية $\text{Prob}(F\text{-statistic}) = 0.001736$ أقل من مستوى المعنوية 5%، مما يؤكد أن النموذج ذو معنوية إحصائية، وبالتالي يتم رفض فرضية العدم وقبول الفرضية البديلة الداعمة لصحة النموذج.

2- اختبار معامل التحديد: تُظهر النتائج أن النموذج يمتلك قدرة تفسيرية بلغت 23.82%، وهي نسبة يمكن اعتبارها مقبولة، في حين تُرجع النسبة المتبقية وقدرها 76.18% إلى عوامل أخرى لم يتضمنها النموذج.

3- تحليل دالة الارتباط الذاتي البسيط والجزئي لسلسلة البواقي: في هذه المرحلة يتم اختبار دالتي الارتباط الذاتي البسيط والجزئي الخاصة ببواقي النموذج للتحقق من مدى استقرارها. فإذا وقعت جميع معاملات الارتباط الذاتي ضمن حدود الثقة، فإن السلسلة تُعتبر مستقرة. أما في حال تجاوز بعض هذه المعاملات حدود الثقة، فهذا يشير إلى عدم استقرار السلسلة ويطرح تساؤلات حول مدى ملائمة النموذج المعتمد.

الشكل رقم (87): دالة الارتباط الذاتي البسيط والجزئي للسلسلة البواقي

Date: 09/10/25 Time: 19:45
Sample (adjusted): 1966 2024
Q-statistic probabilities adjusted for 2 ARMA terms

Autocorrelation	Partial Correlation	AC	PAC	Q-Stat	Prob
		1 -0.039	-0.039	0.0961	
		2 0.032	0.031	0.1624	
		3 -0.050	-0.048	0.3252	0.568
		4 0.082	0.078	0.7649	0.682
		5 -0.004	0.004	0.7662	0.858
		6 0.115	0.109	1.6602	0.798
		7 -0.045	-0.031	1.8029	0.876
		8 -0.012	-0.026	1.8126	0.936
		9 -0.130	-0.122	3.0203	0.883
		10 -0.143	-0.178	4.5254	0.807
		11 -0.033	-0.042	4.6067	0.867
		12 -0.081	-0.105	5.1118	0.884
		13 -0.118	-0.120	6.2080	0.859
		14 0.066	0.088	6.5519	0.886
		15 -0.203	-0.182	9.9226	0.700
		16 -0.034	-0.025	10.017	0.761
		17 -0.128	-0.129	11.411	0.723
		18 -0.169	-0.259	13.910	0.605
		19 0.063	0.037	14.264	0.648
		20 0.107	0.024	15.329	0.639
		21 0.173	0.220	18.154	0.512
		22 -0.074	-0.081	18.680	0.543
		23 0.023	0.001	18.732	0.602
		24 0.026	0.037	18.804	0.657

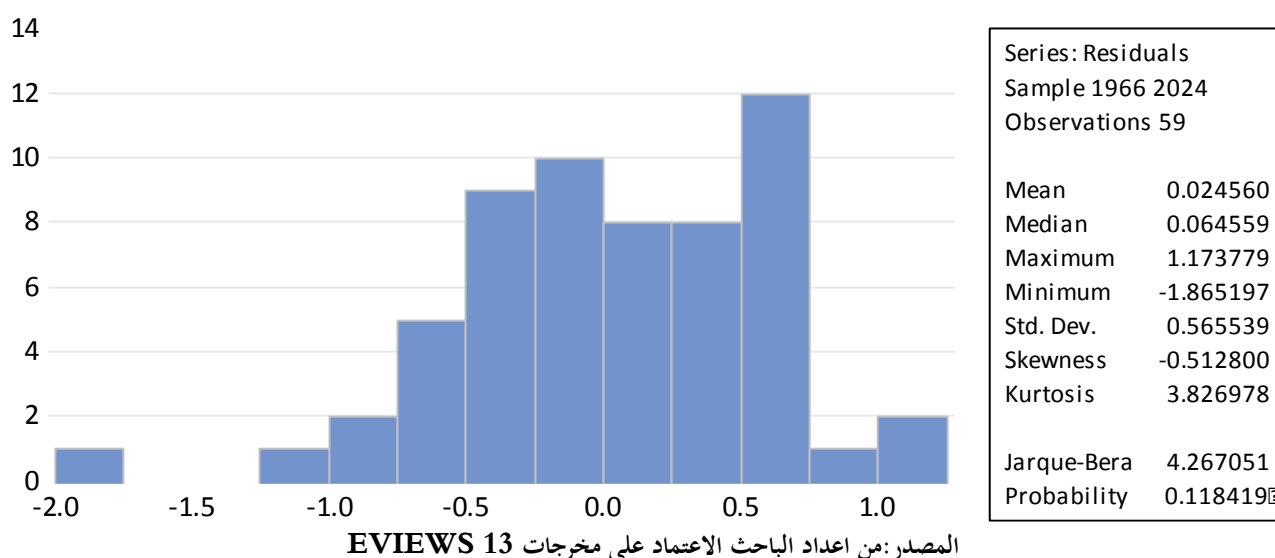
المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EViews

استنادا إلى الشكل أعلاه، يتبين أن سلسلة البواقي مستقرة، إذ تقع جميع معاملات الارتباط الذاتي ضمن حدود الثقة. كما أن القيمة الاحتمالية عند الفجوة الزمنية $k = 24$ تجاوزت مستوى الدلالة 5%، مما يدل على أن سلسلة البواقي تتسم بدرجة من الاستقرار وبأن تباينها ثابت.

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

4- اختبار التوزيع الطبيعي لسلسلة البواقي: يوضح الشكل أدناه أن القيمة الاحتمالية لاختبار جاك-بيرا بلغت 0.118419، وهي أعلى من مستوى الدلالة 0.05. وعليه يمكن الاستنتاج أن بواقي النموذج تتبع التوزيع الطبيعي، الأمر الذي يعزز صلاحية النموذج ويؤكد ملاءمته للتنبؤ بالقيم المستقبلية لإنتاج الطاقة الكهربائية.

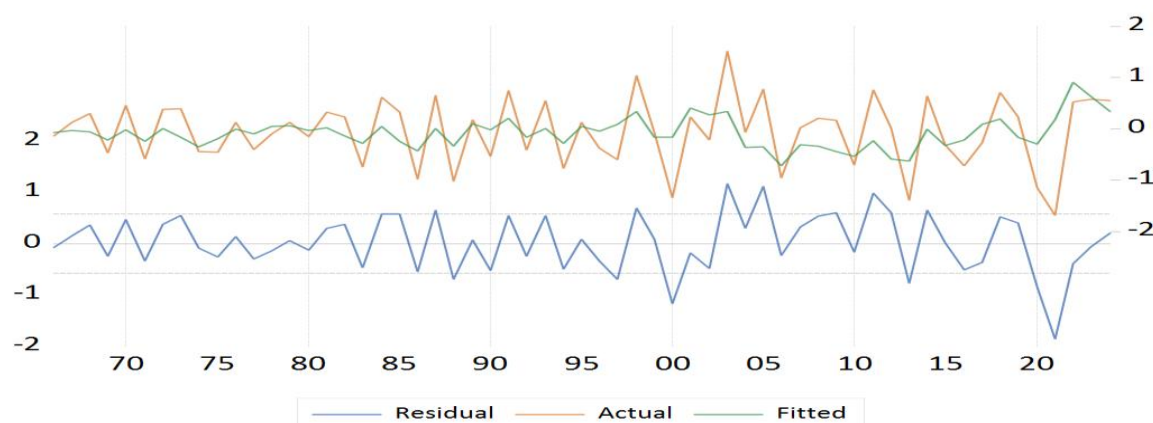
الشكل رقم (88) اختبار التوزيع الطبيعي لسلسلة البواقي



رابعا: مرحلة التنبؤ

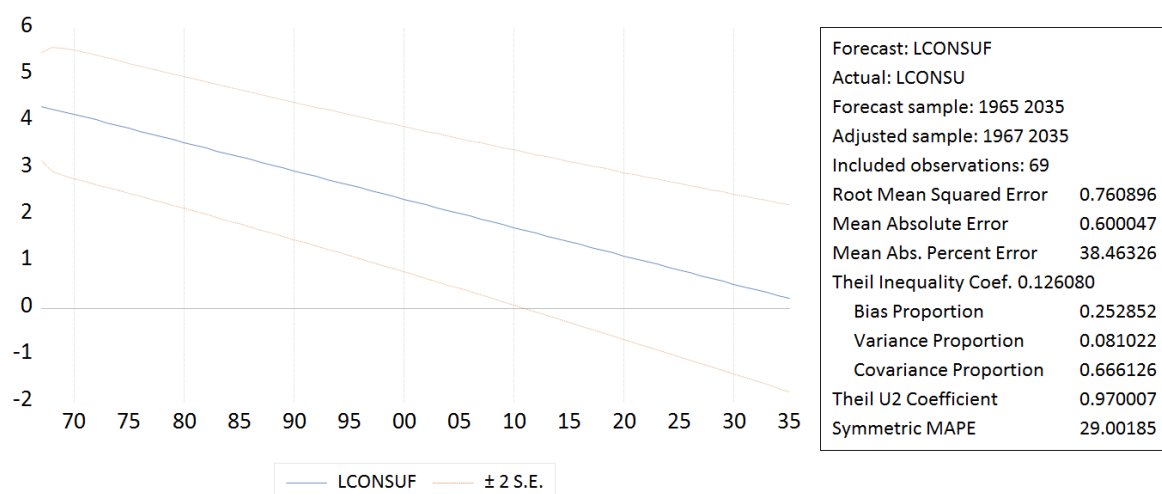
بعد الانتهاء من عملية تشخيص واختبار النموذج المقدر $ARIMA(1,1,1)$ ، تم الانتقال إلى مرحلة التنبؤ، التي تُعد الخطوة الأخيرة في منهجية بوكس-جنكينز، وتهدف إلى تقدير القيم المستقبلية المتوقعة لإنتاج الطاقة الكهربائية.

الشكل رقم (89) السلسلة الحقيقية والمتوقعة وسلسلة البواقي لكمية المستهلكة من الطاقة الكهربائية



يُبرز الشكل السابق تمثيل السلسلة الأصلية إلى جانب القيم المتوقعة وسلسلة البواقي، حيث يتضح أن القيم المتوقعة تتقارب بشكل ملحوظ مع مسار السلسلة الأصلية، مما يعكس فعالية النموذج ودقته في التنبؤ.

الشكل رقم (90): تمثيل البياني للسلسلة المتنبأ به



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

يبين الشكل أعلاه مخرجات التنبؤ الخاصة بسلسلة استهلاك الطاقة (LCONSUF) خلال الفترة

1965–2035، حيث يظهر المنحنى الأزرق اتجاهاً تنازلياً واضحاً مع فاصل ثقة عند حدود ± 2 S.E. يوضح الجدول المرافق مقاييس دقة التنبؤ، إذ بلغ الجذر التربيعي لمتوسط الخطأ (RMSE) حوالي 0.76 ومتوسط الخطأ المطلق (MAE) قرابة 0.60، بينما سجل متوسط الخطأ النسبي المطلق (MAPE) نحو 38.46%. كما أن معامل عدم المساواة لـ Theil كان منخفضاً (0.126) مما يدل على مقبولة النموذج في التقدير.

وتشير مكونات معامل Theil إلى أن الجزء الأكبر من الأخطاء يرجع إلى التباين المشترك

(Covariance proportion = 0.66)، بينما نسبة الانحياز كانت محدودة نسبياً (0.25) ونسبة التباين صغيرة (0.08). كذلك، فإن معامل (Theil U2) (0.97) قريب من الواحد، مما يعكس جودة توقعات النموذج مقارنةً بالمقارنة العشوائية.

بوجه عام، يوضح الشكل أن التنبؤات تتجه نحو انخفاض مطرد في القيم المستقبلية مع بقاء معظم التقديرات

ضمن حدود الثقة، مما يؤكد وجود اتجاه طويل المدى تنازلي في استهلاك الطاقة الكهربائية (أو المتغير المدروس) حتى آفاق سنة 2035.

الجدول رقم (23): القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية

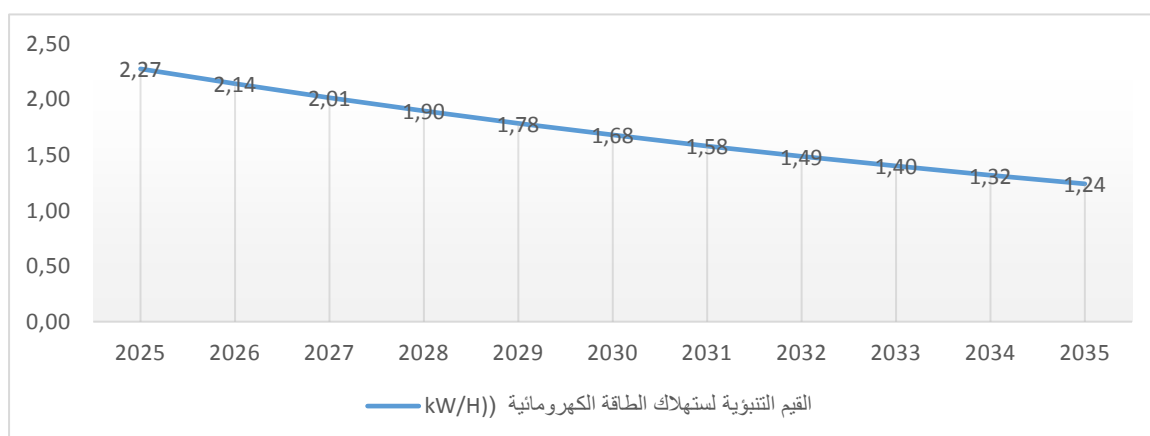
2035

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

السنوات	القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهربائية (KW/H)
2025	2.274160201346582
2026	2.140359388161561
2027	2.014430780988399
2028	1.895911216517264
2029	1.784364781773394
2030	1.679381210836472
2031	1.580574375889438
2032	1.487580867046837
2033	1.400058655739344
2034	1.317685836738409
2035	1.240159444194212

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

الشكل الرقم (91): القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهربائية (KW/H)



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EXCEL

يبين الجدول القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة 2025–2035، حيث تسجل

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر

الأرقام اتجاها تنازليا ملحوظا، إذ ينخفض الاستهلاك من حوالي 2.27 kWh في 2025 إلى نحو 1.24 kWh في 2035، أي بانخفاض يقارب 45% خلال عقد واحد.

هذا التراجع يعكس محدودية مساهمة الطاقة الكهرومائية في مزيج الطاقة الجزائري، نتيجة عدة عوامل موضوعية،

أهمها:

- ✓ القيود الطبيعية المرتبطة بشح الموارد المائية وتذبذب التساقطات، ما يقلل من قدرة التوسع في المشاريع الكهرومائية.
- ✓ أولوية الاستثمارات التي باتت تتجه نحو مصادر متجددة أخرى أكثر جدوى للجزائر مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، بما يتماشى مع إستراتيجية التحول الطاقوي.
- ✓ التحديات المناخية التي تؤثر على استقرار الموارد المائية وبالتالي على استدامة الإنتاج الكهرومائي.
- من منظور التحول الطاقوي، فإن هذه النتائج لا تعكس فشلاً بقدر ما تعكس إعادة هيكلة لمزيج الطاقة، حيث يتم تحرير حصة الكهرومائي لصالح الطاقات الشمسية والرياح، بما يسمح بالاستفادة المثلى من الموارد المتاحة. كما أن الانخفاض التدريجي لاستهلاك هذه الطاقة قد يحفز تسريع الاستثمارات في التكنولوجيا النظيفة الأكثر ملاءمة للبيئة الجغرافية للجزائر.
- أما على الصعيد الاقتصادي، فإن تراجع مساهمة الكهرومائي قد يحمل عدة انعكاسات:
- ✓ زيادة الضغط على الطاقات البديلة لتغطية الطلب المتنامي، ما يستدعي تكثيف الاستثمارات في الطاقة الشمسية والرياح والهيدروجين الأخضر.
- ✓ تحقيق وفورات مالية على المدى الطويل، حيث أن استغلال الطاقات الأكثر تنافسية سيخفض من تكاليف الإنتاج ويعزز من استقلالية الجزائر الطاقوية.
- ✓ تنويع الاقتصاد الوطني عبر خلق صناعات جديدة مرتبطة بتجهيزات وتقنيات الطاقات المتجددة، وبالتالي توفير مناصب شغل مستدامة.
- ✓ التقليل من المخاطر البيئية المرتبطة بالتغير المناخي، بما يعزز التزامات الجزائر ضمن الأجندة الدولية للانتقال الطاقوي.
- وعليه، فإن الأرقام التنبؤية الواردة في الجدول تمثل إشارة إستراتيجية على أن الدور الرئيسي للطاقة الكهرومائية في الجزائر سيتراجع تدريجياً، لتصبح مجرد عنصر تكميلي في مزيج الطاقة، بينما يُعاد توجيه السياسة الطاقوية نحو بدائل أكثر استدامة وفعالية، بما يخدم الأمن الطاقوي والاقتصادي للبلاد في أفق 2035.

المطلب الثالث: اعتماد أسلوب التمهيد الأسّي الثلاثي للتنبؤ بالطاقة الكهرومائية

يركز المطلب على اعتماد أسلوب التمهيد الأسّي الثلاثي (Holt-Winters) للتنبؤ بالطاقة الكهرومائية، باعتباره طريقة مناسبة للسلاسل التي تتضمن اتجاهًا عامًا، ويهدف إلى تقدير القيم المستقبلية بدقة من خلال الموازنة بين مكونات المستوى والاتجاه.

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

الفرع الأول: التنبؤ بإنتاج الطاقة الكهربائية باستخدام أسلوب التمهيد الأسّي الثلاثي (Holt-Winters) بدون مركبة موسمية.

من خلال دراسة خصائص السلسلة الزمنية لإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة الممتدة من 1965 إلى 2024، يتضح أنّ السلسلة تتضمن مكّون الاتجاه العام، وهو ما يتوافق مع شروط تطبيق أسلوب التمهيد الأسّي الثلاثي (Holt-Winters) في صورته الخالية من المركبة الموسمية. وبناءً على ذلك، تم تطبيق هذا الأسلوب باختبار مجموعة من معاملات التمهيد، واختيار تلك التي تحقق أقل قيمة لكلّ من مجموع مربعات الأخطاء والجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ، حيث قُدرت على النحو التالي:

$$\alpha=0.54, \beta=0, \gamma=0$$

وبالاعتماد على نموذج التمهيد الأسّي الثلاثي بدون مركبة موسمية، تكون معادلة التنبؤ كما يلي:

$$LPROD_{t+h}=3.507044-0.024292h$$

حيث:

$LPROD_{t+h}$: يمثّل كمية إنتاج الطاقة الكهربائية المتوقعة للفترة المستقبلية h ، التي تمتد من عام 2024 إلى غاية عام 2035.

أما المركبة الموسمية $St+h$ فهي غير مدرجة في النموذج، وهو ما توضحه النتائج البيانية أدناه.

الجدول رقم (24): نتائج تقدير نموذج هولت (Holt-Winters) بدون موسمية لسلسلة LPROD خلال الفترة (1965-2024).

