Solar Energy
And Sustainable Development
Refereed, biannual scientific journal issued by:
The Libyan Center for Solar Energy Research and Studies

# Estimation of $CO_2$ Emissions from the Electric Power Industry Sector in Libya

**Yasser F. Nassar[1], Mansour A. Salem[2], Hala J. El-Khozondar[3].**

[1]Research Center for Renewable Energy and Sustainable Development, Wadi AlShatti University, Libya.
[2]Environment and Natural resources Faculty, Wadi AlShatti University, Brack, Libya.
[3]Electrical Engineering and Smart Systems Dept., Islamic University of Gaza, Gaza Strip, Palestine.
[3]Department of Materials and London Centre for Nanotechnology, Imperial College London, UK.

E-*mail:* [1] y.nassar@wau.edu.ly ,[2] m.salem@wau.edu.ly ,[3] hkhozondar@iugaza.edu.ps .

**ARTICLE INFO.**

Article history:
Received 20 Jul 2024
Received in revised form 23 Jul 2024
Accepted 22 Oct 2024
Available online 1 Jan 2025

**KEYWORDS**

Carbon dioxide emission factor; electrical power generation technologies; electricity industry sector; renewable and clean energies; Libya.

**ABSTRACT**

Since Libya is one of the nations that ratified the Paris Agreement, this research is an attempt to meet its commitment to the international community to lessen environmental degradation and the impact of greenhouse gas emissions on ecosystems. Thus, the purpose of this study is to compute the costs of environmental harm brought on by carbon dioxide ($CO_2$) emissions as well as to estimate the quantity of $CO_2$ emissions from Libya's electric power plants. This study differs from others because it is grounded in real data collected at pollution monitoring stations and in unit performance control systems in electric power plants.

Additionally, this study covers all fuel types used, including natural gas, steam, and combined cycles, as well as all generation technologies. It was discovered that the $CO_2$ emission factor was roughly 0.857 $kgCO_2/kWh$. The outcomes were compared to emission lists released by environmental agencies like the EPA and IPCC, as well as the UNFCCC's standard for assessing the system's technical and environmental performance. The study's approach to evaluating environmental harm helps to foster competition in the energy sector in favor of renewable and alternative energy sources. It was calculated that Libya's annual environmental damage costs from producing electricity were roughly $2.184 billion. Additionally, the study offered a few alternatives for allocating this sum to clean, renewable energy technology. This research can be viewed as a road map for the switch to sustainable and clean electricity production.

*Corresponding author.

DOI: https://doi.org/10.51646/jsesd.v14i1.415



This is an open access article under the CC BY-NC license (http://Attribution-NonCommercial 4.0 (CC BY-NC 4.0)).

# تقدير انبعاثات غاز ثاني اكسيد الكربون من قطاع صناعة الطاقة الكهربائية في ليبيا

ياسر فتحي نصّـــار، منصور عويدات سالم، هالة جارالله الخزندار.

**ملخص:** يمثل هذا البحث احد الجهود المبذولة من اجل استيفاء الدولة الليبية بالتزامها نحو المجتمع الدولي من اجل تلطيف تأثير انبعاثات الغازات الدفيئة على النظم البيئية والحد من التدهور البيئي؛ كونها إحدى الدول المصادقة على اتفاقية باريس. وعليه يهدف هذا البحث الى تقدير كميات غاز ثاني اكسيد الكربون $CO_2$ المنبعثة من محطات توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا، وكذلك حساب تكلفة الضرر البيئي الناتجة عن انبعاث $CO_2$.

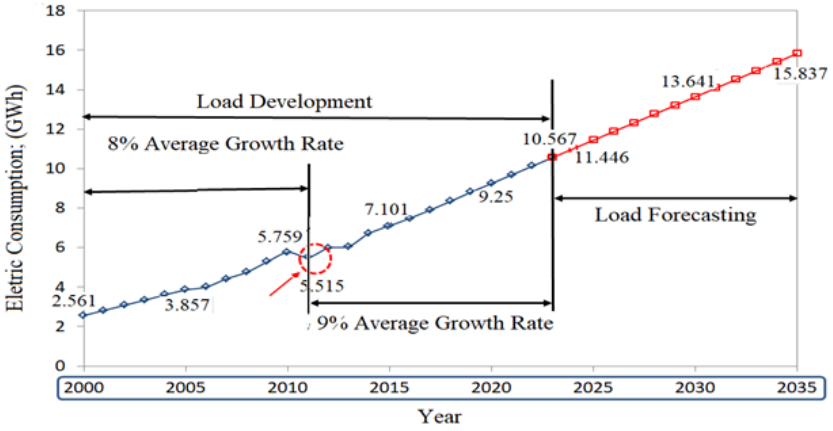
وتنفرد هذه الدراسة عن سابقاتها في انها استندت على بيانات حقيقية مسجلة في محطات رصد ومراقبة الملوثات المنبعثة، ومنظومات التحكم في أداء الوحدات في محطات توليد الطاقة الكهربائية. كما وان هذه الدراسة شملت جميع تقنيات التوليد (الغازية والبخارية والمركبة)، وجميع انواع الوقود المستخدمة (الغاز الطبيعي وزيت الوقود الخفيف والثقيل والنفط الخام) في قطاع صناعة الطاقة في ليبيا. تم ايجاد معامل انبعاث $CO_2$ والذي قدر بحوالي $0.857 kgCO_2/kWh$ . كما تم مقارنة النتائج المتحصل عليها مع قوائم الانبعاثات المنشورة ضمن قوائم المنظمات المهتمة بالبيئة مثل IPCC, EPA. وكذلك القيمة التي حددتها UNFCCC لتقييم الأداء التقني والبيئي لمنظومة التوليد الكهربائي. اضافة الى ان الاسلوب الذي اتبعته الدراسة في ادراج الضرر البيئي في الحسابات الاقتصادية للطاقة، يصب في دعم التنافس في سوق الطاقة لصالح الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة. حيث قدرت تكلفة الضرر البيئي السنوي الناجم عن توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا بحوالي 2.184 مليار دولار. كذلك قدمت الدراسة عدة خيارات لاستثمار هذه القيمة في تقنيات إنتاج الطاقة الكهربائية من المصادر المتجددة والنظيفة. كما يمكن اعتبار هذه الدراسة خارطة طريق للتحول نحو توليد طاقة كهربائية نظيفة ومستدامة..

**الكلمات المفتاحية** – معامل انبعاث $CO_2$؛ تقنيات توليد الطاقة الكهربائية؛ قطاع صناعة الطاقة الكهربائية؛ الطاقات المتجددة والنظيفة؛ ليبيا.

