

Carbon and Energy Life Cycle Analysis of Wind Energy Industry in Libya

Suhaylah Mohammed^{1*}, Yasser Nassar¹ , Wedad El-Osta² , Hala J. El-Khozondar³ ,
Abdulhakeem Miskeen¹, Ali Basha¹.

¹Mechanical & Renewable energy Engineering, Wadi Alshatti University, Brack-Libya.

²The Libyan Center for Solar Energy Research and Studies, Libya.

³Electrical Engineering and Smart Systems, Islamic University of Gaza, Palestine.

E-mail: ¹ S.mohammed@wau.edu.ly.

ARTICLE INFO.

Article history:

Received 1 July 2023

Received in revised form 2 July 2023

Accepted 6 August 2023

Available online 17 August 2023

KEYWORDS

Wind energy, Life cycle assessment,
Environmental impact, GHG emission
factor, Libya.

ABSTRACT

By analyzing a wide range of energy, economic, and environmental variables for a variety of attractive locations in Libya, the study established the fundamentals of localizing the wind energy business in Libya. The estimate of the greenhouse gas (GHG) emission factor resulting from the conversion of wind energy into electric energy also includes the quantity of GHG emissions from cement manufacturing and transportation, as well as manufacturing (for various wind turbine manufacturers) sea transportation of wind energy equipment from the site of manufacture to the port of Tripoli, land transportation to the location of the wind energy farm, and calculating the energy and emissions used for recycling recyclable materials and for transportation. Hourly climate data over a 25-year period (1995-2020) were gathered from the SolarGis climate information portal.

For many viable wind energy production locations in Libya, the System Advisor Model (SAM) software was used to calculate the productivity of wind farms with a 100 MW capacity. The study's findings showed that the Gamesa turbine, whose capital cost was around (146,916,400 dollars), had the best economic and environmental indices. The GHG emission rates for all the cities that were targeted ranged from 24-63g GHG/kWh. The time needed for carbon to recover ranged from 5.5 to 14.5 months. The expected energy payback time was 14 to 22 months. An LCOE's production costs ranged from 4.8 to 11.1 cents per kWh.

*Corresponding author.

تحليل دورة حياة الكربون والطاقة في صناعة طاقة الرياح في ليبيا

سهيلة محمد¹، ياسر نصار¹، وداد الاسطى²، هالة جارالله الخزندار³، عبدالحكيم بن مسكين¹، علي ميلاد¹.

¹ قسم اهندسة الميكانيكية والطاقات المتجددة، كلية الهندسة، جامعة وادي الشاطئ، براك- ليبيا.

² المركز الليبي لبحوث ودراسات الطاقة الشمسية، طرابلس-ليبيا.

³ قسم الهندسة الكهربائية والانظمة الذكية، كلية الهندسة، الجامعة الاسلامية بغزة، غزة- فلسطين.

ملخص: تم في هذه الدراسة وضع أساسيات توطين صناعة طاقة الرياح في ليبيا، وذلك بحساب العديد من مؤشرات الطاقة والاقتصاد والبيئة لعدد من المواقع الواعدة في ليبيا، وحساب معامل انبعاث الغازات الدفيئة (GHG) الناتجة من تحويل طاقة الرياح الى طاقة كهربائية، وذلك بدء من التصنيع (لعدة شركات مصنعة لتوربينات الرياح)، والنقل البحري لمعدات طاقة الرياح من مكان التصنيع الى ميناء طرابلس، والنقل البري الى مكان انشاء مزرعة طاقة الرياح، إضافة الى كمية انبعاث GHG الناتجة عن صناعة ونقل الاسمنت من مصانع الاسمنت في ليبيا الى اماكن انشاء مزارع الرياح، والانبعاثات خلال عمليات التركيب والتشغيل والصيانة والطمر.

كما تم الاخذ بعين الاعتبار الانبعاثات من عملية تدوير ما يقارب 90% من الهيكل المعدني للتوربينات، وتقدير كمية الانبعاثات والطاقة المستهلكة خلال عمليات نقل وإعادة تدوير المواد المدورة. تم الحصول على البيانات المناخية من منصة المعلومات المناخية SolarGis لكل ساعة ولمدة 25 سنة (1995-2020)، واستخدم برنامج System Advisor model (SAM) لتقدير إنتاجية مزارع الرياح بقدرة 100 MW لعدة مواقع واعدة لإنتاج طاقة الرياح في ليبيا.

أشارت نتائج الدراسة أن التوربينه من نوع Gamesa لها أفضل المؤشرات الاقتصادية والبيئية، حيث بلغت تكلفة رأس المال حوالي (146,916,400\$)، وتراوحت معاملات انبعاثات الغازات الدفيئة لكل المدين المستهدفة حوالي 24-63g GHG/kWh، وتراوحت فترة استرداد الكربون حوالي 5.5 – 14.5 شهراً، وقدرت فترة استرداد الطاقة بحوالي 14- 22 شهراً، وتراوحت تكلفة إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية LCOE حوالي 4.8-11.1 cent/kW.

1. مقدمة

يُعتبر التغير المناخي أحد أكبر التهديدات التي يواجهها العالم، بسبب الآثار السلبية لاستخدام الوقود الأحفوري في توليد الطاقة، ومسؤوليته عن أكثر من ثلث إجمالي الانبعاثات (35.29%) [1]. ومن أجل الوفاء بالتزامات الدولة الليبية نحو المجتمع الدولي وما تم الاتفاق عليه في مؤتمر باريس، والحد من انبعاث الغازات الدفيئة وتلطيف آثارها السلبية على البيئة، كان من الضروري زيادة نسبة مشاركة الطاقات المتجددة في مزيج إنتاج الطاقة التقليدية، وعليه فقد أطلقت الدولة الليبية الخطة الاستراتيجية لتوليد الطاقة الكهربائية للأعوام (2018-2050) والتي تُلزم وزارة الكهرباء والطاقات المتجددة بان تكون مساهمة الطاقات المتجددة حوالي 35% من إجمالي إنتاج الكهرباء بحلول عام 2030، وستتعدى النصف في عام 2050 والتي سيكون مصدرها الطاقة الشمسية وطاقة الرياح [2].

تعتبر طاقة الرياح من أهم مصادر الطاقة المتجددة في العالم، حيث تشكل حلاً مستداماً وتقلل من الاعتماد على الوقود الأحفوري، ومع زيادة الاهتمام بالحفاظ على البيئة وتحسين جودة الهواء، أصبح التركيز على تقييم الآثار البيئية لتوليد طاقة الرياح مهماً، فعملية تقييم دورة حياة طاقة الرياح تساعد على توضيح الآثار البيئية والاقتصادية لتوليد الطاقة الكهربائية باستخدام طاقة الرياح [3].

تأتي أهمية هذا البحث من أهمية طاقة الرياح كونها الشريك المثالي للطاقة الشمسية في منظومات الطاقات المتجددة الهجينة، وذلك لتميزها باحتمالية توليد الطاقة على مدار 24 ساعة حسب سرعة الرياح، خلافاً للطاقة الشمسية والتي تعمل فقط خلال ساعات النهار، وبالتالي وجود مزارع الرياح في أنظمة توليد الطاقة الكهربائية الاستراتيجية يعتبر ضرورياً للتقليل من تكلفة المشروع وأيضاً لتقليل الاعتماد على منظومات تخزين الطاقة [4]. شهدت صناعة طاقة الرياح تطورا ونموا كبيرا خلال السنوات القليلة الماضية، وفقا للمجلس العالمي الأعلى لطاقة الرياح (GWEC)؛ حيث بلغت القدرات المركبة من مزارع طاقة الرياح على اليابسة 707.4 GW والبحرية 35.3 GW، كما تم تركيب مزارع طاقة الرياح بقدرة 93 GW في عام 2022 [5]. تمتلك ليبيا إمكانات كبيرة من طاقة الرياح [6-9] والطاقة الشمسية [10-12] وطاقة الكتلة الحيوية [13، 14] والتي يجب تسخيرها لمعالجة مخاوف البيئة العالمية، والحد من

التدهور البيئي المحلي والمساهمة في تلطيف الاحترار الكوني وتغير المناخ. ويعتبر تقييم دورة حياة الطاقة أداة مصممة لمساعدة صانعي القرار على مقارنة أنظمة أو تقنيات الطاقات المختلفة، وتقييم أثارها البيئية طوال دورة الحياة من أجل اختيار التكنولوجيا المثلى التي سيتم استخدامها. تشتمل دورة الحياة على تحصيل الأثار البيئية لأي نظام أو تقنية للطاقة منذ بداية تصنيع الآلة مروراً بجميع العمليات اللوجستية التي تصدر انبعاثات مثل: النقل والتكيب والتشغيل والصيانة وتفكيكها وطمرها أو إعادة تدوير جزء منها في نهاية عمرها [15]، وهي طريقة معروفة ومعترف بها لإجراء تحليل التقييم البيئي لأي منتج وهي ISO14040, ISO14044 [16].

