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

Towards Green Economy:
Case of Electricity Generation Sector in Libya

Yasser F. Nassar[1*], Mukhtar Irhouma[2], Mansour A. Salem[3], Hala J. El-Khozondar[4], Seham Suliman[5], Monaem Elmnifi[6], Mohamed Khaleel[7], Sassi Sassi Rekik [8].

[1]Research Center for Renewable Energy and Sustainable Development, Wadi AlShatti University, Libya.
[2]Mechanical and Renewable Energy Engg. Dept., Eng, Faculty, Wadi Alshatti University, Brack, Libya
[3]Environment and Natural resources Faculty, Wadi AlShatti University, Brack, Libya.
[4]Electrical Engineering and Smart Systems Dept., Islamic University of Gaza, Gaza Strip, Palestine.
[4]Department of Materials and London Centre for Nanotechnology, Imperial College London, UK.
[5]Libyan Center for Solar Energy Research and Studies.
[6]Department of Mechanical Engineering Technology, FSBEI "Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov." 308012, Belgorod, st. Kostyukova 46. Russia.
[7]Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Karabuk University, Karabuk 78050, Türkiye.
[8]Laboratory of Thermal and Energy Systems Studies (LESTE), National Engineering School of Monastir, University Monastir, Tunisia.

E-*mail:* [1] y.nassar@wau.edu.ly ,[2] muk.muhamed@wau.edu.ly ,[3] m.salem@wau.edu.ly , [4] hkhozondar@iugaza.edu.ps , [5] sehamsuliman123@gmail.com ,[6] monm.hamad@yahoo.co.uk ,[7] lykhaleel@yahoo.co.uk ,[8] sassi.rekik@gmail.com .

ARTICLE INFO.

Article history:
Received 18 Jul 2024
Received in revised form 20 Jul 2024
Accepted 23 Apr 2025
Available online 27 Apr 2025

KEYWORDS

Green economy, energy industry, renewable and environmental friendly energy, negative carbon emission ecosystems, net-zero carbon.

ABSTRACT

Libya is primarily concerned with the green economy as it relies on a single source of national income and a single source of energy. It loses its national income source as industrial countries abandon fossil fuels and replace them with environmentally friendly alternative energy sources. Therefore, Libya must begin the battle for green economy transformation, and policymakers need to develop strategies for a rapid and safe transition to sustainable green development. This research outlines the basic framework for green economy transition strategies by reviewing other countries' experiences and theoretical studies.

It proposes a temporal and financial transformation plan that includes three paths to achieve the green economy transition. The first path involves reducing emissions by using natural gas instead of oil fuel and introducing carbon capture systems in polluting systems. The second path suggests increasing the contribution of zero-emission technologies in the energy mix, such as solar energy, wind energy, and hydrogen.

*Corresponding author.

DOI: https://doi.org/10.51646/jsesd.v14i1.549

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

The third path involves enhancing negative emission environmental systems like reforestation and algae cultivation, localizing renewable and environmentally friendly energy industries, and facilitating investment in zero and negative emission projects. This path also aims to achieve sustainable development by utilizing oil in petrochemical industries, which will generate more revenue and jobs than burning it for energy production. To implement this strategic plan, $8.3 billion needs to be allocated for installing carbon capture systems on all electric power plants, plus approximately $7 million in annual payments for maintenance and operation. Additionally, around $39.5 billion is required to establish concentrated solar power plants and use them as a sustainable clean fuel instead of fossil fuels, with annual payments for operation and maintenance estimated at approximately $735 million. Furthermore, about $2.1 million is needed for investment in negative emission environmental systems such as forests, and around $2.5 million in annual payments for managing approximately 20,400 hectares of forests, which will achieve net-zero carbon for the current electric power industry.

نحو الاقتصاد الأخضر في قطاع صناعة الطاقة الكهربائية في ليبيا

ياسر نصار، مختار ارحومة، منصور سالم، هالة الخزندار، سهام سليمان، منعم المنفي، محمد خليل، ساسي رقيق.

ملخص: ليبيا معنية في المقام الأول بالاقتصاد الأخضر كونها تعتمد على مصدر واحد للدخل القومي ومصدر واحد للطاقة. وستفقد مواردها للدخل القومي بمجرد استغناء الدول الصناعية عن الوقود الأحفوري واستبداله بمصادر الطاقة البديلة والصديقة للبيئة. ولذلك فعليها أن تبدأ خوض معركة التحول نحو الاقتصاد الأخضر، وعلى صناع القرار وضع الاستراتيجيات لتحقيق تحول سريع وآمن نحو التنمية المستدامة الخضراء. يرسم هذا البحث الإطار الأساسي لاستراتيجيات التحول نحو الاقتصاد الأخضر، وذلك من خلال مراجعة تجارب الدول الأخرى والدراسات في هذا المجال، كما تم وضع خارطة طريق زمنية ونقدية للتحول نحو الاقتصاد الأخضر. تتضمن الخارطة ثلاثة مسارات لتحقيق التحول نحو الاقتصاد الأخضر، حيث يتضمن المسار الأول السعي لتخفيض الانبعاثات من خلال استخدام الغاز الطبيعي عوضا عن الوقود النفطي وإدخال لاقطات الكربون في محطات توليد الطاقة الكهربائية. بينما يقترح المسار الثاني زيادة مساهمة التقنيات صفرية الانبعاث في مزيج الطاقة المنتجة، وذلك عن طريق دمج منظومات توليد الطاقة الكهربائية عن طريق الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والهيدروجين في منظومة توليد الطاقة الكهربائية. ويتضمن المسار الثالث على التوسع في انتشار أنظمة البيئة سالبة الانبعاثات مثل زراعة الغابات والمساحات الخضراء والطحالب. إن توطين صناعة الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة وتسهيل الاستثمار في المشاريع صفرية وسالبة الانبعاثات، والاستغلال الأمثل للنفط في الصناعات البتروكيمائية التي ستدر عائدا للبلاد ووظائف أكثر بكثير من حرقه لتوليد الطاقة. ولوضع خارطة الطريق المقترحة على طريق التنفيذ، يجب رصد 8.3 مليار دولار لتركيب آسرات الكربون على جميع محطات الطاقة الكهربائية بالإضافة إلى حوالي 7 مليون دولار كدفعات سنوية لأعمال الصيانة والتشغيل. كذلك يتطلب رصد حوالي 39.5 مليار دولار لإنشاء محطات الطاقة الشمسية المركزة واستخدامها كوقود نظيف مستدام عوضا عن الوقود الأحفوري، كذلك يتطلب رصد دفعات سنوية لأغراض التشغيل والصيانة تقدر بحوالي 735 مليون دولار. كما يتطلب حوالي 2.1 مليون دولار للاستثمار في الأنظمة البيئية السالبة الانبعاث مثل الغابات، وحوالي 2.5 مليون دولار كدفعات سنوية لإدارة حوالي 20400 هكتار من الغابات والذي سيحقق صافي الصفر الكربوني لقطاع صناعة الطاقة الكهربائية في الوضع الحالي.

الكلمات المفتاحية – الاقتصاد الأخضر، صناعة الطاقة، الطاقات البديلة والصديقة للبيئة، الأنظمة البيئية سالبة انبعاثات الكربون، صافي الكربون الصفري.

1. المقدمة

يُعرّف برنامج الأمم المتحدة للبيئة UNEP الاقتصاد الأخضر «بأنه الاقتصاد الذي يؤدي إلى تحسين رفاهية الإنسان والعدالة الاجتماعية، مع الحد بشكل كبير من المخاطر البيئية. وفي أبسط صوره، يمكن اعتبار الاقتصاد الأخضر اقتصادا منخفض الكربون، وفعالا في استخدام الموارد، وشاملا اجتماعيا» [1]. كما ينبغي للاقتصاد الأخضر أن

يستند على الاستثمارات العامة والخاصة وأن يعزز نمو الدخل وتشغيل العمالة والحد من انبعاثات الكربون والتلوث، وتعزيز كفاءة استخدام الطاقة والموارد، ويمنع فقدان التنوع البيولوجي وتدهور النظم الإيكولوجية. وتحتاج هذه الاستثمارات إلى التحفيز والدعم من خلال الإنفاق العام وإصلاحات السياسات والتغييرات التنظيمية. وينبغي لمسار التنمية أن يحافظ على رأس المال الطبيعي ويعززه، ويعيد بناؤه عند الضرورة، باعتباره أصولا اقتصادية بالغة الأهمية ومصدرا للمنافع العامة، وخاصة بالنسبة للدول النامية والطبقة الفقيرة في المجتمعات المحلية والذين يعتمد بقاءهم وأمنهم على الطبيعة [1].

تتجه ليبيا - اسوة بجميع دول العالم - نحو الاقتصاد الأخضر وذلك تحقيقاً لالتزاماتها نحو المجتمع الدولي في تخفيض انبعاثات الغازات الدفيئة للحد من التدهور البيئي وتلطيف أثار التغير المناخي على البشرية بصفة عامة وعلى الدول النامية خاصة. ويواجه العالم في هذا الإطار تحديات كثيرة، ويتمثل اكبر هذه التحديات في إمداد المجتمعات البشرية بطاقة مستدامة وخدمات مجتمعية، وفي نفس الوقت الحرص على الحفاظ على البيئة. ففي الوقت التي تعتبر فيه الطاقة المحرك الرئيسي للاقتصاد العالمي، يمثل قطاع صناعة الطاقة المصدر الأكبر لانبعاثات الغازات الدفيئة [2]. حيث تشير الإحصائيات العالمية ان حوالي 83٪ من إجمالي الطاقة الأولية المستهلكة في جميع أنحاء العالم من الوقود الأحفوري الملوث [3]. حيث بلغت نسب المشاركة لجميع أنواع الوقود في خليط الطاقة الابتدائي العالمي لعام 2022 على النحو التالي [4]: النفط (29.61%)، الفحم الحجري (25.07%)، الغاز الطبيعي (22.03%)، الكتلة الحيوية (6.21%)، الوقود النووي (3.75%)، مساقط المياه (6.32%)، طاقة الرياح (3.07%)، الطاقة الشمسية (1.93%)، الوقود الحيوي (0.66%)، مصادر بديلة أخرى (1.35%). ويصاحب هذا الاستهلاك انبعاث ما يقدر بحوالي 37.55 جيجا طن CO_2 وبنسبة زيادة 1.1% عن عام 2021 وحوالي 60% عن الانبعاثات في عام 1990 [5]. ومن هذا المنطلق، سيشكل هذا البحث الخطوة الأولى في إجراءات تحييد الكربون من الاقتصاد المحلي الليبي، وذلك باعتماد التوازن بين الانبعاث وامتصاص الكربون.