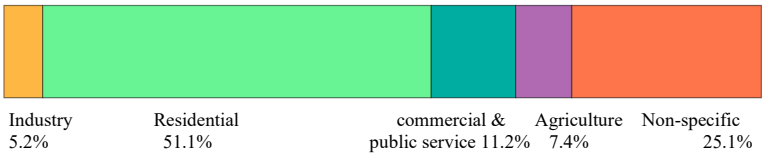
## 1. المقدمة

تعتبر الطاقة هي المحرك الرئيسي للنمو الاقتصادي، الا هناك مخاوف متزايدة بشأن القضايا البيئية المرتبطة بإنتاج الطاقة. حيث يمثل الوقود الأحفوري حوالي أربعة أخماس الطاقة الأولية العالمية [1]. يعد حرق الوقود الأحفوري ضروريًا لإنتاج الطاقة بأي شكل من الأشكال، وينطلق كميات كبيرة من الملوثات، بما في ذلك ثاني أكسيد الكربون ($CO_2$)، وهو المتهم الرئيسي في ظاهرة الاحتباس الحراري وتغير المناخ. بلغت انبعاثات الكربون العالمية في عام 2023 الناتجة عن حرق الوقود الأحفوري ما يقرب من 36.8 مليار طن، وهو ما يمثل زيادة بنسبة 1.1% عن عام 2022 [2]. ومن المتوقع أن يصل متوسط مستويات $CO_2$ في الغلاف الجوي إلى 419.3 جزءً في المليون في عام 2024، أي أعلى بنسبة 51% من مستويات ما قبل الثورة الصناعية. وسيؤدي النمو السريع في الاستهلاك العالمي للطاقة إلى استنزاف الموارد الطبيعية وتقليل فرص التنمية المستدامة في البلدان النامية. وتشير التقديرات إلى أن كمية الطاقة الكهربائية المستخدمة ستتضاعف خلال العشرين سنة القادمة، ويعود السبب إلى زيادة السكان والتطور التكنولوجي. ومن ناحية أخرى، سيؤدي ذلك إلى زيادة الضغط على البيئة وسيصاحبه تغير كبير في النظام البيئي، مما سيفاقم معاناة الدول النامية بسبب انتشار الأمراض والمجاعة والجفاف والتصحر والفياضانات. حيث شهدت عدة مناطق في شمال أفريقيا في السنوات الأخيرة، ارتفاعا كبيرا في درجات الحرارة، مما أدى إلى حدوث حرائق اجتاحت الغابات وكثرت العواصف الرملية والترابية المتكررة. كما شهدت مدينة درنة في 10 سبتمبر 2023 هطول أمطار غزيرة بلغت 414.1 ملم، متجاوزا بذلك بكثير معدل هطول الأمطار الشهري البالغ 2 ملم فقط، مما سبب فياضانات عارمة اجتاحت المدينة ودمرتها. كما حدثت حالات مماثلة في الأعوام 2023-2024 في مدينة غات [3]. ونتيجة لذلك، يواجه العالم تحديًا كبيرًا في تحقيق التوازن بين امداد المجتمعات البشرية بالطاقة الاساسية والحفاظ على البيئة، وهذا يتطلب معالجة المخاطر المرتبطة باستخدام الوقود الأحفوري وتأثيره السلبي على البيئة. ويُعد التقييم الدقيق لانبعاثات $CO_2$ الناتجة عن الأنشطة البشرية أمرًا بالغ الأهمية لتطوير السياسات المناخية التي تهدف إلى الحد من التدهور البيئي، وتلطيف تبعيات تغير المناخ [2]. وكذلك يوضح اهمية التحول نحو للطاقات البديلة والصديقة للبيئة، حيث اكدت العديد من الدارسات المحلية والاقليمة الجدوى الاقتصادية من ادخال الطاقات البديلة منفردة او هجينة متصلة او معزولة عن الشبكة الكهربائية في مزيج الطاقة حتى في الدول النفطية مثل ليبيا [4]، [5]، [6]، [7]، [8]، [9]، [10]، [11]. ويندرج هذا البحث في إطار سياسة الدولة الليبية لتحقيق التزاماتها الدولية في تلطيف التغيير المناخي والاحترار الكوني كونها احدى الدول المصدقة على اتفاقية باريس في 12 ديسمبر 2015. أدت الزيادة في عدد السكان والنمو الاقتصادي في ليبيا إلى ارتفاع الطلب على الطاقة. وتشير التقديرات إلى أن

الزيادة السنوية في الطلب على الكهرباء تتراوح بين 8-9%. ومن المتوقع أن يصل الطلب إلئ 11.5 جيجاوات ساعة بحلول عام 2025 (كما هو موضح في الشكل 1) [12]. ويوضح الشكل 2 توزيع استهلاك الطاقة الكهربائية بين القطاعات في ليبيا لعام 2023 [13]. ولتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري ومعالجة القضايا البيئية المرتبطة بعمليات التوليد التقليدية، تهدف ليبيا لزيادة مشاركة الطاقات التجددة في مزيج الطاقة الكهربائية بنحو10% من إجمالي الطاقة المنتجة بحلول عام 2025. الا ان هذه الخطة توقفت بسبب الظروف الأمنية التي مرت بها البلاد في عام 2011 [14].




الشكل 1: تطور زيادة الطلب على الطاقة الكهربية.




الشكل 2: توزيع استهلاك الطاقة الكهربائية علي القطاعات في ليبيا لعام 2021.

تكمن أهمية البحث في تقدير معاملات انبعاث $CO_2$ الحقيقية لوضع سياسات الحد من التلوث وتلطيف اضرار التلوث البيئي الناجمة من الانشطة الاقتصادية، على غرار الدول التي سبقتنا في هذا المجال. كما اكدت الدراسة على ضرورة اقحام تكلفة الضرر البيئي في الدراسات الاقتصادية، وهذا بدوره سيعزز من مكانة الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة في التنافس في سوق الطاقة.

قامت العديد من الدراسات حول العالم بتقدير معاملات انبعاث غاز $CO_2$ في محطات توليد الطاقة الكهربائية كونها المصدر الاكبر للانبعاثات. قدر الباحثون معاملات انبعاث $CO_2$ الناتجة عن توليد الكهرباء في الولايات المتحدة. كما قاموا بمقارنة النتائج المتحصل عليها مع بيانات لمنظمات فيدرالية ودولية اخرى في قطاع الطاقة الكهربائية، وتبين دقة البيانات في بعض الحالات وفي حالات اخرى كانت النتائج غير دقيقة, وخلصوا في النهاية الى ضرورة تحديث البيانات او وضع عدة بيانات تحاكي سسيناريوهات متعددة من توليد الطاقة الكهربائية [15].

أظهرت دراسة لتحليل انبعاثات $CO_2$ من محطات توليد الطاقة في سنغافورة تباينا بين القيم اللحظية وتلك المستندة على متوسط الأداء. كما بينت الدراسة ان كمية الملوثات تعتمد بصورة كبيرة على الأحمال الكهربائية وكفاءة التوليد والبيانات المناخية. ووجدت الدراسة أن الانبعاثات اللحظية تراوحت من 0.415 إلى 0.455 كجم $CO_2$/كيلووات ساعة، في حين أظهر متوسط الانبعاثات اليومية نمطًا متقلبًا يتراوح بين 0.39 إلى 0.80 كجم من $CO_2$/كيلووات ساعة. وكشفت الدراسة ان قطاع توليد الكهرباء في سنغافورة يساهم بأكثر من 55% من إجمالي انبعاثات $CO_2$ في البلاد، مما يتطلب التحول إلى الطاقات المتجددة [16].

في مصر، أُقترحت دراسة ثلاثة سيناريوهات لتقليل الانبعاثات من قطاع الطاقة الكهربائية. وخلصت الدراسة الى عرض (السيناريو الاخضر) والذي يتمثل في مزيج من الطاقة يتضمن على 58% من محطات الدورة المزدوجة و37% من مصادر الطاقة المتجددة والطاقة المائية و5% من الطاقة النووية. تعتبر محطات الدورة المزدوجة العاملة غلى الغاز الطبيعي الالطف على البيئة حيث لا يتعدى معامل انبعاث $CO_2$ عن 0.4 $kgCO_2/kWh$ مقارنة بحوالي 0.6 $kgCO_2/kWh$ من محطات توليد الطاقة البخارية او الغازية [17].

وفي ليبيا، تم حساب كميات الغازات المنبعثة من مصادر تلوث الهواء المختلفة على أساس المستوى الأول (Tier 1)، حيث أظهرت النتائج أن إجمالي الانبعاثات الغازية السنوية بلغت حوالي 61.1 مليون طن، وكانت الحصة الأكبر من

الانبعاثات لـغاز $CO_2$ (96.76%). وبلـغ إجمالـي مكافئ $CO_2$ السـنوي نحـو 64.6 مليـون طـن، يمثـل نحـو 9.7 طن/سـنة/ فـرد. احتلـت صناعـة الطاقـة الكهربائيـة المركـز الأول فـي انبعاثـات $CO_2$ بنسـبة 33.9%، يليهـا قطـاع النقل بنسـبة 30.7%، ثـم القطـاع السـكني والتجـاري بنسـبة 14.2%، ثـم صناعـة الأسـمنت بنسـبة 10.9 % [18].