الهدف من هذه الدراسة هو تقييم الأثر البيئي من منظور دورة حياة الغازات الدفيئة GHG المرتبطة بتوليد الكهرباء من مزارع طاقة الرياح لأنواع متعددة من التوربينات بقدرات متفاوتة وبلدان مصنعة مختلفة، ويشمل نطاق هذه الدراسة جميع المراحل منذ بداية عمر المزرعة، بدءاً من عمليات تصنيع الأجزاء المكونة لتوربينات الرياح، ونقل جميع المكونات إلى موقع المزرعة، وتركيب توربينات الرياح، وتشغيل وصيانة محطة طاقة الرياح إلى نهاية العمر الافتراضي عن طريق إعادة تدوير المكونات أو التخلص منها، ويحدد فوائدها مقارنة بخيارات أخرى من محطات توليد الطاقة الكهربائية ويعطي رؤية واضحة لصانعي القرار في اختيار التكنولوجيا المناسبة عند إنشاء محطات طاقة جديدة. تعتبر دورة تقييم الحياة لمنظومات إنتاج الطاقة البديلة من أكثر الطرق شيوعاً للمفاضلة بينها فيما يتعلق بالتلوث البيئي، حيث تناولت العديد من الأبحاث تقييم مزارع حصد لرياح البرية، والبحرية [17]. كما تم إجراء العديد من الدراسات في بلدان ومناطق مختلفة حول العالم [19-23]، بهدف تقييم التأثيرات البيئية بمقارنة التقنيات والقدرات والمواقع المختلفة والعوامل الأخرى التي قد تؤثر على اتخاذ القرار، كما أجري تقييم دورة حياة لتقنيات متجددة أخرى ومقارنة هذه التقنيات بتقنية استخراج الطاقة الكهربائية من طاقة الرياح، على سبيل المثال قارن Dale توربينات الرياح بمحطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية والحرارية [24]، بينما قارن Raadal وآخرون طاقة الرياح والطاقة المائية [25]. ودرس Crawford [27] تأثير قدرات توربينات الرياح على دورة الحياة وانبعاثات غازات الاحتباس الحراري [26]. وقارن Tremeac and Meunier اثنين من توربينات الرياح أحدهما بقوة 4.5 ميغاوات والأخرى بقدرة 250 وات، وأظهرت نتائج الدراسة أنه كلما زادت سعة توربينات الرياح قل معامل انبعاث غاز CO₂ لكل كيلو وات ساعة. بينما قام Bhandari وآخرون [28] بتقييم تقنيتين مختلفتين، إحداهما 1.8 ميغاوات بدون علبه تروس والأخرى 2 ميغاوات مع علبه تروس، وأجري Vargas وآخرون [29] تحقيقاً باستخدام نهج تقييم دورة الحياة في الأثار البيئية لمواد التصنيع المختلفة واستهلاك الكهرباء لاثنتين من توربينات الرياح التي تم بناؤها في المكسيك، وبغض النظر عن أن كلتا التوربينتين لهما نفس القدرة 2.0 ميغاواط، فإن أحدهما له تأثير بيئي أقل من الآخر، وعلل سبب ذلك إلى أن إحداهما تستخدم مواد أقل من الأخرى. لتقييم الأداء البيئي لطاقة الرياح في كولومبيا، أجرى Henao and Vivanco [30] تقييماً لدورة الحياة الهجينة لمزرعة رياح تبلغ 5.91 ميغاوات من السعة المركبة للتأثيرات المختلفة. أظهرت النتائج أن معامل انبعاث مزرعة الرياح منخفضة نسبياً 12.93 gCO_{2e}/kWh مقارنة بالدراسات المماثلة، ويرجع ذلك إلى سرعات الرياح العالية في منطقة الدراسة. أستخدم Guezuraga وآخرون [31] برنامج المحاكاة GEMIS وبينوا أن المواد المستخدمة في صناعة البرج تمثل 55% من إجمالي المواد المستخدمة في صناعة توربينات الرياح، بينما تشكل متطلبات الطاقة لمرحلة التصنيع الجزء الأكبر من دورة الحياة بنسبة 84%. وخلصت الدراسة إلى أن طاقة الرياح، على وجه الخصوص، هي أنظف مصدر للطاقة، حيث تقدر فترة استرداد الطاقة عند 7 أشهر وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون عند 9 gCO_{2e}/kWh. ومن أجل تحديد المصادر الأولية لانبعاثات مكافئ ثاني أكسيد الكربون في البرازيل قام Pacca و Oebels [20] بتقييم دورة حياة مزرعة الرياح البرية على الساحل الشمالي الشرقي للبلاد، واكتشفوا أن كثافة CO_{2e} طوال عمر مزرعة الرياح هي 7.1 gCO_{2e}/kWh، وتأتي غالبية الانبعاثات من مرحلة التصنيع (80%)، مع 6% فقط تأتي من مرحلة النقل. كما قام Marimuthu and Kirubakaran [32] بحساب المردود البيئي والطاقي لطاقة الرياح في الهند، مع مراعاة القيم السنوية لسرعة الرياح لمزرعة طاقة رياح بقدرة 1.65 ميغاواط، وكانت فترة استرداد الطاقة حوالي 1.12 سنة وفترة استرداد غازات الدفيئة 50 يوماً. وتم استخدام منهجية تحليل دورة الحياة من قبل Rajaei and Tinjum [33] لإجراء تحليل كمي ومقارن وتصنيف بناء وتشغيل مزارع طاقة الرياح (90 توربينة رياح بقدرة 1.8 MW لكل توربينة في جنوب وسط ويسكونسن بالهند)، حيث قدرت نسبة مردود الطاقة بحوالي 25.5%، وفترة استرداد الطاقة حوالي 12.3 شهراً وقدر إجمالي انبعاثات غاز CO_{2e} حوالي 16.9 gCO_{2e}/kWh على طول عمر مزرعة الرياح البرية. وفي دراسة أخرى في الهند أيضاً أجرى Verma وآخرون [34] تحليل LCA على 10 توربينات رياح من نوع Vestas بقدرة 1.65 MW تحت الظروف المناخية لولاية Karnataka الهندية أظهرت النتائج أن معامل انبعاث غاز CO₂ حوالي 11.3 gCO₂/kWh.

محلياً قام Al-Behadili and El-Osta [35] بالتحقيق في تأثير إعادة التدوير وكذلك الاستهلاك الأساسي للطاقة والانبعاثات لمزرعة الرياح في درنة - ليبيا، وكشفت دراسة دورة الحياة أن مدة الاسترداد للطاقة 5.7 شهراً، ونسبة الاسترداد 42% بدون عملية إعادة التدوير، وبلغ معامل انبعاثات غاز CO₂ حوالي 10.4 gCO₂/kWh، بينما كانت

4.65 gCO_{2e}/kWh مع إعادة التدوير. في دراسة اجراها Li وآخرون [36] على مزرعة رياح برية بقدره 40 MW في الصين لإجراء تحليل لدورة الحياة مع مراعاة البنية التحتية، جمعت البيانات المتعلقة بالموارد والطاقة خلال دورة حياة مزرعة الرياح، بما في ذلك مراحل التصنيع والنقل والبناء والتركييب والتشغيل والصيانة ونهاية العمر. أظهرت النتائج أن معامل انبعاث غاز CO₂ حوالي 28.2 gCO_{2e}/kWh لمزرعة الرياح، وقدرت تكلفة إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية (LCOE) \$/kWh 0.01–0.02.

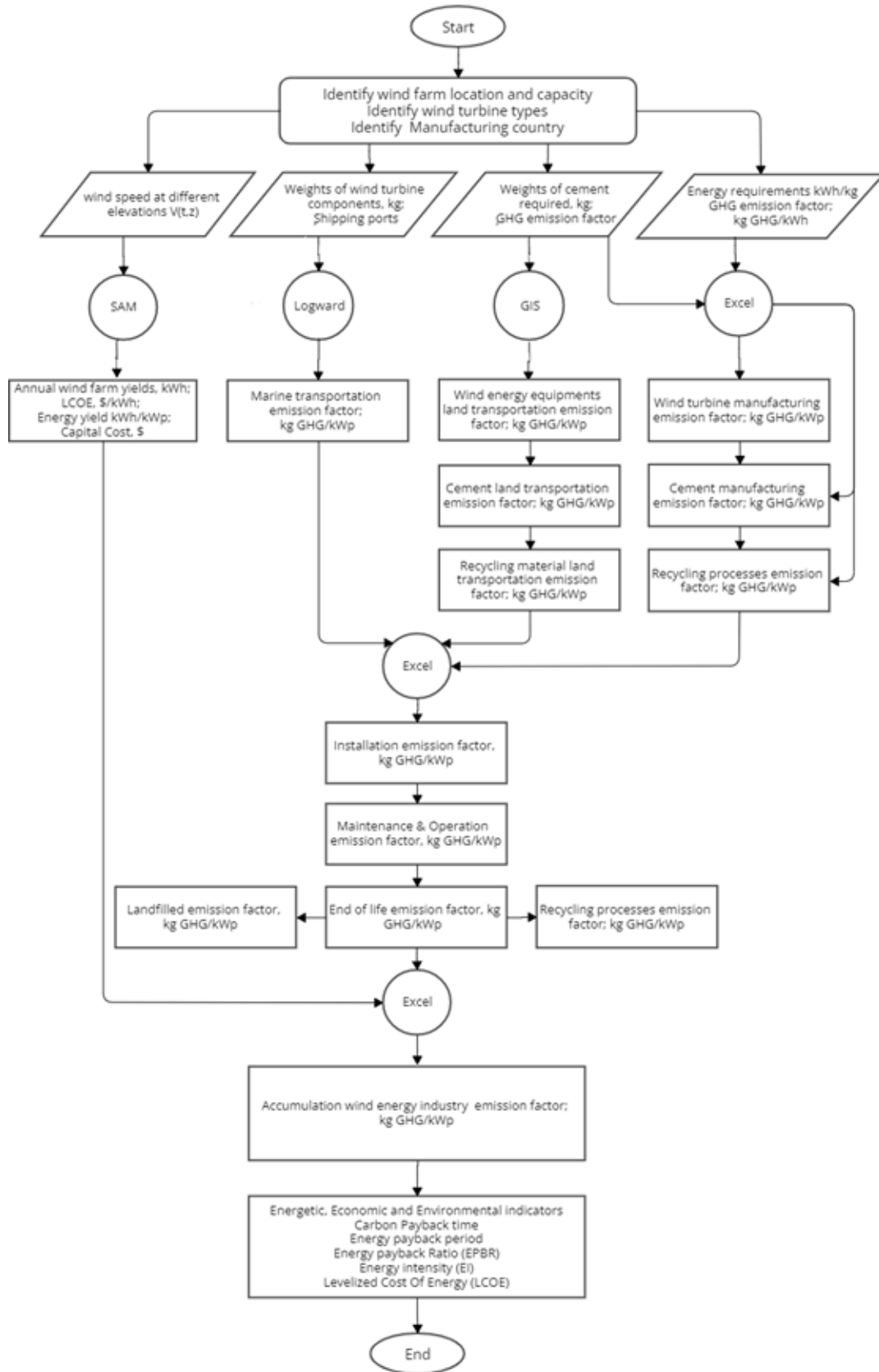
توضح الدراسات السابقة أعلاه أن نوع وقدرة توربينات الرياح وكذلك موقع مزرعة الرياح لها تأثير كبير على نتائج تقييم دورة الحياة، وللحصول على نتائج موثوقة، يجب إجراء العديد من الدراسات على أنواع وسعات مختلفة من توربينات الرياح في مواقع مختلفة من البلاد. من وجهة النظر هذه، لكل دراسة قيمة علمية وعملية خاصة بها. في هذا السياق، توجد فقط دراستان، إحداهما لمدينة درنة [19]، والأخرى في مدينة جودايم بالقرب من مدينة الزاوية [37]، وهي لا تكفي لتغطية بلد مثل ليبيا بمساحة شاسعة وبتضاريس متباينة وإمكانات متفاوتة من طاقة الرياح. من خلال مراجعة الأدبيات السابقة تبين وجود فجوة في دراسات دورة حياة الانبعاثات لطاقة الرياح للدول الغير مصنعة لتقنيات طاقة الرياح، ويكمن الاختلاف في ان حدود النظام لدورة الحياة للدول الغير مصنعة لتقنيات طاقة الرياح متفرقة وتخضع لمعاملات انبعاث غازات الدفيئة، وبناء عليه، وكون ليبيا دولة غير مصنعة لتقنيات طاقة الرياح، اتبع هذا البحث نهجا غير تقليديا في حساب الانبعاثات خلال عمر محطة طاقة الرياح، حيث تم احتساب الغازات الدفيئة لطاقة الرياح بشكل موسع وشامل، وذلك بادراج الانبعاثات من عمليات التصنيع من كل دولة مصنعة استنادا على تقارير IEA لمعامل انبعاث GHG لكل دولة على حدة، وكذلك حساب الانبعاث خلال عملية النقل البحري من ميناء الدولة المصنعة الى ميناء طرابلس البحري، وكذلك عمليات النقل البري داخل ليبيا بين ميناء طرابلس الى 12 موقعا مرشحا من قبل ابحاث محلية لانشاء مزارع الرياح فيها، وكذلك اخذ بعين الاعتبار التلوث الناتج من صناعة ونقل الاسمنت من مصانع متفرقة في ليبيا الى مواقع انشاء مزارع الرياح، كما تم ادراج كمية الانبعاثات جراء نقل وإعادة تدوير المواد المعدنية المدورة من مزارع الرياح الى مدينة مصراتة حيث سيتم إعادة تدويرها في مصنع الحديد والصلب، وهذا يمثل الاضافة العلمية لهذا البحث واختلافه عن البحوث السابقة.