حددت الدراسة [6] مسارين أساسيين لتحييد الكربون في الصين وهما: خفض الانبعاثات، وزيادة مصارف الكربون أو ما يسمى بالانبعاثات السالبة. وتم تحديد ثلاثة اتجاهات بحثية وهي: بناء نظام طاقة خالٍ من الكربون وإعادة بناء العمليات الصناعية منخفضة الكربون وحجز الكربون والأنظمة البيئية سالبة الانبعاثات.كما قدمت الدراسة [7] مراجعة للتقنيات المبتكرة لتحقيق حياد الكربون والتنمية المستدامة، وهذا بدوره يؤدي إلى التخفيف من تغير المناخ ودعم الأنشطة البشرية بشكل مستدام، بما في ذلك تلك المتعلقة بالطاقات المتجددة، والنظام الغذائي، وتثمين النفايات، وحجز وحفظ الكربون، والصناعات ذات الكربون السلبي. كما اقترحت الدراسة [8] خططًا لتحييد الكربون مثل التحول من الوقود الأحفوري إلى الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة، وتطوير تقنيات صناعية وزراعية منخفضة الكربون، وتغيير العادات الغذائية، وزيادة الاستفادة من النفايات المنزلية والزراعية. هذا بالتوازي مع تطوير المباني والمدن ذات المصادر المتعددة، وإدخال أنظمة الطاقة اللامركزية، وكهربة قطاع النقل. كما قدموا مراجعة في طرق تحليل دورة حياة الأنظمة المحايدة للكربون. أُدرجت الدراسة [9] طرقاً متعددة لإزالة CO_2 من الغلاف الجوي، وتندرج معظمها تحت ثلاث فئات، الفئة الأولى- الحلول القائمة على الطبيعة: وتشمل زيادة الأراضي الزراعية والغابات، كما وتشمل استعادة المواطن الطبيعية للكائنات البحرية لضمان استمرارها في امتصاص CO_2 من الهواء. الفئة الثانية- تعزيز العمليات الطبيعية، وتتمثل في إدراج أساليب إدارة الأراضي لزيادة محتوى الكربون في التربة من خلال أساليب الزراعة الحديثة، وتخزين الكربون في باطن الأرض،كما تشمل تقنيات لتسريع العمليات الطبيعية التي تمتص CO_2 (على سبيل المثال، عن طريق إضافة صخور السيليكات المعدنية الدقيقة للغابة إلى التربة) أو تسميد المحيطات حيث تضاف العناصر الغذائية إلى المحيط لزيادة قدرته على امتصاص CO_2. الفئة الثالثة- الحلول القائمة على التكنولوجيا: وتشمل الطاقة الحيوية مع حجز الكربون وتخزينه والاحتجاز المباشر للكربون من الهواء. في هذا السياق، أقر المشاركون في مؤتمر COP28، والذي انعقد خلال الفترة 30 نوفمبر- 12 ديسمبر 2023 في دبي،خمس ركائز أساسية؛استناداً على توقعات نمو سوق الطاقة العالمية [10]: رفع القدرات المركبة العالمية للطاقات المتجددة الى ثلاثة أضعاف القدرات الحالية؛مضاعفة معدل التحسينات في كفاءة استخدام الطاقة؛التزام أنشطة قطاع صناعة الوقود الأحفوري وشركات النفط والغاز على وجه الخصوص ببنود اتفاقية باريس بدءً من خفض انبعاثات غاز الميثان من العمليات بنسبة 75%؛إنشاء آليات تمويل واسعة النطاق لمضاعفة الاستثمار في صناعة الطاقات النظيفة الى ثلاثة أضعاف التمويل الحالي في الدول النامية؛الالتزام بالتدابير التي تضمن انخفاضاً في استخدام الوقود الأحفوري، بما في ذلك إلغاء التراخيص الجديدة لمحطات الطاقة التي تعمل على الفحم الحجري. كما وجدت الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ IPCC أن تدابير زراعة الغابات واستخدام الأراضي يمكن أن تحيد ما بين مليار إلى 11 مليار طن من غاز CO_2 سنوياً بحلول عام 2050 [9].

وقد حددت دراسة في الصين [11] الخطوات الرئيسية نحو تحييد الكربون عن طريق: زيادة نسبة مشاركة الطاقات الصديقة للبيئة في مزيج الطاقة المتولدة؛ نشر تكنولوجيات الانبعاثات السلبية على نطاق واسع؛ تعزيز التنمية المحلية المنخفضة الكربون وإنشاء «سوق خضراء» على الصعيد الوطني. ولتحقيق هذه الخطوات، يجب أن تتزامن خطط

التنمية الاجتماعية والاقتصادية وتقديم الحوافز الاقتصادية وتطوير التكنولوجيا. كما عرض بحاث من اليابان [12] فكرة الاقتصاد الأخضر والنظريات والمفاهيم والمناهج والأدوات ذات الصلة وتحديد الشروط الأساسية لتحقيقه. ومن بين هذه النظريات: الاقتصاد البيئي، والإنتاج الأنظف، وإدارة النفايات، والاقتصاد الحيوي، والبيئة الصناعية، والاقتصاد المدور، والحلول القائمة على الطبيعة، وأدوات التقييم مثل تقييم دورة حياة المنتجات، وتحليل التكلفة والعائد. كما قدم المؤلفون دليلا إرشاديا لدمج أدوات وأساليب متنوعة في إطار الاقتصاد الأخضر. كذلك ناقش البحث بإيجاز تأثير الاقتصاد الأخضر على الاستدامة، والذي يسمح بدرجات مختلفة من الاستبدال والمقايضات بين الفوائد البيئية والاقتصادية، وأكدوا على ضرورة إجراء تغييرات في أنماط معيشة وسلوك المجتمعات البشرية لتحقيق التنمية المستدامة والاقتصاد الأخضر. وأيضا سلط الباحثون [13]على الدور الأساسي الذي تلعبه سياسات كفاءة الطاقة في التحول نحو الاقتصاد الأخضر. وأجروا تقيما لتأثيرات سياسة كفاءة الطاقة الحالية في ألمانيا وتأثيرات الطاقة على الوضع البيئي والاجتماعي والاقتصادي لأحدث استراتيجيات كفاءة الطاقة والمناخ في البلاد لعام 2020. أشارت الدراسة إلى أن تعزيز سياسات الطاقة الخضراء سيؤدي إلى تحقيق فوائد اقتصادية ملموسة من حيث نمو الناتج المحلي الإجمالي وفرص العمل الجديدة. وفي حين أن صناع السياسات قد اعترفوا بفعالية اقتصاد الطاقة الخضراء ونفذوه في حالة الطاقات المتجددة، إلي انه يجب السعي إلى سياسات أكثر طموحا لكفاءة استخدام الطاقة والتي ينبغي استغلالها على نطاق أوسع بكثير. كما أظهرت نتائج البحث [14] أن المحركات العامة للاقتصاد الأخضر تشتمل على: منع التلوث الذي له تأثيرا على تغير المناخ، وتكلفة التدهور البيئي واستنزاف الموارد الطبيعية، فضلا عن التنمية المستدامة، ورفض نماذج التنمية الغير صديقة للبيئة. أجرى الباحثون [15] تحليل SWOT كأداة للوصول إلى نقاط القوة والضعف والفرص والتهديدات في جهود التحول إلى الاقتصاد الأخضر في غانا. وكشفت النتائج أن الموقع الجغرافي للبلاد، والسياسات البيئية، وإمكانات التحول نحو الطاقة الخضراء، وجهود البلاد للحد من مستويات الفقر ومعدلات الأمية هي نقاط القوة الرئيسية. ومع ذلك، فإن عوامل مثل ضعف المؤسسات، وعدم كفاية التمويل لابتكارات التكنولوجيا الخضراء، وعدم كفاية السياسات طويلة الأجل للاستراتيجيات الخضراء، وعدم كفاية الإرادة السياسية تشكل بعضا من نقاط الضعف الرئيسية. ووجدت الدراسة أيضًا اهتمامات تجارية في دفع تطوير ونقل التكنولوجيا الخضراء، والتعاون الخارجي والاهتمام العالمي بتغير المناخ، والدعم المحلي والدولي للاقتصاد الأخضر، والوعي والفهم لحماية البيئة باعتبارها بعضاً من الفرص الرئيسية. وتم تحديد عدم كفاية الالتزام بدعم تطوير التكنولوجيا ونقلها، وتكلفة التكنولوجيات الخضراء، والتهديد المتزايد لتغير المناخ والفساد، باعتبارها تهديدات لجهود غانا الرامية إلى جعل اقتصادها أخضر. وختم المؤلفون بضرورة أن يقوم صانعو السياسات بتطوير استراتيجيات يمكن أن تساعد في الاستفادة من نقاط القوة والفرص بينما تكون بمثابة حلول لنقاط الضعف والتهديدات وإعطاء الأولوية لتعليم العلوم والتكنولوجيا لدعم تنمية الاقتصاد الأخضر.