كمـا تـم تتبـع التلـوث خـلال سلسـلة الطاقـة (مـن البئـر الـى التوربيـن) مـن حقلـي الشـرارة والحمـادة مـرورا بمعمـل تكريـر النفـط وصـولا الـى محطـة جنـوب طرابلـس. واظهـرت نتائـج الدراسـة انـه لتوليـد 1 MWh مـن الكهربـاء يتوجـب حـرق 291 kg مـن وقـود زيـت الديـزل, وللحصـول علـى هـذه الكميـة مـن الديـزل يجـب تكريـر 1141 kg مـن النفـط الخـام, وان اجمالـي انبعـاث $CO_2$ مـن هـذه العمليـة هـو 0.921 $kgCO_2/kWh$, وكان نصيـب التلـوث فـي السلسـة لقطـاع النفـط حوالـي 6% ولقطـاع الكهربـاء 93.6% [19]. بُذلـت الكثيـر مـن الجهـود لتحديـد كميـات الانبعاثـات مـن محطـات توليـد الكهربـاء فـي ليبيـا. حيـث قـدم [20] تحقيقـا حـول مسـتوى التراكيـز وانتشـار الملوثـات حـول عـدة محطـات توليـد الكهربـاء. حيـث تـم قيـاس أكاسـيد النيتروجيـن والكبريـت المنبعثـة مـن محطـات توليـد الطاقـة الكهربائيـة فـي مدينـة الخمـس، وقيـاس مسـتويات تركيـز الملوثـات حولهـا وبعيـداً عنهـا [21]، [22]. وبينـت الدراسـة الاثـار السـلبية لهـذه الانبعاثـات علـى مدينـة لبـدة الاثاريـة [23]. كمـا اقترحـت تعديـلات علـى تصميـم محطـة الطاقـة البخاريـة مـن أجـل تحسـين كفاءتهـا الكليـة والتقليـل مـن انبعـاث الملوثـات وخفـض تكاليـف التشـغيل والصيانـة [24]. تـم دراسـة التأثيـر البيئـي للتقنيـات المختلفـة المسـتخدمة فـي محطـات توليـد الطاقـة الكهربائيـة بشـكل شـامل مـن قبـل العديـد مـن البحـاث. وخلصـت الدراسـات الـى إن إدراج الضـرر البيئـي فـي التكلفـة الاقتصاديـة لأنظمـة توليـد الطاقـة التـي تعتمـد علـى الوقـود الأحفـوري يمنـح فرصـة أكبـر للطاقـات المتجـددة للمنافسـة فـي سـوق الطاقـة المحليـة [52]، [62]. وأشـارت دراسـة أخـرى إلـى أن اسـتخدام أنظمـة الطاقـة البديلـة يمكـن أن يحـل أزمـة الطاقـة التـي تواجههـا بعـض الـدول، مثـل ليبيـا. وقـدرت الدراسـة تكاليـف الأضـرار البيئيـة الناجمـة عـن انبعاثـات الغـازات الدفيئـة فـي الاقتصـاد الليبـي بـحوالي 44 دينـاراً ليبيـاً لـكل طـن مـن مكافئ $CO_2$ (مـا يعـادل 32 دولارًا أمريكيًـا أو 29 يـورو). كمـا توقعـت زيـادات كبيـرة فـي أسـعار أنـواع الوقـود المختلفـة، مثـل البنزيـن والديـزل ووقـود الطائـرات وغـاز النفـط المسـال، بالإضافـة إلـى تذاكـر الطيـران والكهربـاء والصلـب والأسـمنت واللحـوم الحمـراء [27]. وقـد قـدر إجمالـي إيـرادات تطبيـق ضريبـة الكربـون بنحـو 4.4 مليـار دينـار ليبـي، أي مـا يعـادل 3.6% مـن الناتـج المحلـي الإجمالـي الليبـي فـي عـام 2023 [28]. مـن الدراسـات السـابقة تتضـح أهميـة وشـمولية هـذا الموضـوع. ولكـي يمكـن التفاضـل بيـن عـدة بدائـل مـن انمـاط توليـد الطاقـة الكهربائيـة مـن حيـث تقنيـات التوليـد او مـن حيـث نوعيـة الوقـود المسـتخدم او مـن حيـث تأثيـره علـى البيئـة، يجـب اضافـة بُعـد أخـر والمتمثـل فـي البعـد الاقتصـادي- البيئـي. حيـث ان اقحـام العامـل الاقتصـادي فـي القضايـا البيئيـة يعطـي رؤيـةً واسـعةً وبصمـةً أكثـر تأثيـراً مـن الناحيـة الاجتماعيـة والسياسـية. كمـا ان الدافـع مـن وراء «ضريبـة الكربـون» التـي اجمـع العالـم علـى تفعيلهـا هـي تجسـيد كامـل لهـذا البعـد, وبذلـك لا تصبـح القضايـا البيئيـة ترفـاً علميـاً وانمـا واقعـاً يجـب أن يـدرج علـى أجنـدة المسـؤولين وصنـاع القـرار فـي البـلاد, وبالتالـي يمكـن الصعـود مـن مسـتوى التقييـم البيئـي النظـري الـى المسـتوى التصميمـي الهندسـي المثالـي للأنظمـة الصناعيـة لكـي تخـدم اغـراض التنميـة المسـتدامة. تهـدف هـذه الدراسـة إلـى تقديـر معامـلات انبعـاث $CO_2$ لمختلـف محطـات توليـد الطاقـة الكهربائيـة فـي ليبيـا باسـتخدام عـدة مؤشـرات. والتـي تسـتند علـى بيانـات مقاسـة مـن محطـات توليـد الطاقـة الكهربائيـة المتعـددة، باسـتخدام تقنيـات مختلفـة (غازيـة وبخاريـة ومركبـة) وأنـواع مختلفـة مـن الوقـود (الوقـود الخفيـف والثقيـل والنفـط الخـام والغـاز الطبيعـي). ويُعـد هـذا البحـث الأول مـن نوعـه مـن حيـث شـموليته لكافـة تقنيـات توليـد الطاقـة وكافـة أنـواع الوقـود. ولتحقيـق الهـدف مـن البحـث، اتبعـت الدراسـة مسـارين اساسـيين. حيـث تضمـن المسـار الأول جمـع البيانـات مـن عـدة محطـات لتوليـد الطاقـة الكهربائيـة، بينمـا انتهـج المسـار الثانـي المنهـج التحليلـي الرياضـي لمعالجـة البيانـات وحسـاب معامـل انبعـاث $CO_2$.

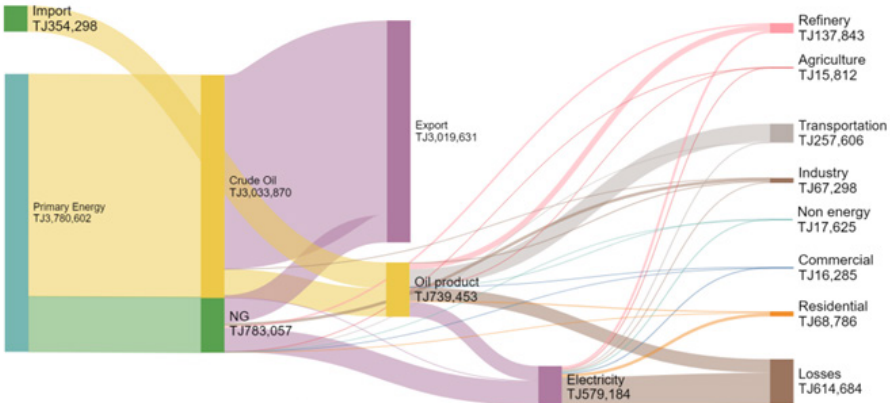
وعليه يمكن تقديم الاضافة العلمية لهذا البحث في النقاط التالية:

1. حساب كمية $CO_2$ المنبعثة من قطاع صناعة الطاقة الكهربائية في ليبيا.
2. تحديد معامل انبعاث $CO_2$ لعدة تقنيات توليد الطاقة الكهربائية ولعدة انواع من الوقود
3. تحديد معامل انبعاث $CO_2$ على أساس عدة مؤشرات مما يزيد من انتشار استعمال هذه المعاملات ليس فقط في قطاع توليد الكهرباء.
4. تسليط الضوء على الوضع الراهن لنظام توليد الكهرباء في ليبيا من الناحيتين التقنية والبيئية.
5. اقتراح استثمار العائد من تكلفة الضرر البيئي في توطين صناعة الطاقات المتجددة الصديقة للبيئة.

## 2. منهجية العمل

### 1.2. وضع الطاقة في ليبيا

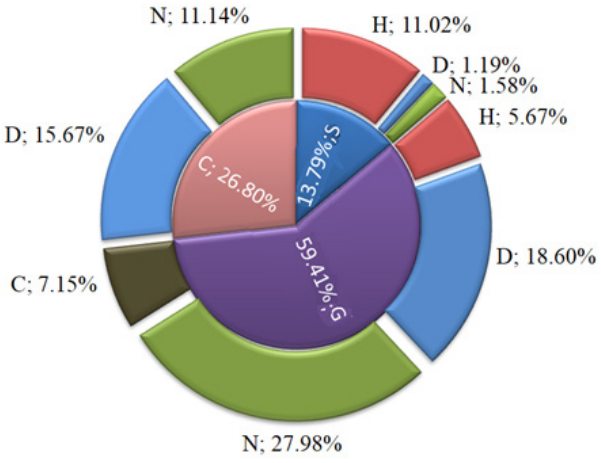
تعتمد ليبيا في انتاج طاقتها على الوقود الاحفوري بنسبة 100% (62.3% نفط، 34.0% غاز طبيعي) [29]. الشكل 3 يمثل ميزان الطاقة في ليبيا لعام 2023.