2. منهجية البحث

تقييم دورة الحياة هي طريقة معروفة ومعترف بها لإجراء تحليل التقييم البيئي لأي منتج، إنها طريقة مرجعية تأخذ في الاعتبار مادة وطاقة المنتج والانبعاثات المصاحبة لكل مرحلة من مراحل دورة الحياة، ويتم ذلك طبقا للمواصفات الدولية ISO 14044 و ISO 14040. يبين الشكل 1 مخططاً انسيابياً يوضح منهجية الدراسة.

1.2. الفرضيات ومحدودية ومصادر اللإيقين في الدراسة

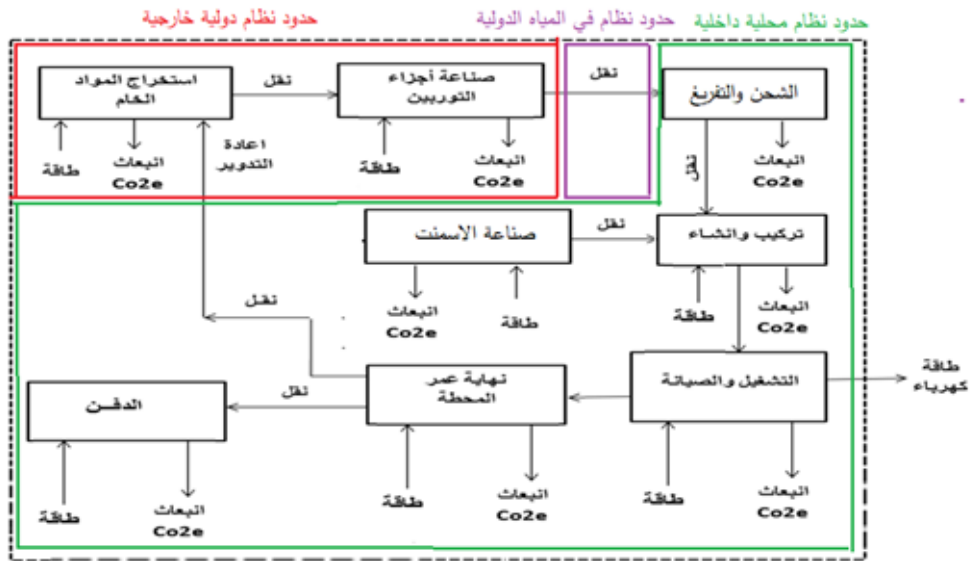
1. الطاقة المستهلكة لإنتاج تقنيات طاقة الرياح هي طاقة كهربائية فقط.
2. الطاقة المطلوبة لإنتاج 1 kg من المواد المصنعة لتقنيات طاقة الرياح متساوية في كل الشركات المصنعة ولكل البلدان.
3. اعتماد معاملات الانبعاث للغازات الدفيئة لمنظومة توليد الطاقة الكهربائية للدول المصنعة لتقنية طاقة الرياح من قوائم وكالة الطاقة الدولية (IEA).
4. إهمال الانخفاض في إنتاجية الطاقة من مزارع الرياح مع الزمن.
5. بسبب عدم وجود خبرة عملية لليبيا في طاقة الرياح، فقد تم اعتماد كمية الطاقة المستهلكة في مراحل التركيب والصيانة والتشغيل ونهاية العمر كنسبة مئوية من الطاقة اللازمة للتصنيع وقدرت بحوالي 5% من الطاقة المستهلكة في مرحلة التصنيع [37].
6. تم اعتماد الميناء الرئيسي للدولة المصدرة لتقنيات طاقة الرياح كما تم اعتماد ميناء طرابلس البحري كمدخل لتقنيات طاقة الرياح ومن تم شحنها برا الى جميع مواقع مزارع الرياح.
7. يعتبر عدم دراسة حساسية الحسابات لارتفاع برج توربينات الرياح احد جوانب القصور الرئيسية في هذه الدراسة، وكذلك غياب الحسابات الخاصة بالتوربينات الصغيرة والمتوسطة.
8. ترتبط المصادر الرئيسية لعدم اليقين ببيانات دورة الحياة التي تم الحصول عليها من مصادر مختلفة تتعلق باستهلاك الطاقة، ومعامل الانبعاثات ذات الصلة لكل مرحلة [38]. مجال آخر من عدم اليقين هو تكلفة معدات طاقة الرياح. رصد Nassar and Alsadi تفاوتات في اسعار معدات تقنية الطاقات المتجددة تتعدى 360% [39]. كما لوحظ اختلاف كبير في قيم معاملات انبعاث الهواء.



الشكل 1: المخطط الانسيابي للدراسة

2.2. حدود النظام

يشمل تقييم مزرعة الرياح كلا من التصنيع والنقل والتركيب والصيانة، والتكثيف والطمر واعادة التدوير. يتم عرض حدود النظام في الشكل 2.

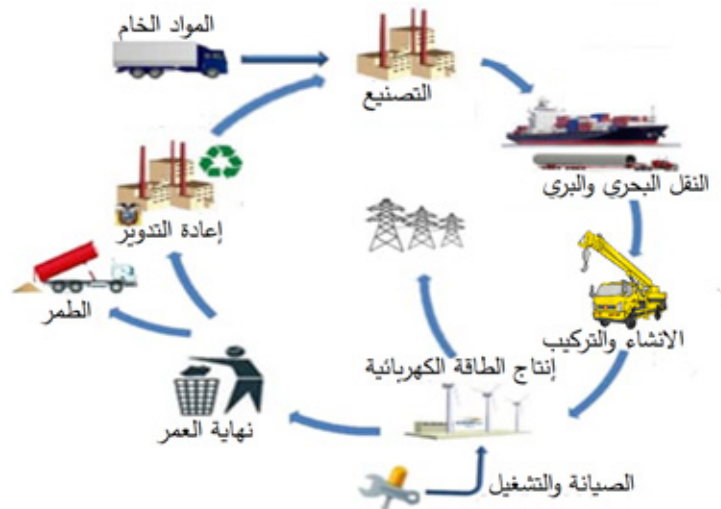


الشكل 2: حدود نظام الدراسة

يتكون حدود نظام توربينات الرياح من المراحل كما هو موضح في الشكل 2، في البداية يتم استخراج المواد الخام أو إنتاجها ونقلها إلى إنتاج توربينات الرياح، يتم تصنيع مكونات توربينات الرياح من المواد المنقولة في موقع الإنتاج. لتجميع وتوزيع الكهرباء، يتم تصنيع الكابلات الداخلية ومحطة المحولات والكابلات الخارجية أيضاً من مواد متعددة. تستهلك مرحلة الإنتاج هذه الطاقة وتطلق الملوثات. يتم نقل الأجزاء المصنعة إلى موقع التركيب. مرحلة النقل أيضاً تطلق الملوثات. في موقع الانشاء، يتم بناء الأساس وتركيب التوربينات الريحية عليه. علاوة على ذلك، مراحل التشغيل والصيانة تشمل توليد الكهرباء والفحص الدوري واستبدال المعدات يتطلب كمية معينة من الطاقة وانبعاثات الملوثات. بعد الانتهاء من فترة تشغيل التوربينة عمر (20 عاماً)، يتم إيقاف تشغيلها. أيضاً يتم نقل الأجزاء المعاد تدويرها إلى موقع إنتاج المواد أو يتم نقل المنتجات التي يمكن التخلص منها إلى منطقة مكب النفايات.

3.2. مراحل دورة الحياة

يمكن تقسيم دورة حياة توربينات الرياح إلى خمس مراحل: التصنيع، المواصلات، الانشاء، التركيب، التشغيل والصيانة، وإيقاف التشغيل والتخلص، كما هو موضح في الشكل 3.



الشكل 3: دورة حياة مزارع طاقة الرياح

1.3.2. التصنيع (E_{man})

تم اختيار عدة توربينات مختلفة الانواع والقدرات (10 أنواع) وعدة دول مصنعة لتوربينات الرياح (24 دولة). أيضا تم حصر كمية المواد الداخلة في صناعة توربينات الرياح (الجدول 1) والطاقة اللازمة للتصنيع. أما الخرسانة فلم تحسب ضمن مكونات توربينة الرياح لانها صنعت في ليبيا وبالتالي ستكون ضمن حدود النظام الداخلية في المرحلتين مرحلة التصنيع ومرحلة النقل.