Date: 09/15/25 Time: 14:29		
Sample: 1965 2024		
Included observations: 60		
Method: Holt-Winters No Seasonal		
Original Series: LPROD		
Forecast Series: LPROD_SM		
Parameters:	Alpha	0.5400
	Beta	0.0000
Sum of Squared Residuals		21.14439
Root Mean Squared Error		0.593638
<hr/>		
End of Period Levels:	Mean	3.507044
	Trend	-0.024292

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EVIEWS

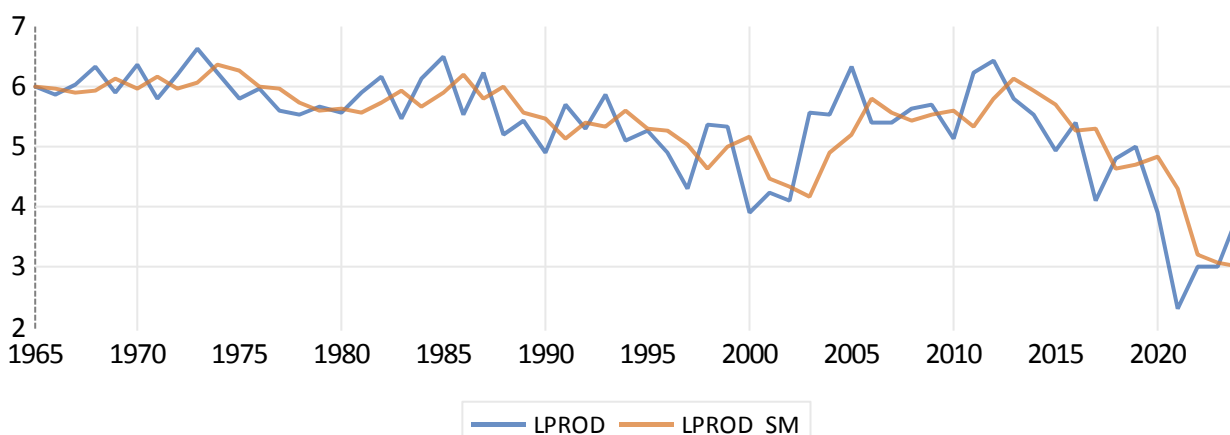
يوضح الجدول نتائج تطبيق نموذج Holt-Winters بدون موسمية على السلسلة الزمنية LPROD خلال

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

الفترة (1965–2024). حيث قُدِّر معامل التمهيد للمستوى (α) بـ 0.54، ما يعني أن النموذج أعطى وزناً متوسطاً للقيم الحالية مقارنة بالقيم السابقة. أما معامل الاتجاه (β) فقد بلغ 0.00، وهو ما يشير إلى أن النموذج لم يعتمد على مكوّن الاتجاه، واكتفى بمتابعة تطور المستوى فقط. من جهة أخرى، بلغ مجموع مربعات البواقي 21.14، بينما قُدِّرت قيمة جذر متوسط الخطأ المعياري بـ 0.59، وهي مؤشرات تعكس قدرة تفسيرية مقبولة للنموذج. كما أظهرت نتائج نهاية الفترة أن المستوى بلغ حوالي 3.51، في حين أن الاتجاه كان سالباً بقيمة -0.024، وهو ما يعكس وجود ميل طفيف نحو التراجع في السلسلة على المدى الطويل.

الشكل الرقم (92): السلسلة الاصلية والمتوقعة لكمية المنتجة من الطاقة الكهربائية

Forecast Comparison Graph



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

يوضح الشكل مقارنة بين القيم الفعلية لإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر (LPROD) والقيم المقدرة باستخدام نموذج التمهيد الأسّي الثلاثي بدون مركبة موسمية (LPROD_SM) خلال الفترة (1965–2024). ومن خلال المنحنيين، يمكن ملاحظة أن القيم المتنبأ بها تسير في مسار قريب من القيم الفعلية، مع قدرة واضحة للنموذج على تتبع الاتجاهات العامة للتقلبات صعوداً وهبوطاً. ورغم بعض الفوارق الطفيفة في بعض الفترات، إلا أنّ التطابق بين السلسلتين يعكس كفاءة مقبولة للنموذج في تمثيل ديناميكية السلسلة الزمنية والتنبؤ بمسارها المستقبلي.

الجدول رقم (25): القيم التنبؤية لإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية

2035

السنو	القيم التنبؤية لإنتاج الطاقة الكهربائية (GW/H)
2025	32,54914542

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

31,76797272	2026
31,00554801	2027
30,26142134	2028
29,53515354	2029
28,82631603	2030
28,13449046	2031
27,45926856	2032
26,80025185	2033
26,15705141	2034
25,52928763	2035

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

يبين الجدول رقم (25) القيم التنبؤية لإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة (2025–2035)، حيث يُلاحظ وجود اتجاه تنازلي واضح للإنتاج، إذ يتراجع من حوالي 32.5 GWh سنة 2025 إلى ما يقارب 25.5 GWh سنة 2035. ويعكس هذا المسار الانحداري استمرار الضغوط الطبيعية المرتبطة بتذبذب الموارد المائية، إلى جانب محدودية قدرات التوسع في المنشآت الكهربائية مقارنة بالطلب المتنامي على الطاقة.

هذا التراجع له دلالات مباشرة في إطار التحول الطاقوي الذي تبنته الجزائر. فمن جهة، يُبرز محدودية الرهان على الطاقة الكهربائية كمصدر رئيسي في مزيج الطاقات المتجددة على المدى المتوسط والبعيد، الأمر الذي يستدعي تعزيز الاستثمارات في مصادر بديلة أكثر استدامة مثل الطاقة الشمسية والرياح والهيدروجين الأخضر. ومن جهة أخرى، فإن الانخفاض المتوقع في الإنتاج الكهربائي قد يزيد من الضغوط على الاقتصاد الوطني، لاسيما في ظل تنامي الطلب الداخلي على الكهرباء وما يرافقه من تحديات تتعلق بالأمن الطاقوي.

اقتصاديا، فإن تراجع إنتاج الكهرباء الكهربائية قد يؤدي إلى ارتفاع الحاجة للاعتماد على مصادر أخرى – تقليدية أو متجددة – مما قد يترتب عنه ارتفاع تكاليف الإنتاج إذا لم يتم الإسراع في الانتقال إلى منظومة طاقوية متنوعة وفعّالة. كما يمكن أن يؤثر ذلك على أهداف الجزائر المتعلقة بتقليل الانبعاثات الكربونية، نظراً لتراجع دور أحد أهم

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

مصادر الطاقة النظيفة نسبياً. وبالتالي، يُعد هذا التراجع مؤشراً استراتيجياً على ضرورة تسريع وتيرة تنفيذ مشاريع الطاقات المتجددة، ليس فقط لتحقيق التوازن في العرض والطلب، ولكن أيضاً لتعزيز القدرة التنافسية للاقتصاد الوطني وضمان استدامة النمو على المدى الطويل.

الفرع الثاني: التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية وفق طريقة تمهيد الأسّي الثلاثي لـ holt-winters no seasonal

من خلال تحليل خصائص السلسلة الزمنية لاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة (1965–2024)، يتبين أن السلسلة تتسم بوجود مركبة الاتجاه العام، وهو ما يتوافق مع شروط تطبيق أسلوب التمهيد الأسّي الثلاثي (Holt-Winters) في صورته الحالية من المركبة الموسمية. وبناءً على ذلك، جرى اعتماد هذا الأسلوب بعد اختبار مجموعة من معاملات التمهيد واختيار القيم التي تحقق أدنى مستوى لكل من مجموع مربعات الأخطاء والجذر التربيعي لمتوسط مربع الخطأ، حيث كانت كما يلي:

$$\alpha=0.47, \beta=0, \gamma=0$$

وبالاستناد إلى نتائج النموذج، صيغت معادلة التنبؤ كما يلي:

$$LCONS_{t+h}=0.561790-0.052090h$$

بحيث يمثل $LCONS_{t+h}$: حجم استهلاك الطاقة الكهربائية المتوقع للفترة المستقبلية h ، الممتدة من سنة 2024 إلى سنة 2035. أما المركبة الموسمية $St+h$ فهي غير مدرجة في النموذج، وهو ما توضحه النتائج البيانية اللاحقة.

الجدول رقم (26): نتائج تقدير نموذج هولت (Holt-Winters بدون موسمية) لسلسلة LCONS خلال الفترة (1965–2024).

Date: 09/15/25 Time: 16:50		
Sample: 1965 2024		
Included observations: 60		
Method: Holt-Winters No Seasonal		
Original Series: LCONS		
Forecast Series: LCONSU_SM		
<hr/>		
Parameters:	Alpha	0.4700
	Beta	0.0000
Sum of Squared Residuals		21.00714
Root Mean Squared Error		0.591709
<hr/>		
End of Period Levels:	Mean	0.561790
	Trend	-0.052090
<hr/>		

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EVIEWS

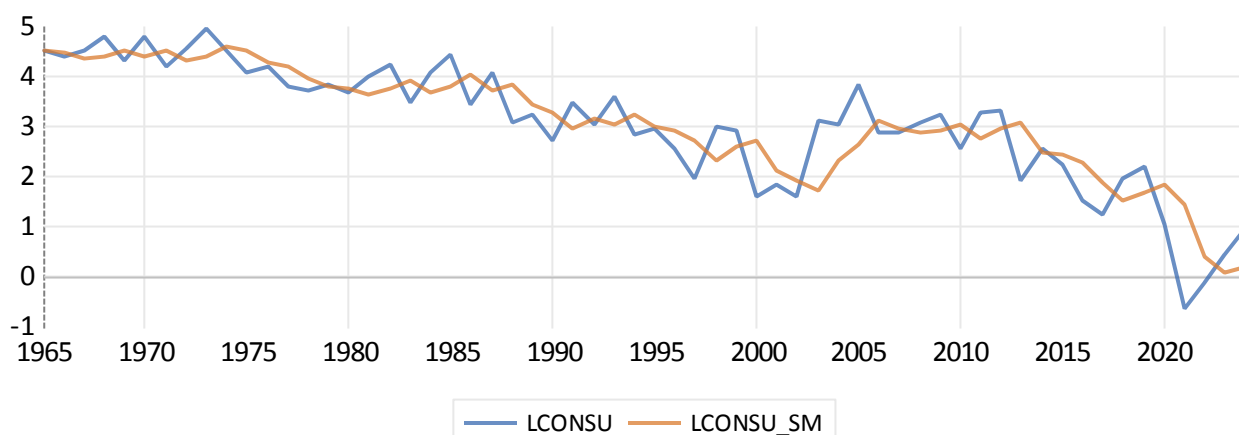
يبين الجدول نتائج تطبيق نموذج Holt-Winters بدون موسمية على السلسلة الزمنية (LCONS) خلال

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

الفترة الممتدة من 1965 إلى 2024، حيث تم تقدير معامل التمهيد للمستوى (α) بـ 0.47، وهو ما يعكس إعطاء وزن متوسط للقيم الحالية مقارنة بالماضية. أما معامل الاتجاه (β) فقد جاء مساوياً لـ 0.00، ما يدل على أن النموذج لم يعتمد على مكوّن الاتجاه واكتفى بمتابعة تغيرات المستوى فقط. وقد بلغ مجموع مربعات البواقي 21.00714، في حين قدّرت قيمة جذر متوسط الخطأ المعياري بـ 0.591709، وهي مؤشرات مقبولة لمدى دقة النموذج في تمثيل السلسلة. كما أظهرت القيم في نهاية الفترة أن المستوى بلغ نحو 0.561790، بينما الاتجاه كان سالباً بقيمة -0.052090، وهو ما يشير إلى وجود ميل طفيف نحو التراجع في السلسلة على المدى الطويل.

الشكل الرقم (93): السلسلة الأصلية والمتوقعة لكمية المستهلكة من الطاقة الكهربائية

Forecast Comparison Graph



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات 13 EVIEWS

يبين الشكل أعلاه مقارنة بين القيم الفعلية لسلسلة استهلاك الطاقة (LCONSU) والقيم المتنبأ بها (LCONSU_SM) خلال الفترة (1965-2024). نلاحظ أن المنحنيين يسيران بشكل متوازٍ تقريباً، حيث تعكس السلسلة المتنبأ بها الاتجاه العام نفسه للسلسلة الأصلية مع تقليص حدة التقلبات. ويظهر من خلال الشكل أن الاتجاه العام للسلسلة يتمثل في تراجع تدريجي ملحوظ عبر الزمن، خصوصاً بعد سنة 2005، وهو ما يؤكد قدرة النموذج المستعمل على محاكاة الواقع والتنبؤ بالمستقبل بشكل مقبول.

الجدول رقم (27): القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية

2035

القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهربائية (kW/H)	السنوات
1,664792278	2025

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

1,580293892	2026
1,500084316	2027
1,423945867	2028
1,351671909	2029
1,283066296	2030
1,217942838	2031
1,156124793	2032
1,097444392	2033
1,04174238	2034
0,988867586	2035

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات EVIEWS 13

يبين الجدول رقم (27)، القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة الممتدة من سنة 2025 إلى غاية 2035، ويتبين من خلال القيم المعروضة وجود اتجاه انخفاض متواصل في مستويات الاستهلاك، إذ يُسجل انخفاض تدريجي من نحو (1.66) kWh سنة 2025 ليصل إلى أقل من (1.0 kWh) بحلول سنة 2035. ويشير هذا الاتجاه التراجعي إلى محدودية مساهمة الطاقة الكهربائية في المزيج الطاقوي الوطني على المدى المتوسط، وهو ما يتماشى مع طبيعة الموارد المائية الجزائرية التي تعاني من تقلبات مناخية وندرة متزايدة بفعل التغيرات المناخية وتزايد الطلب على المياه لأغراض الشرب والفلاحة والصناعة.

إن هذا الانخفاض يعكس، من جهة أخرى، التحول التدريجي في الاستراتيجية الطاقوية للجزائر، والتي تركز على تقليص الاعتماد على المصادر الكهربائية لصالح تنويع قاعدة الطاقات المتجددة، وعلى رأسها الطاقة الشمسية والريحية، بالنظر إلى وفرتها الجغرافية والإشعاعية. ومن المتوقع أن يشكل هذا التوجه ركيزة أساسية لتحقيق أهداف الانتقال الطاقوي المعلنه، لاسيما تلك المرتبطة بتقليص انبعاثات الغازات الدفيئة وتعزيز الأمن الطاقوي.

اقتصاديا، فإن تراجع استهلاك الطاقة الكهربائية قد يحمل انعكاسات مزدوجة: فمن جانب، يقلل الضغط

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

على البنية التحتية المائية التقليدية، لكنه من جانب آخر، يفرض ضرورة تكثيف الاستثمارات في مشاريع الطاقة المتجددة البديلة لضمان تلبية الطلب المتنامي على الطاقة. وهذا يتطلب وضع سياسات فعالة لتشجيع الاستثمارات المحلية والأجنبية، وتطوير الإطار التشريعي والتنظيمي بما يضمن تسريع عملية الانتقال الطاقوي، وتحقيق التوازن بين متطلبات النمو الاقتصادي والحفاظ على الاستدامة البيئية.

المطلب الرابع: الشبكات العصبية الاصطناعية كأداة للتنبؤ بالطاقة الكهربائية

يأتي المطلب الرابع لعرض استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية كأداة للتنبؤ بالطاقة الكهربائية، حيث تتميز بقدرتها على التعلم من البيانات التاريخية واستخلاص الأنماط المعقدة وغير الخطية. ويهدف هذا المطلب إلى إبراز كفاءة النماذج الذكية في تحسين دقة التنبؤ مقارنة بالأساليب الإحصائية التقليدية.

الفرع الأول: نمذجة إنتاج الطاقة الكهربائية وتوقعه باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية

أولاً: وصف بيانات ومتغيرات الدراسة

1. اختيار المتغيرات:

في هذه الدراسة، تم اعتماد متغير «إنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر» كمؤشر رئيسي للتحليل والتنبؤ، ويُقاس بوحدة الجيجاواط-ساعة (GWh). وقد جُمعت بيانات هذا المؤشر في شكل سلسلة زمنية سنوية تغطي الفترة الممتدة من 1965 إلى 2024، وبعدد إجمالي بلغ 60 مشاهدة.

وتتمثل أهمية هذا المتغير في كونه يعكس حجم الجهود الوطنية المبذولة في استغلال الموارد المائية لإنتاج الطاقة، بما يسمح بتقدير مساهمة الطاقة الكهربائية في مزيج الطاقة الوطني. كما يُعد مؤشراً مهماً لقياس مدى فعالية السياسات الطاقوية الموجهة نحو تنويع مصادر الإنتاج وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، في سياق التحول نحو طاقات أنظف وأكثر استدامة.

2. المعالجة الأولية للبيانات:

ترتكز هذه الدراسة على أسلوب التنبؤ الأحادي المتغير (Univariate Forecasting)، بالاعتماد على سلسلة زمنية واحدة تمثل تطور إنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة 1965-2024، والمقاسة بوحدة الجيجاواط-ساعة. ويستند نموذج الشبكات العصبية الاصطناعية المستخدم إلى مبدأ النمذجة الذاتية غير الخطية (Nonlinear Autoregressive Modeling)، الذي يقوم على تقدير القيم المستقبلية للسلسلة الزمنية $Y(t)$ انطلاقاً من القيم السابقة لنفس المتغير، وفق الصيغة:

$$Y(t)=f(Y(t-1),\dots,Y(t-d))$$

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

حيث يشير d إلى عدد الفترات السابقة (التأخيرات الزمنية) المعتمدة في عملية التدريب، ويتم تحديده بشكل أمثل أثناء بناء النموذج.

3. مرحلة تحليل البيانات:

قبل الشروع في تدريب النموذج، قام برنامج MATLAB بتحليل الخصائص الإحصائية للسلسلة الزمنية وتحديد بنيتها. وبناء على نتائج هذا التحليل، تم تقسيم البيانات إلى ثلاث مجموعات رئيسية لضمان فعالية عملية التدريب والتقييم، على النحو الآتي:

✓ **مجموعة التدريب (Training Set):** تضم 42 مشاهدة زمنية أولية (حوالي 70% من إجمالي البيانات)، وتستخدم في بناء النموذج وتعلمه.

✓ **مجموعة التحقق (Validation Set):** تتكون من 9 مشاهدات (نحو 15% من البيانات)، وتستخدم أثناء التدريب لتقييم أداء النموذج والتحقق من قدرته على التنبؤ بدقة خارج بيانات التدريب.

✓ **مجموعة الاختبار (Test Set):** تشمل 9 مشاهدات متبقية (حوالي 15% من البيانات)، وتستخدم بعد اكتمال التدريب لاختبار الكفاءة النهائية للنموذج وقياس دقته في التنبؤ.

4. تحديد بنية الشبكة العصبونية:

في هذه الدراسة، تم اعتماد شبكة عصبونية من نوع NAR (Nonlinear Autoregressive

Neural Network)، وهي مخصصة لمعالجة السلاسل الزمنية ذاتية الانحدار. وقد تم تحديد معمارية الشبكة وفق مجموعة من المعايير الأساسية، كما يلي:

✓ **عدد عصبونات الإدخال:** يعادل عدد المتغيرات المستخدمة كمدخلات، وهو متغير واحد يتمثل في إنتاج الطاقة الكهربائية.

✓ **الطبقات المخفية:** تم تحديدها بطبقة واحدة فقط.

✓ **عدد العصبونات في الطبقة المخفية:** جرى ضبطه تجريبيًا بما يضمن أفضل أداء للشبكة.

✓ **التأخيرات الزمنية (Delays):** اختيرت خلال عملية الضبط بهدف تقليل مستوى الخطأ إلى أدنى قيمة ممكنة.

✓ **عصبون الإخراج:** يمثل القيمة المتوقعة لإنتاج الطاقة الكهربائية في الفترة الزمنية اللاحقة.

5. آلية التدريب وقياس جودة النموذج:

اعتمدت عملية التدريب في هذه الدراسة على خوارزمية Levenberg-Marquardt (TRAINLM)، التي

تُعد من أكثر الخوارزميات فعالية في تدريب الشبكات العصبونية القائمة على أسلوب الانتشار العكسي (Backpropagation)، نظرًا لسرعتها في الوصول إلى الحلول المثلى وكفاءتها الحسابية العالية. وتهدف هذه الخوارزمية إلى

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

تقليل متوسط مربعات الخطأ (MSE) بين القيم الفعلية والقيم المتوقعة، والذي يُحسب وفق الصيغة الرياضية المعروفة لهذا المؤشر.