الشكل 3: ميزان الطاقة في ليبيا لعام 2023.

يتبين من الشكل 3، ان يعتبر من اكثر القطاعات استهلاكا للطاقة الابتدائية (النفط والغاز الطبيعي)، كما يتضح أيضا ان نسبة الفاقد في الطاقة كبيرة جدا تتعدى 80% وهي تشمل الفاقد في التوليد وايضا في توزيع الطاقة الكهربائية.
يعتمد نظام توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا على 16 محطة توليد اساسية كما هو موضح في الشكل 4، وتبلغ طاقتها الإجمالية 9,375 ميجاواط, وبسبب الاعطال الفنية فإن المتاح منها فقط حوالي 7,531 ميجاواط. وتبلغ مساهمة المحطات البخارية حوالي 17.8% من الانتاج الكلي، بينما تبلغ نسبة الإنتاج من المحطات الغازية حوالي 49.65%, ونسبة انتاج المحطات المزدوجة 32.46%.

الشكل 4: توزيع محطات توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا.
[Source: https://images.app.goo.gl/YiXD2TBYoiZXPFhQ9]




الشكل 5: مساهمة تقنية التوليد ونوع الوقود في توليد الكهرباء في ليبيا.

وينقسم استهلاك الوقود لتوليد الطاقة الكهربائية على النحو التالي: يبلغ مساهمة الغاز الطبيعي بنسبة 61% والخفيف بنسبة 20% والوقود الثقيل بنسبة 12%, والخام بنسبة 7.0% كما هو موضح في الشكل 5. وبلغ متوسط إجمالي الكهرباء المنتجة في عام 2022 حوالي 7,331 جيجاواط ساعة بمتوسط كفاءة 30%.
يعرض الجدول (1) البيانات التشغيلية والفنية لجميع محطات التوليد في ليبيا مع تقنية التوليد ونوع وكمية الوقود المستهلكة سنويا كمتوسط عام بالإضافة الى قدرتها الانتاجية وسنة دخولها الخدمة وعدد وحداتها [30].

الجدول 1: الخصائص التقنية والتشغيلية لمحطات التوليد في ليبيا.

| اسم المحطة | سنة التشغيل | نوع الوقود | تقنية التوليد | كمية الوقود المستهلك /year $10^3m^3$ | القدرة MW | الكفاءة | عدد الوحدات |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **غرب طرابلس** | 1970 | ثقيل | بخارية | 492.34 | 320 | 20% | 5 |
| **الخمس** | 1982 | ثقيل | بخارية | 734.13 | 480 | 28% | 4 |
| **درنة** | 1985 | ثقيل | بخارية | 227.2 | 62 | 21% | 2 |
| **طبرق** | 1985 | ثقيل | بخارية | 209.1 | 53 | 25% | 2 |
| **سرت** | 2014 | خفيف | بخارية | 265.4 | 170 | 27% | 4 |
| **مصراته** | 1990 | غاز | بخارية | 460.91 | 226 | 20% | 2 |
| **شمال بنغازي** | 1995 | غاز | غازية | 1,092 | 570 | 20% | 3 |
| **الخمس** | 1995 | غاز | غازية | 1,194 | 600 | 23% | 4 |
| **جنوب طرابلس** | 1994 | خفيف | غازية | 978.12 | 500 | 18% | 7 |
| **الزويتينة** | 1994 | غاز | غازية | 670.285 | 385 | 19% | 4 |
| **الجبل الغربي** | 2005 | خفيف | غازية | 1,624.46 | 780 | 24% | 6 |
| **السرير** | 2010 | غاز | غازية | 890.06 | 285 | 20% | 3 |
| **اوباري** | 2019 | خام | غازية | 525.65 | 520 | 33% | 4 |
| **الزاوية** | 1994 | غاز | مزدوجة | 1,512 | 1440 | 45% | 9 |
| **مصراته** | 2010 | غاز | مزدوجة | 1,091 | 470 | 46% | 3 |
| **شمال بنغازي** | 2010 | غاز | مزدوجة | 1,445 | 470 | 45% | 3 |

يتضح من الجدول 1 ان معظم المحطات تعمل بكفاءات منخفضة وان بعض المحطات تعمل خارج العمر الزمني لها حيث يقدر عمر المحطة الغازية بحوالي 60 سنة وللمحطات البخارية بحوالي 40 سنة [31].
وبسبب عدم توفر البيانات لجميع المحطات تمت دراسة عدد 3 محطات بخارية (طبرق، سرت، مصراتة) و2 محطات مزدوجة (مصراتة، شمال بنغازي) و3 محطات غازية (جنوب طرابلس، أوباري، الخمس). بحيث شملت هذه الدراسة جميع تقنيات التوليد وجميع انواع الوقود, كما غطت 2,990 MW وهو ما يمثل 40% من القدرة المركبة الكلية لجميع المحطات. ويستعرض الجدول 2، الخصائص الفنية والتشغيلية للمحطات المدروسة.

الجدول 2: الخصائص القنية والتشغيلية للمحطات المدروسة.

| التقنية | المحطة | الوقود | استهلاك الوقود $(\dot{m}_{.fuel});\ ton/hr$ | الغازات العادمة $(m_{.fg});\ ton/hr$ | النسبة الحجمية $(Q_{co_2});\ CO_2$ | الطاقة المنتجة $E_h;\ MWh$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **غازية** | جنوب طرابلس | خفيف | 67 | 3397 | 3.7 | 95 |
| | | غاز | 67 | 3397 | 2.7 | 92 |
| | أوباري | خام | 296 | 10512 | 6.8 | 520 |
| | الخمس | غاز | 34 | 1805 | 3.16 | 40 |
| **بخارية** | مصراتة | غاز | 70 | 3503 | 2.87 | 96 |
| | سرت | خفيف | 64 | 3510 | 2.5 | 87 |
| | طبرق | ثقيل | 66 | 3506 | 3.1 | 94 |
| **مركبة** | شمال بنغازي | غاز | 270 | 10643 | 4.07 | 717 |
| | مصراتة | خفيف | 239 | 10486 | 4.65 | 641 |

### 2.2. حساب معاملات انبعاث غاز $CO_2$

تم تقدير معاملات انبعاث غاز $CO_2$ على أساس العديد من المؤشرات استنادا على المعلومات الحقيقية الواردة من المحطات المدروسة والمجدولة في الجدول 2 وباستخدام المعادلات التالية:

- معدل التدفق الحجمي لغاز $CO_2$ ( $\dot{V}_{CO_2}$ )

$$\dot{V}_{CO_2} = \frac{Q_{co_2} \times \dot{m}_{fg}}{\rho_{fg}}; \quad m^3 / hr \qquad (1)$$

حيث $\rho_{fg}$ كثافة الغازات العادمة ($\rho_{fg} = 0.617$ kg/m$^3$)[32].

- معدل التدفق الكتلي لغاز $CO_2$ ( $\dot{m}_{CO_2}$ ):

$$\dot{m}_{CO_2} = \dot{V}_{CO_2} \times \rho_{CO_2}; \quad kg / hr \qquad (2)$$

حيث $\rho_{CO_2}$ – كثافة غاز $CO_2$ ($\rho_{CO_2}$ =1.2605 kg/m$^3$).

- معامل انبعاث غاز $CO_2$ ( $EF_{CO_2,M}$ ) بدلالة معدل تدفق الوقود ( $kg_{CO_2} / kg_{fuel}$ ):

$$EF_{CO_2,M} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\dot{m}_{fuel}} \qquad (3)$$

- معامل انبعاث غاز $CO_2$ ( $EF_{CO_2,V}$ ) بدلالة معدل التدفق الحجمي للوقود( $m^3_{CO_2} / m^3_{fuel}$ ):

$$EF_{CO_2,V} = \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{fuel}} \qquad (4)$$

حيث: ( $\dot{V}_{CO_2}$ ) و( $\dot{V}_{fuel}$ ) معدل التدفق الحجمي لغاز $CO_2$ والوقود بوحدات ( $m^3_{CO_2} / s$ ; $m^3_{fuel} / s$ ) على التوالي.

- معامل انبعاث غاز $CO_2$ ( $EF_{CO_2,E}$ ) بدلالة الطاقة الكهربائية المنتجة ( $kg_{CO_2} / MWh$ ):

$$EF_{CO_2,E} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{E_h} \qquad (5)$$

- معامل انبعاث غاز $CO_2$ ( $EF_{CO_2,H}$ ) بدلالة نوع الوقود أو الطاقة الحرارية للوقود ( $kg_{CO_2} / MJ$ ):

$$EF_{CO_2,H} = \frac{\dot{m}_{CO_2}}{\dot{m}_{fuel} \times HV_{fuel}} \qquad (6)$$

حيث: $HV_{fuel}$ القيمة الحرارية للوقود ( $MJ / kg_{fuel}$ ).