على اثر ذلك تم حساب الوزن النوعي ($M_{i,j}$) لكل مادة ($m_{i,j}$) ولكل توربينة رياح بقدره (P_j) [37]:

$$M_{i,j} = \frac{m_{i,j}}{P_j}, \left[\frac{kg}{kW_p} \right] \dots \dots \dots (1)$$

وبفرض ان الطاقة المستهلكة لانتاج 1 kg من المادة هي فقط طاقة كهربائية وقيمتها ثابتة في كل البلدان. أدرجت الطاقة اللازمة لانتاج 1 kg من المواد الداخلة في تصنيع توربينات الرياح في الجدول 1، ودرجت معاملات انبعاثات GHG في الجدول 2 لجميع الدول المصنعة لتقنيات طاقة الرياح.

الجدول 1: الطاقة اللازمة لتصنيع 1 kg من المواد الداخلة في تصنيع تقنيات طاقة الرياح [37].

مكونات متنوعة	الالياف الزجاجية	النحاس	الالمونيوم	الحديد
kWh/kg	kWh/kg	kWh/kg	kWh/kg	kWh/kg
13.0	2.4	9.5	16.4	55.4

الجدول 2: معامل انبعاث GHG للدول المصنعة لتقنيات طاقة الرياح بالإضافة الى دولة ليبيا بوحدة $kg\ GHG/kWh$

الدولة	فرنسا	الهند	الدنمارك	اسبانيا	الصين	ألمانيا	سوريا	تركيا
معامل الانبعاث	0.5128	0.7082	0.42767	0.28653	0.5374	0.58883	0.65	0.375
الدولة	إستونيا	إيران	إيطاليا	اليابان	هولندا	النرويج	روسيا	تاوان
معامل الانبعاث	0.59869	0.532	0.45857	0.4658	0.45172	0.40194	0.3102	0.442
الدولة	أوكرانيا	امريكا	البرازيل	الأرجنتين	كندا	بريطانيا	كوريا الجنوبية	ليبيا
معامل الانبعاث	0.20145	0.42394	0.0617	0.307	0.12	0.21233	0.4156	1.035

أما معامل انبعاث GHG من صناعة الاسمنت فيقدر بحوالي 850 kg GHG/ton cement [1].

2.3.2. النقل (E_{tra})

تم حساب الانبعاثات من عمليات النقل الخارجية والداخلية. حيث اخذ بعين الاعتبار احتمالية استيراد معدات طاقة الرياح من اي دولة مصنعة لتوربينات الرياح (24 دولة)، الشكل 4 يوضح الدول المصنعة والقدرات الانتاجية لمصانع توربينات الرياح حول العالم. كما أستخدم البرنامج المقدم مجاناً من شركة Logward الألمانية للتكنولوجيا اللوجستية والذي لديه القدرة على حساب انبعاثات الكربون المتوقعة من رحلات النقل التجارية البحرية حول العالم (<https://www.logward.com/freebies/co2-calculator>)؛ لحساب الانبعاث خلال عملية النقل البحري من ميناء الدولة المصنعة الى ميناء طرابلس البحري. وكذلك عمليات النقل البري داخل ليبيا بين ميناء طرابلس الى 12 موقعا واعداً لإنشاء مزارع طاقة الرياح في ليبيا.

كما تم الاخذ بعين الاعتبار التلوث الناتج من نقل الاسمنت من مصانع متفرقة في ليبيا الى مواقع انشاء مزارع الرياح، وهي (مصنع زلتن للمنطقة الغربي، ومصنع الخمس للمنطقة الوسطى والجنوبية، ومصنع بنغازي للمنطقة الشرقية). كما تم ادراج كمية الانبعاثات جراء نقل وإعادة تدوير المواد المعدنية المدورة من مزارع الرياح الى مدينة مصراتة حيث سيتم إعادة تدويرها في مصنع الحديد والصلب.

تم الحصول على المسافات بين المدن على الطرق المعبدة باستخدام منصة GIS. وباعتبار وسيلة النقل هي سيارات الحمولة وبمعامل انبعاث GHG حوالي 4.533 kg GHG/km لسيارة نقل بحمولة 80 ton [1]. أي ان نقل واحد طن لمسافة 1000 km سيبعث 56.6625 kg GHG.



الشكل 4: الدول المصنعة للتوربينات في العالم

3.3.2. الإنشاء والتركيب (E_{ins})

تتضمن عمليات انشاء مزرعة الرياح عمليات تركيب معدات وأجهزة طاقة الرياح في الموقع المحدد، والنقل اللوجستي، والتي تنطوي على استخدام الروافع، والسيارات في الموقع، ومد الكابلات الداخلية، وتركيب محطة المحولات، والاتصال بالشبكة العامة للكهرباء.

4.3.2. التشغيل والصيانة ($E_{o\&m}$)

تشمل عمليات التشغيل والصيانة جميع الأنشطة الهندسية ومنها: الصيانة الدورية والطارئة، عمليات مراقبة أداء المزرعة، تغيير الزيوت والفلاتر، والتشحيم، وتجديد أو استبدال الأجزاء البالية (مثل علبه التروس والمحامل) على مدى عمر محطة المزرعة. كما يتم تضمين جميع العمليات اللوجستية في المزرعة من النقل المرتبط بالتشغيل والصيانة. ذكر Tremeac and Meunier ان العديد من الأبحاث أهملت التشغيل والصيانة لأن لها تأثير ضئيل للغاية ويمكن تجاهله [40]. تكشف الأبحاث في هذا المجال أن التشغيل والصيانة والتركيب والخدمة هي مراحل أقل أهمية في دورة الحياة. بينما أشار Bonou وآخرون إلى أن الطاقة المستهلكة في هذه المراحل تتراوح بين 2-4% [17]. وعليه فقد تم اعتبار قيمة 3% من الطاقة اللازمة من تصنيع توربينة الرياح كقيمة لحساب الطاقة المستهلكة في هذه المرحلة [37].

5.3.2. نهاية الحياة (End)

1.5.3.2. إعادة التدوير (E_{rec})

تمثل عمليات إعادة التدوير ضرورة للحفاظ على الموارد الطبيعية وايضا التقليل من استهلاك الطاقة الكهربائية وبالتالي المحافظة على البيئة، حيث ان الطاقة المستهلكة في إعادة التدوير تقدر بحوالي 65% من الطاقة اللازمة في حالة التعامل مع المواد الخام. يمكن إعادة تدوير نسبة كبيرة من وزن توربينات الرياح للعديد من المواد، خاصة البرج والقمرة وعمود الدوارن. يعرض الجدول 3 نسبة المواد المدارة في التوربينة، حيث سيتم التخلص من الأجزاء المتبقية في مكب النفايات. تم حساب الطاقة المستهلكة في إعادة تدوير توربينات بضرب وزن المواد المختلفة للأجزاء القابلة لإعادة التدوير من توربينات الرياح، كما هو موضح في الجدول 3، من خلال الطاقة النوعية (kWh / kg) من كل معدن.

الجدول 3: نسبة المواد القابلة للتدوير من هيكل التوربينة والطاقة المستهلكة

المعدن	نسبة المواد المدورة؛ [42]	نسبة التوفير في الطاقة من إعادة التدوير [41]	الطاقة المستهلكة في عملية التدوير؛ kWh/kg
الحديد	87%	72%	15.514
النحاس	95%	85%	1.428
الألومنيوم	95%	95%	0.822

2.5.3.2. التفكيك والظمر (E_{gra})

يمكن تقدير الأجزاء المتبقية التي سيتم ظمرها، عن طريق طرح وزن الأجزاء القابلة لإعادة التدوير من الوزن الإجمالي لتوربينات الرياح. تم حساب الطاقة المستهلكة في المكب بضرب وزن الأجزاء المتبقية في الطاقة المحددة لهذه المواد. تم اعتماد نسبة 0.206% من إجمالي الطاقة المستهلكة في مرحل التصنيع كقيمة لعمليات التفكيك والظمر [37].

4.2. مؤشرات دورة الحياة**1.4.2. إجمالي الطاقة المستهلكة (E_{con})**

يمكن الحصول على إجمالي الطاقة المستهلكة لكل وحدة قدرة من مزرعة الرياح عن طريق جمع كل الطاقات المستهلكة خلال كل مرحلة من مراحل عمر المزرعة. وبالتالي يمكن صياغة إجمالي الطاقة المستهلكة على الصورة التالية:

$$E_{con} = E_{man} + E_{tra} + E_{ins} + E_{o\&cm} + E_{gra}; [kWh/kW_p] \quad \dots (2)$$

2.4.2. انبعاث GHG خلال دورة الحياة ($EF_{GHG,LC}$)

يستخدم معامل الانبعاث للغازات الدفينة لكل وحدة طاقة كهربائية مستهلكة لكل مرحلة على حدة لتقدير كمية انبعاث GHG من مزرعة الرياح بوحدة (kg GHG/kWp) وذلك لاختلاف حدود النظام لكل مرحلة، من المعادلة التالية [43]:

$$EF_{GHG,LC} = \sum_{i=1}^6 EF_i \times E_i; [kg GHG/kW_p] \quad \dots (3)$$

حيث i تمثل مراحل عمر المزرعة الستة، التصنيع، والنقل، والتكيب، والتشغيل والصيانة، وإعادة التدوير، والظمر. وتمثل EF_i معامل انبعاث غازات GHG لكل وحدة طاقة كهربائية مستهلكة (kg GHG/kWh) لكل مرحلة من استهلاك الطاقة E_i (kWh/kWp).

3.4.2. معامل انبعاث GHG لكل وحدة طاقة منتجة من مزارع الرياح ($EF_{GHG,wind}$)

يمثل هذا المعامل اساس المقارنة في تقييم دورة حياة طاقة الرياح، ويمكن الحصول عليه، بقسمة مجموع كمية انبعاثات GHG خلال طول عمر المزرعة من التصنيع الى الظمر (kg GHG)، على الطاقة المنتجة على طول عمر مزرعة الرياح (kWh) [44]:

$$EF_{GHG,wind} = \frac{EF_{GHG,LC} \times P}{\sum_{n=1}^{20} E_{wind}} [kg GHG/kWh] \quad \dots (4)$$

حيث: P تمثل قدرة مزرعة الرياح (kWp)، E_{wind} تمثل الطاقة الكهربائية المنتجة سنويا من مزرعة الرياح (kWh)، وترمز n الى عمر المزرعة والتي تقدر بحوالي 20 سنة. تم تقدير انتاجية مزارع الرياح لعدة مناطق واعدة في ليبيا عن طريق برنامج SAM (System Advisor Model).