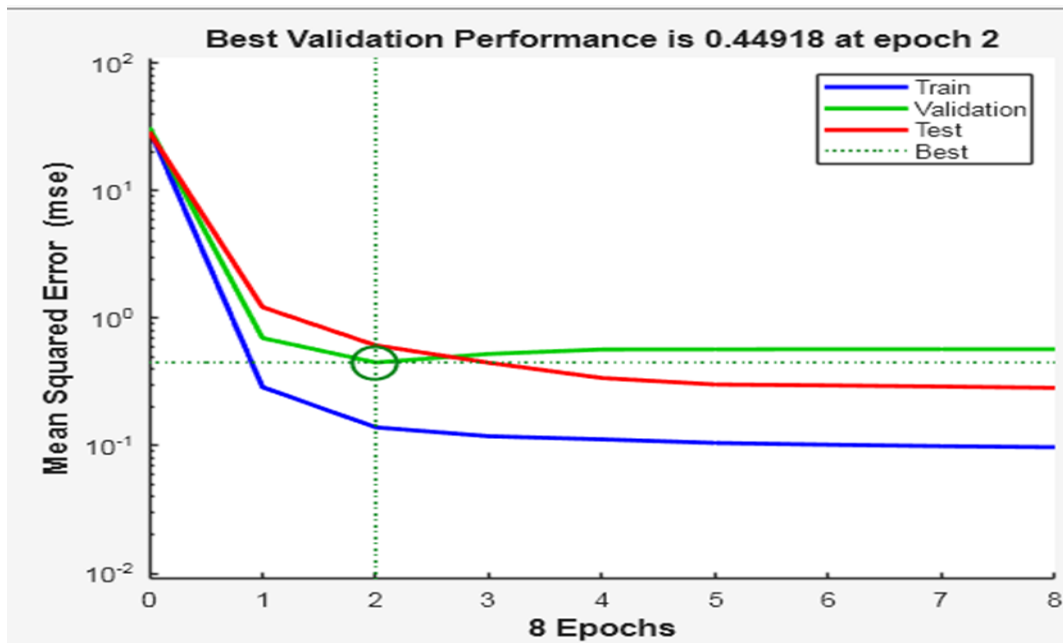
$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n e^2}{n}$$

وإلى جانب ذلك، تم استخدام معامل التحديد (R^2) كأداة إضافية لتقييم دقة النموذج، حيث يعكس درجة التقارب بين القيم المتوقعة والقيم الحقيقية، ويتراوح بين (0-1). وكلما اقتربت قيمته من 1، كان ذلك دليلاً على مستوى عالٍ من الدقة في التنبؤ.

6. تحليل أداء عملية تدريب الشبكة العصبية الاصطناعية:

تم بناء نموذج للتنبؤ بإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية. وقد استخدمت خوارزمية Levenberg-Marquardt (trainlm) لتدريب النموذج، نظراً لفعاليتها في تقليل الخطأ وتسريع عملية التعلم. تمت عملية التدريب على مدى 8 دورات (epochs) مع متابعة تغير متوسط مربع الخطأ (MSE) لبيانات التدريب والتحقق والاختبار كما هو موضح في الأشكال التالية:

الشكل الرقم (94): منحنى أداء التحقق (Performance Plot)



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

يوضح الشكل تطور أداء النموذج خلال التدريب. يظهر أن أفضل نتيجة لمرحلة التحقق كانت عند الدورة

الثانية (epoch 2)، حيث بلغ متوسط مربع الخطأ حوالي 0.44918.

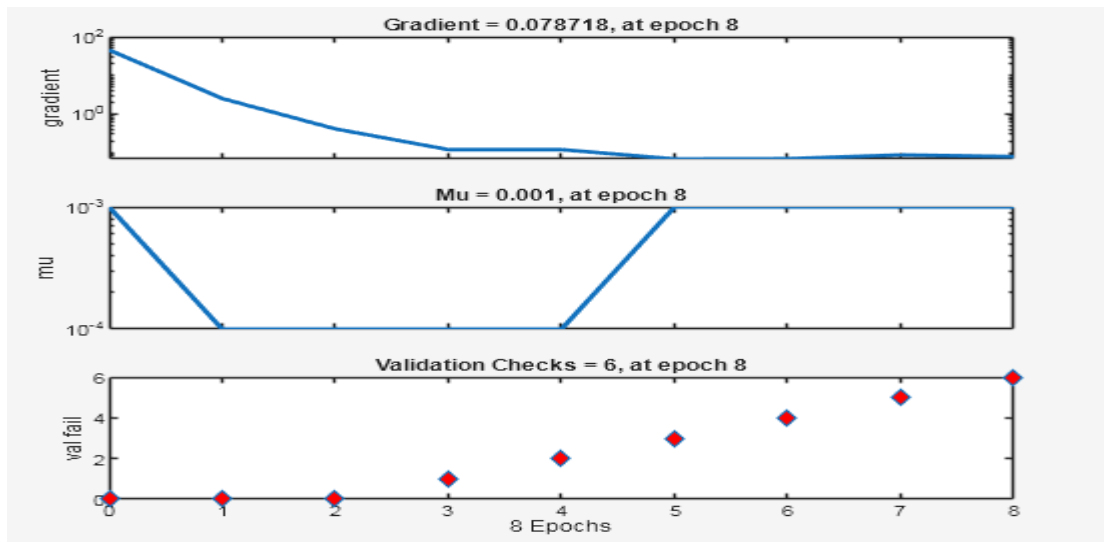
الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

وهذا يعني أن النموذج قدّم نتائج جيدة في التنبؤ، ويمكن من التعامل مع بيانات جديدة بشكل مقبول دون أن يقتصر فقط على بيانات التدريب.

لمتابعة عملية تدريب الشبكة العصبية باستخدام خوارزمية Levenberg–Marquardt، يتم عادةً مراقبة بعض المؤشرات المهمة التي تساعد على فهم أداء النموذج أثناء التعلم. من بين هذه المؤشرات: الانحدار (Gradient) الذي يوضح سرعة التغير في الخطأ مع كل دورة تدريبية، ومعامل التعديل (μ) الذي يتحكم في خطوات التحديث داخل الخوارزمية، بالإضافة إلى اختبارات التحقق (Validation Checks) التي تُستخدم للكشف عن توقف تحسن النموذج على بيانات التحقق.

الشكل الرقم (95): تطور مؤشرات تدريب الشبكة العصبية باستخدام خوارزمية Levenberg–

Marquardt



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

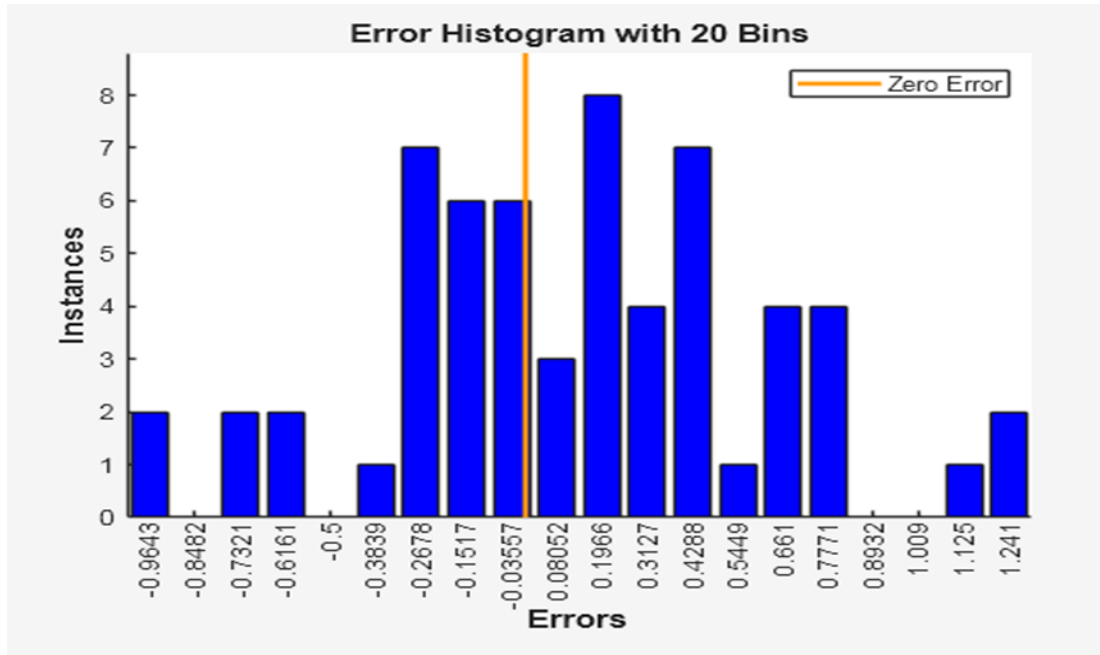
يوضح الشكل أن قيمة الانحدار (Gradient) انخفضت بشكل تدريجي مع تقدم الدورات التدريبية، وهو ما يشير إلى أن الشبكة تسير نحو حل أفضل ويقل معدل الخطأ مع كل دورة. أما معامل التعديل (μ) فقد استقر عند قيمة صغيرة جدًا (0.001) في الدورة الثامنة، مما يدل على أن الخوارزمية أصبحت تُجري تحديثات دقيقة جدًا للوصول إلى أفضل أداء. وبالنسبة إلى اختبارات التحقق (Validation Checks) فقد ارتفعت تدريجيًا حتى بلغت 6 محاولات في الدورة الثامنة، وهو ما يعكس أن النموذج لم يعد يحقق تحسنًا إضافيًا على بيانات التقييم، وبالتالي فإن عملية التدريب وصلت تقريبًا إلى أفضل نقطة ممكنة.

من بين الطرق المهمة لتقييم أداء الشبكة العصبية، استخدام مخطط التوزيع التكراري للأخطاء

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

(Error Histogram)، حيث يوضح هذا المخطط مدى انتشار الأخطاء بين القيم المتوقعة من النموذج والقيم الفعلية. يساعد هذا النوع من التحليل على التعرف فيما إذا كانت الأخطاء قريبة من الصفر أو موزعة بشكل عشوائي، مما يعطي فكرة أوضح عن دقة النموذج في التنبؤ.

الشكل رقم (96): التوزيع التكراري لأخطاء النموذج.



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

يبين الشكل أن معظم الأخطاء تتجمع حول الصفر، خاصة في المجال بين -0.15 و 0.20، وهو ما يشي ر إلى أن توقعات النموذج قريبة من القيم الفعلية في أغلب الحالات. كما أن توزيع الأخطاء على جانبي الصفر يظهر بشكل متوازن نسبيا، حيث بلغ أعلى تكرار حوالي 7 إلى 8 مرات، وهو ما يعكس أن النموذج يعطي نتائج متوازنة في التنبؤ. وبعبارة أخرى، فإن النموذج قادر على إعطاء نتائج دقيقة ومقبولة عند تقدير القيم. اقتصاديا، تمثل هذه الدقة عاملا أساسيا في دعم سياسات الطاقة، حيث تسمح بتخطيط أكثر كفاءة لإدارة الموارد المائية والكهربائية، وتقليل الفجوة بين العرض والطلب، الأمر الذي يسهم في تعزيز استقرار المنظومة الكهربائية وتحقيق أهداف الأمن الطاقوي والتنمية المستدامة.

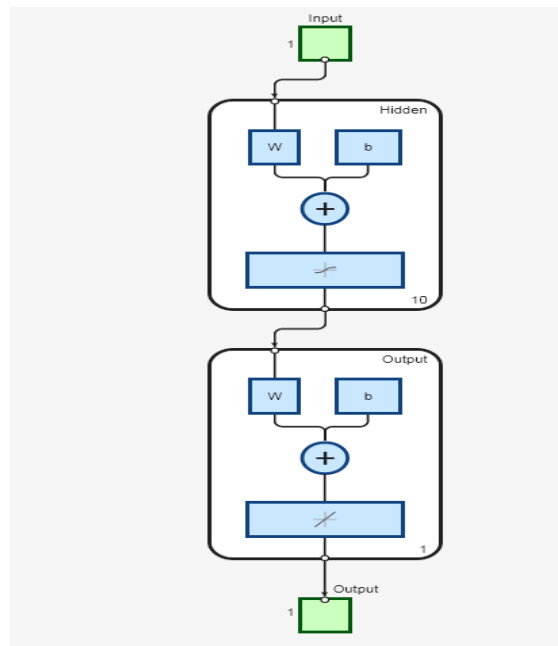
7. معمارية الشبكة العصبية الاصطناعية المعتمدة في نموذج التنبؤ:

تم اعتماد شبكة عصبية بسيطة للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر، كما يوضح الشكل. تتكون الشبكة

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

من طبقة إدخال واحدة، تليها طبقة مخفية تضم عشرة عصبونات تقوم بمعالجة البيانات واستخلاص الأنماط، ثم طبقة مخرجات تحتوي على عصبون واحد يعطي القيمة المتوقعة. وأظهرت النتائج أن هذه البنية حققت دقة جيدة في التنبؤ، بالاعتماد على مقاييس متوسط مربعات الخطأ (Mean Squared Error - MSE) والانحدار (Regression)، حيث تمكنت من تمثيل التغيرات الزمنية للسلسلة مع الحفاظ على توازن مقبول بين الدقة والقدرة على التكيف مع التغيرات المستقبلية. وهذا يجعلها أداة عملية يمكن الاستفادة منها في دعم السياسات الطاقوية المقبلة.

الشكل رقم (97): معمارية شبكة العصبية الاصطناعية معتمدة



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

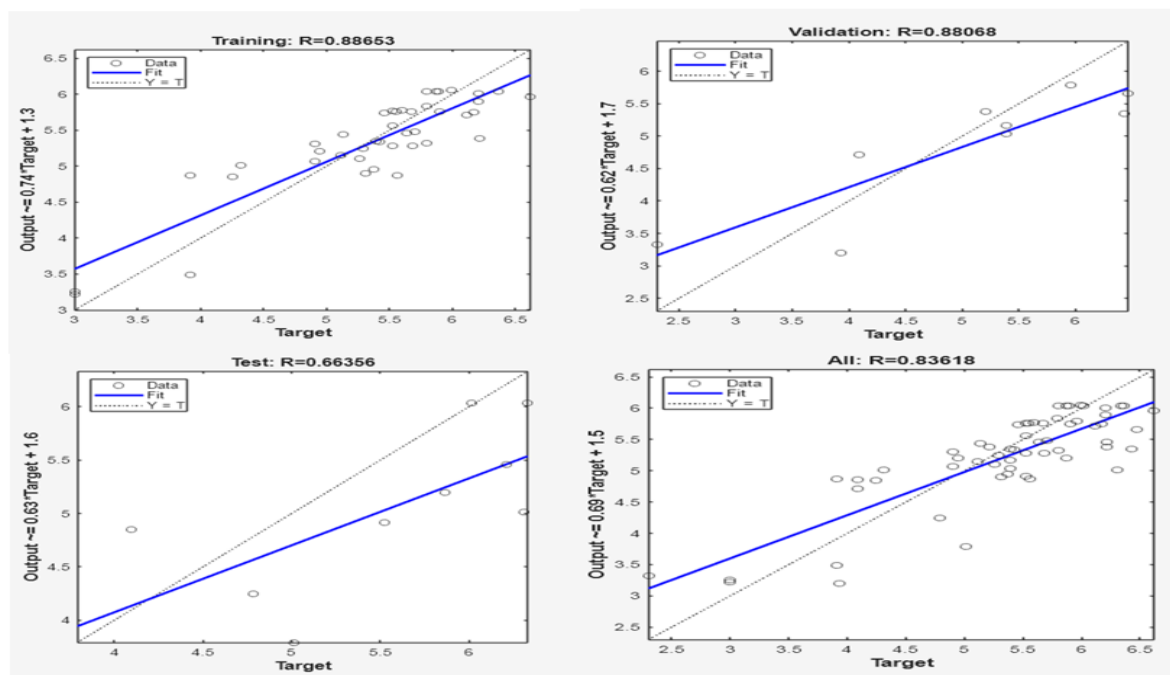
ثانيا: المعادلة الانحدارية لنموذج التنبؤ

يبين الشكل العلاقة بين القيم الفعلية (Target) والقيم المتنبأ بها (Output) لإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر باستخدام النموذج العصبي الاصطناعي، وذلك عبر مراحل التدريب والتحقق والاختبار، إضافة إلى الأداء الكلي. نلاحظ أن النقاط الممثلة للبيانات تقترب من الخط المرجعي المثالي ($Y=T$)، مما يدل على أن النموذج ينجح بشكل جيد في تقريب النتائج من الواقع. وتعتبر معادلة الانحدار الخطية $y=0.69x+1.5$ عن طبيعة العلاقة بين القيم المدخلة والمخرجات المتنبأ بها. كما أن معاملات الارتباط (R) في مختلف المراحل جاءت مرتفعة، حيث بلغت 0.886 في التدريب، 0.881 في التحقق، 0.664 في الاختبار، و0.836 لجميع البيانات معاً، وهو ما يشير إلى أن العلاقة بين المخرجات والنتائج الحقيقية قوية. هذا يثبت أن النموذج قادر على تحقيق تنبؤات دقيقة مع وجود بعض التباين المقبول بين

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

المراحل، الأمر الذي يجعله أداة فعالة يمكن الاعتماد عليها في تحليل واستشراف اتجاهات إنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر.

الشكل الرقم (98) المعادلة الانحدارية لنموذج تنبؤ بالانتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

ثالثا: التنبؤ بحجم الانتاج الطاقة الكهربائية من 2025 الى غاية 2035:

استنادا إلى النتائج التي تم الحصول عليها من بناء وتدريب نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية، تم استخدام هذا النموذج لإجراء التنبؤات المستقبلية لإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة الممتدة من سنة 2025 إلى غاية 2035. وقد اعتمدت هذه التقديرات على أفضل بنية تم الوصول إليها، والتي تضمنت طبقة مخفية مكونة من عشرة (10) عصبونات، وهو ما ساعد على تحقيق نتائج مستقرة وبدقة مقبولة وفق مؤشرات الأداء (R^2 و MSE). يوضح الجدول (رقم 28) القيم التنبؤية لإنتاج الطاقة الكهربائية بالجيجاواط ساعي (GWh) خلال هذه الفترة.

الجدول رقم(28): القيم التنبؤية لانتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية

2035

القيم التنبؤية لانتاج الطاقة الكهربائية (GWh)	السنوات
23,80748436	2025

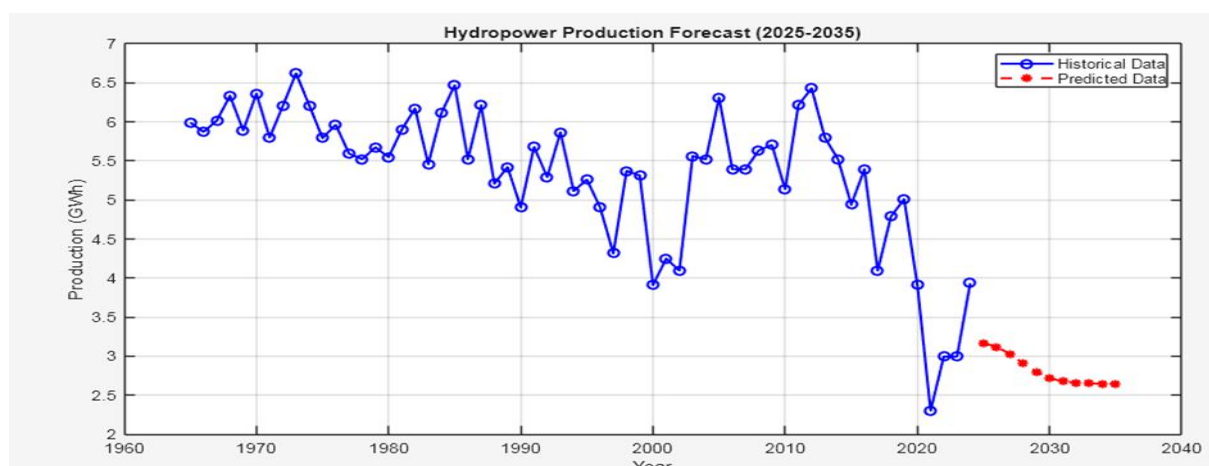
الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر

22,64637964	2026
20,69723259	2027
18,35679857	2028
16,44464677	2029
15,18032224	2030
14,5850933	2031
14,2962891	2032
14,15403865	2033
14,15403865	2034
14,15403865	2035

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

الشكل رقم (99): القيم التنبؤية لإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية

2035



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

تشير نتائج التوقعات إلى أن إنتاج الطاقة الكهرومائية سيشهد انخفاضاً تدريجياً من حوالي 23.8 GWh سنة

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

2025 إلى ما يقارب 14.1 GWh ابتداءً من 2033 ليستقر عند هذا المستوى حتى عام 2035. هذا التراجع يعكس محدودية القدرة الحالية على التوسع في مشاريع الطاقة الكهربائية نظراً للعوامل الطبيعية (تذبذب الموارد المائية) والتقنية (محدودية مواقع بناء السدود الجديدة).