يستعرض الجدول 3، القيم الحرارية للوقود المستخدم في محطات الطاقة الكهربائية استنادا على تقارير مختبرات تحليل النفط في ليبيا.

الجدول 3: القيم الحرارية للوقود الليبي المستخدم في محطات توليد الطاقة الكهربائية.

| الوقود | الغاز الطبيعي | زيت النفط الخفيف | زيت النفط الثقيل | النفط الخام |
|---|---|---|---|---|
| القيمة الحرارية ( $HV_{fuel}$ ) $MJ / kg_{fuel}$ | 24.93 | 65.14 | 65.44 | 19.54 |

تكمن اهمية ايجاد معامل انبعاث غاز $CO_2$ بعدة مؤشرات في امكانية استخدامها لعدة تطبيقات وليس فقط لتوليد الطاقة الكهربائية.

على سبيل المثال معامل انبعاث $CO_2$ ( $EF_{CO_2,M}$ ) بدلالة معدل تدفق الوقود ( $kg_{CO_2} / kg_{fuel}$ ) يمكن أن يستخدم

في قطاع المواصلات لمركبات الديزل او في العمليات الصناعية التي يلتزم حرق الديزل لانتاج الطاقة. ولم تحسب نسبة الخطا لعدم وجود معلومات كافية للتطبيق الاخر (مثل المواصلات).

### 3.2. حساب التكلفة الاقتصادية للضرر البيئي

يهدف هذا الجزء من البحث الى تقدير تكلفة الضرر البيئي جراء توليد الطاقة الكهربائية في منظومة توليد الطاقة في ليبيا. ونظرا لعدم وجود دراسات اقتصادية-بيئية تعكس الوضع الاقتصادي الحقيقي في ليبيا، تم تبني القيم الدولية المقدرة للضرر البيئي الناجم عن $CO_2$. وقد تم تقدير تكلفة الضرر البيئي في مؤتمر الأمم المتحدة الثامن والعشرون للتغير المناخي 2023 بحوالي 75 دولار لكل طن $CO_2$. ومن المتوقع ان يرتفع الى 85 دولار لكل طن $CO_2$ في عام 2030 [6].

وبناء على ذلك، يمكن تقدير تكلفة الضرر البيئي السنوي ( $C_{CO_2}$ ) من المعادلة التالية [12]، [33]:

$$C_{CO_2} = EF_{CO_2} \times G_{elec} \times \phi_{CO_2} \times 10^{-3} \quad (7)$$

حيث: $EF_{CO_2}$ معامل انبعاث $CO_2$ ( $EF_{CO_2}$ )، الطاقة الكهربائية المنتجة السنوية ( $kg_{CO_2} / MWh$ )، تكلفة الضرر البيئي ($/ton $CO_2$).

### 4.2. فرضيات وحدود ومصادر اللابقين في الدراسة

لحساب معاملات انبعاث غاز $CO_2$ من قطاع صناعة الطاقة الكهربائية؛ تم اعتماد الفرضيات التالية:

1. ظروف التشغيل اعتيادية.
2. اجريت الحسابات على اساس المتوسط الشهري.
3. لعدم توفر البيانات لكافة المحطات تم اعتماد النتائج المتحصل عليها من المحطات المدروسة كنموذج لمنظومة توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا بالكامل.
4. اعتماد قيمة واحدة للخصائص الفيزيائية (الكثافة) لكل من الغازات العادمة وغاز $CO_2$ بغض النظر عن درجة حرارة خروج الغازات العادمة.
5. تبني القيم الدولية لتكلفة الضرر البيئي نظرا لعدم وجود دراسة محلية.

تتمثل حدود الدراسة الحالية في النقاط التالية:

1. لم يتم دراسة كافة المحطات العاملة في قطاع صناعة الطاقة الكهربائية في ليبيا.
2. لم تتم دراسة حساسية كمية الانبعاثات لتغير الاحمال الكهربائية والظروف المناخية.
3. لم تشمل الدراسة تأثير عمر المحطة على معدلات الانبعاث.

ولمعالجة هذا القصور في الدراسية الحالية، وضعت خطة بحثية مستقبلية لدراسة تأثير هذه العوامل على معدلات الانبعاثات في حالة الحصول على البيانات المطلوبة لذلك.

تعتبر البيانات اهم عنصر من مصادر اللابقين في الدراسات التحليلية [34]، [8]. كذلك تم ملاحظة وجود تباين في الخصائص الفيزيائية للوقود في كل دفعة تزود بها المحطات. كما أن استخدام النماذج الرياضية عوضاً عن المعادلات التجريبية يشكل احد مصادر اللايقين [35].

## 3. النتائج والمناقشة

يستعرض هذا الجزء من البحث النتائج المتحصل عليها من معالجة بيانات جميع المحطات المدروسة.

يمثل الجدول 4 معامل انبعاث $CO_2$ للمحطات الغازية بعدة مؤشرات:

مؤشر تدفق الوقود ( $EF_{CO_2,M}$ ) بوحدة $kg_{CO_2} / kg_{fuel}$ ، ومؤشر الطاقة الكهربائية المنتجة ( $EF_{CO_2,E}$ ) بوحدة $kg_{CO_2} / MWh$ ، ومؤشر نوع الوقود ( $EF_{CO,H}$ ) والذي يمثله الوحدة الحرارية للوقود ( $kg_{CO_2} / MJ$ ).

الجدول 4: معامل انبعاث 2OC بعدة مؤشرات لمحطات الطاقة الغازية.

| المحطة | الوقود | $EF_{CO_2,M}$ $kg_{CO_2} / kg_{fuel}$ | $EF_{CO_2,E}$ $kg_{CO_2} / MWh$ | $EF_{CO_2,H}$ $kg_{CO_2} / MJ$ |
|---|---|---|---|---|
| جنوب طرابلس | غاز طبيعي | 2.796 | 0.838 | 0.088 |
| جنوب طرابلس | زيت النفط الخفيف | 3.831 | 1.113 | 0.090 |
| أوباري | نفط خام | 4.932 | 1.154 | 0.081 |
| الخمس | غاز طبيعي | 2.301 | 0.798 | 0.087 |

أظهر الجدول 4 ان الغاز الطبيعي هو الالطف بيئيا من باقي انواع الوقود. ويتضح ايضا وجود تباين في النتائج بين محطتي جنوب طرابلس والخمس، ويرجع سبب ذلك في اختلاف كفاءة المحطتين حيث أن كفاءة محطة جنوب طرابلس أقل كفاءة من محطة الخمس. وكما هو متوقع، كانت القيمة العظمى لجميع المعاملات للنفط الخام ماعدا لمعامل الانبعاث بمؤشر الحرارة وذلك لان القيمة الحرارية للنفط الخام أعلى بكثير من باقي انواع الوقود. ويعزى سبب الاختلاف في معامل انبعاث $CO_2$ على مؤشر الحرارة بين محطتي طرابلس والخمس الى اختلاف القيمة الحرارية للغاز الطبيعي المستهلك في المحطتين، وهذا يمثل أحد اسباب اللايقين في التحليلات.

بينما جدولت معاملات انبعاث $CO_2$ للمحطات البخارية في الجدول 5، وبعدة مؤشرات:

مؤشر تدفق الوقود ( $EF_{CO_2,M}$ ) بوحدة $kg_{CO_2} / kg_{fuel}$ ، ومؤشر الطاقة الكهربائية المنتجة ( $EF_{CO_2,E}$ ) بوحدة $kg_{CO_2} / MWh$ ، ومؤشر نوع الوقود ( $EF_{CO_2,H}$ ) والذي يمثله الوحدة الحرارية للوقود ( $kg_{CO_2} / MJ$ ).

.