وبصورة مباشرة، ربط المؤلفون [16] الاقتصاد الأخضر باستدامة البيئة، مبينا وجود صلة بين العوامل المؤثرة في الاقتصاد الأخضر والابتكارات التكنولوجية الخضراء والبنية التحتية للطاقة المتجددة. وإن السياسات والحوافز الحكومية والاستثمار في مجال الطاقة المتجددة يدعم تحقيق الاقتصاد الأخضر. وأوردوا المؤلفون إحصائيات من واقع تجارب الصين واليابان والهند منذ 2006 إلى 2022، حيث تقلصت البصمة البيئية بنسبة 0.019% مع زيادة بنسبة 1% في الاستثمار في البنية التحتية للطاقة المتجددة. وتقلصت بنسبة 0.795% مقابل زيادة بنسبة 1% في السياسات والحوافز الحكومية. وتقلصت البصمة البيئية بنسبة 0.518% مقابل زيادة بنسبة 1% في الابتكار التكنولوجي الأخضر. وتقلصت البصمة البيئية بنسبة 0.734% مقابل زيادة بنسبة 1% في استخدام الطاقة المتجددة. وترتبط الزيادة في مساحة الغابات بنسبة 1% بانخفاض في البصمة البيئية بنسبة 0.016%.

[17] قدمت الدراسة أجندة جديدة لاقتصاد عالمي مستدام يعتمد على النمو الأخضر المستدام والشامل. تشير الدراسة إلى أن النمو الشامل لا يمكن أن يكون مستداماً إلا إذا اهتم بجودة البيئة، ومعالجة الفقر، والحد من عدم المساواة من خلال الإدماج الاجتماعي، وخلق فرص عمل منتجة للأجيال الحالية والمستقبلية. ويمكن اعتبار هذا البحث بمثابة خارطة طريق لواضعي السياسات من مختلف البلدان لاستهداف النمو الأخضر الشامل المستدام. علاوة على ذلك، يتم أيضًا أخذ مفاهيم رأس المال البشري والمادي والمؤسسات والأبعاد التجارية والاستثمار ودور مؤشرات الاقتصاد الكلي الرئيسية مثل التضخم في الاعتبار عند تصميم الإطار العام للنمو الاقتصادي الأخضر.

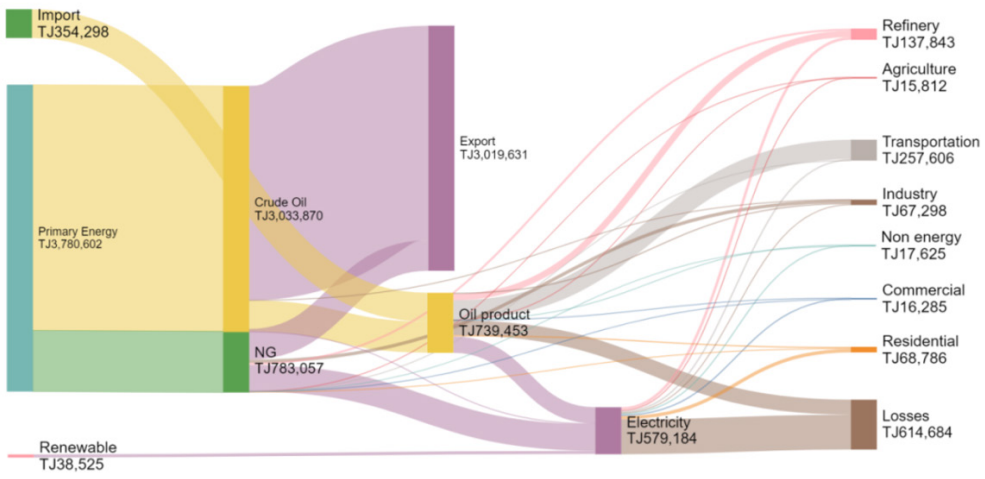
حرصت الحكومات في جميع أنحاء العالم على إعلان التزامهم بالاقتصاد الأخضر وتحييد الكربون وتحقيق صافي الانبعاثات الصفرية في برنامجهم السياسي. ويبقى السؤال، كم سيكلف التحول نحو الاقتصاد الأخضر؟ قدم الباحثون [18] اجابة عن هذا السؤال: بأن إجمالي الإنفاق العالمي من قبل الحكومات والشركات والأفراد على أنظمة الطاقة واستخدام الأراضي سيحتاج إلى إنفاق ما مقداره 3.5 تريليون دولار سنوياً، في حالة سيناريو الوصول إلى صافي الانبعاثات الصفري في عام 2050. كما يتطلب الأمر أيضاً تحويل ما يقارب تريليون دولار من الأصول العالية الانبعاثات إلى الأصول المنخفضة الكربون.وكردة فعل لهذا السيناريو، سيرتفع المتوسط العالمي لتكلفة الكهرباء على المدى القريب، ويتوقع أن يتراجع بعد ذلك، وهذا بطبيعة الحال سيختلف باختلاف قوة الاقتصاد وسياسات الدعم التي

تتبعها بعض الدول – مثل ليبيا.ويمكن أن يؤدي التحول إلى صافي الانبعاثات الصفري إلى إعادة توزيع العمالة، مع توفير حوالي 200 مليون وظيفة مباشرة وغير مباشرة وخسارة 185 مليون وظيفة بحلول عام 2050. وفي حين أن هذا التحول من شأنه أن يخلق الفرص، فإن القطاعات ذات المنتجات أو العمليات ذات الانبعاثات العالية ــ والتي تولد نحو 20% من الناتج المحلي إجمالي الانبعاثات ــ سوف تواجه تأثيرات كبيرة على الطلب، وتكاليف الإنتاج، وتشغيل العمالة.أما البلدان الفقيرة وتلك التي يعتمد اقتصادها بصورة كبيرة على الوقود الأحفوري هي الأكثر عرضة للتداعيات الاقتصادية الناجمة من التحول إلى الاقتصاد الأخضر وتحقيق صافي انبعاثات صفري.وقد يواجه المستهلكون دفع تكاليف إضافية على استهلاك الكهرباء، ومن الطبيعي أن تصبح الأسر ذات الدخل المنخفض ن أكثر عرضة لهذه التداعيات. وللتصدي لكافة هذه المخاطر يتعين على الحكومات وقطاع الأعمال أن يعملا معا لتوسيع آفاق التخطيط والاستثمار واتخاذ إجراءات فورية لإدارة المخاطر واغتنام الفرص.

ومع تحول الاقتصاد العالمي نحو الاقتصاد الأخضر، فمن المهم تحليل العناصر التي يمكن أن تدعم هذا التحول والتي تعيقه والتصدي للتحديات واغتنام الفرص لتخطي هذه المرحلة في ليبيا بأقل التداعيات على الاقتصاد والمجتمع المحلي. لذلك، هدفت هذه الدراسة إلى تقييم إمكانات الدولة الليبية للتحول نحو الاقتصاد الأخضر من خلال استعراض الخيارات المتاحة وتحليل المعطيات التي تربط الطاقة والبيئة، وذلك عن طريق تحليل بصمة الكربون في قطاع صناعة الطاقة في البلاد ومستويات انبعاثات CO_2 المصاحبة. إن تقدير تكلفة الضرر البيئي يجعل تحقيق هذا الهدف ممكنا ويعطي بعدا واقعيا لاتخاذ التدابير اللازمة لتلطيف تبعيات التغير المناخي وتحقيق منافسة عادلة لكافة الخيارات المتاحة في سوق الطاقة المحلية [19].

2. نظرة عن القطاعات المنتجة والمستهلكة للطاقة في ليبيا

يشكل الوقود الأحفوري في ليبيا حوالي 99% من إجمالي الطاقة الابتدائية المستهلكة، ويمثل خليط الطاقة الابتدائي من المصادر التالية: النفط (62.3%)، الغاز الطبيعي (34.0%)، مصادر بديلة (1.0%). أما عن شكل الطاقة المستهلكة في الصورة النهائية، فهي كالتالي: النفط (73.3%)، الكهرباء (17.4%)، استيراد من الخارج (6.3%)، أخرى (3.0%). يمثل الشكل (1) ميزان الطاقة في ليبيا وتوزيع الطاقة المستهلكة بصورها الابتدائية والنهائية على القطاعات المختلفة في ليبيا لعام 2023[20]. وتعرف الطاقة النهائية بأنها الصورة النهائية للطاقة التي يستهلكها القطاع (مثل النفط أو الغاز أو الكهرباء) فمثلا قطاع الإسكان يستهلك الطاقة الكهربائية كطاقة نهائية وأيضا غاز الطهي كطاقة نهائية.أما القطاعات المنتجة للطاقة فهي تلك القطاعات التي تنتج الطاقة في أحد صورها النهائية. فقطاع الكهرباء ينتج الطاقة الكهربائية وهو نفسه يعتبر مستهلكا لطاقة نهائية والمتمثلة في النفط الخام والغاز ويحصل على الوقود الخفيف والثقيل من مصانع تكرير النفط (وبالتالي هذا الأخير يمثل قطاعا منتجا للطاقة).



الشكل 1: ميزان الطاقة في ليبيا لعام 2023.

1.2. قطاع الكهرباء

تعتمد منظومة توليد الكهرباء في ليبيا على 17 محطة توليد للطاقة. تبلغ القدرة الإجمالية 8987 ميجاوات، وبلغت مساهمة المحطات البخارية 13.7% فيما بلغت 59.3% محطات الغازية ومساهمة محطات الدورة المركبة هي26.1%، بينما لا يزيد مساهمة الطاقات المتجددة في مزيج الطاقة عن 1%. وتنتج ليبيا الطاقة الكهربائية من الوقود الأحفوري على النحو التالي: الزيت الثقيل (19.4%) والزيت الخفيف (35.3%) والغاز الطبيعي (38.2%)

والنفط الخام (7.1%). وبلغ إجمالي الكهرباء المولدة في عام 2022 حوالي 33,980 جيجا واط ساعة بمتوسط كفاءة 27%. ويقدر معامل انبعاث CO_2 لقطاع الكهرباء بحوالي 967.35 $kgCO_2/MWh$ [12]. الجدول (1) يبين معلومات الأداء والتشغيل لمحطات توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا للعام 2013.