4.4.2. فترة استرداد الكربون (CPBT)

وهي الفترة الزمنية اللازمة لتليقص انبعاثات GHG بنفس القدر المنبعثة من استهلاك الطاقة في كل مراحل العمر لمزرعة الرياح. وتعطى بالعلاقة التالية [37]:

$$CPBT = \frac{EF_{GHG,LC} \times P}{E_{wind} \times EF_{GHG,Libya}} [year] \quad \dots (5)$$

حيث: تمثل انتاجية مزرعة الرياح السنوية (kWh)، $EF_{GHG,Libya}$ يمثل معامل انبعاث GHG من قطاع صناعة الطاقة الكهربائية في ليبيا هو (1.035 kg GHG/kWh).

5.4.2. فترة استرداد الطاقة (EPBT)

فترة استرداد الطاقة هي مقياس للوقت أو عدد السنوات اللازمة لمزرعة الرياح لإنتاج كمية من الطاقة تعادل تلك الطاقة المستهلكة خلال مرحلة دورة حياتها. تُعرّف بأنها نسبة إجمالي الطاقة الأولية المستهلكة خلال دورة الحياة والطاقة الكهربائية التي تنتجها توربينات الرياح سنويًا، وتعطى بالعلاقة التالية [37]:

$$EPBT = \frac{E_{con} \times P}{E_{wind}} \quad [year] \quad \dots\dots\dots (6)$$

6.4.2. نسبة استرداد الطاقة (EPBR)

تُعرّف نسبة استرداد الطاقة بأنها نسبة الطاقة التي تنتجها مزارع الرياح خلال فترة حياتها التشغيلية إلى الطاقة المستهلكة خلال دورة الحياة، ويمكن صياغتها على النحو التالي [37]:

$$EPBR = \frac{\sum_{n=1}^{20} E_{wind,n}}{E_{cons} \times P} \quad \dots\dots\dots (7)$$

7.4.2. كثافة الطاقة (EI)

وتعرف بأنها نسبة الطاقة الأولية المستهلكة خلال دورة حياة مزرعة طاقة الرياح إلى الطاقة الكهربائية التي تنتجها خلال تلك الفترة. وتعطى بالعلاقة التالية [37]:

$$EI = \frac{E_{cons} \times P}{\sum_{n=1}^{20} E_{wind,n}} = \frac{1}{EPBR} \quad \dots\dots\dots (8)$$

3. النتائج والمناقشة

1.3. تقدير كمية المواد الداخلة في صناعة طاقة الرياح

لتحقيق شمولية عالية للبحث؛ مثلت بيانات 10 توربينات رياح مختلفة القدرة والنوع وبلد الصنع والمتحصل عليها من المصنعين، بصيغ رياضية (9-14) كدالة في المواد المستخدمة في تصنيع توربينات الرياح مع سعة القدرات. الجدول 4 يمثل معادلة الانحدار ومعامل الارتباط لكلا من الحديد والاسمنت والالمونيوم والنحاس والالياف الزجاجية ومواد متنوعة أخرى كدالة في قدرة التوربين، على التوالي.

الجدول 4: أوزان المواد المستخدمة في صناعة معدات طاقة الرياح (ton) كدالة في قدرة التوربين (kW).

المادة	معادلة الانحدار	معامل الارتباط	رقم المعادلة
الحديد	$m_{Fr} = -3 \times 10^{-6} P^2 + 3.82 \times 10^{-2} P - 1.2444$	0.7733	(9)
الاسمنت	$m_{ce} = 0.4448 P$	0.7585	(10)
النحاس	$m_{cu} = 7 \times 10^{-7} P^2 + 4.41 \times 10^{-3} P$	0.8269	(11)
الالمونيوم	$m_{al} = 1.1 \times 10^{-3} P$	0.7	(12)
الالياف الزجاجية	$m_{Fg} = -6 \times 10^{-7} P^2 + 1.04 \times 10^{-2} P$	0.7264	(13)
مواد اخرى	$m_{Me} = 1 \times 10^{-7} P^2 + 6.1 \times 10^{-3} P$	0.7541	(14)
لكافة المكونات ماعدا الاسمنت	$m_{all/ce} = 2.3229 P + 0.0508$	0.9694	(15)

2.3. الطاقة السنوية المنتجة من مزارع طاقة الرياح في ليبيا

تشير العديد من الدراسات المحلية الى ان هناك العديد من المواقع في ليبيا لديها امكانيات اقتصادية لاقامة صناعة لطاقة الرياح فيها [45].

تم تقدير الطاقة السنوية المنتجة لمزارع الرياح بقدرة 100 MW لعدة أنواع من تقنيات توربينات الرياح ولعدة مواقع مختلفة في ليبيا عن طريق برنامج المحاكاة الديناميكي SAM الاصدار 2020.02.29. أدرجت النتائج المتحصل عليها في الجدول 5.

الجدول 5: متوسط سرعة الرياح على ارتفاع 100m والطاقة المنتجة (GWh) من مزارع الرياح بقدرة 100 MWp في السنة الأولى لعدة مواقع في ليبيا ومن عدة أنواع من توربينات الرياح ودول مصنعة.

الطاقة المنتجة (GWh)										\bar{V}_{100m}	الموقع
أمريكا		الهند		الصين		أسيانيا	ألمانيا	الدنمارك	فرنسا		
SGRE	Acciona	Nordex	Suzulon	Gold Wind	Siemnas	Enrcon	Gamesa	Vestas	GE	†m/s	
172	116	107	117	206	117	87	215	135	129	8.24	طرابلس
295	282	297	197	287	190	278	296	295	287	7.98	الزاوية
229	184	204	247	196	216	283	352	251	211	9.02	درنة
130	95	110	135	103	114	123	218	141	114	8.77	الجفرة
160	124	160	169	132	140	151	255	174	167	8.73	مسلاطة
201	158	200	212	170	175	189	306	218	183	9.03	براك
154	118	153	162	127	192	145	245	167	219	8.80	غريان
172	134	172	182	144	213	162	270	188	156	8.46	سرت
112	78	92	115	85	144	105	193	121	96	8.95	غات
201	158	200	212	170	246	189	306	218	209	8.55	بنغازي
108	72	107	93	79	141	90	193	117	170	9.96	الكفرة
125	88	124	130	95	163	117	218	136	108	11.46	القطرون

† البيانات من اطلس الرياح- ليبيا <https://globalwindatlas.info/en/area/Libya>

3.3. الانبعاثات خلال مرحلة التصنيع ($EF_{GHG-man}$)

يبين الشكل (5) التباين في معامل انبعاث GHG [kg GHG/kWp] بين الدول المصنعة لتقنيات طاقة الرياح. ويرجع سبب التفاوت في اختلاف طرق توليد الطاقة الكهربائية في هذه الدول (كما هو مدرج في الجدول 2). بالإضافة إلى اختلاف المواد الداخلة في صناعة توربينات الرياح.



الشكل 5: معامل انبعاث GHG بوحدة [kg GHG/kWp] للدول المصنعة لتقنيات طاقة الرياح

4.3. الانبعاثات من المواصلات الخارجية $EF_{GHG(ext-trn-wind)}$ والداخلية $EF_{GHG(int-trn-wind)}$

استخدمت منصة Logward لتقدير كمية انبعاثات GHG خلال النقل البحري $EF_{GHG(ext-trn-wind)}$. واستخدمت منصة GIS لحساب المسافات المقطوعة من ميناء طرابلس البحري لنقل معدات طاقة الرياح برا عبر الطرق البرية إلى مواقع مزارع الرياح داخل البلاد. كما تم أيضا حساب المسافة المقطوعة لنقل الاسمنت من أماكن التصنيع إلى مواقع مزارع الرياح، وكذلك نقل المواد المعاد تدويرها من مواقع مزارع الرياح إلى مدينة مصراتة. وقدرت قيمة معامل انبعاث GHG بحوالي 56.6625 [kg GHG/ton/1000km] على أساس القيمة المعطاة في المصدر [1]. من المعادلة (16) يمكن صياغة معامل انبعاث GHG للمواصلات الداخلية لنقل معدات مزارع الرياح $EF_{GHG(int-trn-wind)}$ لكل وحدة قدرة [kg GHG/kWp] على الصورة التالية:

$$EF_{GHG(int-trn-wind)} = \frac{56.6625}{1000} \times (2.3229 P + 0.0508) \times D_{wind} \quad \dots\dots\dots (16)$$

حيث D_{wind} هي المسافة بين ميناء استيراد معدات طاقة الرياح ومكان انشاء مزرعة الرياح (km). وبنفس الكيفية يمكن صياغة معامل انبعاث GHG للمواصلات الداخلية لنقل الاسمنت من أماكن تصنيعه إلى المكان المزمع انشاء مزرعة الرياح $EF_{GHG(int-trn-wind)}$ لكل وحدة قدرة [kg GHG/kWp] على الصورة التالية:

$$EF_{GHG(int-trn-cement)} = \frac{56.6625}{1000} \times 0.4448 P \times D_{cement} \dots\dots\dots (17)$$

حيث D_{cement} تمثل المسافة بين مصنع الاسمنت والمكان المزمع انشاء مزرعة الرياح (km).

5.3. معامل انبعاث GHG خلال عمر مزرعة الرياح

يتم حساب معامل انبعاث GHG الكلي خلال عمر المحطة بجمع المعاملات المنفردة لكل مرحلة على حدة. يبين الجدول (6) النتائج المتحصل عليها من معالجة البيانات باستخدام برنامج Excel. حيث يمثل الجدول (6) ملخصاً شاملاً لكافة العمليات الحسابية والذي يظهر فيه معامل انبعاث GHG بوحدة $[kg\ GHG/kWp]$. كما تم تصنيف حدود النظام الى ثلاث فئات:

أولاً: فئة الدولة المصنعة للتقنية (اللون الأحمر):

وتشمل مرحلة التصنيع والذي بلغ متوسط $EF_{GHG-man}$ حوالي 1516 $[kg\ GHG/kWp]$.

ثانياً: فئة المواصلات الدولية (اللون البنفسجي):

وتشمل مرحلة النقل البحري لمعدات تقنية طاقة الرياح من الدول المصنعة الى ميناء طرابلس البحري عبر الناقلات البحرية، وبلغ متوسط $EF_{GHG(ext-trn-wind)}$ حوالي 69.625 $[kg\ GHG/kWp]$.