الجدول 5: معامل انبعاث $CO_2$ بعدة مؤشرات لمحطات الطاقة البخارية.

| المحطة | الوقود | $EF_{CO_2,M}$ $kg_{CO_2} / kg_{fuel}$ | $EF_{CO_2,E}$ $kg_{CO_2} / MWh$ | $EF_{CO_2,H}$ $kg_{CO_2} / MJ$ |
|---|---|---|---|---|
| مصراتة | غاز طبيعي | 2.788 | 0.848 | 0.070 |
| سرت | زيت النفط الخفيف | 2.930 | 0.875 | 0.070 |
| طبرق | زيت النفط الثقيل | 3.371 | 0.973 | 0.076 |

يتبين من الجدول 5 ان الغاز الطبيعي هو الالطف بيئيا من باقي انواع الوقود يليه زيت النفط الخفيف ثم زيت النفط الثقيل. وبمقارنة هذه المؤشرات مع المحطات الغازية يتبين ان للكفاءة دور اساسي في قيمة معامل الانبعاثات. ولهذا السبب كانت قيمة $EF_{CO_2,E}$ لمحطتي سرت ومصراتة أقل من تلك لمحطة طرابلس الغازية.

ويعرض الجدول 6 معاملات انبعاث $CO_2$ للمحطات المركبة، وبعدة مؤشرات:

مؤشر تدفق الوقود ( $EF_{CO_2,M}$ ) بوحدة $kg_{CO_2} / kg_{fuel}$ ، ومؤشر الطاقة الكهربائية المنتجة ( $EF_{CO_2,E}$ ) بوحدة $kg_{CO_2} / MWh$ ، ومؤشر نوع الوقود ( $EF_{CO_2,H}$ ) والذي يمثله الوحدة الحرارية للوقود ( $kg_{CO_2} / MJ$ ).

الجدول 6: معامل انبعاث $CO_2$ بعدة مؤشرات لمحطات الطاقة المركبة.

| المحطة | الوقود | $EF_{CO_2,M}$ $kg_{CO_2} / kg_{fuel}$ | $EF_{CO_2,E}$ $kg_{CO_2} / MWh$ | $EF_{CO_2,H}$ $kg_{CO_2} / MJ$ |
|---|---|---|---|---|
| شمال بنغازي | غاز طبيعي | 3.076 | 0.624 | 0.100 |
| مصراتة | زيت النفط الخفيف | 4.168 | 0.638 | 0.100 |

مرة أخرى، تظهر الكفاءة دورها الرئيسي ليس فقط في توليد الطاقة الكهربائية وانما ايضا في مستوى التلوث؛ حيث ان للدورات المركبة كفاءة أعلى بكثير من تلك للمحطات الغازية والبخارية. ولهذا السبب يمكن التوصية بالتعاقد على انشاء محطات مركبة او تطوير المحطات الغازية الى محطات مركبة اذا كان ذلك ممكن تقنيا، حيث أن المحطات المركبة تتطلب كميات كبيرة من المياه في المكثف.

مما سبق، يتبين أنه من حيث نوع الوقود، فإن الغاز الطبيعي أقل ضررا على البيئة من أنواع الوقود الأخرى. ومن ناحية تقنية توليد الكهرباء، حيث تلعب الكفاءة الحرارية دورا رئيسيا في توليد الكهرباء، يتبين أن محطات توليد الطاقة ذات الدورة المركبة لديها أقل معامل انبعاث $CO_2$ على مؤشر توليد الكهرباء، حيث تبلغ الكفاءة الكلية في المحطات المركبة حوالي 45 % (وهي منخفضة نسبيا مقارنة بالكفاءات القياسية والتي تصل إلى 55% [36])، بينما تبلغ في التوربينات الغازية حوالي 30%، وفي المحطات البخارية حوالي 25%. وللأغراض الحرارية (على سبيل المثال التدفئة)، فإن توليد الحرارة باستخدام البخار هو الألطف على البيئة من تسخين الهواء، حيث كان معامل الانبعاث لكل وحدة حرارة بخار أقل من معامل الانبعاث لكل وحدة حرارة الهواء.

### 1.3. تقدير معامل انبعاث $CO_2$ لكل نظام توليد الكهرباء

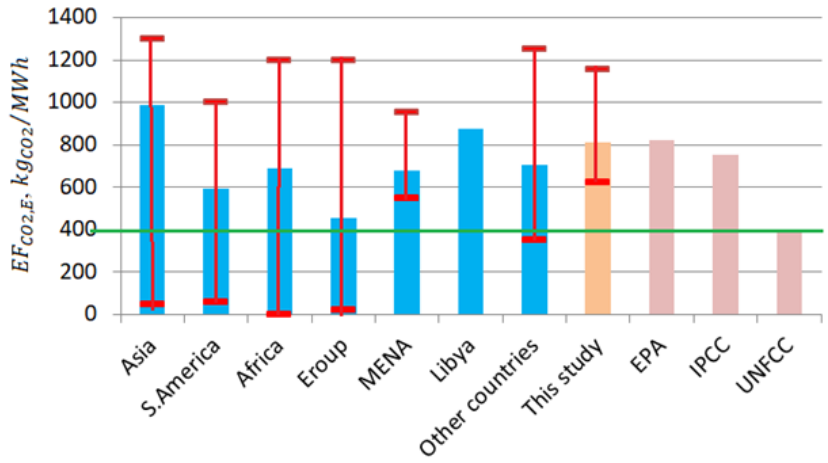
ومن خلال تحليل البيانات الواردة في الشكل 5، اضافة الى النتائج المتحصل عليها في هذا البحث والذي تم فيه تحديد معدلات توليد الطاقة الكهربائية على أساس الوقود وتقنية الوقود، فإنه يمكن تحديد معامل انبعاث $CO_2$ موحد لجميع قطاع صناعة الطاقة الكهربائية في ليبيا.

وعليه فان معامل انبعاث $CO_2$ بمؤشر توليد الكهرباء ( $EF_{CO_2,E}$ ) يمكن صياغته على النحو التالي:

$$EF_{CO_2,E} = \sum_{j=1}^{3}\sum_{i=1}^{4} EF_{CO_2,E} \times Sh_{i,j} \qquad (8)$$

حيث: تشير الرموز السفلية i، j الى نوع الوقود وتقنية التوليد، على التوالي. ويشير العدد (3) الى انواع تقنيات التوليد في ليبيا (غازية وبخارية ومركبة) بينما يشير العدد (4) الى انواع الوقود المستخدم في محطات التوليد (غاز طبيعي ووزيت النفط الخفيف وزيت النفط الثقيل والنفط الخام). $Sh_{i,j}$ – نسبة مساهمة كل نوع وقود وتقنية في منظومة التوليد (كما هو موضح في الشكل (5). وبالتالي أمكن تقدير معامل انبعاث $CO_2$ لمنظومة توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا، وقدرت بحوالي 813.88 $kg_{CO_2} / MWh$ .

يستعرض الشكل 6 مقارنة معامل انبعاث $CO_2$ لقطاع صناعة الطاقة الكهربائية في ليبيا الذي تم الحصول عليه من خلال هذه الدراسة مع معدلات دول اخرى وايضا لمؤسستي EPA و IPCC وكذلك القيمة التي حددتها UNFCC للحفاظ على احترار الكون بحدود 1.5 درجة.




الشكل 6: مقارنة المستويات الدولية لمعامل انبعاثات $CO_2$ على مؤشر توليد الطاقة الكهربائية.

يعزى التباين الكبير في معاملات انبعاث $CO_2$ للاقليم الواحد إلى توليد الطاقة الكهربائية بعدة طرق، حيث تستخدم بعض الدول الوقود الاحفوري مثل الفحم او النفط او الغاز الطبيعي وبهذا يكون التلوث في أعلى مستوياته، بينما تولد بعض الدول الاخرى طاقتها الكهربائية من تقنيات أنظف بيئيا مثل: الطاقة النووية أو الكهرومائية أو المتجددة وبالتالي تكون مستويات التلوث أقل بكثير من تلك الدول التي تستخدم الوقود الاحفوري. كما يمكن الملاحظة من الشكل 6، أن بعض الدول حققت نجاحاً في هذا المجال، إذ تمكنت من تبني تقنيات أوصلتها إلى القيمة التي حددتها اتفاقية الأمم المتحدة الإطارية بشأن تغير المناخ. وبشكل عام، لا يزال متوسط معامل انبعاث $CO_2$ أعلى من المستوى المطلوب.

كما يوضح الشكل 6 نتائج سياسات الدول التي حققت نجاحاً في هذا المجال، ليتسنى للدول التي لا تزال فوق المستوى المطلوب أن تحذو حذوها. ويشير الشكل 6 أيضاً إلى أن المنطقة الوحيدة التي لا يوجد فيها توليد طاقة أقل من المستوى المحدد هي منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، ويعود السبب في ذلك إلى وفرة الاحتياطيات المؤكدة من النفط الخام والغاز الطبيعي في هذه الدول. ولذلك فمن المتوقع أن يكون الوقود الأحفوري لفترة طويلة من الزمن هو المصدر الوحيد لتوليد الكهرباء. ورغم وجود عدة مصادر أخرى بديلة وصديقة للبيئة لتوليد الطاقة الكهربائية، مثل: الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، إلا أن استخدام هذه المصادر البديلة لا يشكل إلا نسبة ضئيلة جداً من إجمالي التوليد في هذه المنطقة لا تتعدى 5% من اجمالي الطاقة المستهلكة في المنطقة [37]. بينما تصل هذه النسبة الى أقل من 1% في ليبيا حتى تاريخ اعداد هذا البحث.