الجدول 1: محطات توليد الكهرباء ومعلومات التشغيل والأداء*.

المحطة وسنة التشغيل	WM القدرة	الوقود	الكفاءة%	ساعات التشغيل hrs	كمية الوقود المستهلك (10^3m^3/year)
محطات التوليد البخارية (14.9% من إجمالي التوليد)					
غرب طرابلس (1970)	500	ثقيل	20%	2212	492.34
الخمس (1982)	480	ثقيل	28%	4810	734.13
درنة (1985)	130	ثقيل	21%	5315	292.93
طبرق (1985)	130	ثقيل	25%	4858	224.91
محطات التوليد الغازية (75% من إجمالي التوليد)					
مصراتة (1990)	507	ثقيل	20%	4810	1,085.6
شمال بنغازي (1995)	570	غاز	25%	5230	1,091,600
أبو كماش (2891)	45	ديزل	11%	3288	129.91
الخمس (1995)	600	غاز	23%	4999	1,193,800
جنوب طرابلس (1994)	500	ديزل	18%	3646	978.12
الزاوية (1994)	770	غاز	20%	4290	1,512,000
الكفرة (1982)	50	ديزل	11%	2870	126.0
الجبل الغربي (2005)	780	ديزل	24%	5176	1,624.46
مصراتة (2010)	570	غاز	23%	4810	1,091,300
السرير (2010)	360	ديزل	20%	5120	890.06
أوباري (2022)	640	نفط خام	23%	4800	
محطات مركبة (28.1% من إجمالي التوليد)					
الزاوية	1440	ديزل	45%	4675	1,444.8
شمال بنغازي (1995)	915	غاز	46%	5230	1,952,350
مجموع القدرات المركبة	MW 8987				
كمية استهلاك الوقود الثقيل	3,279.90	نسبة التوليد بالوقود الثقيل	20.9%		
كمية استهلاك الديزل	6,193.30	نسبة التوليد بالديزل	38.1%		
كمية استهلاك الغاز	6,841,100	نسبة التوليد بالغاز	41.0%		
كمية استهلاك النفط الخام		نسبة التوليد بالنفط الخام	7%		
متوسط الكفاءات	24%				
متوسط ساعات التشغيل	4460 ساعة				

* البيانات في الجدول من تجميع الباحثين.

2.2. قطاع النفط والغاز والصناعات النفطية

يشكل النفط نحو 94% من عائدات ليبيا من النقد الأجنبي وحوالي 60% من العائدات الحكومية ونحو 30% من الناتج المحلي الإجمالي.يستند قطاع النفط في ليبيا على 12 منصة بحرية و120 بئرا للنفط والغاز و6 محطات تكرير للنفط ومحطة واحدة لتسييل الغاز الطبيعي وثمان منصات لشحن السفن بالنفط والغاز للتصدير.وبلغ إنتاج ليبيا من النفط الخام خلال العام 2023 حوالي 432 مليون برميلا، ومن الغاز الطبيعي نحو 12 مليارًا و391 مليونًا و398 ألفًا و48 مترًا مكعبًا، في حين بلغ إنتاج المشتقات النفطية نحو 6.166 مليون طن، والمكثفات نحو 2.4 مليون طن، والبتروكيماويات نحو 682.6 ألف طن[22]. وتقدر كميات CO_2 المنبعثة من قطاع صناعة النفط بحوالي 1,117,400 طن سنويا [2]. تشير التقارير البيئية إلى أن قطاع صناعة النفط والغاز حول العالم أنتج ما يقارب 5.1 مليار طن من الغازات الدفيئة في عام 2022،وهو ما يقدر بحوالي 15% من إجمالي الانبعاثات المسببة للاحتباس الحراري المرتبطة بالطاقة [23].

3.2. قطاع الصناعة

يعد القطاع الصناعي أحد أكبر قطاعات الاقتصاد ديناميكية ويلعب دوراً أساسياً في التنمية الاقتصادية. يوجد في ليبيا بعض الصناعات الإستراتيجية وهي صناعة الاسمنت وصناعة الحديد والصلب وهما أكبر مستهلك للطاقة في قطاع الصناعة. بالإضافة إلى بعض الصناعات الصغيرة الأخرى مثل صناعة الصابون ومواد التنظيف وصناعة الألبان ومشتقاتها وصناعة الخبز والخبيز. يستهلك قطاع الصناعة سنويا حوالي 41 ألف طن من زيت الديزل و404 ألف طن من زيت النفط الثقيل، أي ما يعادل حوالي 145 تيراجول في السنة، وهو ما يمثل 3.71% من استهلاك البلاد من المشتقات النفطية. بالإضافة إلى استهلاكه 11,508 تيراجول (GWh 3197) في السنة من الطاقة الكهربائية. وتقدر كمية CO_2 المنبعثة سنويا من قطاع الصناعة بحوالي 7,767,745طن. وتتصدر صناعة الاسمنت القائمة بحوالي 6,373,188 طن وتليه صناعة الحديد والصلب بقيمة 1,390,800 طناً [2].

4.2. قطاع المواصلات

تبلغ مساحة دولة ليبيا نحو 1,759,540 كم^2 وتربط البلاد شبكة طرق سريعة بمجموع 83,200 كيلومتر منها 47,590 كلم مُعَبّدة، إضافة إلى مايزيد عن 140 مطار ومهبط في مختلف مدن ليبيا. كما تتصل البلاد مع بقية العالم بحريا عن طريق 15 ميناء بحريا موزعة على طول الساحل.
ويقدر إعداد السيارات بحوالي 5,483,760 سيارة [2]. ويشمل الأسطول البحري على 3 سفن للركاب و15 ناقلة نفط وغاز وبتروكيمياويات. ويشمل الأسطول الجوي الليبي على 14 طائرة حسب إحصائيات عام 2022 [24]. ويعتبر قطاع المواصلات القطاع الأكبر استهلاكا للوقود، حيث بلغ استهلاك الوقود حوالي 5,545 مليون طن من الوقود. كما يستهلك قطاع المواصلات حوالي 17,262 تيراجول (GWh 4795) من الطاقة الكهربائية سنويا. وتقدر كمية CO_2 المنبعثة من هذا القطاع بحوالي 18,246 مليون طن سنويا [2].

5.2. القطاع المنزلي

يعتبر القطاع المنزلي أكبر القطاعات استهلاكا للطاقة الكهربائية، وبالرغم من التباين الكبير في المعلومات الواردة بشأن نسب استهلاك الطاقة الكهربائية في القطاع المنزلي والتي تراوحت من 36%-53% [26]، إلا إن مسؤولا في وزارة الكهرباء صرح لجريدة صدى الاقتصادية الليبية بان ما نسبته 51% من الطاقة الكهربائية يستهلك في القطاع المنزلي حسب إحصائيات عام 2022 [27]. ويقدر الاستهلاك المنزلي السنوي للمشتقات النفطية بحوالي 331 ألف طن من الغاز المسال و161 ألف طن من الكيروسين. كما يعتبر القطاع المنزلي الأكبر استهلاكا للطاقة الكهربائية، حيث قدر استهلاك الطاقة الكهربائية لسنة 2023 نحو 41,430 تيراجول (GWh 11,508).

6.2. قطاع الزراعة

تعد ليبيا من البلدان المتنوعة في التضاريس والمناخ، ويغلب عليها الطابع الصحراوي حيث تشكل الصحراء ما يقارب 90% من مساحة البلاد، بينما يمثل الشريط الساحلي ما نسبته 5.5% من إجمالي المساحة،وهو الأكثر خصوبة وذلك لتساقط الأمطار الموسمية عليه بمعدلات تصل إلى حوالي 600 مليمتر سنويا. ويستهلك قطاع الزراعة حوالي 9 ألاف طن من المنتجات النفطية [28]، وحوالي 13,810 تيراجول (GWh 2,142) من الطاقة الكهربائية سنويا [26]. وتقدر كمية CO_2 المنبعثة من المخلفات الحيوانية حوالي 10,479 طن سنويا ولا توجد معلومات أخرى عن الانبعاثات في هذا القطاع [2].

3. منهجية البحث

تتمركز منهجية البحث في تصنيف الطاقة المستهلكة في كافة القطاعات إلى طاقة كهربائية و/أو طاقة حرارية، ومن ثم حساب كميات CO_2 المنبعثة خلال استهلاك الطاقة بكافة أنواعها وفي كل القطاعات. وتشمل الخطوة الثانية تقدير تكلفة الأضرار البيئية الناجمة عن CO_2 بتبني عدة خيارات عالمية، وذلك لعدم وجود قيمة محلية. أما الخطوة الثالثة فسيتم من خلالها اقتراح بعض البرامج والمشاريع السالبة الانبعاثات الكربونية مثل الغابات والمساحات المعشبة وزراعة الطحالب على طول الساحل البحري الليبي وأيضا التقليل من الانبعاثات من محطات توليد الطاقة باستخدام لاقطات الكربون في محطات توليد الطاقة الكهربائية التقليدية، واستبدال المحطات التي انتهى عمرها بمحطات توليد الطاقة البديلة والصديقة كمحطات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح، تبني سياسات وبرامج كفاءة الطاقة في جميع قطاعات الدولة. وكذلك زيادة دعم البحوث العلمية في مجال التنمية المستدامة والحفاظ على البيئة.