ثالثاً: فئة الدولة المستهلكة للتقنية (اللون الأخضر):

وتشمل هذه الفئة العديد من الفئات الجزئية منها:

1. النقل البري والتي تتضمن نقل معدات طاقة الرياح من ميناء الاستيراد، ونقل الاسمنت من مصانع الاسمنت، ونقل المواد المعادة التدوير الى مدينة مصراتة عبر الشاحنات. وبلغ متوسط - مجموع معاملات الانبعاث للنقل البري لكل موقع حوالي 8.729 $[kg\ GHG/kWp]$.

2. عمليات اللوجيستية: والتي تشمل الانشاء والتشغيل والصيانة والفك والطمس، وبلغ متوسط معاملات الانبعاث للعمليات اللوجيستية في مزرعة طاقة الرياح حوالي 117.788 $[kg\ GHG/kWp]$.

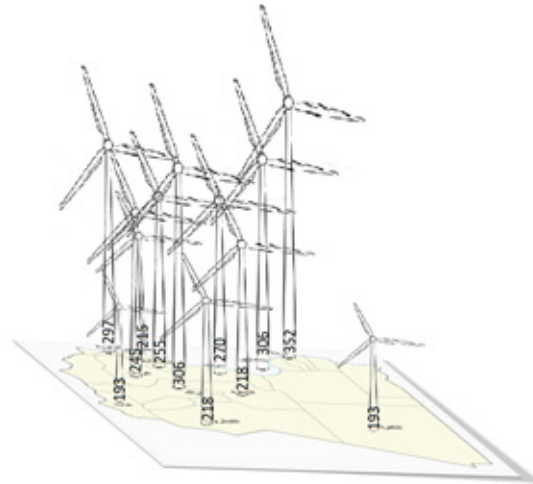
3. تصنيع الاسمنت: بلغ متوسط معاملات الانبعاث لصناعة الاسمنت حوالي 54.084 $[kg\ GHG/kWp]$.

الجدول (6) يبين معاملات الانبعاث GHG التفصيلية لكل دولة مصنعة ولكل شركة تقنية ولكل موقع انشاء مزارع طاقة الرياح ولكل مصنع اسمنت في ليبيا.

كما تم تقدير تكلفة وحدة انتاج الطاقة الكهربائية (LCOE) من مزارع طاقة الرياح باقحام العامل البيئي الناجم من صناعة وتوطين طاقة الرياح بشقيها اطلاق $C_{GHG,LC}$ وتوفير الانبعاثات وصيغت المعادلة على الصورة التالية [13]:

$$LCOE = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \times (C_{inv} + C_{o\&m} + C_{GHG,LC} - C_{GHG,saving}); [\$ / kWh] \dots\dots\dots (18)$$

حيث يمثل C_{inv} تكلفة رأس المال الكلية (\$)، $C_{o\&m}$ تكلفة الصيانة والتشغيل السنوية (\$)، $C_{GHG,LC}$ تكلفة الضرر البيئي الناجم عن اطلاق الانبعاثات خلال مراحل عمر مزرعة الرياح السنوية (\$)، $C_{GHG,saving}$ تكلفة الضرر البيئي الناجم عن توليد الكهرباء بالطريقة التقليدية السنوية (\$)، E_{wind} الانتاج السنوي لمزرعة طاقة الرياح (kWh)، والرموز n و i تشير الى معدل التضخم وعمر توربينات الرياح بالسنة.



الشكل 7: الطاقة السنوية المنتجة من مزارع الرياح لعدة مواقع في ليبيا GWh

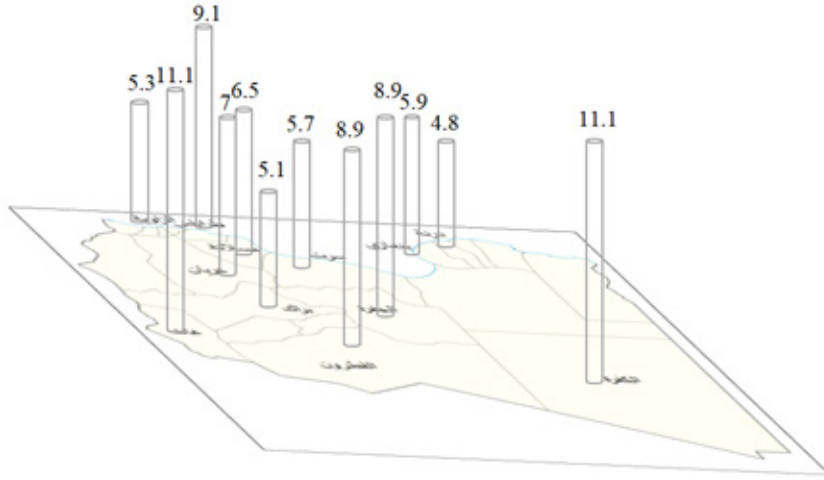
كما تم اختبار عدة تقنيات لتوربينات الرياح تحت الظروف الحقيقية للتشغيل عن طريق محاكاة مزارع الرياح بقدره 100MWp بواسطة برنامج المحاكاة الديناميكي SAM ولجميع المواقع المدروسة، ومن تم إيجاد عدة معالم طاقتوية واقتصادية وبيئة مهمة. ومثلت النتائج بيانيا في الشكلين 8،7.

الجدول 6: تجزئة معامل GHG المنبعثة من عمليات توطين صناعة طاقة الرياح في ليبيا [kg GHG/kWp].

الدول المصنعة	التصنيع	التقل البحري	التقل البري	مزارع	المجموع الكلي	الإنتاج والتوزيع	التقل البري	التقل البري	تصنيع	مصنع
فرنسا	1820.352	78	لمعدات	طاقة الرياح	النظام الداخلي	الصيانة والتشغيل	المواد المعادة	لاامنت	الامنت	الامنت
الهند	2513.989	105	طاقة الرياح	طاقة الرياح	A+B+C+D+E	التفكيك والطمر	التوربين-مصنعة	لاامنت	الامنت	الامنت
النمرك	1518.155	70	(A)			(B)	(C)	(D)	(E)	
اسبانيا	1017.133	53								
الصين	1907.678	88								
المانيا	2090.246	92								
سوريا	2307.389	102	0.0	طرابلس	172.87	117.79	0.571	0.425	54.084	الشمس
تركي	1331.186	63	0.5	الزاوية	173.593	117.79	0.703	0.516	54.084	الشمس
الارجنتين	1089.798	55	0.8	مسلاية	173.127	117.79	0.338	0.115	54.084	الشمس
كندا	425.9795	27	5.7	براك	181.602	117.79	1.537	2.491	54.084	الشمس
استونيا	2125.247	93	0.8	غرين	173.944	117.79	0.805	0.465	54.084	الشمس
ايران	1888.509	81	3.6	سرت	177.339	117.79	0.661	1.204	54.084	زيتين
ايطاليا	1627.845	67	4.8	الجزيرة	180.551	117.79	1.530	2.347	54.084	زيتين
اليابان	1653.51	79	8.2	القطرون	187.426	117.79	2.791	4.561	54.084	زيتين
هولندا	1603.529	70	10.7	عات	191.2516	117.79	3.610	5.0676	54.084	زيتين
النرويج	1426.818	66	8.2	بنغازي	182.292	117.79	2.218	0.0	54.084	بنغازي
روسيا	1101.157	54	8.8	الكفرة	188.253	117.79	3.292	4.287	54.084	بنغازي
تايلاند	1569.024	74	10.2	درنة	184.992	117.79	2.918	0.0	54.084	درنة
بريطانيا	753.7352	36								
كوريا الجنوبية	1475.309	72								
أوكراينا	715.1131	31								
امريكا	1504.915	72								
البرازيل	219.0245	19								
اسرائيل	2697.87	124								

ليبيا - ميناء طرابلس البحري

يتضح من الشكل 8 أن خيار طاقة الرياح يمكن أن يكون اقتصاديا في العديد من المواقع المدروسة حتى أنه يمكن أن ينافس الطاقة المنتجة من حقل الخلايا الشمسية في مدينة غدامس والذي سيتم حقن انتاجها في الشبكة العامة للكهرباء بسعر 10 $\$/kWh$.



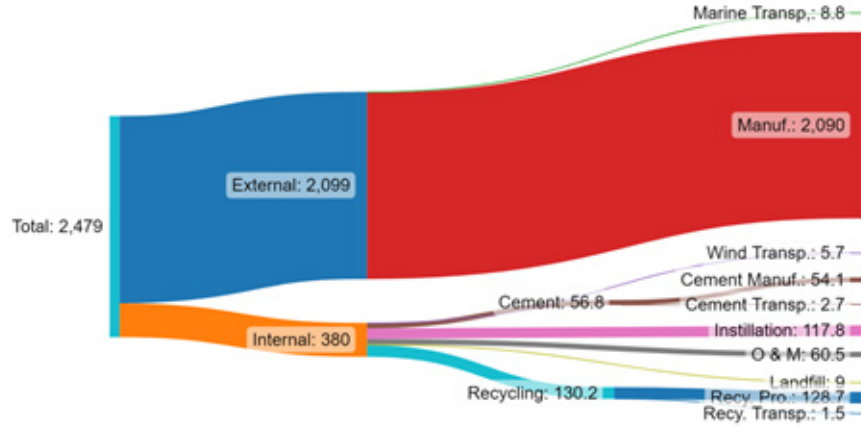
الشكل 8: تكلفة انتاج وحدة الطاقة الكهربائية من مزارع الرياح لعدة مواقع في ليبيا $\$/kWh$

على اثر هذا التحليل ولعدد 10 تقنيات من توربينات الرياح تبين أن لكل موقع توربين خاص يحقق له أفضل أداء وأقل سعر تكلفة LCOE. الجدول (7) يبين الموقع والتوربين المناسب وتكلفة LCOE وتكلفة رأس المال.