اقتصادياً، يعكس هذا الوضع تحدياً على مستوى تلبية الطلب المتزايد على الطاقة، مما يعني أن الاعتماد المتزايد سيكون على مصادر أخرى للطاقة لتغطية الفجوة. ومن هنا تأتي أهمية ربط هذه النتائج بالأهداف الوطنية للتحويل الطاقوي في الجزائر، والتي تسعى إلى:

- ✓ تعزيز الاعتماد على الطاقات المتجددة الأخرى (الطاقة الشمسية والرياح) لتعويض التراجع في الطاقة الكهربائية.
 - ✓ ضمان أمن الطاقة على المدى المتوسط والبعيد.
 - ✓ دعم النمو الاقتصادي المستدام عبر تنويع مصادر الإنتاج الطاقوي وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري.
 - ✓ المساهمة في التزامات الجزائر المتعلقة بخفض الانبعاثات الكربونية وتحقيق أهداف التنمية المستدامة.
- وبالتالي، فإن هذه التوقعات لا تمثل فقط قراءة تقنية لأداء الطاقة الكهربائية، بل هي مؤشر استراتيجي يبرز ضرورة الإسراع في تنفيذ مشاريع الطاقات البديلة ضمن مسار التحويل الطاقوي الوطني.

الفرع الثاني: نمذجة استهلاك الطاقة الكهربائية وتوقعه باستعمال الشبكات العصبية الاصطناعية

أولاً: وصف بيانات ومتغيرات الدراسة

1- اختيار المتغيرات:

في هذه الدراسة تم اعتماد متغير «استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر» كمؤشر أساسي للتحليل والتنبؤ، ويُقاس بوحدة الكيلوواط-ساعة (kWh). جُمعت بيانات هذا المتغير في شكل سلسلة زمنية سنوية تمتد من 1965 إلى 2024، ليلعب عدد المشاهدات 60 مشاهدة.

تبرز أهمية هذا المؤشر في كونه يعكس مستوى استفادة المواطن الجزائري من مصادر الطاقة النظيفة، مما يسمح بتقييم فعالية السياسات الطاقوية في سياق الانتقال نحو الطاقات المستدامة.

2- المعالجة الأولية للبيانات:

تندرج هذه الدراسة ضمن إطار التنبؤ الأحادي المتغير (Univariate Forecasting)، إذ تعتمد على سلسلة زمنية وحيدة تمثل تطور استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال المدة 1965–2024، والمقاسة بوحدة الكيلوواط-ساعة. يقوم نموذج الشبكات العصبية الاصطناعية هنا على مبدأ النمذجة الذاتية غير الخطية (Nonlinear)

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

(Autoregressive Modeling)، الذي يهدف إلى تقدير القيم المستقبلية للسلسلة الزمنية $Y(t)$ بالاستناد إلى القيم السابقة لنفس المتغير، وفق الصيغة:

$$Y(t)=f(y(t-1),.....y(t-d))$$

حيث يمثل d عدد التأخيرات الزمنية (الخطوات السابقة) المعتمدة في عملية التدريب، ويتم تحديده بصورة مثلى أثناء ضبط النموذج.

3- مرحلة تحليل البيانات:

قبل البدء في عملية تدريب النموذج، قام برنامج MATLAB بتحليل الخصائص الإحصائية للسلسلة الزمنية وتحديد هيكل بياناتها. وبناءً على نتائج هذا التحليل، جرى تقسيم البيانات إلى ثلاث فئات رئيسية لضمان فعالية عملية التدريب والتقييم كما يلي:

- ✓ **مجموعة التدريب (Training Set):** تضم أول 42 مشاهدة زمنية، أي ما يقارب 70% من إجمالي البيانات، وتُستخدم لبناء وتعلم النموذج.
- ✓ **مجموعة التحقق (Validation Set):** تتكون من 9 مشاهدات، تمثل نحو 15% من البيانات وتُستخدم أثناء التدريب لتقييم أداء النموذج والتحقق من قدرته على التعميم.
- ✓ **مجموعة الاختبار (Test Set):** تشمل 9 مشاهدات متبقية (حوالي 15%)، وتُستخدم بعد انتهاء التدريب لاختبار فعالية النموذج النهائية وتحديد مدى دقته في التنبؤ.

4- تحديد بنية الشبكة العصبونية:

في هذه الدراسة، تم اعتماد شبكة عصبونية من نوع NAR (Nonlinear Autoregressive Neural Network)، المصممة خصيصًا لمعالجة السلاسل الزمنية ذاتية الانحدار. وقد جرى تحديد معمارية الشبكة استنادًا إلى المعايير التالية:

- ✓ **عدد عصبونات الإدخال:** يساوي عدد المتغيرات المستخدمة كمدخلات، وهو متغير واحد يتمثل في استهلاك الطاقة الكهربائية.
- ✓ **عدد الطبقات المخفية:** حُدد تلقائيًا بطبقة واحدة.
- ✓ **عدد العصبونات في الطبقة المخفية:** جرى تحديده تجريبيًا بما يحقق أفضل أداء للنموذج.
- ✓ **عدد التأخيرات الزمنية (Delays):** اختير أثناء مرحلة الضبط بهدف تقليل مستوى الخطأ لأدنى قيمة ممكنة.
- ✓ **عصبون الإخراج:** يمثل القيمة المتوقعة لاستهلاك الطاقة خلال الفترة اللاحقة.

5- آلية التدريب وقياس جودة النموذج:

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

ارتكزت عملية التدريب في هذه الدراسة على خوارزمية Levenberg-Marquardt (TRAINLM)، التي تُعد من أكثر الخوارزميات كفاءة في تدريب الشبكات العصبية المعتمدة على أسلوب الانتشار العكسي (Backpropagation)، بفضل سرعتها في الوصول إلى الحلول المثلى وكفاءتها الحسابية العالية. تهدف هذه الخوارزمية إلى تقليل متوسط مربعات الأخطاء (MSE) بين القيم الفعلية والقيم المتنبأ بها، ويُحسب هذا المؤشر وفق الصيغة المعروفة لمتوسط مربعات الأخطاء.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n e^2}{n}$$

إضافة إلى ذلك، استُخدم معامل التحديد (R^2) كمقياس إضافي لتقييم جودة النموذج، إذ يعبر عن مستوى توافق القيم المتنبأ بها مع القيم الحقيقية، ويتراوح بين 0 و 1؛ وكلما اقتربت قيمته من 1، دلّ ذلك على دقة تنبؤية مرتفعة.

6- تحليل أداء عملية تدريب الشبكة العصبية الاصطناعية:

عند بناء نموذج تنبؤي قائم على الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks) لتقدير استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر، جرى تدريب النموذج باستخدام خوارزمية Levenberg-Marquardt (trainlm)، التي تُعد من أكثر خوارزميات الانتشار العكسي كفاءة في تقليل الخطأ وتسريع عملية التقارب، خصوصاً في النماذج ذات البنية البسيطة نسبياً.

وقد نُفذت عملية التدريب عبر 11 دورة تدريبية (epochs)، مع متابعة دقيقة لعدد من المؤشرات الرئيسة الخاصة بأداء النموذج، كما هو مبين في أشكال أدناه.

الشكل الرقم (100): منحنى أداء التحقق (Performance Plot)

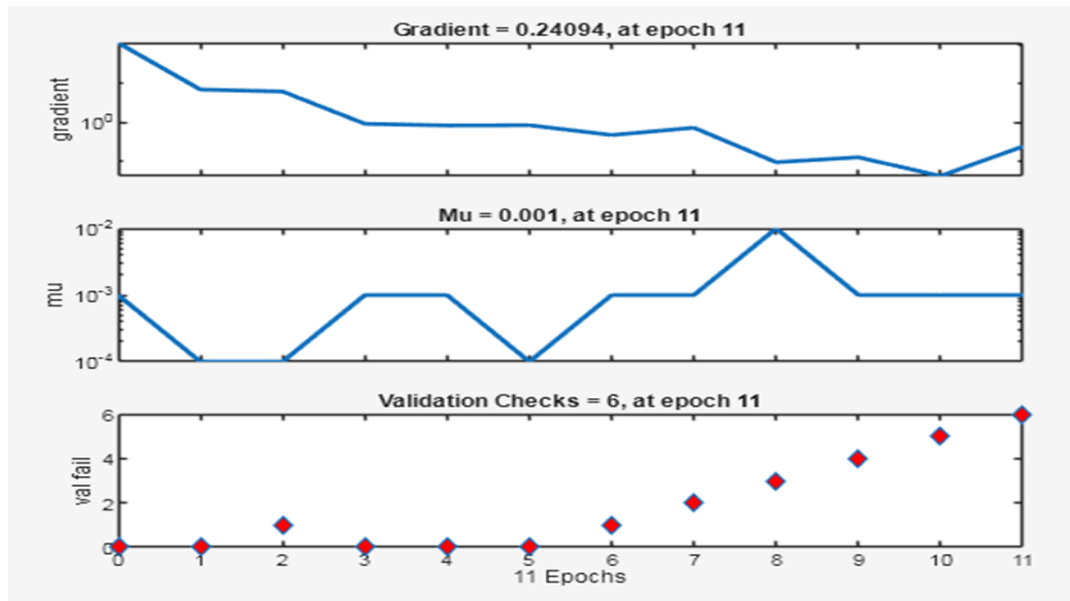


المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

يبين الشكل أن النموذج استطاع تمثيل سلوك استهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر بدرجة دقة جيدة، خاصة على البيانات المستخدمة للتدريب والتقييم، كما تُظهر النقطة عند Epoch 5، حيث سُجِّل أدنى متوسط لمربعات الخطأ (MSE) بقيمة تقارب 0.12007، أنها تمثل المرحلة الأنسب لإيقاف عملية التدريب، إذ يتضح من ذلك أن النموذج بلغ مستوى جيداً من الدقة دون الحاجة لمزيد من التعقيد، مما يعزز موثوقية التنبؤ بالاتجاهات المستقبلية في استهلاك الطاقة.

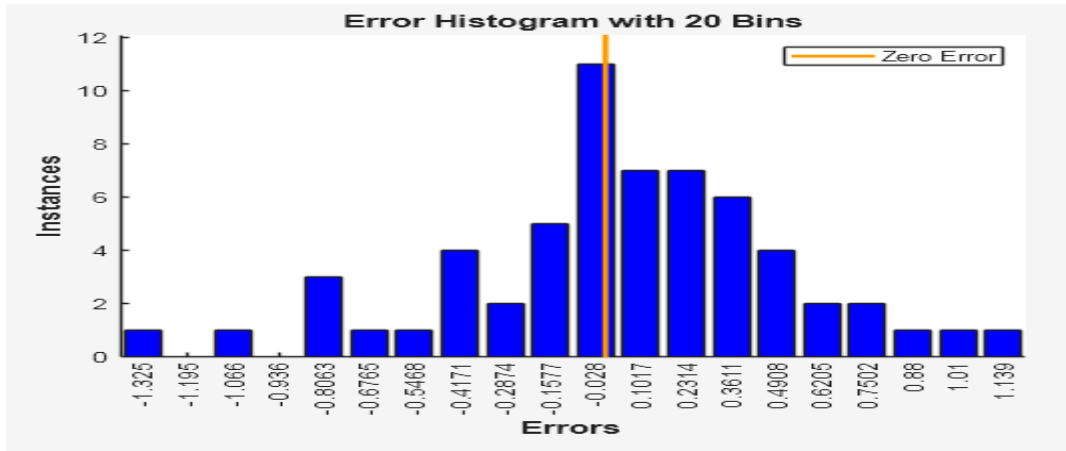
الشكل الرقم (101): تطور مؤشرات تدريب الشبكة العصبية باستخدام خوارزمية Levenberg–Marquardt»



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

يوضح الشكل تطور أداء الشبكة العصبية أثناء التدريب بخوارزمية Levenberg–Marquardt عبر 11 دورة. يمثل المنحنى الأول تغير قيمة الميل (Gradient) الذي ينخفض تدريجياً ليصل عند الدورة 11 إلى قيمة صغيرة، ما يدل على استقرار عملية التعلم واقتراحها من الحل الأمثل. أما المنحنى الثاني فيُظهر سلوك معامل التخميد (Mu) المستخدم لضبط حجم خطوة التعلم، حيث يتكيف صعوداً أو هبوطاً بحسب حاجة الخوارزمية لتحقيق تقارب أفضل. بينما يوضح الرسم الأخير عدد محاولات تقييم النموذج (Validation Checks) التي تتزايد مع الدورات، وهو مؤشر يُستعمل لإيقاف التدريب عند ملاحظة ثبات أداء النموذج ضمن بيانات التقييم، ما يضمن الحصول على نموذج دقيق دون زيادة غير مرغوبة في تعقيد النموذج.

الشكل رقم (102): المدرج التكراري للأخطاء Error Histogram with



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

يوضح الشكل أعلاه مخطط الهستوغرام للأخطاء الناتجة عن النموذج المستعمل في التنبؤ باستهلاك الطاقة

الكهرومائية في الجزائر. حيث يمثل المحور الأفقي قيم الأخطاء (الفارق بين القيم الفعلية والمتنبأ بها)، في حين يعكس المحور العمودي عدد مرات تكرار كل خطأ. ويلاحظ أن معظم الأخطاء متمركزة حول الصفر، مما يدل على أن النموذج يتميز بدرجة عالية من الدقة في التنبؤ. كما أن وجود بعض الانحرافات الطفيفة على الأطراف يشير إلى حالات محدودة لم يتم التنبؤ بها بنفس الدقة، وهو أمر متوقع في النماذج التطبيقية. بشكل عام، يعكس هذا الشكل قدرة النموذج على تقديم نتائج موثوقة وقريبة من القيم الحقيقية.

من الناحية الاقتصادية، يعكس الشكل أن النموذج المستخدم في التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر يتمتع بمستوى جيد من المصداقية والدقة، حيث تتركز معظم الأخطاء حول الصفر مع ندرة الانحرافات الكبيرة. وتكتسي هذه النتيجة أهمية بالغة في مجال التخطيط الطاقوي، إذ تمكن من الاعتماد على التقديرات المتحصل عليها لاتخاذ قرارات اقتصادية واستثمارية أكثر فعالية. فموثوقية التنبؤات تساهم في رسم سياسات رشيدة لتطوير البنية التحتية الطاقوية وتوجيه الاستثمارات نحو الطاقات المتجددة بما يعزز الأمن الطاقوي الوطني. كما أن انخفاض مستوى المخاطر المرتبط بالأخطاء يعزز ثقة صناع القرار في استخدام هذه النماذج كأدوات داعمة للتخطيط الاستراتيجي طويل المدى.

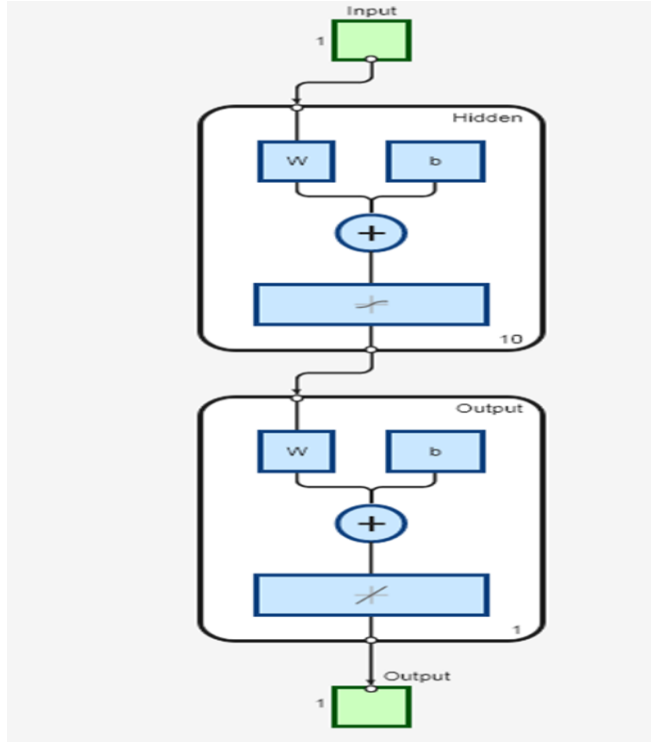
7- معمارية الشبكة العصبية الاصطناعية المعتمدة في نموذج التنبؤ:

في إطار بناء النموذج التنبؤي لاستهلاك الطاقة الكهرومائية في الجزائر، تم اعتماد مقارنة تجريبية لتحديد البنية المثلى للشبكة العصبية الاصطناعية. ويبين الشكل المرفق البنية المعتمدة للشبكة، حيث تتكون من طبقة إدخال واحدة مرتبطة بطبقة مخفية تحتوي على عشرة (10) عصبونات، تليها طبقة مخرجات تضم عصبوناً واحداً يمثل القيمة المتنبأ بها. وقد أظهرت التجارب أن هذه البنية حققت أداءً جيداً من حيث دقة التنبؤ، وذلك استناداً إلى معايير التقييم مثل متوسط

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

مربعات الخطأ (MSE) والانحدار. وتبرهن هذه المعمارية على قدرة الشبكة في تمثيل الخصائص الزمنية للسلسلة المدروسة مع الحفاظ على توازن مقبول بين الدقة والاستجابة للتغيرات المستقبلية، مما يعزز من فعالية النموذج كأداة استشرافية لدعم السياسات الطاقوية المستقبلية.