1.3. التقييم الاقتصادي والبيئي وتكلفة التحول نحو تحييد الكربون

استرشادا بما تم ذكره في مراجعة الأدبيات السابقة؛يمكن رصد ثلاث مسارات متوازية لتحقيق الاقتصاد الأخضر: الأول؛ يختص بتخفيض الانبعاثات وذلك عن طريق استخدام الغاز الطبيعي عوضا عن الوقود النفطي وإدخال لاقطات الكربون في المنظومات الصناعية. والثاني؛ زيادة مساهمة التقنيات الصفرية الانبعاثات في مزيج الطاقة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والهيدروجين. بينما يتضمن المسار الثالث؛ تفعيل الأنظمة البيئة السالبة الإنبعاثات مثل زراعة الغابات والطحالب. البيانات الاقتصادية والتقنية اللازمة للمقارنة بين تقنيات إنتاج الطاقة الكهربائية بالطرق التقليدية وباستخدام تقنيات الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة مدرجة في الجدول (2)، والتي تتضمن تكلفة الاستثمار وتكلفة الصيانة والتشغيل وعمر التقنية ومعامل القدرة.

الجدول 2: البيانات الاقتصادية لعدد من تقنيات توليد الطاقة الكهربائية التقليدية والبديلة.

التقنية	تكلفة رأس المال $/kW	تكلفة الصيانة والتشغيل $/Wk/raey	عمر التقنية	المرجع
محطة توليد كهرباء غازية	880	17.9	60	[25]
محطة توليد كهرباء بخارية	1030	16.7	40	[26]
محطة توليد كهرباء مركبة	1480	28.9	40	[27]
محطة مركبة مع اسر كربون	2160	33.5	40	[28]
محطة نووية	2430	139.6	50	[26]
محطة محركات احتراق داخلي	1820	40.9	40	[26]
محطة طاقة الكتلة الحيوية	2340	147.0	30	[29]
محطة طاقة جوف الارض	3560	155.3	30	[29]
محطة الطاقة الهيدروليكية	2590	48.7	30	[29]
حقول الخلايا الشمسية	880	17.7	20	[29]
حقول المركزات الشمسية	4280	96.1	20	[29]
مزارع طاقة رياح برية	1270	29.7	30	[29]
مزارع طاقة رياح بحرية	3460	123.9	20	[29]
خلايا الوقود	600	35.3	5	[30]

بينما يمثل الجدول (3) البيانات الاقتصادية لبعض التقنيات المستخدمة في خفض الانبعاثات والتي شملت آسرات الكربون وزراعة الغابات والمسطحات الخضراء والطحالب [31].

الجدول 3: البيانات الاقتصادية لعدد من تقنيات تحييد الكربون.

التقنية	تكلفة رأس المال	تكلفة الصيانة والتشغيل لكل سنة	عمر التقنية	فترة الإنشاء/ سنة	المرجع
لاقطات الكربون	$/kW 960	$/ton CO_2 0.255	40	3	[26]
زراعة الغابات	$/ha 101.34	$/ha 121.47	40	6	[32]
زراعة المسطحات الخضراء	$/m^2 3.78	$/m^2 2.67	20	3	[33]
زراعة الطحالب	$/m^2 8.34	$/m^2 0.87	6	-	[34]

كما تم اختيار المؤشرات الاقتصادية التالية لتحديد النجاعة الاقتصادية والبيئية لكل تقنية من التقنيات المطروحة للتنفيذ .

فترة استرداد رأس المال (PBTM)- ويمثل الفترة الزمنية اللازمة لاستعادة رأس المال. ويؤخذ القرار بالتنفيذ: في حالة إذا كانت الفترة الزمنية المتبقية من عمر المحطة أكبر من فترة تنفيذ المشروع مضافا إليها الفترة الزمنية اللازمة لاسترداد رأس المال. ويوضح الجدول (3) الفترة الزمنية اللازمة لإنشاء المشاريع المدروسة.

ويمكن حساب فترة استرداد رأس المال بالعلاقة التالية [35]:

$$PBTM = \frac{CC_{Tech}}{\frac{(1+r)^{n-1}}{r(1+r)^{n}}\left(Inc + C_{co_2} - O\&M_{Tech}\right)} \qquad (1)$$

حيث يمثل البسط من المعادلة (1) تكلفة رأس المال المدفوع دفعة واجدة عند بداية المشروع بينما يمثل المقام المردود المادي السنوي (المدخولات – المدفوعات) من المشروع.
CC_{Tech} - تكلفة رأس المال للتقنية ($)، Inc المدخولات السنوية من المشروع ($/year)، C_{CO2} - التكلفة السنوية للضرر البيئي الناجم من انبعاث C_{CO2}($/year)، $O\&M_{Tech}$ - تكلفة الصيانة والتشغيل السنوية ($/year)، r– معدل الفائدة السنوية (قدرت بحوالي 8%)، n– عمر التقنية بالسنوات.
تكلفة إنتاج وحدة الطاقة (LCOE) – ويعتبر هذا المؤشر الاقتصادي من أهم المؤشرات في عملية المفاضلة بين الخيارات فكلما كانت قيمة (LCOE) كان للمنتج فرصة أكبر في التنافس في السوق. ويمكن تقدير قيمة (LCOE) باستخدام المعادلة التالية [36]:

$$LCOE = \frac{\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^{n-1}} CC_{Tech} + O\&M_{Tech} - C_{co_2}}{E_{p,an}} \qquad (2)$$

حيث: $E_{P,an}$– الطاقة السنوية المنتجة (kWh/year)

ويمكن تقدير التكلفة السنوية لتلطيف الضرر البيئي C_{CO2} الناجم من انبعاث غاز CO_2 من عدة قطاعات (N)، على النحو التالي [37]:

$$C_{co_2} = \phi_{co_2} \times \sum_{i=1}^{N} EF_{CO2.i} \times G_i \qquad (3)$$

حيث: يمثل $EF_{CO2,i}$- معامل انبعاث $G_i.CO_2$ تمثل المنتج، $\emptyset_{CO2}$ يمثل السعر الدولي لتكلفة الكربون.
يحدد الجدول (4) قيم معامل انبعاث CO_2 على أساس الطاقة النهائية، بينما أدرجت معاملات انبعاث CO_2 لبعض القطاعات في الجدول (5)

الجدول 4: معامل انبعاث CO_2 على أساس الطاقة النهائية[20،38].

الطاقة النهائية	معامل انبعاث kg CO_2/kg fuel	القيمة الحرارية للوقود MJ/kg	الكثافة kg/m³	معامل انبعاث CO_2 Ton CO_2/TJ
غاز طبيعي	2.69	48.0	0.65	56.1
نفط خام	3.90	45.9	819.3	85.0
زيت وقود ثقيل	3.36	44.1	926.7	76.2
زيت وقود خفيف (ديزل)	3.14	43.6	845.6	72.0
بنزين	3.07	44.3	742.9	69.3
غاز النفط المسال	2.98	47.3	1.8	63.1
غازات الشعلة	0.99	44.1	1.003	22.5

الجدول 5: معامل انبعاث CO_2 على اساس القطاعات المنتجة للطاقة[38].

القطاع	معامل انبعاث CO_2	الوحدة	معامل انبعاث CO_2 Ton CO_2/TJ
الكهرباء	0.967	kg CO_2/kWh	268.71
النفط	4.212	kg CO_2/bllcrude oil	0.75
الغاز	148.8	kg CO_2/m3 NG	6.20
تكرير النفط†	173.17	kg CO_2/ton fuel	3.90

† على أساس متوسط لكل المنتجات النفطية (زيت الوقود الثقيل والديزل والبنزين).

تُحسب كمية الانبعاثات من العمليات الصناعية المختلفة بالطرق النظرية التقليدية الموثقة في العديد من المراجع، والتي تعتمد أساسا على بيانات من المستوى الأول أو الثاني أو الثالث. حيث أن بيانات المستوى الأول (Tier 1) تعتمد على الحسابات النظرية في تقدير انبعاثات الغازات من احتراق الوقود الأحفوري، ويبني المستوى الثاني (Tier 2)

على بعض القياسات والباقي على حسابات نظرية، بينما يعتمد المستوى الثالث (Tier 3) بالكامل على بيانات مقاسة وبالتالي يعتمد الأكثر دقة في تقدير كميات الانبعاثات من محطات توليد الطاقة الكهربائية. في هذا البحث تم اعتمار المستوى الثالث من البيانات.

2.3. فرضيات وحدود الدراسة

لتجنب التعقيد في حساب كميات الانبعاثات من القطاعات المختلفة تم اعتماد الفرضيات التالية:
1. عدد ساعات التشغيل السنوية يساوي متوسط عدد ساعات التشغيل السنوية لكل الوحدات (4460 ساعة).
2. اعتماد قيمة واحدة لمعامل انبعاث غاز CO_2 لجميع محطات توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا 0.967 $(kgCO_2/kWh)$.
3. تبني معامل انبعاث دولي من قوائم وكالة IPCC في حالة عدم وجود قيمة محلية.
4. إهمال كفاءة التحويل في المنظومات الحرارية بالنسبة للقطاعات التي تستخدم الطاقة الحرارية من مشتقات النفط.

أما محدودية الدراسة فتمثلت في عدم إجراء دراسة مفصلة لكل محطة توليد طاقة كهربائية وكذلك لم تشمل الدراسة كافة القطاعات المستهلكة للطاقة في البلاد بالصورة النهائية للوقود المستهلك (على سبيل المثال: البنزين في السيارات والكهرباء وغاز الطهي في المنازل)، وذلك لعدم وجود بيانات كافية عن كافة النشاطات الصناعية في البلاد. وسيتم وضع خطة بحثية مستقبلية لدراسة جميع القطاعات المستهلكة للطاقة بكل صورها الابتدائية والنهائية.