تبين التقارير الاقتصادية ان الاهداف الوطنية لدول الشرق اللاوسط وشمال افريقيا للطاقة المتجددة لعام 2030، للوصل الى نسبة مساهمة الطاقات المتجددة تتراوح بين 15% - 50% من مزيج توليد الكهرباء, وأن حكومات المنطقة تعتزم مضاعفة جهودها لرفع حصة المصادر المتجددة في مزيج الطاقة. ومن المتوقع للمنطقة اضافة حوالي 33 جيجاواط من الطاقات المتجددة إلى قدراتها المركبة وذلك بحلول عام 2026، والتي من ضمنها الطاقة الشمسية الكهروضوئية وطاقة الرياح والطاقة الكهرومائية [37]. وفي هذا السياق، أعلنت ليبيا عن خطتها الاستراتيجية والتي تهدف الى زيادة نسبة مساهمة الطاقات المتجددة في مزيج انتاج الطاقة الكهربية بحيث تصل الى 30% في عام

2030 وتتعدى 50% بحلول عام 2050. وذلك باستخدام الطاقة الشمسية الحرارية والكهروضوئية وطاقة الرياح.

### 2.3. تقدير تكلفة الضرر البيئي

ولتقدير تكلفة الضرر البيئي الناجم عن توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا، وباعتبارتكلفة الضرر البيئي حوالي 57 دولار لكل طن $CO_2$، وبمعلومية معامل الانبعاث (0.875) والتوليد الفعلي 33,980 GWh , فان تكلفة الضرر البيئي السنوية تقدر (باستخدام المعادلة 7) بحوالي 2.184 مليار دولار. ومن خلال الجدول 7 الذي يبين تكلفة راس المال لبعض تقنيات إنتاج الطاقة الكهربائية من المصادر المتجددة والنظيفة, يتضح امكانية استثمار هذا المبلغ في تقنيات توليد الطاقة الكهربائية المتجددة والصديقة للبيئة وصولا للحياد الكربوني في قطاع صناعة الطاقة الكهربائية في ليبيا.

الجدول 7: التكلفة الاقتصادية لإنتاج الطاقة الكهربائية من المصادر المتجددة.

| الطاقات المتجددة | تكلفة الاستثمار (M$\MW) | قدرة المحطة (MW) |
|---|---|---|
| محطات طاقة الوقود الحيوي | 2.353 | 928 |
| محطات طاقة جوف الارض | 3.991 | 547 |
| محطات الطاقة المائية | 2.135 | 1,023 |
| حقول الخلايا الشمسية | 0.857 | 2,548 |
| حقول المركزات الشمسية | 9.091 | 240 |
| مزارع الرياح البرية | 1.325 | 1,648 |
| مزارع الرياح البحرية | 2.858 | 764 |

أشادت العديد من الدراسات المحلية بأن تقنية المركزات الشمسية CSP كونها الانسب في ليبيا [38]. وتكلفة انشاء 1 MW كما هو مبين في الجدول 7 هي $ 9,091,000. وبالتالي فانه بالإمكان اضافة 240 MW سنويا من الطاقة النظيفة الى مزيج الطاقة الكهربائية، وهذا يعني الحد من انبعاث ما قيمته 205,000 طن $CO_2$ سنويا في الهواء الجوي.

## 4. الاستنتاجات

في هذه الدراسة، تم حساب معامل انبعاث $CO_2$ على أساس بيانات مقاسة من بعض محطات توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا والذي قدر بحوالي 758.0 kg $CO_2$/kWh. هذه القيمة بعيدة عن جميع القيم المدرجة في قوائم المنظمات المعنية بالبيئة، مما يعطي تقيما خاطئا عن الوضع البيئي في البلاد. كما أوضحت الدراسة بان مستوى التلوث في قطاع صناعة الطاقة في ليبيا مرتفع مقارنة مع بعض الدول الاخرى، وبعيداً عن القيمة التي حددتها UNFCC للحد من زيادة احترار الكون. وعليه يتطلب بذل المزيد من الجهود على كافة الاصعدة من العلماء والسياسيين لسن القوانين والاستراتيجات للحد من التدهور البيئي وتلطيف اثاره السلبية على المجتمع المحلي. كما بينت الدراسة من خلال التحليل الاقتصادي المتضمن لتكلفة الضرر البيئي، انه بالامكان تطوير البنية التحتية للبلاد والتحول نحو الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة عوضا عن الوقود الاحفوري التقليدي وتحقيقا للتنمية المستدامة.

## 5. التوصيات

أظهرت الدراسة الحالية أن معامل انبعاث غاز $CO_2$ في قطاع الكهرباء في ليبيا كبير، مما يشكل تهديدا بيئيا، ويقوض انجازات والمشاركة الدولية للدولة الليبية في تخفيض كمية انبعاثات الغازات الدفيئة. وعليه فان هذه الدراسة توصي بالاتي:

- العمل على التحويرات التقنية في جميع المحطات من اجل التحول نحو التوليد باستخدام الغاز الطبيعي عوضا عن زيت الوقود الخفيف والثقيل والنفط الخام.
- العمل على ان تكون تقنية جميع المحطات التي سيتم انشائها مستقبلا من نوع تقنية الدورة المركبة.
- كإجراء سريع للحد من التلوث يمكن تركيب آسرات الكربون في جميع المحطات [39].
- العمل على ايقاف والاستغناء عن جميع المحطات القديمة ذات الكفاءة المتدنية.

- الغاء كافة العقود الحديثة بشأن انشاء محطات توليد الطاقة الكهربائية التقليدية والاستعاضة عنها بالوقود الشمسي [40]، [41] او محطات الطاقة المتجددة الهجينة [9]، [10].
- اقحام تكاليف الاضرار البيئية في التحليل الاقتصادي مما يتيح فرصة عادلة للطاقات البديلة والنظيفة للمنافسة في سوق الطاقة المحلية [42]، [26].

**Author Contributions:** All authors have made a substantial, direct, and intellectual contribution to the work and approved it for publication.
**Funding:** There is no funding for the article.
**Data Availability:** The data are available at request.
**Conflicts of Interest:** The authors declare that they have no conflict of interest.

## REFERENCES

*[1] H. Ritchie and P. Rosado, " Fossil fuels," 2017. [Online]. Available: https://ourworldindata.org/fossil-fuels.*

*[2] M. Al-Sayed, "Record levels of carbon emissions from fossil fuels in 2023," 2023.*

*[3] H. Algassie, .. Fakroun, M. Miskeen and I. Gargar, "The Use of GIS and Multi-Criteria Fuzzy Logic to Assess and Identify Flood-Prone Areas in the Greater Ghat Region," vol. 1, no. 1, pp. 37-47, 2023.*

*[4] H. El-Khozondar, A. Asfour, Y. Nassar, S. Shaheen, M. El-Zaety, R. El-Khozondar, M. Khaleel, A. Ahmed and A. Alsharif, "Photovoltaic solar energy for street lighting: A case study at Kuwaiti Roundabout, Gaza Strip, Palestine," Power Eng. Eng. Thermophys, vol. 3, no. 2, pp. 77-91, 2024.*

*[5] "Hala J. El-Khozondar, Rifa J. EL-Khozondar, Fady El-Batta, Rafat Al Afif, Christoph Pfeifer, "Microgrid for remote area in Gaza Strip powered by solar energy and olive oil mill waste," in 12th International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protectiion (SEEP 2021), Vienna, Austria, 2021.*

*[6] F. Yasser, J. Hala, A. Ahmed, A. Alsharif, M. Khaleel and R. J., "A new design for a built-in hybrid energy system, parabolic dish solar concentrator and bioenergy (PDSC/BG): A case study–Libya," Journal of Cleaner Production, vol. 441, p. 140944, 2024.*

*[7] H. El- Khozondar, F. El-batta, R. El-Khozondar, Y. Nassar, M. Alramlawi and S. Alsadi, "Standalone hybrid PV/Wind/Diesel electric generator system for a COVID-19 Quarantine Center," Environ Prog Sustainable Energy, pp. 1-18, 2022.*