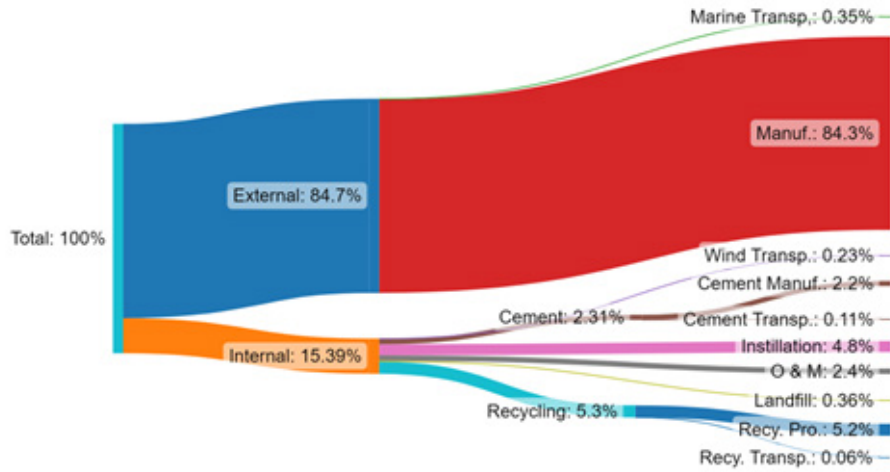
الجدول 7: نوع توربينة الرياح المناسبة لكل موقع وتكلفة رأس المال وتكلفة LCOE ومعامل الانبعاث.

ر.م	الموقع	نوع توربينة الرياح	الدولة المصنعة	تكلفة رأس المال؛ \$	LCOE؛ $\$/kWh$
1	طرابلس	Gamesa	ألمانيا	147,275,648	9.1
2	الزاوية	Acciona	أمريكا	147,145,344	5.3
3	درنة	Enrcon	أسبانيا	135,246,912	4.8
4	الجفرة	Gamesa	ألمانيا	147,578,672	8.9
5	مسلاتة	Gamesa	ألمانيا	147,327,824	6.5
6	براك	Gamesa	ألمانيا	146,978,384	5.1
7	غريان	Gamesa	ألمانيا	147,393,152	7
8	سرت	Gamesa	ألمانيا	147,221,536	5.7
9	غات	Gamesa	ألمانيا	147,745,680	11.1
10	بنغازي	Gamesa	ألمانيا	146,978,384	5.9
11	الكفرة	Gamesa	ألمانيا	147,747,472	11.1
12	القطرون	Gamesa	ألمانيا	147,576,528	8.9

يوضح الشكلان (9) ، (10) مساهمة ونسبة مساهمة كل فئة من الفئات السابقة في معامل انبعاث GHG الكلي لمزرعة طاقة الرياح في مدينة براك ولمسار تدفق التلوث من خط صناعة ونقل التقنية من دولة ألمانيا (شركة Gamesa) الى مدينة براك، ومن خط صناعة ونقل الاسمنت من مدينة الخمس الى مدينة براك، وخط نقل المواد المدورة من مدينة براك الى مدينة مصراتة، وخط اعادة التدوير في مدينة مصراتة.



الشكل 9: مساهمة جميع مراحل توطين صناعة طاقة الرياح في ليبيا على طول عمر مزرعة الرياح من توربينات من نوع Gamesa بمدينة براك بوحدة kg GHG/kWp .



الشكل 10: نسبة مساهمة جميع مراحل توطين صناعة طاقة الرياح في ليبيا على طول عمر مزرعة الرياح من توربينات من نوع Gamesa بمدينة براك

كما أمكن الحصول على معامل انبعاث GHG لانتاج الطاقة الكهربائية على الصورة التالية [37]:

$$EF_{GHG} \left[\frac{kg \text{ GHG}}{kWh} \right] = \frac{EF_{GHG,LC} \left[\frac{kg \text{ GHG}}{kWp} \right]}{\text{Energy Yield} \left[\frac{kWh}{kWp} \right]} \dots\dots\dots (19)$$

أدرجت في الجدول 8 جميع المدلولات الاقتصادية والبيئية المذكورة في الفقرات 3.4.2 – 6.4.2 لنوع التوربين المناسب المدرج في الجدول 7.

تظهر النتائج أن فترة استرداد كل من الطاقة المستهلكة والغازات الدفيئة المنبعثة خلال عمر مزارع طاقة الرياح أقل بكثير من عمر توربينات الرياح والتي قدرت بحوالي 7.3% و 4.6% على التوالي، مما يبرز الدور المهم لطاقة الرياح في التلطيف من تغير المناخ واستدامة الطاقة.

كما تبين من خلال هذه الدراسة ومراجعة الدراسات السابقة حساسية مؤشرات الاقتصاد-الطاقة-البيئة لمزارع طاقة الرياح على موقع المزرعة - سرعة الرياح، والخصائص التقنية لتوربينات الرياح، ومعامل انبعاث GHG لمنظومة انتاج الطاقة الكهربائية من البلدين المنشأ والمستهلك لتكنولوجيا طاقة الرياح (والذي سيدرج ضمن الخطط البحثية المستقبلية).

الجدول 8: المدلولات الاقتصادية والبيئية لكل موقع مزرعة رياح في ليبيا.

الموقع	معامل الانبعاث (g GHG/kWh)	فترة استرداد الكربون (CPBT)؛ سنة	فترة استرداد الطاقة (EPBT)؛ سنة	نسبة استرداد الطاقة (EPBR)	كثافة الطاقة (EI)
طرابلس	55.781	1.078	1.649	12.127	0.082
الزاوية	32.491	0.628	1.261	15.862	0.063
درنة	23.684	0.458	1.253	15.962	0.063
الجفرة	55.222	1.067	1.631	12.263	0.082
مسلاتة	47.242	0.913	1.394	14.347	0.070
براك	39.353	0.760	1.160	17.249	0.058
غريان	49.080	0.948	1.449	13.804	0.072
سرت	44.618	0.862	1.313	15.229	0.066
غات	62.589	1.209	1.839	10.876	0.092
بنغازي	39.423	0.762	1.160	17.249	0.058
الكفرة	62.684	1.211	1.841	10.861	0.092
القطرون	55.202	1.067	1.629	12.281	0.081
المتوسط	47.281	0.914	1.465	14.009	0.073

6.3. مقارنة معامل انبعاث غازات الدفيئة GHG مع مصادر طاقات أخرى

يلخص الجدول 9 معامل انبعاث GHG لعدد من الطاقات المتجددة والتقليدية. يتضح جلياً من المعلومات المدرجة في الجدول 9 أن طاقة الرياح تعتبر الالطف بيئياً من كل الطاقات المتجددة الأخرى [36, 46].

الجدول 9: معامل انبعاث GHG لعدة بدائل من توليد الطاقة الكهربائية.

معامل الانبعاث g GHG/kWh		تقنيات توليد الطاقة
المتوسط	المعدل	
350	100-1000	طاقة الكتلة الحيوية
100	25-600	طاقة البيز غاز
40	15-150	الطاقة الشمسية الحرارية
60	20-200	الخلايا الشمسية
25	10-80	طاقة جوف الارض الحرارية
25	10-80	طاقة المد والجزر
25	12-50	طاقة الامواج
20	2-60	الطاقة المائية
15	5-70	طاقة الرياح البحرية
15	5-70	طاقة الرياح البرية
12	10-20	الطاقة النووية
800	800-1500	الطاقة توليد الطاقة الحرارية

4. الاستنتاجات والتوصيات

تم استخدام منهجية تقييم دورة الحياة لإجراء تحليلاً طاقياً - اقتصادياً - بيئياً لمزرعة طاقة رياح بقدرة 100 MW، وذلك لإثبات نجاعة توظيف صناعة طاقة الرياح في عموم ليبيا من خلال دراسة 12 مدينة مختارة في ليبيا استناداً على توصيات بحاث محليين. بينت الدراسة أن متوسط تكلفة راس المال لإنشاء مزرعة طاقة رياح بقدرة 100 MW في ليبيا تقدر بحوالي \$146,351,295، وبلغت أقصى طاقة منتجة سنوياً من طاقة الرياح في مدينة درنة حوالي 352 GWh وأصغر انتاجية في مدينتي الكفرة و غات حوالي 193 GWh، وبلغ المتوسط السنوي لكل المدن الليبية حوالي 256 GWh.

كما وقدرت تكلفة انتاج وحدة الطاقة الكهربائية المنتجة LCOE والتي تراوحت بين 4.8 – 11.1 \$/kWh لمدينتي درنة و غات على التوالي.

وبلغ متوسط معامل انبعاث غازات GHG لصناعة طاقة الرياح حوالي 47.281 g GHG/kWh، ومتوسط فترة استرداد الكربون حوالي 0.914 سنة، ومتوسط فترة استرداد الطاقة 1.465 سنة، ومتوسط نسبة استرداد الطاقة 1,400%، ومتوسط كثافة الطاقة 7.5%. واستناداً على هذه النتائج تم تحديد توربينات الرياح الأنسب لكل منطقة. وبالنظر الى هذه النتائج فإنه يمكن اعتبار أن طاقة الرياح مصدراً لتوليد الطاقة الكهربائية والحد في انبعاثات غازات الدفيئة واستنزاف النفط مقارنة بمصادر الطاقات التقليدية الأخرى. كما تظهر النتائج أيضاً أن ما يصل إلى 85% من GHG لدورة الحياة يرجع إلى خارج البلاد في مرحلتي التصنيع والشحن لمعدات توربينات الرياح إلى ليبيا. أما التلوث الداخلي الذي يشكل ما نسبته 51% فيأتي من مراحل النقل البري والتركيب (5%) وإعادة التدوير (5%) وصناعة الاسمنت (2%) ومجموع المواصلات (3%). توصي الدراسة بزيادة الاهتمام بطاقة الرياح كونها أحد المصادر الواعدة والداعمة لتنفيذ المرحلة الانتقالية من التوليد التقليدي للطاقة الكهربائية إلى التوليد المستدام للطاقة. لتحقيق ذلك فإن الحاجة ملحة لتقييم مصادر الرياح في البلاد ليس فقط من الناحية الاقتصادية، ولكن أيضاً من حيث التأثير البيئي من خلال الحد من التلوث خلال مسار انتقال تقنيات ومعدات طاقة الرياح من بلد المنشأ إلى مكان الطمر. مثل استخدام مواصلات أقل تلوثاً، وكذلك استبدال الأسمنت البورتلاندي المستخدم في الخرسانة بمواد محلية مثل البوزلانا المحلية [47]. واستخدام تقنيات متطورة من توربينات الرياح [48, 49]. وكذلك إصدار بروتوكولات من شأنها إجبار الشركات المصنعة بتفكيك ونقل التوربينات بعد انتهاء عمرها واستخدامها كمعاد تدويرها في التصنيع، الأمر الذي سيؤدي إلى انخفاض كبير في انبعاثات غازات الدفيئة وتلطيف الأثر البيئي لهذه المرحلة.