4. النتائج والمناقشة

1.4. سياسات التحول نحو الاقتصاد الأخضر

1. الانتقال إلى الغاز الطبيعي كوقود عوضا عن النفط ومشتقاته في حالة الإمكانية التقنية لذلك.
2. التحول نحو الوقود الشمسي عوضا عن الوقود الأحفوري.
3. تركيب أجهزة لاقطات الكربون على جميع محطات توليد الطاقة الكهربائية العاملة.
4. إنشاء محطات طاقا بديلة نظيفة لتعويض ماسيخرج عن الخدمة نتيجة انتهاء عمر المحطة.
5. إنشاء بنية تحتية في قطاع المواصلات استعدادا لتغلغل السيارات الكهربائية في الأسواق الليبية
6. انتشار واسع للتقنيات السالبة الانبعاث مثل زراعة الغابات والمساحات المعشبة والطحالب.

تم تبني المؤشر الاقتصادي فترة استرداد رأس المالPayback time money لتعيين الجدول الزمني والفعالية الاقتصادية لتركيب لاقطات الكربون والتحول نحو الوقود الشمسي عوضا عن الوقود الأحفوري في محطات توليد الطاقة الكهربائية. وسيتم اتخاذ قرار تطبيق التقنية إذا كان زمن استرداد المال أقل من العمر المتبقي للمحطة. ويقصد بالتقنية هنا تقنية لاقطات الكربون /أو الوقود الشمسي.

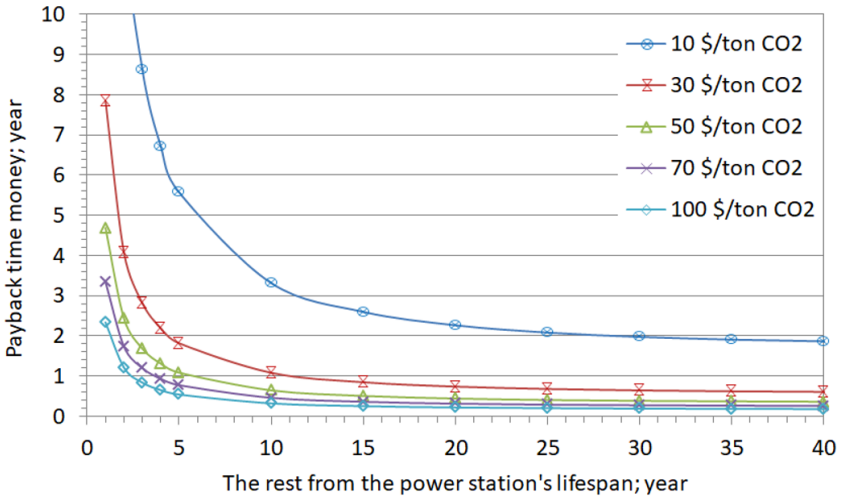
2.4. التأثير الاقتصادي والتقني والبيئي لتركيب تقنيات لاقطات الكربون في محطات توليد الطاقة الكهربائية

لفتت هذه التقنية أنظار الأطراف المجتمعة في مؤتمر الأمم المتحدة المعنية بالتغير المناخي COP28، حيث تواجد خيار استخدام لاقطات الكربون في كافة سيناريوهات التنمية المستدامة كونه المصدر الأكثر نجاحا من حيث تحييد جزءً كبيراً من الكربون في الغازات المنبعثة نتيجة لاحتراق الوقود الأحفوري. كما تلقت إعفاءً ضريبياً قدره 50 دولارا لكل طن من الكربون الذي يتم التقاطه من خلال احتجاز الكربون وتخزينه و 85 دولارا لكل طن يتم التقاطه من أجل احتجاز وتخزين الكربون، و 180 دولارا لكل طن يتم حجزه من خلال لجنة المساعدة الإنمائية[39]. كما يتم تحديث 120 جيجا وات من القدرة الحالية التي تعمل بالفحم من خلال تقنية احتجاز الكربون، وهو ما يمثل نحو 80% من محطات الفحم المجهزة بهذه التقنيات،ما يشكل استثمارا بحوالي 160 مليار دولار أمريكي. كما يتم تجهيز 10 جيجا واط أخرى في الولايات المتحدة لتركيب معدات تقنية لاقطات الكربون. كما تلعب عمليات احتجاز الكربون أيضا دورا مهما في محطات الطاقة التي تعمل بالغاز، حيث تم تجهيز 155 جيجا وات من محطات الطاقة التي تعمل بالغاز الطبيعي بوسائل احتجاز الكربون واستخدامه وتخزينه نصفها تقريبا في الولايات المتحدة[40].
وبالتالي يمكن حساب تكلفة حجز ثاني أكسيد الكربون من المعادلة التالية والتي طورت من قبل المؤلفين:

$$LCOCO_2 = \frac{\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^{n-1}} CC_{CS,Good} + O\&M_{CS} - EC_{co_2}}{\eta_{CS} \times EF_{CO_2,Good} \times AP_{Good}} \qquad (4)$$

حيث: $CC_{CS,Good}$ يمثل تكلفة رأس المال لمعدات لاقطات الكربون لعملية إنتاجية محددة مثل (توليد الكهرباء، صناعة الإسمنت، صناعة الحديد والصلب، الخ) [$]، $O\&M_{CS}$ يمثل تكلفة الصيانة والتشغيل السنوية للجهاز [$/year]، بينما

يشير $ECCO_2$ إلى التكلفة السنوية للضرر البيئي الناجم من انبعاث CO_2 [$/year]، ويشير الرمز η_{CS} الى كفاءة الجهاز والتي تقدر بحوالي 90% [41]، $EF_{CO_2,Good}$ معامل انبعاث غاز CO_2 لكل منتج، AP_{Good} الإنتاج السنوي لمنتج معين ، n يمثل عمر جهاز لاقطات الكربون والذي يقدر بحوالي 20 years، i ترمز الى نسبة الفائدة الحقيقية وقدرت بحوالي 8%. وباعتبار الفترة الزمنية المطلوبة لتنفيذ مشاريع لاقطات الكربون يستغرق حوالي 3 سنوات فقد تم استبعاد المحطات التي تقل عمرها المتبقي عن 3 سنوات. يمثل الشكل (2) خيار تبني تقنية لاقطات الكربون في محطات توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا كعلاقة بين الفترة الزمنية المتبقية من عمر المحطة ومدة استرداد رأس المال ولعدة تسعيرات للكربون نظرا لحساسية الحساب لهذه التكلفة. نود الإشارة هنا أن المحطات المركبة تعامل معاملة المحطات الغازية تماما ويتم حساب سعة لاقطات الكربون على أساس قدرة الوحدات الغازية.

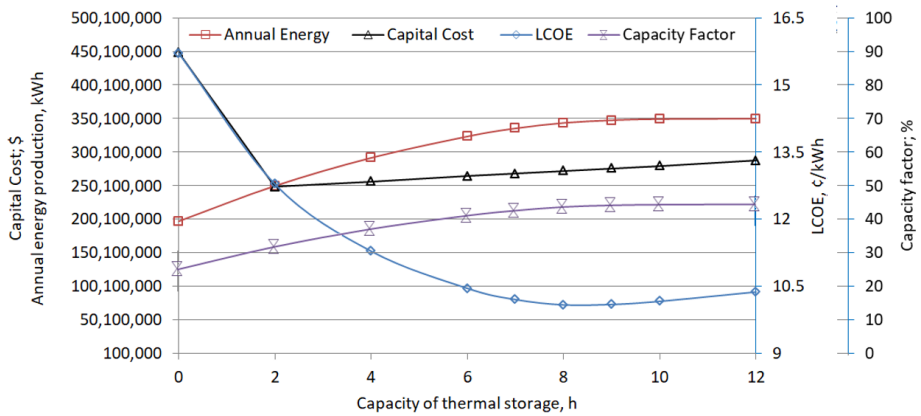


الشكل 2: علاقة الزمن المتبقي من عمر المحطة مع فترة استرداد رأس المال في حالة تركيب معدات لاقطات الكربون لعدة تسعيرات للكربون.

يتضح من الشكل (2) إن تسعيرة الكربون تعتبر عاملا حساسا في اتخاذ القرار، حيث يتبين أنه لا جدوى اقتصادية من تركيب معدات لاقطات الكربون لمحطات تبقى من عمرها أقل من 3 سنوات في حالة تسعيرة الكربون أقل من 30 $/ton CO_2، والعكس صحيح.

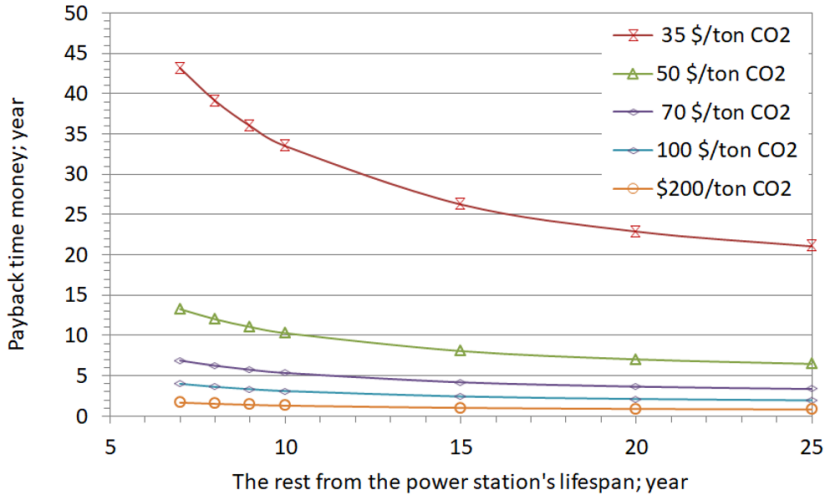
3.4. التأثير الاقتصادي والتقني والبيئي لتركيب حقول المركزات الشمسية في محطات توليد الطاقة الكهربائية

أكد العديد من البحاث المحليين[42-52]ضمانة الاستثمار في الطاقة الشمسية المركزة كخيار تقني للتحول نحو الوقود الشمسي، وخاصة تقنية المركزات الشمسية. حيث قام Nassar et. al. بدراسة تحليلية تقنية-اقتصادية-بيئية لجميع تقنيات المركزات الشمسية، وخلصت الدراسة إلى نجاح استخدام حقول المرايا الشمسية المركزة لمعظم مناطق ليبيا[53]. إلا أن الدراسة لم تقدم توصيات بخصوص السعة التخزينية للتصميم.