الشكل رقم (103): معمارية شبكة العصبية الاصطناعية معتمدة



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

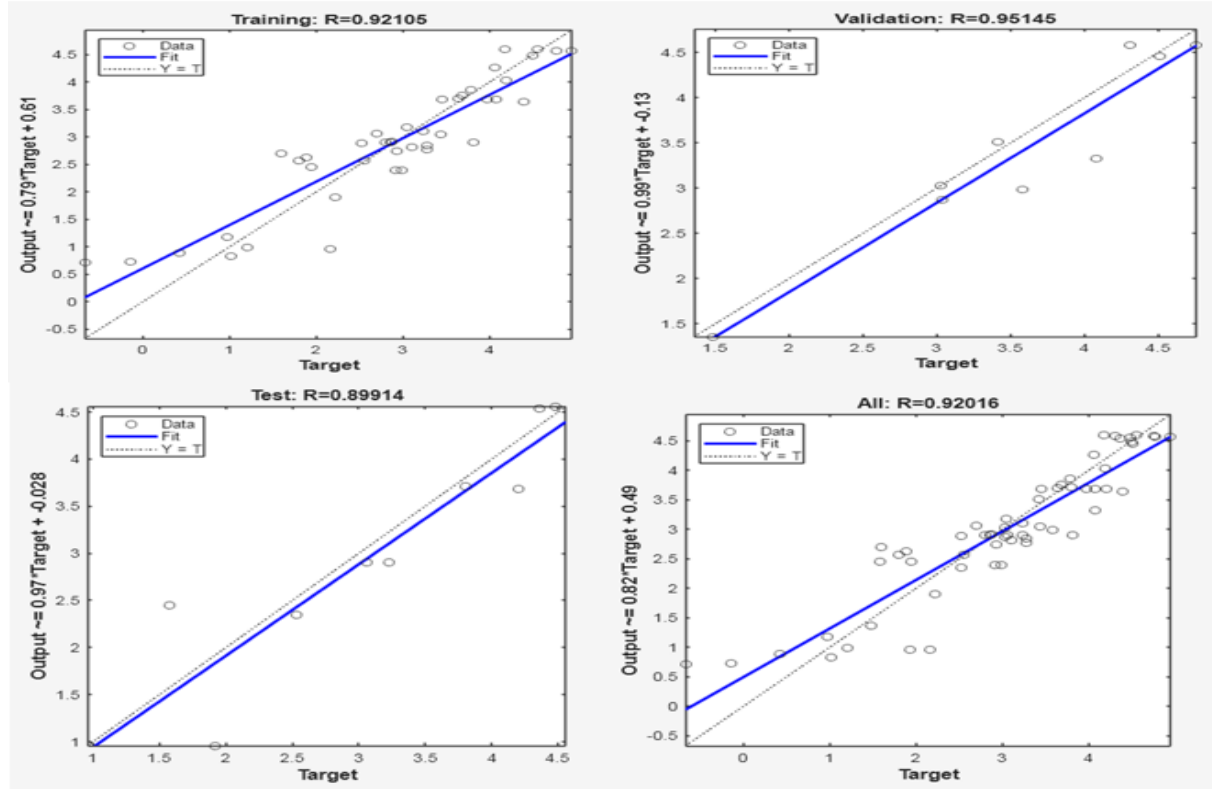
ثانيا: المعادلة الانحدارية لنموذج التنبؤ

يبين الشكل علاقة الارتباط بين القيم الفعلية (Target) والقيم المتنبأ بها (Output) للنموذج العصبي الاصطناعي عبر مراحل التدريب والتحقق والاختبار، إضافة إلى الأداء الكلي. يتضح أن النقاط الممثلة للبيانات تقترب بدرجة كبيرة من الخط المرجعي المثالي ($Y=T$)، وهو ما يعكس دقة جيدة للنموذج. كما أن معادلة الانحدار المستخدمة في التنبؤ للنموذج هي: ($Y = 0.82X + 0.49$)، الأمر الذي يوضح طبيعة العلاقة الخطية بين المتغيرات. ويؤكد ذلك معامل الارتباط (R) الذي بلغ 0.921 في مرحلة التدريب، و0.951 في مرحلة التحقق، و0.899 في مرحلة الاختبار، و0.920 لجميع البيانات مجتمعة. وتشير هذه القيم المرتفعة إلى قوة العلاقة الخطية بين المخرجات والتوقعات المستهدفة، مما يثبت قدرة النموذج على التنبؤ بدقة مع مستوى مقبول من التباين بين المراحل. وبالتالي، يعكس النموذج كفاءة إحصائية

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

معتبرة في تمثيل السلسلة الزمنية لاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر، بما يعزز من اعتماده كأداة تحليلية واستشرافية في مجال التخطيط الطاقوي.

الشكل الرقم (104) المعادلة الانحدارية لنموذج تنبؤ بالاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

ثالثا: التنبؤ بحجم الاستهلاك الطاقة الكهربائية من 2025 الى غاية 2035:

في ضوء النتائج المتحصل عليها من خلال بناء وتدريب نموذج الشبكة العصبية الاصطناعية، تم الاعتماد على هذا النموذج لإجراء التنبؤات المستقبلية لاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة الممتدة من سنة 2025 إلى غاية 2035. وقد جرى استخدام أفضل بنية تم التوصل إليها سابقاً، والتي تضمنت طبقة مخفية مكونة من عشرة (10) عصبونات، الأمر الذي مكّن النموذج من تحقيق استقرار في النتائج ضمن الحدود الإحصائية المقبولة، وبمستوى دقة معتبر حسب مؤشرات الأداء المعتمدة (MSE) و (R^2) ويعرض الجدول أدناه القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهربائية خلال الفترة المذكورة.

الجدول رقم(29): القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية

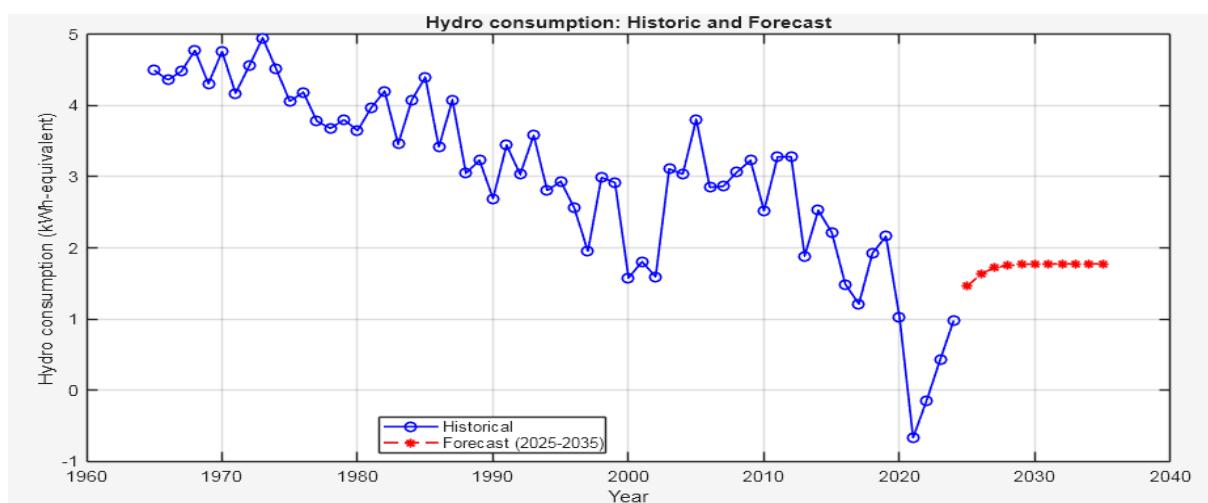
2035

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهربائية (kW/H)	السنوات
4,305524648	2025
5,124290108	2026
5,573431876	2027
5,77451344	2028
5,856329253	2029
5,888250944	2030
5,900469948	2031
5,905103636	2032
5,906839991	2033
5,90748978	2034
5,907726084	2035

المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

الشكل رقم (105): القيم التنبؤية لاستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة من سنة 2025 إلى غاية 2035



المصدر: من اعداد الباحث الاعتماد على مخرجات matlab

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

من منظور اقتصادي، تعكس القيم التنبؤية اتجاهاً متصاعداً في استهلاك الطاقة الكهربائية بالجزائر خلال الفترة 2025-2035، وهو ما يحمل دلالات مهمة على صعيد الأمن الطاقوي والتنمية المستدامة. فمن جهة، يساهم هذا الارتفاع التدريجي في ضمان تلبية الطلب المحلي المتنامي على الطاقة، عبر الاعتماد على مورد متجدد يخفف من الضغوط على شبكة الإمدادات المعتمدة على الوقود الأحفوري، بما يعزز استقرار الإمداد الطاقوي على المدى الطويل. ومن جهة أخرى، فإن الاعتماد المتزايد على الطاقة الكهربائية يساهم في تقليص الانبعاثات الغازية المسببة للاحتباس الحراري، ما ينسجم مع الالتزامات البيئية للجزائر في إطار التحول نحو اقتصاد أخضر. كما أن هذا التوجه يفتح آفاقاً اجتماعية وتنموية من خلال خلق فرص عمل جديدة، وتشجيع البحث والابتكار في مجال تقنيات الطاقة المتجددة، إلى جانب تعزيز العدالة الطاقوية عبر توفير طاقة نظيفة ومستدامة للأجيال المقبلة. وعليه، فإن النتائج المتوقعة لا تعكس مجرد بعد تقني في التنبؤ، بل تحمل أيضاً أبعاداً استراتيجية تدعم الاستقرار الاقتصادي والبيئي والاجتماعي على حد سواء.

المبحث الثالث: عرض وتحليل النتائج

بعد بناء النماذج القياسية ونماذج الذكاء الاصطناعي وتقدير معالمها استناداً إلى بيانات إنتاج واستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر، يهدف هذا المبحث إلى عرض النتائج التي تم التوصل إليها وتحليلها من أجل تقييم كفاءة النماذج المستخدمة في التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر. يتم ذلك من خلال المفاضلة بين النماذج الثلاثة اعتماداً على مؤشرات الدقة الإحصائية، بغية تحديد النموذج الأكثر ملاءمة من حيث القدرة التنبؤية، كما يسعى إلى تحليل الاتجاهات المتوقعة للإنتاج والاستهلاك خلال الفترة 2025-2035، واستخلاص الدلالات الاقتصادية والاجتماعية المترتبة عليها، بما يساهم في دعم التخطيط الطاقوي ورسم السياسات المستقبلية للقطاع في الجزائر.

المطلب الأول: المفاضلة بين النماذج الثلاثة وفق مؤشرات الدقة.

يركز المطلب الأول على المفاضلة بين النماذج الثلاثة المستخدمة في التنبؤ بالطاقة الكهربائية، وهي: نموذج بوكس-جنكينز، أسلوب التمهيد الأسّي الثلاثي، والشبكات العصبية الاصطناعية. وتتم هذه المقارنة استناداً إلى المعطيات السابقة التي تم الحصول عليها من تطبيق كل نموذج على سلاسل إنتاج واستهلاك الطاقة الكهربائية. ويهدف هذا المطلب إلى قياس دقة النماذج من خلال مؤشرات إحصائية متعارف عليها، من أجل تحديد النموذج الأكثر كفاءة وموثوقية في التنبؤ بالقيم المستقبلية، بما يخدم عملية التخطيط ورسم السياسات المرتبطة بقطاع الطاقة في الجزائر.

الفرع الأول: مقارنة النماذج الثلاثة في ضوء مؤشرات الدقة المتعلقة بإنتاج الطاقة الكهربائية

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

بعد تطبيق كل من أسلوب التمهيد الأسّي الثلاثي (Holt-Winters) بدون الموسمية، ومنهجية Box-Jenkins، وتقنية الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) للتنبؤ بإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة من 2025 إلى 2035، تم الاعتماد على مقارنة مؤشرات جودة التنبؤ من أجل تحديد النموذج الأكثر دقة. ويعتمد الاختيار على النموذج الذي يحقق أقل القيم لمقاييس الخطأ المبينة في الجدول رقم (30).

الجدول رقم (30): مؤشرات قياس الجودة

	المؤشرات جودة التنبؤ					
	RMSE	MAE	MAPE	SMAPE	Theil U1	Theil U2
holt winters	0.593638	0.459472	9.692964	9.196676	0.054656	0.926111
box jenkins	0.959675	0.764654	14.53923	15.76977	0.094268	1.320750
ANN	0.5067	0.4008	8.12	8.14	0.0473	0.7899

من اعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات 13 EViews و MATLAB

تشير النتائج إلى أن النموذج العصبي الاصطناعي (ANN) قدّم أفضل أداء مقارنة بباقي النماذج، حيث حقق أدنى القيم في معظم المؤشرات (RMSE (0.50)، MAE (0.40)، MAPE (8.12%)، SMAPE و (8.14%)، إضافة إلى قيم منخفضة لمؤشري Theil U1 (0.047) و Theil U2 (0.78) وهذا يعني أن نتائج ANN قريبة جداً من القيم الحقيقية للإنتاج.

أما أسلوب Holt-Winters فجاء في المرتبة الثانية، إذ حقق نتائج مقبولة نسبياً، لكن بدقة أقل من ANN. في المقابل، أظهرت منهجية Box-Jenkins أضعف أداء، حيث سجلت أعلى قيم لجميع المؤشرات، ما يعكس محدودية فعاليتها في التنبؤ بإنتاج الطاقة الكهربائية.

بشكل عام، توضح هذه النتائج أن الشبكات العصبية الاصطناعية هي النموذج الأنسب للتنبؤ بإنتاج الطاقة

الكهربائية في الجزائر، نظراً لدقتها العالية وقدرتها الأفضل على تقليل نسب الخطأ مقارنة بالنماذج التقليدية.

الفرع الثاني: مقارنة النماذج الثلاثة في ضوء مؤشرات الدقة المتعلقة باستهلاك الطاقة الكهربائية

بعد تطبيق كل من أسلوب التمهيد الأسّي الثلاثي (Holt-Winters) بدون الموسمية، ومنهجية Box-Jenkins، وتقنية الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر خلال الفترة الممتدة من 2025

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

إلى 2035، يتم تحديد النموذج الأكثر دقة من خلال مقارنة قيم مؤشرات جودة التنبؤ. يعتمد الاختيار على الأسلوب الذي يحقق أقل قيمة لمقاييس الخطأ الموضحة في الجدول رقم (31).

الجدول رقم (31): مؤشرات قياس الجودة

	المؤشرات جودة التنبؤ					
	RMSE	MAE	MAPE	SMAPE	Theil U1	Theil U2
holt winters	0.591709	0.466379	29.62961	26.04095	0.090453	0.831077
box jenkins	0.760896	0.600047	38.46326	29.00185	0.126080	0.970007
ANN	0.491152	0.374618	16.488	17.219	0.073370	0.760864

من اعداد الباحث بالاعتماد على مخرجات 13 EViews و MATLAB

يوضح الجدول أن النموذج العصبي الاصطناعي (ANN) حقق أفضل أداء مقارنة ببقية النماذج، حيث سجل أقل القيم في معظم مؤشرات جودة التنبؤ (RMSE (0.49)، MAE (0.37)، MAPE (16.48%)، SMAPE و (17.21%). كما جاءت قيم مؤشري Theil U1 (0.073) و Theil U2 (0.76) منخفضة، مما يدل على أن النموذج يقترب بدرجة كبيرة من القيم الحقيقية للاستهلاك.

أما أسلوب Holt-Winters فجاء في المرتبة الثانية، إذ حقق نتائج مقبولة نسبياً مع مؤشرات خطأ أعلى من ANN ولكن أقل من Box-Jenkins. في حين أن منهجية Box-Jenkins أظهرت أضعف أداء، حيث سجلت أعلى القيم لجميع المؤشرات، مما يدل على محدودية قدرتها على التنبؤ الدقيق في هذا المجال. بشكل عام، تؤكد هذه النتائج أن النموذج العصبي الاصطناعي هو الخيار الأمثل للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر، كونه الأكثر دقة والأكثر قدرة على تقليل نسب الخطأ مقارنة بالنماذج الأخرى.

المطلب الثاني: تحليل نتائج التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

تشير نتائج التنبؤ إلى أن الجزائر ستواجه خلال الفترة من 2025 إلى 2035 تحدياً مزدوجاً يتمثل في تراجع إنتاج الطاقة الكهربائية مقابل استمرار ارتفاع الاستهلاك. هذا الاختلال بين العرض والطلب يعكس محدودية الاعتماد على السدود والمنشآت المائية كمصدر رئيسي للطاقة، نظراً للعوامل الطبيعية مثل تقلبات الموارد المائية والجفاف، إضافة إلى القيود التقنية المرتبطة بعدم إمكانية التوسع الكبير في مشاريع جديدة.

اقتصادياً، يعني هذا الوضع ارتفاع الضغط على بقية المصادر التقليدية لتغطية الطلب، وهو ما قد يترتب عليه

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

زيادة في التكاليف العمومية الخاصة بإنتاج وتوزيع الطاقة. كما قد يضعف من القدرة التنافسية للاقتصاد الوطني إذا لم تتم معالجة الفجوة الطاقوية عبر مصادر بديلة. أما اجتماعيًا، فإن أي عجز في تلبية الطلب المستقبلي قد ينعكس على جودة حياة المواطنين من خلال تأثيره على استقرار التزويد بالطاقة وعلى أسعارها، بما قد يخلق ضغوطًا اجتماعية إضافية. ومن هذا المنطلق، تبرز أهمية هذه التوقعات كأداة مساعدة في التخطيط الاستراتيجي للطاقة، حيث تدعم بوضوح أهداف التحول الطاقوي في الجزائر. إذ تسعى الدولة إلى رفع مساهمة الطاقات المتجددة وخاصة الطاقة الشمسية والرياح لتعويض تراجع الطاقة الكهربائية وضمان توازن المنظومة الطاقوية. كما أن الانتقال إلى نموذج طاقوي متنوع يقلل من الاعتماد على الوقود الأحفوري، ويعزز التزامات الجزائر في مجال الاستدامة البيئية وخفض الانبعاثات الكربونية. وبالتالي، فإن دقة التنبؤات المعتمدة بالنموذج العصبي الاصطناعي (ANN) لا تقدم مجرد قراءة تقنية للبيانات، بل تمثل مؤشرًا استراتيجيًا يعكس الحاجة الملحة إلى تسريع التحول الطاقوي، بما له من آثار اقتصادية إيجابية في تنويع مصادر الطاقة وتقليل الكلفة على المدى البعيد، وانعكاسات اجتماعية تتمثل في ضمان أمن الطاقة وتحسين رفاهية المجتمع.

الفصل الثالث: التنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر

خلاصة:

من خلال هذا الفصل، تمت معالجة موضوع التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر في أفق 2035 وفق خطوات منهجية متكاملة. فبعد عرض واقع إنتاج واستهلاك الطاقة الكهربائية في الجزائر ضمن المبحث الأول، جرى تحليل خصائص السلاسل الزمنية للإنتاج والاستهلاك من خلال الدراسة الوصفية والاختبارات الإحصائية الخاصة بالاستقرارية، مما أتاح التعرف على طبيعة البيانات واتجاهاتها العامة.

بعد ذلك، تم تطبيق ثلاثة نماذج كمية للتنبؤ، وهي: نموذج بوكس-جنكينز (Box-Jenkins)، وأسلوب التمهيد الأسّي (Holt-Winters)، وتقنية الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN)، مع إجراء مفاضلة بينها وفق مؤشرات الدقة الإحصائية. وقد أظهرت النتائج أن نموذج الشبكات العصبية الاصطناعية هو الأكثر كفاءة ودقة، حيث حقق أقل قيم لمؤشرات الخطأ مقارنة بباقي النماذج.

كما بينت التنبؤات المستقبلية للفترة (2025-2035) أن إنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر مرشح للتراجع التدريجي، في حين يتجه الاستهلاك نحو الارتفاع، وهو ما يخلق فجوة واضحة بين العرض والطلب. ويؤكد هذا التباين الحاجة الملحة إلى دعم استراتيجيات التحول الطاقوي عبر تنويع مصادر الطاقات المتجددة، خاصة الطاقة الشمسية والرياح، لتأمين التوازن الطاقوي وتعزيز الاستقرار الاقتصادي والاجتماعي.

في ضوء ما سبق، يمكن القول إن هذا الفصل أبرز أهم النتائج العملية، حيث تم تحديد النموذج الأمثل (ANN)، وكذا رسم صورة واضحة للتحديات المستقبلية التي تواجه الجزائر في مجال الطاقة الكهربائية، بما يوجّه السياسات العامة نحو حلول أكثر استدامة.

الخاتمة العامة

خاتمة عامة:

شهدت الجزائر في السنوات الأخيرة اهتمامًا متزايدًا بمجال الطاقات المتجددة، نظرًا لأهمية هذه المصادر في تحقيق الاستدامة الطاقوية وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري. ومن هذا المنطلق، ركزت الدراسة على تحليل واقع الطاقات المتجددة في الجزائر، واستعراض المصادر المختلفة مثل الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، الطاقة الكهرومائية، الطاقة الحيوية، الهيدروجين الأخضر والطاقة الحرارية الأرضية، مع إبراز مميزات وعيوب كل مصدر. في الجانب النظري، تم تناول الإطار التشريعي والتنظيمي للطاقة المتجددة في الجزائر، وتقييم القدرات الوطنية الحالية، وكذلك استعراض خارطة الطريق نحو تحقيق أهداف الطاقة المتجددة بحلول 2030، بما يتيح فهمًا واضحًا للسياسات والاستراتيجيات الوطنية في هذا المجال. كما قدمت الدراسة خلفية مفصلة حول نماذج التنبؤ القياسية والتقنيات الحديثة للذكاء الاصطناعي، بما فيها السلاسل الزمنية، تحليل الانحدار، منهجية Box-Jenkins، أساليب التمهيد الأسّي، والشبكات العصبية الاصطناعية.