*[8] Y. Nassar, S. Alsadi, H. El-Khozondar, M. Ismail, M. Al-Maghalseh, T. Khatib, J. Sa'ed and T. D. M. Mushtaha, "Design of an isolated renewable hybrid energy system: a case study," Materials for Renewable and Sustainable Energy, pp. 1-16, 2022.*

*[9] L. Rtemi, W. El-Osta and A. Attaiep, "Hybrid System Modeling for Renewable Energy Sources," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 12, no. 1, pp. 13-28, 2023.*

*[10] M. Almihat and M. Kahn, "Design and implementation of Hybrid Renewable energy (PV/Wind/Diesel/Battery) Microgrids for rural areas," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 12, no. 1, pp. 71-95, 2023.*

*[11] H. El-Khozondar and F. El-batta, "Solar Energy as an alternative to conventional energy in Gaza Strip: Questionnaire based study," An-Najah University Journal for Research - A (Natural Sciences), vol. 32, no. 1, pp. 47-74, 2018.*

*[12] M. Abdunnabi, N. Etiab, Y. Nassar, H. El-Khozondar and R. Khargotra, "Energy savings strategy for the residential sector in Libya and its impacts on the global environment and the nation economy," Advanes in Building Energy Research, vol. 17, no. 4, pp. 379-411, 2023.*

[13] A. Abodwair, M. Guneser, M. Khaleel, Y. Nassar, H. El-Khozondar, Z. Yusupov and A. Elbaz, "Feasibility assessment of hybrid renewable energy based ev charging station in Libya," Solar Energy abd Sustainable Development Journal, vol. 13, no. 2, 2024.

[14] Y. Nassar, H. El-Khozondar, A. Alatrash, B. Ahmed, R. Elzer, A. Ahmed, I. Imbayah, A. Alsharif and M. Khaleel, "Assessing the Viability of Solar and Wind Energy Technologies in Semi-Arid and Arid Regions: A Case Study of Libya's Climatic Conditions," Applied Solar Energy, vol. 60, no. 1, pp. 149-170, 2024.

[15] A. Eberle and G. Heath, "Estimating carbon dioxide emissions from electricity generation in the United States: How sectoral allocation may shift as the grid modernizes," Energy Policy, vol. 140, p. 111324, 2020.

[16] A. Finenko and L. Cheah, "Temporal CO2 emissions associated with electricity generation: Case study of Singapore," Energy policy, vol. 93, pp. 70-79, 2016.

[17] L. Abdallah and T. El-Shennawy, "Evaluation of CO2 emission from Egypt's future power plants. Euro-Mediterr," Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration , vol. 49, no. 5, 2020.

[18] Y. Nassar, K. Aissa and S. Alsadi, " Air Pollution Sources in Libya," Research & Reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences, vol. 6, no. 1, pp. 63-79, 2018.

[19] N. Yasser, M. Salem, K. Iessa, I. AlShareef, K. Ali and M. Fakher, "Estimation of CO2 emission factor for the energy industry sector in libya: a case study," Environment, Development and Sustainability, vol. 23, pp. 13998-14026, 2021.

[20] S. Yousif, A. Salem, F. Yasser and I. Bader, "Investigation of pollutants dispersion from power stations," International journal of energy research, vol. 30, no. 15, pp. 1352-1362, 2016.

[21] A. Okasha, H. Ibrahim, M. Elatrash and M. Al-Meshragi, "Computer Assessment of SO2 and NOx Emitted From Khoms Power Station in North-western Libya," International Journal of Modern Engineering Sciences, vol. 1, no. 1, 2012.

[22] A. Okasha, H. Ibrahim, M. Elatrash and M. Al-Meshragi, "Investigation of SO2 and NOx Emissions from Khoms Power Stations in Libya," International Conference on Environmental, Biomedical and Biotechnology, vol. 1, no. 1, pp. 191-195, 2022.

[23] A. Okasha, D. Nasser, H. Abu-Arabia and M. Elatrash,"Effect of Khoms power station stack emission impact on the ancient city of Leptis Magna, Libya," An-Najah University Journal for Research-A (Natural Sciences), vol. 36, no. 1, pp. 109-132, 2021.

[24] H. Ibrahim, A. Okasha and A. Elkhalidy, "Improve Performance and Efficiency of the Steam Power Plant," in 1st Conference on Petroleum Resources and Manufacturing, Tripoli, 2020.

[25] A. Miskeen, R. Elzer, I. Mangir, Y. Nassar, H. El-Khozondar, M. Khaleel, A. Ahmed, A. Alsharif and I. Imbayah, "Electricity from Wastewater Treatment Plants," Solar energy and sustainablr Development journal, vol. 12, no. 2, p. 24–37, 2023.

[26] S. Mohammed, Y. Nassar, W. El-Osta, H. El-Khozondar, A. Miskeen and A. Basha, "Carbon and Energy Life Cycle Analysis of Wind Energy Industry in Libya," Solar energy and sustainable development journal, vol. 12, no. 1, pp. 50-69, 2023.

[27] N. Yasser, K. Aissa and S. Alsadi, "Estimation of Environmental Damage Costs from CO2e Emissions in Libya and the Revenue from Carbon Tax Implementation," Low Carbon Economy, vol. 8, pp. 118-132, 2017.

[28] CNBC, "cnbcarabia," [Online]. Available: https://www.cnbcarabia.com/123174/2024/18/05. [Accessed 2024 May 21].

[29] IEA, "Energy system of Libya," 2022.

[30] K. Iessa, Y. Fahi and M. Salem, "Quantities inventory of CO2 emitted from the energy industry sector in Libya: A case study," in the International Scientific Symposium on Environmental Science, Tulkarm-Palestine, March 9th -10th, 2022.

[31] EIA, "Capital Cost and Performance Characteristic Estimates for Utility Scale Electric Power Generating Technologies," 2024.

[32] E. Zadorozhnaya, V. Hudyakov and S. Sibiryakov, "Simulation of heat transfer in a turbocharger bearing housing," Tribology and Materials, vol. 1, no. 2, pp. 42-54, 2022.

[33] Y. Nassar, H. El-Khozondar, W. El-Osta, S. Mohammed, M. Elnaggar, M. Khaleel, A. Ahmed and A. Alsharif, "Carbon footprint and Energy Life Cycle Assessment of Wind Energy Industry in Libya," Energy conversion and management, vol. 300, no. 1, p. 117846, 2023.

[34] Y. F. Nassar and S. Y. Alsadi, "Assessment of solar energy potential in Gaza Strip-Palestine," Sustainable Energy Technologies and Assessments, vol. 31, pp. 318-328, 2019.

[35] Y. Nassar, H. El-Khozondar, M. Elnaggar, F. El-batta, R. El-Khozondar and S. Alsadi, "Renewable energy potential in the State of Palestine: Proposals for sustainability," Renewable Energy Focus, vol. 49, p. 100576, 2024.

[36] M. Hasan, W. Muzammil, T. Mahlia, A. Jannifar and I. Hasanuddin, "A review on the pattern of electricity generation and emission in Indonesia from 1987 to 2009," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, no. 5, pp. 3206-3219, 2012.

[37] K. O'Malia and etc., "MENA grows renewables by half butclings to risky hydrogen and gas," Global Energy Monitor, 2023.

[38] M. Abouqeelah, Y. Nassar, H. El-Khozondar, M. Khaleel, A. Ahmed, A. Alsharif and A. Abubaker, "Atlas of Concentrating Solar Power for Libya," Solar energy and sustainable development Journal, vol. 12, no. 2, pp. 1-20, 2023.

[39] Y. Nassar, M. Salem and H. El-Khozondar, "Towards Green Economy: Case of Electricity Generation Sector," Solar Energy and Sustainability Development Journal, vol. 13, no. 2, 2024.

[40] M. Abadulwahab, Y. Nassar and H. El-Khozondar, "Switching to solar fuels instead of fossil fuels in the electric power industry in Libya," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 12, no. 2, 2023.

[41] M. Andeef, Y. Nassar, H. Awad, H. El-Khozondar and M. Khaleel, "Transitioning to Solar Fuel Instead of Fossil Fuel in The Electricity Industry in Libya," International Journal of Electrical Engineering, vol. 1, no. 4, pp. 32-46, 2023.

[42] S. Al-Behadili, "Analysis of Clean Development Mechanism for Dernah Wind Farm (I) Project (Libya) by Using AM0019 Methodology," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 12, no. 2, pp. 47-64, 2023.