الشكل 3: علاقة السعة التخزينية لمحطة تعمل بالوقود الشمسي مع بعض المؤشرات الاقتصادية والتقنية.

في هذه الدراسة استخدم برنامج SAM لمحاكاة أداء حقل مرايا شمسية لتزويد الطاقة لمحطة توليد طاقة كهربائية بقدرة 100 MW، ولتجنب حدوث أي خلل في عملية المحاكاة تم اختيار نمط التصميم المثالي لمكونات الحقل الشمسي لإنتاج طاقة تكافئ الطاقة المنتجة من المحطة التقليدية عند نفس السعة. تم الحصول على سعة التخزين المثالية على أساس أقل قيمة LCOE، ومثلت النتائج المتحصل عليها بيانيا في الشكل 3.
يتبين من الشكل 3 أن السعة التخزينية المثالية هي 8 ساعات والطاقة الكهربائية السنوية المنتجة حوالي 343500 MWh بمعامل قدرة حوالي 43.6% ويقدر الاستثمار بحوالي 271745792 دولارا.
تم حساب زمن استرداد رأس المال لمحطات توليد الطاقة العاملة على الوقود الشمسي ،وباعتبار الفترة الزمنية المطلوبة لتنفيذ مشاريع المركزات الشمسية يستغرق حوالي 6 سنوات فقد تم استبعاد المحطات التي تقل عمرها المتبقي عن 6 سنوات. مثلت النتائج المتحصل عليها بيانيا في الشكل 4.



الشكل 4: علاقة الزمن المتبقي من عمر المحطة مع فترة استرداد رأس المال في حالة تركيب الحقول الشمسية.

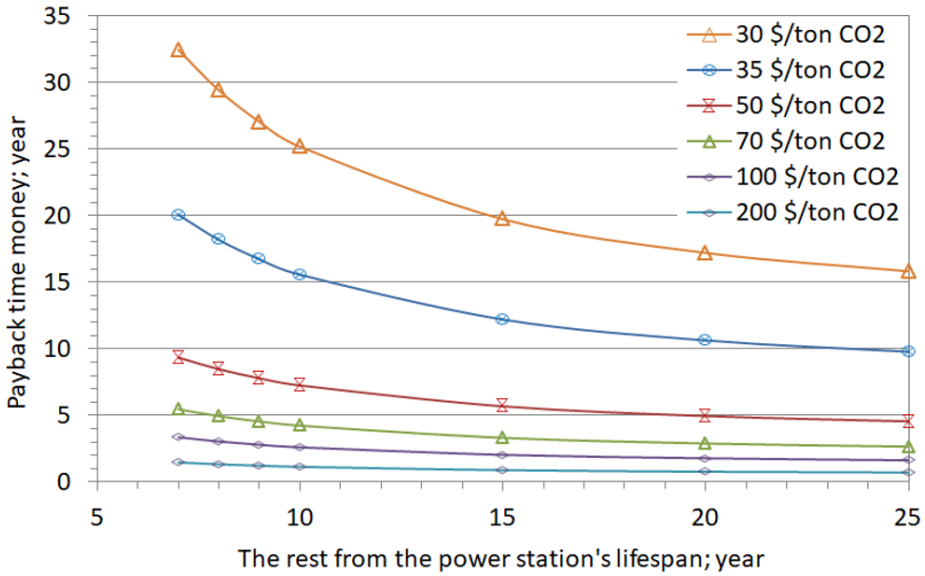
يبين الشكل 4،جدوى الاستثمار في الحقول الشمسية المركزة لكافة المحطات عندما تكون تسعيرة الكربون بحدود 70 ($/ton CO_2) وهي القيمة التي حددها مؤتمر الأمم المتحدة السابع والعشرون للتغير المناخي COP 27، والذي انعقد في الفترة من 6 حتى 18 نوفمبر 2022 في مدينة شرم الشيخ المصريَّة[54].

4.4. التأثير الاقتصادي والتقني والبيئي لتركيب لاقطات الكربون بالتكامل مع حقول المركزات الشمسية في محطات توليد الطاقة الكهربائية

تعمل محطات الطاقة الكهربائية بمتوسط ساعات تشغيل سنوية حوالي 4460 ساعة سنويا (كما هو مبين في الجدول1)، وعليه فإن الطاقة الكهربائية المنتجة من 100 MW توربين تقليدي تقدر بحوالي 446000 MWh . كما وتقدر إنتاجية المحطة الشمسية العاملة على الوقود الشمسي وبسعة تخزينية 8 ساعات من الطاقة الكهربائية السنوية حوالي 343500 MWh بمعامل قدرة حوالي 39.2% وبالتالي فان 102500 MWh ما قيمته 23% من الإنتاج الكلي لمنظومة توليد الطاقة الكهربائية سيتم توليده باستخدام الوقود التقليدي، وسيتم تركيب أجهزة لاقطات الكربون لحجز ما يقدر بحوالي 91050 ton CO_2 بكفاءة 90%. يمثل الشكل (5) علاقة الزمن المتبقي من عمر المحطة مع فترة استرداد رأس المال في حالة تركيب الحقول الشمسية بالتكامل مع معدات لاقطات الكربون لعدة تسعيرات للكربون، مع استبعاد المحطات التي يتبقى من عمرها الافتراضي أقل من 7 سنوات.
نود الإشارة هنا أن المحطات المركبة تعامل معاملة المحطات الغازية للوحدات الغازية ومعاملة المحطات البخارية للوحدات البخارية، ويتم حساب حجم الحقل الشمسي على أساس قدرة الوحدات الغازية وقدرة الوحدات البخارية.
يتطلب حساب فترة استرداد رأس المال في حالة استخدام وقود شمسي بالتكامل مع وحدات لاقطات الكربون؛إضافات على المعادلة (6) بحيث تتضمن تكلفة رأس المال فقط للحقل الشمسي وأجهزة لاقطات الكربون بينما يجب إضافة تكلفة الصيانة المتغيرة والثابتة لكل من الحقل الشمسي ومحطة توليد الكهرباء ولاقطات الكربون. وبالتالي سيعاد صياغة معادلة فترة استرداد رأس المال لهذه الحالة على النحو التالي:

$$PBTM = \frac{CC_{SF} + CC_{CC}}{\frac{(1+r)^{n-1}}{r(1+r)^{n}}\left[C_{co_2} - (O\&M_{SF} + O\&M_{CC})\right]} \quad ; \; n = min(n_{sp}, n_{pp}) \qquad (5)$$

ويشير الرمز السفلي SF إلى الحقول الشمسية و CC إلى لاقطات الكربون و PP محطة توليد الطاقة الكهربائية.
يبين الشكل 5 نجاعة الاستثمار في تحييد الكربون حيث انخفضت فترة استرجاع رأس المال عن استخدام لاقطات الكربون بالتكامل مع الحقول الشمسية المركزة لكافة المحطات عندما تكون تسعيرة الكربون بحدود 70 $/ton CO_2. وباعتبار التكلفة الحالية للكربون 70 $/ton CO_2، فإن الوضع التقني والبيئي للمحطات العاملة في ليبيا سيكون على النحو المدرج في الجدول (6).

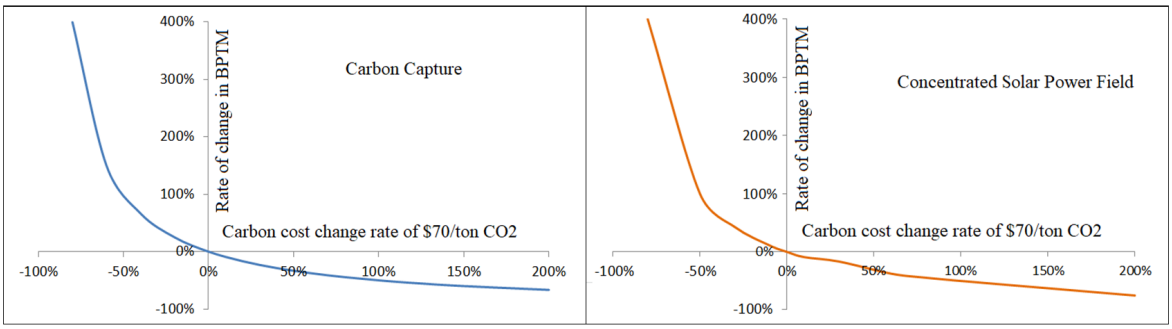


الشكل 5: علاقة الزمن المتبقي من عمر المحطة مع فترة استرداد رأس المال في حالة تركيب الحقول الشمسية بالتكامل مع معدات لاقطات الكربون.