أما في الجانب التطبيقي، فقد ركزت الدراسة على التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر حتى أفق 2035، باستخدام برامج EViews 13 و MATLAB وقد أظهرت النتائج أن الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) قدمت أفضل أداء من حيث مؤشرات الدقة RMSE، MAE، MAPE، و Theil، مقارنة بأسلوب التمهيد الأسّي الثلاثي (Holt-Winters) ومنهجية Box-Jenkins. هذه النتائج تؤكد أن ANN هو النموذج الأنسب للتنبؤ بالسيناريوهات المستقبلية للطاقة الكهرومائية، بما يضمن موثوقية أكبر لتقديرات الإنتاج والاستهلاك.

بشكل عام، توضح هذه الدراسة كيف يمكن الربط بين النظرية والتطبيق في مجال الطاقات المتجددة، حيث أتاح الجانب النظري تقديم رؤية شاملة حول الوضع الحالي للطاقات المتجددة في الجزائر والتحديات والفرص المرتبطة بها، بينما أظهرت الدراسة التطبيقية فعالية النماذج التنبؤية المختلفة، مع إبراز كفاءة الشبكات العصبية الاصطناعية كأداة استراتيجية لدعم صنع القرار في التحول الطاقوي الوطني.

أ. نتائج اختبار الفرضيات:

✓ **الفرضية الأولى:** "هل يكون لاستخدام كل من منهجية Box-Jenkins والتمهيد الأسّي الثلاثي نتائج دقيقة في التنبؤ باستهلاك وإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر؟"

أظهرت نتائج الدراسة أن منهجية Box-Jenkins قدمت قدرة مقبولة على التنبؤ، حيث كانت القيم التنبؤية مقارنة للبيانات الفعلية، إلا أن مؤشرات الدقة (RMSE، MAE، MAPE و Theil) سجلت مستويات أعلى من الخطأ مقارنة بباقي النماذج، مما يجعل دقته نسبية ومحدودة.

في المقابل، حقق نموذج Holt-Winters أداءً أفضل، حيث انخفضت نسب الخطأ بشكل ملحوظ مقارنة بـ Box-Jenkins، وأظهر قدرة جيدة على تمثيل اتجاهات السلاسل الزمنية والتنبؤ بمستقبل الإنتاج والاستهلاك. غير أن أدائه ظل أقل دقة من نموذج الشبكات العصبية الاصطناعية. وعليه يمكن القول إن الفرضية الأولى صحيحة جزئياً، إذ أن كلا النموذجين يقدمان نتائج مقبولة، مع تفوق Holt-Winters على Box-Jenkins.

✓ الفرضية الثانية: "هل يؤدي تطبيق نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) إلى تحقيق تنبؤات ذات جودة عالية لاستهلاك وإنتاج الطاقة الكهربائية في الجزائر؟" أظهرت النتائج أن نموذج ANN حقق أعلى مستويات الدقة بين جميع النماذج، حيث سجل أدنى قيم لمؤشرات الخطأ (RMSE، MAE، MAPE، Theil)، وكانت القيم التنبؤية قريبة جداً من القيم الفعلية. هذا يعكس قدرة كبيرة للنموذج على تمثيل وتحليل السلاسل الزمنية بدقة عالية، مما يؤكد صحة الفرضية الثانية بشكل كامل.

وبالتالي، فإن الإجابة على الإشكالية المطروحة، تتمثل في أن نموذج الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) هو النموذج الأمثل والأكثر دقة وفعالية، بينما تبقى نماذج Box-Jenkins و Holt-Winters ذات نتائج مقبولة لكنها أقل كفاءة مقارنة به.

ب. نتائج الدراسة:

يمكن تلخيص أهم النتائج التي توصلت إليها الدراسة في النقاط التالية:

1) النتائج النظرية:

1. يمثل التنبؤ أداة أساسية في التخطيط الطاقوي وصياغة السياسات المستقبلية، لكونه يساعد على الاستعداد للتغيرات الاقتصادية والبيئية.
2. تبين أن نماذج التنبؤ الكمية، وعلى رأسها منهجية Box-Jenkins، أساليب Holt-Winters، وتقنيات الذكاء الاصطناعي مثل الشبكات العصبية الاصطناعية، توفر أدوات فعالة لتحليل السلاسل الزمنية والتنبؤ بمستقبل إنتاج واستهلاك الطاقة.
3. أظهرت الشبكات العصبية الاصطناعية قدرتها العالية على التعامل مع البيانات المعقدة والمتذبذبة بدقة تفوق النماذج التقليدية، مما يجعلها خياراً مميّزاً في مجال التنبؤ الطاقوي.

2) النتائج التطبيقية:

1. تعكس السلسلة الزمنية لإنتاج الطاقة الكهرومائية في الجزائر (1965-2024) محدودية الاعتماد على هذا المصدر، حيث يظهر اتجاه تنازلي على المدى الطويل متأثراً بعوامل طبيعية واقتصادية.
 2. أظهر الاستهلاك تذبذبات حادة مع ميل عام نحو التراجع في السنوات الأخيرة نتيجة للجفاف وضعف الاستثمارات في الطاقة الكهرومائية.
 3. بالمقارنة بين النماذج، أظهرت الدراسة أن:
 - ✓ ANN هو الأكثر دقة وفعالية، مسجلاً أدنى مؤشرات خطأ.
 - ✓ يليه Holt-Winters بأداء متوسط.
 - ✓ بينما جاء Box-Jenkins بأضعف النتائج.
 4. التوقعات المستقبلية (2025-2035) تشير إلى تراجع إنتاج الطاقة الكهرومائية مقابل زيادة الاستهلاك، مما يخلق فجوة متنامية تستدعي الاعتماد على مصادر بديلة كالشمس والرياح.
- ت. توصيات و اقتراحات:

- انطلاقاً من هذه الدراسة ونتائجها، نقدم التوصيات التالية:
1. ضرورة الاعتماد على نماذج الذكاء الاصطناعي (ANN وغيرها) في التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة، لما توفره من دقة ومرونة في التعامل مع البيانات المعقدة.
 2. وضع خطط طاقوية وطنية تعتمد على التنبؤات الدقيقة لضمان أمن الطاقة على المدى الطويل.
 3. تشجيع برامج البحث العلمي لتطوير تطبيقات الذكاء الاصطناعي في التخطيط الطاقوي.
 4. إنشاء مراكز بحث متخصصة في الذكاء الاصطناعي والطاقة، لتطوير نماذج وطنية للتنبؤ تراعي خصوصيات المناخ والاقتصاد الجزائري.
 5. إدماج تقنيات الذكاء الاصطناعي بشكل ممنهج في قطاع الطاقة بالجزائر، من خلال اعتماد الشبكات العصبية الاصطناعية والتعلم العميق لرصد وتحليل استهلاك وإنتاج الطاقات المتجددة.
 6. تطوير قواعد بيانات وطنية موحدة خاصة بالطاقة المتجددة، قابلة للاستغلال عبر تقنيات الذكاء الاصطناعي، بما يضمن توفر بيانات دقيقة وموثوقة للتنبؤ والتحليل.
 7. تكوين الكفاءات البشرية في مجالي الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات، لتوفير خبرات وطنية قادرة على تطوير وتشغيل النماذج التنبؤية.
 8. تشجيع الشراكات بين الجامعات والقطاع الصناعي لتطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي في مشاريع طاقوية فعلية، بما يضمن نقل التكنولوجيا وتوسيع نطاق استخدامها.

ث. آفاق البحث:

- استنادا إلى ما تم عرضه وتحليله في هذه الدراسة، يمكن اقتراح عدة مسارات للبحث المستقبلي لتطوير التنبؤات وتحسين استغلال الطاقات المتجددة في الجزائر:
1. استخدام الذكاء الاصطناعي في تقييم الجدوى الاقتصادية لمشاريع الطاقة المتجددة، عبر دمج البيانات التقنية مع المتغيرات المالية والبيئية لتقديم قرارات استثمارية أكثر دقة.
 2. دمج الشبكات العصبية الاصطناعية مع نماذج السلاسل الزمنية (Hybrid Models) لتحسين دقة التنبؤ بإنتاج واستهلاك الطاقة المتجددة على المدى الطويل.
 3. توسيع قاعدة البيانات لتشمل تأثيرات التغير المناخي والعوامل الاقتصادية على الإنتاج والاستهلاك.
 4. استخدام تقنيات تعلم الآلة الحديثة مثل التعلم العميق والشبكات العصبية التكرارية (RNN/LSTM) للتنبؤ بالتقلبات قصيرة وطويلة المدى.
 5. ربط نتائج التنبؤ مباشرة باستراتيجيات التحول الطاقوي في الجزائر لضمان استدامة المنظومة الطاقوية.
 6. البحث في دمج الذكاء الاصطناعي مع سياسات الطاقة الوطنية لوضع خطط طويلة الأجل، قادرة على استباق تحديات ندرة الموارد المائية والتحول المناخي.

قائمة المراجع

قائمة المراجع:

1) المراجع باللغة العربية:

الكتب:

1. جون ر. فانشي ، الطاقة التقنية والتوجهات للمستقبل ، ترجمة (د.عبد الباسط علي صالح كرمان) ، سلسلة كتب التقنيات الإستراتيجية والمتقدمة ، مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية ، المنظمة العربية للترجمة ، مركز دراسات الوحدة العربية ، ط 1، بيروت، 2011.
2. سرور على سرور ، نظم دعم الادارة نظم القرارات و نظم الخبرة ،الرياض دار المريخ، 2000.
3. سعيد غالب ياسين .نظم مساندة القرار .دار المنهاج للنشر و التوزيع الطبعة الاولى ،2006.
4. سمير مصطفى شعراوي، مقدمة في التحليل الحديث للسلاسل الزمنية، الطبعة الأولى، مركز النشر العلمي، مطابع جامعة الملك عبد العزيز، المملكة العربية السعودية، 2005.
5. شيخي محمد، طرق الاقتصاد القياسي، محاضرات وتطبيقات، الحامد، الجزائر، الطبعة الأولى، 2011.
6. محمد احمد حسان نظم المعلومات الادارية الدار الجامعية 2008.
7. محمد رأفت إسماعيل رمضان، علي جمعان الشكيل ،الطاقة المتجددة، الطبعة الثانية، دار الشروق، بيروت، 1988.
8. منال محمد البكري ، جلال ابراهيم العبد "مقدمة في نظم المعلومات الادارية المفاهيم الاساسية و التطبيقات" دار الجامعة الجديدة للنشر.
9. هاجر بوعوة، تطبيقات الذكاء الاصطناعي الداعمة للقرارات الإدارية في منظمات الأعمال (الإصدار الطبعة الأولى)، برلين، ألمانيا: المركز الديمقراطي العربي للدراسات الإستراتيجية و السياسية و الاقتصادية، 2019.
10. هشام حريز، دور إنتاج الطاقة المتجددة في إعادة هيكلة سوق الطاقة، دار الوفاء، الطبعة الأولى، مصر، 2014.

المذكرات و الاطروحات:

11. بختاوي فاطيمة الزهراء، تحليل فوريه و تقنية الشبكات العصبية الاصطناعية و نماذج ARIMA للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية-دراسة حالة مؤسسة سونلغاز-مقاطعة سعيدة-، أطروحة تدخل ضمن متطلبات نيل شهادة الدكتوراه علوم في العلوم الاقتصادية ،جامعة أبي بكر بلقايد -تلمسان، 2018-2019.
12. جباري لطيفة مصطفى، طرق اتخاذ القرار باستخدام الذكاء الاصطناعي:دراسة مقارنة للتنبؤ بالطاقة الكهربائية لولاية تلمسان باستعمال الشبكات العصبية الاصطناعية، أطروحة لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم الاقتصادية تخصص: بحوث العمليات و تسيير المؤسسات، جامعة أبي بكر بلقايد تلمسان، الجزائر، 2015-2016.

13. جميلة منجيل، دور البدائل الاستثمارية في هيكلية جديدة لتمويل الاقتصاد الجزائري —دراسة حالة الطاقات المتجددة الجزائر، أطروحة لنيل شهادة دكتوراه الطور الثالث في العلوم الاقتصادية، جامعة فرحات عباس سطيف-1، الجزائر، 2018-2019.
14. حماش وليد، التكنولوجيات النظيفة كآلية للحد من التلوث الصناعي لتجسيد التنمية الصناعية المستدامة دراسة حالة الطاقة النظيفة في الجزائر، أطروحة مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه علوم في العلوم الاقتصادية، جامعة فرحات عباس سطيف 1، الجزائر، 2019-2020.
15. حمزة جعفر، آليات تمويل و تنمية مشاريع الطاقة المتجددة لتحقيق التنمية المستدامة في الجزائر، أطروحة مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم الاقتصادية تخصص الاقتصاد الدولي و التنمية المستدامة، جامعة فرحات عباس سطيف، 2017-2018.
16. دربال أمينة ، محاولة التنبؤ بمؤشرات الأسواق المالية العربية باستعمال النماذج القياسية دراسة حالة : مؤثر سوق دبي المالي أطروحة دكتوراه في العلوم الاقتصادية ، جامعة تلمسان ، الجزائر ، 2014.
17. ذبيحي عقيلة، الطاقة في ظل التنمية المستدامة (دراسة حالة الطاقة المستدامة في الجزائر)، مذكرة تدخل ضمن متطلبات نيل شهادة ماجستير في العلوم الاقتصادية، جامعة منتوري قسنطينة، الجزائر، 2008-2009.
18. زاهي محمد الأمين، دور الطاقات الخضراء في تحقيق التنمية المستدامة * دراسة التجربة الجزائرية ، أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه في العلوم الاقتصادية، جامعة يحي فارس بالمدينة، الجزائر 2018-2019.
19. زواوي أحلام، دور اقتصاديات الطاقة المتجددة في تحقيق التنمية المستدامة في الدول المغاربية، مذكرة ماجستير في الاقتصاد الدولي والتنمية المستدامة، جامعة سطيف، الجزائر، 2012-2013.
20. سحاري ريمة، أثر الطاقات المتجددة على النمو الاقتصادي-دراسة تحليلية قياسية حالة الجزائر(1985-2019)، أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه الطور الثالث(ل م د) قسم العلوم الاقتصادية، جامعة الجزائر 03، 2022-2023.
21. سميرة مومن، تمويل مشروعات الطاقة المتجددة لتحقيق التنمية المستدامة دراسة حالة الجزائر، أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه الطور الثالث lmd في العلوم الاقتصادية، جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي-تبسة الجزائر، 2021-2022.
22. عتروس سهيلة ، استخدام منهجية بوكس جنكز و الشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية بمؤسسة سونلغاز —دراسة حالة:ولاية بسكرة- رسالة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه علوم في علوم تسيير، جامعة محمد خيضر بسكرة، الجزائر 2017-2018.
23. عدالة العجال، استخدامات العمليات العشوائية و نماذج الشبكات العصبية في التنبؤ الاقتصادي، و دورها في دراسة الآفاق المستقبلية للواقع التقني و التسويقي للمؤسسة الصناعية بالجزائر، أطروحة لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم الاقتصادية، جامعة وهران، الجزائر، 2010-2011.

24. عماد تكواشت، دور الطاقة المتجددة في مواجهة الطلب على الطاقة في الجزائر، أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه في علوم العلوم الاقتصادية، جامعة الجزائر 03، 2018-2019.
 25. عمر شريف، استخدام الطاقات المتجددة ودورها في التنمية المحلية المستدامة : دراسة حالة الطاقة الشمسية في الجزائر، أطروحة دكتوراه الدولة في العلوم الاقتصادية، جامعة الحاج لخضر-باتنة-،الجزائر، 2006-2007.
 26. فاتن عبد الله إبراهيم صالح، أثر تطبيق الذكاء الاصطناعي و الذكاء العاطفي علي جودة اتخاذ القرار، رسالة ماجستير في الإدارة الأعمال،الأردن، جامعة الشرق الأوسط للدراسات العليا، 2008-2009.
 27. قارة سامي، أثر الطرق الحديثة لتسيير المخاطر البنكية على الأداء المالي للبنوك التجارية العمومية -دراسة ميدانية بالوكالات العمومية البنكية بولاية المسيلة- ، أطروحة مقدمة لنيل شهادة دكتوراه الطور الثالث في: علوم التسيير، جامعة محمد بوضياف بالمسيلة ،الجزائر، 2022-2023.
 28. محمد مداحي،فعالية الاستثمار في الطاقات المتجددة في ظل التوجه الحديث للاقتصاد الأخضر ،التوجه الجزائري على ضوء بعض التجارب الدولية،أطروحة مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه في العلوم الاقتصادية،جامعة يحي فارس بالمدينة، 2015-2016.
 29. مروة زهواني، تطبيقات نماذج الذكاء الاصطناعي للتنبؤ بمخاطر التعثر المالي في المؤسسة الاقتصادية-دراسة حالة-، أطروحة دكتوراه الطور الثالث في العلوم الاقتصادية،جامعة غرداية،السنة 2021-2022.
 30. يوسف كلوم، الطاقات المتجددة كآلية مزدوجة لدعم الاقتصاد الوطني و حماية البيئة،أطروحة مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه الطور الثالث في الحقوق،جامعة زيان عاشور -الجلفة،الجزائر.
-  **المطبوعات:**
31. بن معزو محمد زكريا، نماذج التنبؤ، مطبوعة بيداغوجية، قسم العلوم الاقتصادية، كلية العلوم الاقتصادية وعلوم التسيير،جامعة باجي مختار- عنابة،الجزائر، 2021-2022.
-  **المؤتمرات و الملتقيات العلمية:**
32. مروان عبدول حمد عشور.(2016). الشبكات العصبية الاصطناعية، المؤتمر العلمي الدولي الخامس لاتحاد الاحصائيين العرب-القاهرة. DOI:10.13140/RG.2.2.28012.18563
 33. فروم محمد الصالح، بوجعادة إلياس، سليمان عز الديف،مداخلة بعنوان: "دور أنظمة المعلومات المعتمدة على الذكاء الاصطناعي في عملية صنع القرارات الإدارية"، الملتقى الوطني السادس حول: الأساليب الكمية ودورها في اتخاذ القرارات الإدارية، كلية العلوم الاقتصادية والتجارية وعلوم . التسيير، جامعة 20 أوت 1955 سكيكدة، الجزائر، 27-28 جانفي 2009.