Author Contributions: “Conceptualization, El-Osta; methodology, Nassar, Suhaylah, Basha and El-Khozondar; data collection, Suhaylah, Basha; writing—original draft preparation, Nassar, Suhaylah, Miskeen; writing—review and editing, El-Khozondar, Miskeen and El-Osta. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.”

Funding: “This research received no external funding.”

Data Availability Statement: “The data are available at request.”

Acknowledgments: The authors would like to express their appreciation to the center for research and studies of renewable energy and sustainable development, Wadi Elshatti University, Brack-Libya.

Conflicts of Interest: “The authors declare no conflict of interest.”

REFERENCES

- [1] Y. Nassar, K. Aissa and S. Alsadi, “Air Pollution Sources in Libya,” *Research & reviews: Journal of Ecology and Environmental Sciences*, vol. 6, no. 1, pp. 63-79, 2018.
- [2] Y. Nassar, H. El- Khozondar, N. Abohamoud, A. Abubaker, A. Ahmed, A. Alsharif and M. Khaleel, “Regression Model for Optimum Solar Collectors’ Tilt Angles in Libya,” in *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (IECREs 2023)*, Gaza Strip, Palestine, May 8-9, 2023.
- [3] Y. Nassar and S. Alsadi, “Wind energy potential in Gaza Strip-Palestine state,” *Solar Energy and Sustainable Development*, vol. 7, no. 2, pp. 41-57, 2018.
- [4] B. Lei Xua, P. Mingyue, Z. Lixiao, P. Witold-Roger and D. Sheetal, “Life cycle assessment of onshore wind power systems in China,” *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 132, no. 5, pp. 361-368, 2018.
- [5] Global wind Energy Council, “Global wind report 2021,” 2021.
- [6] A. Teyabeen, F. Akkari, A. Jwaid, A. Zaghwan and R. Abodelah, “Assessment of Wind Energy Potential In Zwara, Libya,” *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 8, no. 2, p. 34-49, 2019.
- [7] A. Abdalla, W. El-Osta, Y. Nassar, W. Husien, E. Dekam and G. Miskeen, “Estimation of Dynamic Wind Shear Coefficient to Characterize Best Fit of Wind Speed Profiles under Different Conditions of Atmospheric Stability and Terrains for the As,” *Applied solar energy*, vol. 59, no. 3, 2023.

- [8] A. Jary, M. Elmnifi, Z. Said, L. Habeeb and H. Moria, "Potential wind energy in the cities of the Libyan coast, a feasibility study," *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, vol. 44, no. 7, pp. 236-252, 2021.
- [9] S. Hasan, A. Guwaeder and W. Gao, "Wind Energy Assessment of the Zawiya Region, in Northwest Libya," *Energy and Power Engineering*, vol. 9, pp. 325-331, 2017.
- [10] M. Abdunnabi, B. Belgasim, M. BenAbead and F. Mohamed, "Performance analysis of solar heat generation system for multi-purpose applications," in the 11th international Renewable Energy congress (IREC), 2020.
- [11] O. Mohamed and S. Masood, "A brief overview of solar and wind energy in Libya: Current trends and the future development," in *International Conference on Mechanical, Materials and Renewable Energy*, 2018.
- [12] Y. Nassar, M. Abdunnabi, M. Sbeta, A. Hafez, K. Amer, A. Ahmed and B. Belgasim, "Dynamic analysis and sizing optimization of a pumped hydroelectric storage-integrated hybrid PV/Wind system: A case study," *Energy conversion and management*, pp. 1-17, 2021.
- [13] Y. Nassar, I. Mangir, A. Hafez, H. El-Khozondar, M. Salem and H. Awad, "Feasibility of innovative topography-based hybrid renewable electrical power system: A case study," *Cleaner Engineering and Technology*, vol. 14, p. 100650, 2023.
- [14] M. E. Imnifi, A. Omran, M. Almosmary and R. Rahel, "Biofuel Production from Animal Waste in Northeastern of Libya: Experimental and Simulation Investigations," *Journal of Environmental Management and Tourism*, vol. 65, no. 1, pp. 67 - 81, 2023.
- [15] Ozsahin, B., Elginöz, N. & Germirli Babuna, F. Life cycle assessment of a wind farm in Turkey. *Environ Sci Pollut Res* 29, 71000–71013 (2022).
- [16] J. An, Z. Zou, G. Chen, Y. Sun, L. L. L. and L. Zheng, "An IoT-based life cycle assessment platform of wind turbines," *Sensors*, vol. 21, no. 4, p. 1233, 2021.
- [17] A. Bonou, A. Laurent and S. Olsen, "Life cycle assessment of onshore and offshore wind energy-from theory to application," *Applied Energy*, vol. 180, no. 15, pp. 327-337, 2016.
- [18] V. Mukoro, A. Gallego-Schmid and M. Sharmina, "Life cycle assessment of renewable energy in Africa," *Sustainable Production and Consumption*, vol. 28, no. 10, pp. 1314-1332, 2021.
- [19] W. El-Osta, and Y. Kalifa. "Prospects of Wind Power Plants in Libya: A Case Study." *Renewable Energy* vol. 28, no.3 (2003): 363–371.
- [20] K. Oebels and S. Pacca, "Life cycle assessment of an onshore wind farm located at the northeastern coast of Brazil," *Renewable Energy*, vol. 53, no. 5, pp. 60-70, 2012.
- [21] C. Jung and D. Schindler, "Modeling wind turbine-related greenhouse gas payback times in Europe at high spatial resolution," *Energy Conversion and Management*, vol. 234, no. 9, p. 114334, 2021.
- [22] L. Dammeier, J. Loriaux, Z. Steinmann, D. Smits, I. Wijnant, B. Hurk and H. M., "Space, Time, and Size Dependencies of Greenhouse Gas Payback Times of Wind Turbines in Northwestern Europe," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 53, p. 9289–9297, 2018.
- [23] Y. Feng and L. Zhang, "The GHG Intensities of Wind Power Plants in China from a Life-Cycle Perspective: The Impacts of Geographical Location, Turbine Technology and Management Level," *Sustainability*, vol. 15, no. 5, p. 4449, 2023.

- [24] M. Dale, "A Comparative Analysis of Energy Costs of Photovoltaic, Solar Thermal, and Wind Electricity Generation Technologies", *Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 325-337, 2013.
- [25] H. Raadala, L. Gagnonb, I. Modahla and O. Hanssena, "Life cycle greenhouse gas (GHG) emissions from the generation of wind and," 2011.
- [26] R. Crawford, "Life cycle energy and greenhouse emissions analysis of wind turbines and the effect of size on energy yield," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 9, pp. 2653-2660, 2009.
- [27] B. Tremeac and F. Meunier, "Life cycle analysis of 4.5MW and 250W wind turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 8, pp. 2104-2110, 2009.
- [28] R. Bhandari, B. Kumar, and F. Mayer, "Life cycle greenhouse gas emission from wind farms in reference to turbine sizes and capacity factors," *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, no. 12, p. 123385, 2020.
- [29] A. Vargas, E. Zenón, U. Oswald, J. Islas, L. Güereca, and F. Manzini, "Life cycle assessment: A case study of two wind turbines used in Mexico," *Applied Thermal Engineering*, vol. 75, pp. 1210-1216, 2015.
- [30] J. Henao and D. Vivanco, "Hybrid life cycle assessment of an onshore wind farm including direct and indirect services: A case study in Guajira, Colombia," *Journal of Environmental Management*, vol. 284, no. 4, p. 112058, 2021.
- [31] B. Guezuraga, R. Zauner and W. Pölz, "Life cycle assessment of two different 2 MW class wind turbines," *Renewable Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 37-44, 2012.
- [32] C. Marimuthu and V. Kirubakaran, "Carbon payback period for solar and wind energy project installed in India: a critical review," *Renewable and Sustainable Energy reviews*, vol. 23, p. 80-90, 2013.
- [33] M. Rajaei and J. Tinjum, "Life Cycle Assessment of Energy Balance and Emissions of a Wind Energy Plant," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 31, p. 1663-1670, 2019.
- [34] S. Verma, A. Paul, and N. Haque, "Selected Environmental Impact Indicators Assessment of Wind Energy in India Using a Life Cycle Assessment," *Renewable Energy*, vol. 83, no.11, pp. 1227-1233, 2015.
- [35] S. Al-Behadili, .. El-Osta and ., "Life Cycle Assessment of Dernah (Libya) wind farm," 2015.
- [36] Q. Li, H. Duan, M. Xie, P. Kang, Y. Ma, R. Zhong, T. Gao, W. Zhong, B. Wen, F. Ba and A. Vuppaladadiyam, "Life cycle assessment and life cycle cost analysis of a 40 MW wind farm with consideration of the infrastructure," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 138, no. 3, p. 110499, 2021.
- [37] A. Elmariami, W. El-Osta, Y. Nassar, Y. Khalifa and M. Efleet, "Life cycle assessment of 20MW wind farm in libya," *Applied Solar Energy*, vol. 59, no. 1, 2023.
- [38] Y. F. Nassar, S. Y. Alsadi, H. J. El-Khozondar, M. S. Ismail, M. Al-Maghalseh, T. Khatib, J.A.Sa'ed, M.H. Mushtaha, and T. Djerafi "Design of an isolated renewable hybrid energy system: a case study," *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, vol. 11, p. 225-240, 2022.
- [39] Y. Nassar and S. Alsadi, "Assessment of solar energy potential in Gaza Strip-Palestine," *Sustainable energy technologies and assessments*, vol. 31, pp. 318-328, 2018.

- [40] B. B Tremeac and F. Meunier, "Life cycle analysis of 4.5MW and 250W wind turbines," 2009.
- [41] E. Aisbl, "Metal Recycling Factsheet," 2020. [Online]. Available: https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/euric_metal_recycling_factsheet.pdf.
- [42] K. Tota-Maharaj. and A. McMahan, "Resource and waste quantification scenarios for wind turbine," 2020.
- [43] A. M'baye, "Energy Performance Management in an Industrial Site: Definition and Application of a Specific Methodology for Carbon Emissions Reduction", *Low Carbon Economy*, vol. 13, no. 3, pp.148-162, 2022.