34. عمر ملوكي، وأحمد الصالح سباع، تطبيق استراتيجيات الذكاء الاصطناعي على المستوى (الإمارات العربية المتحدة نموذجاً)، الملتقى الدولي حول: التفكير الاستراتيجي و استشراف المستقبل (الأنماط الممارسات المعوقات)، الصفحات 1-18.
 35. الشريف بوفاس، ربيع بلايلية، تفعيل استخدام الطاقة المتجددة كاستراتيجية للتنويع الطاقوي في الجزائر، الملتقى الوطني حول :المؤسسات الاقتصادية الجزائرية و استراتيجيات التنويع الاقتصادي في ظل انهيار أسعار المحروقات يومي 25 و 26 أفريل 2017، كلية العلوم الاقتصادية و التجارية و علوم التسيير، جامعة 08 ماي 1945- قلمة-.
 36. خليفة الحاج، مزواغي جيلالي، تواتي خديجة، تجربة الجزائر في التحول إلى استخدام الطاقات الخضراء لتحقيق الاستدامة، مجلة الإستراتيجية والتنمية، عدد خاص بالمؤتمر الدولي الأول: الطاقة الخضراء والتنمية المستدامة، مقاربات وتجارب، جامعة ابن باديس، مستغانم، مجلد 09، عدد خاص (الجزء الأول) /جويلية 2019 .
 37. راشدي فاطمة، غوال نادية، بلهاشمي جهيزة، تقييم سياسة التمويل الطاقة الخضراء في الجزائر في ظل التوجه نحو تنويع و تنمية الاستثمار الطاقوي وفق برنامج المخطط الوطني للطاقات المتجددة 2011-2030 ، مجلة الإستراتيجية والتنمية، عدد خاص بالمؤتمر الدولي الأول: الطاقة الخضراء والتنمية المستدامة، مقاربات وتجارب، جامعة ابن باديس، مستغانم، مجلد 09، عدد خاص (الجزء الأول) /جويلية 2019 .
-  **المجلات العلمية:**
38. احمد عبد الحسين الإمارة، تصميم نظام معلوماتي مقترح لدعم كفاءات الكادر الوسطي باستخدام تقنية الشبكات العصبية /دراسة حالة في جامعة الكوفة، مجلة الغزي للعلوم الاقتصادية و الادارية، المجلد 09 العدد 27 (2013).
 39. بن العارية أحمد.(2022). استخدام نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ بمبيعات الطاقة الكهربائية بولاية أدرار ،مجلة التكامل الاقتصادي، المجلد:10- العدد:02، 92-108.
 40. بن عبد العزيز سفيان . مراس محمد . غربي صباح ، فعالية النماذج الذكية في بناء وتطوير الأنظمة التنبؤية في مجال التسيير، استخدام نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية ANN للنمذجة والتنبؤ، مجلة البشائر الاقتصادية، المجلد السادس، العدد 02 الصفحة 1-16، الجزائر، ديسمبر 2020 .
 41. بن نور فريد، نايت مرزوق محمد العربي. استخدام نماذج الذكاء الاصطناعي للتنبؤ باحتياجات الصرف الأجنبي في الجزائر- نموذج الشبكات العصبية الاصطناعية ANN ،مجلة اقتصاديات شمال افريقيا، المجلد 15/العدد 01، 2019، 67-82.
 42. بوزرورة ليندة، قطاف سهيلة، برنامج تطوير الطاقات المتجددة و الفعالية الطاقوية في الجزائر في الفترة بين 2015-2030، مجلة دفاتر اقتصادية المجلد 10-العدد: 02 (2019) ص 148-158.

43. بوعروري فاطمة، بو درامة مصطفى ، دور الشبكات العصبونية الاصطناعية في التنبؤ بالمبيعات لدعم صنع القرارات الإدارية بالمؤسسات - دراسة حالة مؤسسة الأسمنت بعين الكبيرة، مجلة دراسات وأبحاث اقتصادية في الطاقات المتجددة العدد الثامن جوان، 2018.
44. حادة مدوري، محمد مكيديش. (2017). دراسة مقارنة بين نماذج الذاكرة الطويلة ARFIMA، والشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ بسعر صرف الدينار الجزائري، مجلة الباحث، المجلد/17 العدد/ 159، 17-171.
45. حمد بن عبد الله بن ناصر الغنام، تحليل السلسلة الزمنية لمؤشر أسعار الأسهم في المملكة العربية السعودية باستخدام منهجية بوكس جنكيز (Box-Jenkins) مجلة جامعة الملك عبد العزيز للاقتصاد والإدارة، العدد 02 المجلد 17، ص 03-26، 2003.
46. خلود موسى عمران ريسان عبد الامام زعلان، استخدام بعض الأساليب الاحصائية للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في المملكة العربية السعودية، مجلة العلوم الاقتصادية، جامعة البصرة، العراق، المجلد الثامن، العدد 29، 2012.
47. رحمة بلهادف، رشيد يوسف، الاستثمار في الطاقات المتجددة خيار استراتيجي للانتقال نحو الاقتصاد الأخضر في إطار الاستغلال المستدام للنفط العربي، مجلة الإستراتيجية والتنمية، جامعة ابن باديس، مستغانم، المجلد 2 العدد 1.
48. زكريا يحيى الجمال، عمر صابر، مقارنة التنبؤ باستخدام شبكة الانحدار العصبية المعممة بأسلوب الشبكات العصبية وتحليل الانحدار، المجلة العراقية للعلوم الاحصائية، المجلد 12/العدد 21، 2012.
49. سابق نسيم، 2019، الاطار القانوني و المؤسساتي لقطاع الطاقات المتجددة في الجزائر، مجلة الباحث للدراسات الأكاديمية، المجلد 06/العدد 01، ص 526-542.
50. سعدية عبد الكريم طعمة، استخدام تحليل السلاسل الزمنية للتنبؤ بأعداد المصابين بالاورام الخبيثة في محافظة الأنبار مجلة جامعة الأنبار للعلوم الاقتصادية والإدارية، المجلد 04 العدد 08 ص 371-393.
51. شكاكطة عبد الكريم ، سياسات التعاون الأوروبي الجنوب المتوسطي في مجال الطاقة: واقع و انعكاسات، المجلة الجزائرية للسياسات العامة العدد 6- فيفري 2015 ص 27-44.
52. شين خثير، مزراق وردة، الاستثمار في الطاقات المتجددة كأداة لتحقيق التنمية المستدامة (استعراض لبعض تجارب الدول العربية النفطية في مجال الاستثمار في الطاقات المتجددة)، مجلة إيليزا للبحوث و الدراسات، المجلد 06/العدد: الخاص (2021).
53. صافية أولدرابح - إقلولي، محمد إقلولي، 2022، مجلة صوت القانون، المجلد 08/العدد 02، الإطار القانوني و المؤسساتي للطاقات المتجددة.
54. طبيب سعيدة، سنوسي بن عبو، إستراتيجية استغلال مصادر الطاقات المتجددة بكفؤ لضمان أمن طراقي مستدام الطاقة الشمسية في الجزائر، مجلة الاستراتيجية والتنمية، المجلد 08/العدد 01 (2018).

55. عبد العظيم عبد الكريم، فوزية غالب عمر، استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية للتنبؤ من النموذج للاقتصاد الكلي متعدد الأبعاد في العراق للمدة 1996-2007، مجلة الاقتصادي الخليجي العدد (24) 2013 ص 1-38.
56. فتيحة بن سعدي، مصطفى طويطي، ذهبية بن عبد الرحمان، التنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في المملكة العربية السعودية إلى غاية 2030-دراسة قياسية باستخدام منهجية بوكس و جنكيز، مجلة الإدارة و التنمية للبحوث و الدراسات، المجلد 12/العدد: 02 (ديسمبر 2023)، ص 294-312.
57. فروحات حدة ، الطاقات المتجددة كمدخل لتحقيق التنمية المستدامة في الجزائر، دراسة لواقع مشروع تطبيق الطاقة الشمسية في الجنوب الكبير بالجزائر، مجلة الباحث، المجلد 11 العدد 11 (2012) ص 149-156.
58. كسير سيمير، عادل مستوي، الاتجاهات الحالية لإنتاج واستهلاك الطاقة الناضبة ومشروع الطاقة المتجددة في الجزائر - رؤية تحليلية انية ومستقبلية- مجلة العلوم الاقتصادية والتسيير والعلوم التجارية، العدد 2015/14.
59. محمد طالي، محمد ساحل، أهمية الطاقة المتجددة في حماية البيئة لأجل التنمية المستدامة-عرض تجربة ألمانيا-، مجلة الباحث ، العدد 06، الجزائر، 2008.
60. محمد مغنم، سفيان أبحري، دور الطاقات المتجددة في تحقيق التنمية المستدامة بالوطن العربي: البرنامج الوطني للطاقات المتجددة 2016-2030 بالمملكة السعودية أنموذجا، مجلة الإبداع، المجلد 13/ العدد 01: (2023).
61. مختار حميدة، بن سليمان يحي، دراسة تحليلية تنبؤية لحجم إنتاج مؤسسة مدبغة الهضاب العليا بالجلفة للفترة بين شهر جانفي 2010 وشهر ديسمبر 2013، مجلة إدارة الأعمال والدراسات الاقتصادية، كلية العلوم الاقتصادية والتجارية وعلوم التسيير، جامعة زيان عاشور بالجلفة، الجزائر، العدد الأول، مارس 2015.
62. موساوي رفيقة، موساوي زهية، دور الطاقات المتجددة في تحقيق التنمية المستدامة، مجلة المالية و الأسواق، المجلد 04 العدد 01، 2017.
63. ناظم عبد الله عبد الحمدي، سعدية عبد الكريم طعمه، استخدام نماذج السلاسل الزمنية الموسمية للتنبؤ باستهلاك الطاقة الكهربائية في مدينة الفلوجة، مجلة جامعة الأنبار للعلوم الاقتصادية والإدارية، جامعة الأنبار، العراق، المجلد 4، العدد 7، 2011.
64. نذير غانية، أحمد نصير، يونس زين، برنامج المخطط الوطني للطاقات المتجددة 2011/2030 كاستراتيجية وطنية للخروج من التبعية النفطية وضمان أمن طاقي مستدام في الجزائر، مجلة العلوم الإدارية العراقية، مجلة فصيلة متخصصة محكمة، المجلد: 3 العدد: 2 لسنة: 2019.
65. نشات جاسم محمد، هادي طلال جعفر، بناء نظام للتنبؤ بطلب الحمل الكهربائي في بغداد ،مجلة كلية مدينة العلم الجامعة، كلية مدينة العلم الجامعة، العراق ، المجلد 9 العدد 1 ، 2017.

66. هدى خلّيل ابراهيم الحسّ، عليّ محمد ثجل المعموري، استخدام الشبكات العصبية الاصطناعية في تطوير دور مراقب الحسابات في اكتشاف الاخطاء الجوهرية بحث تطبيقي في الشركة العامة للصناعات الكهربائية وشركة نصر العامة للصناعات الميكانيكية، مجلة دراسات محاسبة ومالية، جامعة بغداد العراق، المجلد العاشر، العدد 31.

67. هيام عبد المجيد حياوي، قصي احمد طه، دراسة سلسلة الاوراق المالية باستخدام PMRS و ANN و ARIMA"، المجلة العراقية للعلوم الإحصائية، المجلد 13 العدد 23 ص 99-118، 2013، ص 07

68. يغان علاء ناظم وقصي عصام حميد، دراسة و تحليل مستوى التذبذب للتضخم في الأرقام القياسية بالاعتماد على السلاسل الزمنية ((ARIMA مقرونة مع نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية (ANNM)، مجلة كلية الرافدين الجامعة للعلوم، مج. 2013، ع. 31، ص ص. 75-96.

المقالات المنشورة على الإنترنت:

69. أحمد عادل جميل، و عثمان حسين عثمان، إمكانية استخدام تقنيات الذكاء الصناعي في ضبط جودة التدقيق الداخلي (دراسة الميدانية في الشركات المساهمة العامة الأردنية، 1-14، ص 10

<https://www.scribd.com/document/862845926/%D8%A5%D9%85%D9%83%D8%A7%D9%86%D9%8A%D8%A9-%D8%A7%D8%B3%D8%AA%D8%AE%D8%AF%D8%A7%D9%85-%D8%AA%D9%82%D9%86%D9%8A%D8%A9-%D8%A7%D9%84%D8%B0%D9%83%D8%A7%D8%A1-%D8%A7%D9%84%D8%B5%D9%86%D8%A7%D8%B9%D9%8A>

70. فهد آل قاسم، مدخل الى علم الذكاء الاصطناعي، نقلا عن الرابط:

www.myreaders.info/html/artificial_intelligence.html

71. كافي فريدة، الاستثمار في الطاقة المتجددة كمدخل لدفع عجلة التنمية المستدامة في الجزائر: الاشارة إلى مشروع صحراء صولار بريد، نشرية الطاقات المتجددة، العدد 2، وزارة التعليم العالي والبحث العلمي، مركز تنمية الطاقات المتجددة، الجزائر، على الموقع الالكتروني: <https://www.cder.dz/spip.php?article2883>

الهيئات و مواقع الانترنت:

72. مركز تنمية التكنولوجيات المتطورة، المتاح على الموقع الالكتروني: <https://www.cdta.dz/ar>

73. مركز تنمية الطاقات المتجددة، المتاح على الموقع الالكتروني: <https://www.cder.dz/spip.php?article1394>

74. مركز تنمية الطاقات المتجددة، المتاح على الموقع الالكتروني: <https://www.cder.dz/spip.php?article1395>

75. الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية، وزارة الطاقة و المناجم والطاقات المتجددة، الطاقات الجديدة والمتجددة وإدارة الطاقة المتوفر على: <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>

76. الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية، وزارة البيئة وجودة الحياة، مهام قطاع البيئة، المتاح على الموقع الالكتروني: <https://www.me.gov.dz/fr/missions-du-secteur-environnemental>

77. اللجنة الاقتصادية والاجتماعية لغربي آسيا (الإسكوا)، دور الطاقة المتجددة في الحد من تغيّر المناخ في منطقة الإسكوا، الأمم المتحدة، نيويورك، 2012.
78. المركز الديمقراطي العربي للدراسات الاستراتيجية، الاقتصادية و السياسية، الطاقة المتجددة ودورها في تحقيق التنمية المستدامة في ضوء التجارب الدولية دراسة حالة “مصر” ، على الموقع الالكتروني:
<https://democraticac.de/?p=55341>
79. الموقع الرسمي لوزارة الطاقة و المناجم والطاقات المتجددة: <https://www.energy.gov.dz/?article=resultats-attendus>
80. الوكالة الوطنية لتطوير الطاقة و ترشيدها (APRUE) ، عن الوكالة، المتاح على الموقع الالكتروني:
<https://www.aprue.org.dz>
81. توفيق حسني، رضوان مالك، و نزيه زويوش. (2021). الجزائر 100% طاقة متجددة توصيات من أجل استراتيجية وطنية للطاقات المتجددة. مؤسسة فريدريش ايبرت.
82. مركز تنمية الطاقات المتجددة، المتاح على الموقع الالكتروني: <https://www.cder.dz/spip.php?rubrique565>
83. موقع وكالة الطاقة الدولية ، على الموقع الالكتروني: <https://www.iea.org>
84. وحدة البحث في الطاقات المتجددة في الوسط الصحراوي بأدرار، التعريف بالوحدة ، المتاح على الموقع الالكتروني:
<https://urirms.cder.dz/%d8%a7%d9%84%d8%aa%d8%b9%d8%b1%d9%8a%d9%81-%d8%a8%d8%a7%d9%84%d9%88%d8%ad%d8%af%d8%a9>
85. وزارة الطاقة، برنامج تطوير الطاقات المتجددة والنجاعة الطاقوية، الجزائر، صات أنفو، سونلغاز، الجزائر، 2016.
86. وكالة الانباء الجزائرية، صدور مرسوم تنفيذي يوضح مهام محافظة الطاقات المتجددة والفعالية الطاقوية، المتاح على الموقع الالكتروني: <https://www.aps.dz/ar/economie/79269-2019-11-06-14-12-15>
87. الطاقة ، محمد عبد السند، أهم 5 مشروعات طاقة في الجزائر ستكون مرتقبة خلال 2025، على الموقع الالكتروني: <https://attaqa.net/2025/01/08/%D8%A3%D9%87%D9%85-5-%D9%85%D8%B4%D8%B1%D9%88%D8%B9%D8%A7%D8%AA-%D8%B7%D8%A7%D9%82%D8%A9-%D9%81%D9%8A-%D8%A7%D9%84%D8%AC%D8%B2%D8%A7%D8%A6%D8%B1-%D8%B3%D8%AA%D9%83%D9%88%D9%86-%D9%85%D8%B1%D8%AA%D9%82>
88. الموسوعة العربية، تنبؤ الاقتصادي، المتاح على الموقع الالكتروني: <https://mail.arab-ency.com.sy/details/8101/%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%86%D8%A8%D8%A4+%D8%A7%D9%84%D8%A7%D9%82%D8%AA%D8%B5%D8%A7%D8%AF%D9%8A>
89. الإذاعة الجزائرية، تدشين محطة نموذجية لتوليد الكهرباء عن طريق الطاقة الشمسية بغرداية، على الموقع الالكتروني:
<https://radioalgerie.dz/news/ar/article/20140710/6529.html>
90. الإذاعة الجزائرية، وزير الطاقة ي دشّن محطة لتوليد الكهرباء عن طريق الطاقة الشمسية بولاية أدرار ، على الموقع الالكتروني: <https://radioalgerie.dz/news/ar/article/20160117/64739.html>
91. سولارايك، الجزائر على أعتاب ريادة عالمية في إنتاج الهيدروجين الأخضر، متوفر على الموقع الالكتروني:
<https://solarabic.com/%D8%A3%D8%AE%D8%A8%D8%A7%D8%B1-%D8%A7%D9%84%D8%A7%D9%82%D8%AA%D8%B5%D8%A7%D8%AF%D9%8A>

[%D8%A7%D9%84%D8%B7%D8%A7%D9%82%D8%A9-%D8%A7%D9%84%D9%85%D8%AA%D8%AC%D8%AF%D8%AF%D8%A9/2025/02/%D8%A7%D9%84%D8%AC%D8%B2%D8%A7%D8%A6%D8%B1-%D8%B9%D9%84%D9%89-%D8%A3%D8%B9%D8%AA%D8%A7%D8%A8-%D8%B1%D9%8A%D8%A7%D8%AF%D8%A9-%D8%B9%D8%A7%D9%84%D9%85%D9%8A%D8%A9-%D9%81%D9%8A-%D8%A5%D9%86%D8%AA%D8%A7](#)

92. وكالة الأنباء الجزائرية، الامكانيات الوطنية في مجال الطاقة الحيوية تتجاوز 500.000 طن معادل بترول، متوفر

على: <https://www.aps.dz/ar/economie/100812-500-000>

93. وكالة MCE ، خبير الطاقة: الهيدروجين الأخضر متاح على الموقع الإلكتروني:

<https://mccleanenergy.org/ar/energy-expert-green-hydrogen>

94. IBM، مزايا الطاقة المتجددة وعيوبها، متوفر على الموقع الإلكتروني: [https://www.ibm.com/sa-](https://www.ibm.com/sa-ar/think/insights/renewable-energy-advantages-disadvantages)

[ar/think/insights/renewable-energy-advantages-disadvantages](https://www.ibm.com/sa-ar/think/insights/renewable-energy-advantages-disadvantages)

95. دراسات و إنجازات في الطاقات المتجددة (ER2)، متاح على الموقع الإلكتروني: <https://www.er2.dz>

96. وكالة الأنباء الجزائرية، صدور مرسوم تنفيذي يوضح مهام محافظة الطاقات المتجددة والفعالية الطاقوية، متاح

على الموقع الإلكتروني: <https://www.aps.dz/ar/economie/79269-2019-11-06-14-12-15>

97. الموسوعة العربية، تنبؤ الاقتصادي، متاح على الموقع الإلكتروني: [https://mail.arab-](https://mail.arab-ency.com/sy/details/8101/%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%86%D8%A8%D8%A4+%D8%A7%D9%84%D8%A7%D9%82%D8%AA%D8%B5%D8%A7%D8%AF%D9%8A)

[ency.com/sy/details/8101/%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%86%D8%A8%D8%A4+%D8%A7%D9%84%D8%A7%D9%82%D8%AA%D8%B5%D8%A7%D8%AF%D9%8A](https://mail.arab-ency.com/sy/details/8101/%D8%A7%D9%84%D8%AA%D9%86%D8%A8%D8%A4+%D8%A7%D9%84%D8%A7%D9%82%D8%AA%D8%B5%D8%A7%D8%AF%D9%8A)

القوانين و اللوائح:

98. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 19 العدد 5، 2 فبراير سنة 1982.
99. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 25 العدد 12، 23 مارس 1988.
100. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 25 العدد 12، 23 مارس 1988.
101. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 25 العدد 12، 23 مارس 1988.
102. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 25 العدد 12، 23 مارس 1988.
103. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 26 العدد 04 25 جانفي 1989.
104. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 35 العدد 62، 14 أوت 1998.
105. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 36، العدد 51 02، أوت 1999.
106. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 39، العدد 08، 06 فبراير 2002.
107. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 40 العدد 75، 07 ديسمبر 2003.
108. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 41 العدد 52، 18 أوت 2004.
109. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 48 العدد 08، 06 فبراير 2011.
110. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 48 العدد 08، 06 فبراير 2011.

111. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 48 العدد 68، 14 ديسمبر 2011.
112. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 48 العدد 68، 14 ديسمبر 2011.
113. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 48 العدد 71، 28 ديسمبر 2011.
114. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 49 العدد 03، 18 جانفي 2012.
115. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 49 العدد 68، 16 ديسمبر 2012.
116. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 51 العدد 31، 11 جوان 2014.
117. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 51 العدد 31، 11 جوان 2014.
118. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 52 العدد 09، 18 فبراير 2015.
119. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 52 العدد 09، 18 فيفري 2015.
120. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 52 العدد 68، 27 ماي 2015.
121. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 53 العدد 10، 22 فيفري 2016.
122. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 54 العدد 15، 05 مارس 2017.
123. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 54 العدد 31، 28 ماي 2017.
124. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 54 العدد 31، 28 ماي 2017.
125. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 54 العدد 40، 06 جويلية 2017.
126. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية ، السنة 60 العدد 75، 22 نوفمبر 2023.
127. الجريدة الرسمية للجمهورية الجزائرية، السنة 25 العدد 12، 23 مارس 1988.

(2) المراجع باللغة الأجنبية:

الكتب: 

128. Bourbonnais. R; Usunier. J-C. (2001). Prévision des ventes : théorie et pratique, 3ème Edit, Economica, Paris.
129. Bourbonnais.R; Terraza.M, 2010, Analyse des séries temporelles : Applications à l'économie et à la gestion, Edition Dunod, France, 3 ème édition.
130. Dimitrios Asteriou and Stephen G. Hall : Applied Econometrics, Amodern Approach, Revised Edition, First edition, 26 New York, 2006, 2007.
131. Dor, E. (2009). économétrie. france: Pearson education.
132. GEORGE E. P. BOX, GWILYM M. JENKINS, GREGORY C. REINSEL, GRETA M. LJUNG. (2016). Time series analysis: Forecasting and control, 5th Edit, Wiley, USA ,available on:
http://repo.darmajaya.ac.id/4781/1/Time%20Series%20Analysis_%20Forecasting%20and%20Control%20%28%20PDFDrive%20%29.pdf
133. Gujarati Damodar, Traduction de la 4ème édition américaine par Bernier Bernard, Econométrie, édition de Boeck, 1ère édition, Bruxelles, Belgique, 2004, Chapitre 14.
134. Gujarati Damodar,Econometrics by example , Second Edition, New York, USA, 2015 .
135. Justus, C. G. et W.R., Mikhail, 1976, "Variation de la hauteur de la vitesse du vent et statistiques de distribution du vent", Geophysical Research Letters, vol.3, No.5.

136. LARDIC S. et MIGNON V.,(2002) "Econométrie des séries temporelles macroéconomiques et financières" Ed. Economica-Paris.
137. Mockler Roberty, information system for management Ohio bell and Howell ,1974.
138. Nikolaos Dritsakis, Paraskevi Klazoglou, Forecasting unemployment rate in USA using Box-Jenkins methodology, International Journal of Economics and financial issues, Vol 8, issue 1, 2018, available on : <https://www.econjournals.com/index.php/ijefi/article/view/5550>
139. Obrien James A introduction to information systems Chicago IRWIN 8th ed 1997.
140. P. H. Dr Wieser « méthodes de prévision » édition EPLF Lausanne, Suisse 2003.
141. Paul Turner, PhD Econometrics in Practice, MERCURY LEARNING AND INFORMATION Dulles, Virginia Boston, Massachusetts, New Delhi .
142. Régis Bourbonnais , Econométrie –cours et exercices corrigés, 9eme édition, Dunod, Paris-France, 2015.
143. R.Bourbonnais, J.C.Usunier, Manuel et exercices corrigés Econométrie, 5ème édition, Dunod, Paris, 1998.

المجلات العلمية:

144. Ahmed, R., & Khalid, S. (2020). Forecasting renewable energy generation using artificial intelligence: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 124, 109779, pp. 2–5. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109779>.
145. Burtschy, B., & Menendian, c. (1980). apropos de la prévision à court terme de la production industriel. revue de statistique appliquée, n06.
146. Christian francq, Jean-Michel Zakoian, GARCH Models structure, statistical inference and financial applications, first publication, John Wiley & Sons Ltd, United Kingdom, 2010.
147. Ian parry, simon black and nate vernon, still not getting energy prices right :a global and country update of fossil fuel subsidies, imf working paper, 2021, Available on: <https://www.imf.org/en/Publications/WP/Issues/2021/09/23/Still-Not-Getting-Energy-Prices-Right-A-Global-and-Country-Update-of-Fossil-Fuel-Subsidies-466004>
148. Khan, M. A., Ali, M., & Alotaibi, M. F. (2021). Artificial intelligence-based forecasting models in energy sector: Recent advances, challenges, and future outlook. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 139, 110712, pp. 4–8. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110712>.
149. Mahmoud Harb and Jarin Nashin , International Monetary Fund. Middle East and Central Asia Dept.. Algeria: Selected Issues. IMF Staff Country Reports. 2024;2024(089):A001. doi:10.5089/9798400271922.002.A001.
150. Yacine Benchenina, Abderrahim Zemmit, Mohammed Moustafa Bouzaki, Abdelouadoud Loukriz, Salah K. Elsayed, Ali Alzaed, Guma Ali & Sherif S. M. Ghoneim, Advancing green hydrogen production in Algeria with opportunities and challenges for future directions, Scientific Reports 15, Article number: 5559 (2025).
151. Younes Zahraoui , Mohammed Rezasudin Basir Khan , Ibrahim AlHamrouni, Saad Mekhilef and Mahrous Ahmed, Energies, 2021, 14(9), 2354, Current Status, Scenario, and Prospective of Renewable Energy in Algeria: A Review. Retrieved from : <https://doi.org/10.3390/en14092354>.

المذكرات و الأطروحات:

152. Andexer Thomas, A Hypothetical Enhanced Renewable Energy Utilization (EREU) Model for Electricity Generation in Thailand, Der Deutschen Bibliothek, Norderstedt Germany, 2008.

المؤتمرات و الملتقيات العلمية:

153. IEA, Conference Summit on the Future of Energy Security, The importance of focusing on jobs and fairness in clean energy transitions, Available on: <https://www.iea.org/commentaries/the-importance-of-focusing-on-jobs-and-fairness-in-clean-energy-transitions>
 154. H. Saibi, Geothermal Resources in Algeria, Proceedings World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
 155. Kadri, F., Chaabane, S., & Tahon, C. (2014). modélisation et prévision des flux quotidiens des pations aux urgence hospitaliers en utilisant l'analyse de seriers chronologique. 7eme conferance de gestion et ingénierie hospitaliers (GISEH), LIEGE,Belgium.
 156. Kamel Abdeladim, Salim Bouchakou, Hadj Arab, Renewable Energies Algeria : Current Situation and Perspectives, Conference Paper, 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Amsterdam, Nederland, September 2014.
 157. Koffi Yao Blaise, Ahoussi Kouassi Ernest, Kouassi Amani Michel, Kouassi Ouattr, Kpangui Loukou Christophe, Biemi Jean, Application des réseaux de neurones formels pour la prévision des débits mensuels du Bandama blanc à la station de Tortiya (Nord de la cote d'ivoire), Afrique Science, L'ENS d'Abijan, Cote d'ivoire, 10(3), 2014. [https://www.afriquescience.net/article.php?nid=1601&&code=Vol.10,%20N%C2%B03%20\(2014\)&id=13](https://www.afriquescience.net/article.php?nid=1601&&code=Vol.10,%20N%C2%B03%20(2014)&id=13)
- المقالات المنشورة على الإنترنت:
158. A.ASLESHA LAKSHMI ASSISTANT PROFESSOR,CSE VNRVJIET ,NEURAL NETWORKS ,CHAPTER-6 Competitive Learning Neural Networks,p1-10,p1,available on : <https://www.scribd.com/document/63715985/Competitive-Learning-Neural-Networks>
 159. Apports de l'intelligence artificielle au génie logiciel .DEREK PATRIDGE ed MASSON. 1990 .
 160. Bayram KÖSE, SERKAN ANSAY, Precipitation Forecast with Artificial Neural Networks Method, Journal of AI,2023.
 161. David Kriesel, A brief introduction to Neural network, 2005,electronic book published in: http://www.dkriesel.com/en/science/neural_networks, p1-226.
 162. Edenhofer Ottmar, Ramon Pichs Madruga, Youba Sokona and others, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation: Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, CAMBRIDGE University Press, USA, First published 2012.
 163. Global commission on the geopolitics of energy transformation ,A new world the geopolitics of the enregy transformation, international renewable energy agency(irena),2019, Available on: https://www.irena.org/-/media/files/irena/agency/publication/2019/jan/global_commission_geopolitics_new_world_2019.pdf
 164. Global energy network institute (GENI), How is 100% Renewable Energy Possible for Algeria by 2030?, may 2016.
 165. IEA. (2023). AI and the Future of Energy. International Energy Agency. [No pagination]. <https://www.iea.org/reports/ai-and-the-future-of-energy>
 166. international labour organization,Guidelines for a just transition towards environmentally sustainable economies and societies for all, 2015, Geneva, Switzerland, Available on:https://www.ilo.org/sites/default/files/wcmsp5/groups/public/@ed_emp/@emp_ent/documents/publication/wcms_432859.pdf
 167. Kenji Suzuki, ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS METHODOLOGICAL ADVANCES AND BIOMEDICAL APPLICATIONS, InTech open journal found at www.intechopen.com ,2011.
 168. L.âche hamane,a.khellaf, cartographie de ressources éloiennes de l'algerie,centre de developpement de energies renouvelables,bulletin des sciences geographiques N°11,avril 2003.

169. Les energies renouvelables en mediterranee, Tendances, perspectives et bonnes pratiques, 2018, MEDENER/OME avec le soutien de l'ADEME .
170. lilia HAMANE, les ressources éoliennes de l'Algérie, bulletin des énergies renouvelables, CDER, Algérie, N3, Juin 2003.
171. M, Y, bouroubi; H, Mimouni A.Mefti (chef de projet Gisement Solaire), Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des énergies renouvelables, CDER, N2, Décembre 2002.
172. nation Unies, Commission économique pour l'Afrique, Bureau pour l'Afrique du nord, Le secteur des énergies renouvelables en Afrique du nord «situation actuelle et perspectives», publiée par le Bureau pour l'Afrique du nord de la Commission économique des nation Unies pour l'afrique (CEA-AN), Riad Rabat, Maroc .
173. Nouredine YASSAA, Messaoud KHELIF, Transition Energétique en Algérie Leçons, Etat des Lieux et Perspectives pour un Développement Accéléré des Energies Renouvelable, Edition 2020, Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique, Premier Ministre, Alger.
174. Ottmar Edenhofer,Ramón Pichs Madruga,Youba Sokona,Kristin Seyboth,Patrick Eickemeier,Patrick Matschoss,Gerrit Hansen,Susanne Kadner,Steffen Schlömer,Timm Zwickel,Christoph von Stechow, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation,Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012,Chapter 3 Direct Solar Energy , Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
175. Ottmar Edenhofer,Ramón Pichs Madruga,Youba Sokona,Kristin Seyboth,Patrick Eickemeier,Patrick Matschoss,Gerrit Hansen,Susanne Kadner,Steffen Schlömer,Timm Zwickel,Christoph von Stechow, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation,Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,2012,chapitre 7 Wind Energy, Cambridge University Press, Cambridge, UnitedKingdom and New York, NY, USA.
176. Ottmar Edenhofer,Ramón Pichs Madruga,Youba Sokona,Kristin Seyboth,Patrick Eickemeier,Patrick Matschoss,Gerrit Hansen,Susanne Kadner,Steffen Schlömer,Timm Zwickel,Christoph von Stechow, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation,Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,2012, Chapter 5 Hydropower, Cambridge University Press, Cambridge, UnitedKingdom and New York, NY, USA.
177. Ottmar Edenhofer,Ramón Pichs Madruga,Youba Sokona,Kristin Seyboth,Patrick Eickemeier,Patrick Matschoss,Gerrit Hansen,Susanne Kadner,Steffen Schlömer,Timm Zwickel,Christoph von Stechow, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation,Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,2012,chapitre 06 Ocean Energy, Cambridge University Press, Cambridge, UnitedKingdom and New York, NY, USA.
178. Ottmar Edenhofer,Ramón Pichs Madruga,Youba Sokona,Kristin Seyboth,Patrick Eickemeier,Patrick Matschoss,Gerrit Hansen,Susanne Kadner,Steffen Schlömer,Timm Zwickel,Christoph von Stechow, Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation,Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,2012,chapitre 04 Geothermal Energy, Cambridge University Press, Cambridge, UnitedKingdom and New York, NY, USA.
179. Renewable energy market update outlook for 2022 and 2023, international renewable energy agency(irena),p04, Available on: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/d6a7300d-7919-4136-b73a-3541c33f8bd7/RenewableEnergyMarketUpdate2022.pdf>
180. RENEWABLES 2012 (REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century),GLOBAL STATUS REPORT ,2012.

181. Roman Kozhan, Financial econometrics-with Eviews, Ventus Publishing APS, toun, 2010.
182. Salima OUALI - Khedidja BOUZIDI - Khaled IMESSAD - Abdelkader AIT-OUALI ,Algerian Renewable Energy Resource Atlas, Centre De Développement Des Energies Renouvelables, CDER, , Edition 2019.
183. Stéphanie Bouckaert, Araceli Fernandez Pales, Christophe McGlade, Uwe Remme and Brent Wanner. Laszlo Varro, Chief Economist, Davide D'Ambrosio and Thomas Spencer, Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY,2021,p81, Available on: https://iea.blob.core.windows.net/assets/deebef5d-0c34-4539-9d0c-10b13d840027/NetZeroBy2050-ARoadmapfortheGlobalEnergySector_CORR.pdf
184. Tawfik Hasni, Création de la New Energy Algeria NEAL «Bulletin des énergies renouvelables - N° 2, CDER, Décembre 2002.
185. World energy transitions outlook 2022 1.5°C pathway, international renewable energy agency(irena),2022, Available on: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2022/Mar/IRENA_WETO_Summary_2022.pdf
186. Yasmina Abdelilah, Ana Alcalde Báscones Heymi Bahar, Piotr Bojek, François Briens, Trevor Criswell, Jeremy Moorhouse, and Laura Mari Martinez, Renewables 2023 analysis and forecast to 2028, INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Available on: https://iea.blob.core.windows.net/assets/96d66a8b-d502-476b-ba94-54ffda84cf72/Renewables_2023.pdf
الهيات و المواقع الانترنت: 
187. Buse Şenol,medium, One Layer Neural Network From Scratch — Classification Available on : <https://busesenol.medium.com/one-layer-neural-network-from-scratch-classification-b6c71481f992>
188. conserve energy future, " Advantages and Disadvantages of Renewable Energy", available at: <https://www.conserve-energy-future.com>
189. Desertec Solar Power Project Abandoned by Shareholders , [en lgine], inhabitat, Disponible sur : <https://inhabitat.com/desertec-solar-power-project-abandoned-by-shareholders/>
190. Find out more about cop 29 , Available on <https://unfccc.int/ar/news/cop29>
191. Find out more about COP21, Available on: <http://www.cop21paris.org>
192. Forbes, Your Guide To Commercial Solar Panel Installation Companies And Costs, Available on:<https://www.forbes.com/home-improvement/solar/commercial-solar-panel-installation-companies/>
193. Geeksforgeeks, Feedback Neural Networks: Structure, Training, and Applications, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/deep-learning/feedback-neural-networks-structure-training-and-applications/>
194. Geeksforgeeks, Feedforward Neural Network, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/nlp/feedforward-neural-network/>
195. Geeksforgeeks, Multi Layered Neural Networks in R Programming, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/r-language/multi-layered-neural-networks-in-r-programming/>
196. Geeksforgeeks, Multi-Layer Perceptron Learning in Tensorflow, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/deep-learning/multi-layer-perceptron-learning-in-tensorflow/>
197. Geeksforgeeks, Optimization Rule in Deep Neural Networks, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/deep-learning/optimization-rule-in-deep-neural-networks/>
198. Geeksforgeeks, Single Layered Neural Networks in R Programming, Available on : <https://www.geeksforgeeks.org/r-language/single-layered-neural-networks-in-r-programming/>
199. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). Deep Learning. MIT Press, <https://www.deeplearningbook.org>.
200. GTM,5 Early Applications for Green Hydrogen, Available on: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/5-early-applications-for-green-hydrogen>
201. IBM Environmental Intelligence Suite, Environmental Intelligence Suite for Renewables Forecasting, Available on:<https://www.ibm.com/downloads/documents/us-en/10c317759fd4015e>

202. IBM, IBM Environmental Intelligence solutions, Available on:<https://www.ibm.com/sa-ar/products/environmental-intelligence/solutions>
203. IBM, What are greenhouse gas (GHG) emissions? , Available on:<https://www.ibm.com/think/topics/greenhouse-gas-emissions>
204. IBM, What is artificial intelligence (AI)?, Available on: <https://www.ibm.com/think/topics/artificial-intelligence>
205. IBM, What is energy management? , Available on:<https://www.ibm.com/think/topics/energy-management>
206. IBM, What is geospatial data?, Available on: <https://www.ibm.com/think/topics/geospatial-data>
207. IBM, What is machine learning?, Available on:<https://www.ibm.com/think/topics/machine-learning>
208. International Renewable Energy Agency (IRENA), RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2024 .
209. IRENA, Fast-Track Energy Transitions to Win the Race to Zero , Available on: <https://www.irena.org/news/pressreleases/2021/mar/fast-track-energy-transitions--to-win-the-race-to-zero>
210. irena, Hydropower, Available on: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Hydropower>
211. irena, Wind energy, Available on: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>
212. irena,Solar energy, Available on:<https://www.irena.org/EnergyTransition/Technology/Solar-energy>
213. Lumivero, Predictive Neural Networks,available on : <https://lumivero.com/software-features/predictive-neural-networks/>
214. McKinsey & Company, Renewable-energy development in a net-zero world: Disrupted supply chains, Available on: <https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/renewable-energy-development-in-a-net-zero-world-disrupted-supply-chains>
215. ourworldindata.org
216. solargis solar maps, Understand the impact of GHI variability on the PV performance, Available on:<https://solargis.com/resources/solar-performance-maps>
217. Statista. (2023). Renewable energy consumption in Algeria by sector. Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/1361684/renewable-energy-consumption-in-algeria-by-sector>
218. The washington post, The Climate 202 Switching to wind and solar energy will require a lot of land, Available on:<https://www.washingtonpost.com/politics/2023/04/24/switching-wind-solar-energy-will-require-lot-land/>
219. u.s departement of energy,hydrogyen fuel basics, Available on: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fuel-basics>
220. UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, Carbon Neutrality in the UNECE Region:Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources, UNITED NATIONS GENEVA, 2022
221. United Nations, Economic and Social Council, Economic Commission for Europe Committee on Sustainable Energy ,Specifications for the application of the United Nations Framework Classification for Fossil Energy and Mineral Reserves and Resources 2009 to Renewable Energy Resources, 19 July 2016.
222. United nations, secretary-general, Opening remarks to High-level Dialogue on Energy, Available on:<https://www.un.org/sg/en/content/sg/speeches/2021-09-24/opening-remarks-high-level-dialogue-energy>
223. World health organization, Billions of people still breathe unhealthy air: new WHO data, Available on:<https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>
224. World health organization, COP24 special report: health and climate change, Available on:<https://www.who.int/publications/i/item/cop24-special-report-health-climate-change>

225. Zahra zolghadr,Kaggle, Neural Network Model for Classification,available :
<https://www.kaggle.com/code/zahrazolghadr/neural-network-model-for-classification>