5.4. تحليل حساسية النتائج لبعض المعلمات الاقتصادية والبيئية

1.5.4. تحليل حساسية النتائج لسعر CO_2

يشار إلى أن سعر الكربون كان منخفضا وفقا لنظام تداول الانبعاثات في الاتحاد الأوروبي الذي تم إنشاؤه عام 2005 كأداة لتقليل انبعاث الكربون في السوق الأوروبية، حيث بلغ متوسط سعر الكربون في عام 2016 نحو 3 يورو للطن. بيد أن هذه التسعيرة ارتفعت إلى 50 يورو (59 $US) في الاتحاد الأوروبي خلال العام 2023، ومن المتوقع أن ترتفع إلى 85 دولاراً للطن في عام 2030. بينما حددت مصر سعر الكربون بحوالي 80 $US للطن لعام 2023[55]. وفي هذا السياق، أعلنت كندا أن سعر انبعاثاتها سيرتفع إلى 170 دولاراً كندياً (214 $US) للطن بحلول عام 2030[56]. أما في الولايات المتحدة الأمريكية فارتبطت تسعيرة الكربون بالاتجاهات السياسية.
حيث قدرت إدارة أوباما تكلفة الكربون بمبلغ 43 دولارا للطن على مستوى العالم، بينما أخذت إدارة ترامب في الاعتبار فقط تأثيرات انبعاثات الكربون داخل الولايات المتحدة، وقدرته بما يتراوح بين 3 إلى 5 دولارات للطن. بينما بلغ التقدير الرسمي من إدارة بايدن 51 دولارا للطن.
كما اقترحت وكالة حماية البيئة في نوفمبر 2022 زيادة بمقدار أربعة أضعاف تقريبا لتصل القيمة إلى 190 دولارا للطن [57]. إلا أن برامج تسعير الكربون لا تغطي سوى خُمس الانبعاثات العالمية، مع حقيقة أن متوسط السعر العالمي يبلغ 3 دولارات فقط للطن[56].وهذا بعيد كل البعد عن القيمة التي تم تحديدها في مؤتمر COP27 المنعقد في شرم الشيخ بمصر في الفترة 6-18 نوفمبر2022 والتي تبلغ 70 دولارًا للطن، لتقليل الانبعاثات بما يكفي لإبقاء الاحترار العالمي أقلّ من درجتين مئويتين[58]. كما حدّد صندوق النقد حدًا أدنى لسعر الكربون قدر بحوالي 70 دولارا للطن للاقتصاديات المتقدمة بحلول 2030، و 50 دولارا لاقتصاديات الأسواق الناشئة ذات الدخل المرتفع مثل الصين، و 25 دولارا للأسواق الناشئة ذات الدخل المنخفض مثل الهند.أما في ليبيا فلا يوجد تسعيرة للكربون (على حسب علم الباحثين). يستعرض الشكل (6) ارتباط فترة استرداد رأس المال PBTM مع تغيير تسعيرة الكربون (القيمة المرجعية 70 $/ton CO_2) لكل من تقنية لاقطات الكربون وحقول الطاقة الشمسية المركزة.
يشكل انخفاض تسعيرة الكربون زيادة كبيرة في PBTM الأمر الذي يزيد من خطورة اتخاذ القرار. بينما يصبح الوضع أكثر استقرارا بزيادة تسعيرة الكربون عن 70 $/ton CO_2 ويدعم اتخاذ القرار.



الشكل 6: ارتباط فترة استرداد رأس المال MTBP مع التغيير في تسعيرة الكربون على أساس القيمة المرجعية 70 $/ton CO_2.

2.5.4. تحليل حساسية النتائج لتكلفة رأس المال

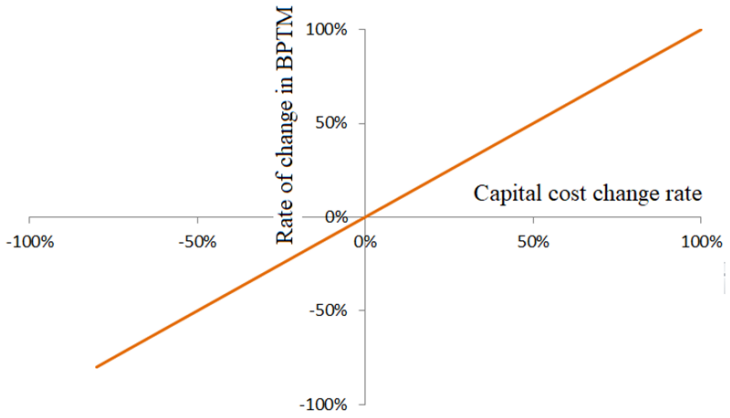
تشير تقارير الوكالة الدولية للطاقات المتجددة (IRENA) لعام 2023؛ إلى أن تكلفة الكهرباء المولدة من الطاقة الشمسية المركزة (CSP) انخفضت بشكل كبير خلال العقد الماضي، ومن المتوقع أن تستمر في الانخفاض، مما يعزز قدرتها التنافسية في قطاع صناع الطاقة. حيث انخفضت التكلفة المستوية للكهرباء إلى حوالي 0.1 $/kWh، ما يعادل انخفاضًا بنسبة 68% على مدار 12 سنة الماضية. ويعزى هذا الانخفاض إلى انخفاض بنسبة 50% في تكاليف الاستثمار التي تتراوح الآن بين 3,000 - 13,000 دولارا لكل كيلو واط قدرة. كذلك زيادة في معامل القدرة، حيث ارتفع من 30% إلى أكثر من 50%، بسبب تحسين التخزين وارتفاع درجات حرارة التشغيل، حيث أصبح من الممكن إضافة منظلامات تخزين حرارية قادرة على تخزين الطاقة إلى 6-15 ساعة بسعر يتراوح بين 20 - 60 دولارًا لكل كيلو واط ساعة [59].

يمثل الشكل (7) معادلة الارتباط بين معدل التغيير في تكلفة الاستثمار (الحالة المرجعية للمركزات الشمسية 12,580 $/pWk ولاقطات الكربون 960 ($/pWk) ومعدل التغير في فترة استرداد رأس المال. يتبين من الشكل إن العلاقة خطية طردية.

من خلال التحليل السابق للمؤشرات الاقتصادية الرئيسية والتي تضمنت فترة استرداد رأس المال وسعر الكربون , العمر المتبقي لمحطات الطاقة , وتكاليف الاستثمار للتقنيات المقترحة، يتبين التالي:

يؤثر سعر الكربون بشكل كبير على الجدوى الاقتصادية لتقنيات التقاط الكربون ودمج الحقول الشمسية عند كلاً من :-

- أقل من 30 دولار / طن CO_2 , فإن تركيب أنظمة التقاط الكربون غير مجدي اقتصاديا للمحطات التي تبقي لها أقل من 3 سنوات من العمر المتبقي (وهي فترة تركيب معدات التقاط الكربون).
- عندما يصل السعر إلي 70 دولار / طن CO_2 (كما هو موصي به في مؤتمر COP27) تصبح أنظمة الطاقة الشمسية الحرارية والأنظمة المتكاملة قابلة للتطبيق في معظم المحطات التي تبقي لها أكثر 6 سنوات من العمر المتبقي (وهي فترة تركيب حقل المركزات الشمسية).



الشكل 7: ارتباط فترة استرداد رأس المال MTBP مع التغيير في تكلفة رأس المال.

- مع زيادة 10 دولارات / طن CO_2 تقل فترة الاسترداد بنحو 0.5-1.2 سنة حسب نوع المحطة وسعتها.
- كذلك تؤثر تكلفة رأس المال بشكل مباشر علي فترة الاسترداد، حيث:

زيادة 10 % في تكلفة تركيب الحقل الشمسي تؤدي إلي تمديد فترة الاسترداد من (1 - 1.5) سنة.

6.4. التأثير الاقتصادي والبيئي للأنظمة البيئية السالبة الانبعاثات

زراعة الأنظمة البيئية السالبة الإنبعاثات (الغابات والمساحات الخضراء والطحالب) ليس خيارا اقتصاديا بل هو ضرورة لتحقيق التوازن البيئي بين المنظومات الموجبة والسالبة الانبعاث.
ففي الوقت الذي لا يمكن به بأي حال من الأحوال التخلص من كل الأنظمة الموجبة الإنبعاثات تقوم الغابات والمسطحات الخضراء بتنظيف الهواء. في هذه الدراسة سنقوم بحساب المساحة الخضراء اللازمة لامتصاص انبعاثات CO_2 الناجمة عن ما تبقى من التوليد التقليدي باستخدام الوقود الأحفوري من منظومة التوليد في ليبيا. يمكن حساب كمية CO_2 السنوية المنبعثة من الجدول (1)، وقدرت بحوالي $7{,}451\times10^3$ CO_2ton.
يمكن حساب المساحة المطلوبة (A_{forest}) لامتصاص هذا الكم من CO_2 (Q_{CO2}) من المعادلة التالية:

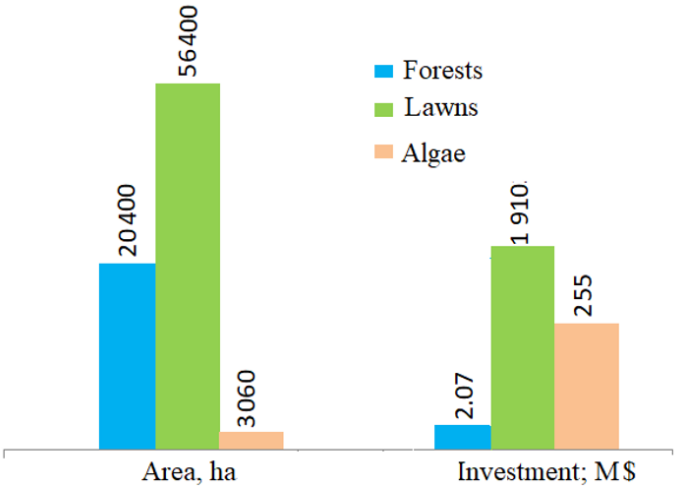
$$A_{forest} = \frac{Q_{CO2}}{AF_{F,CO2}} \qquad (6)$$

ويمثل $AF_{F,CO2}$ معامل امتصاص غاز CO_2 $tonCO_2/h/yr$
وفقًا لدراسة [60] فإن هكتاراً واحداً من الغابات أو المزارع الكثيفة يمكن أن يمتص 365 طن CO_2 وينبعث منه 267 طن O_2 سنويا. كما يمكن أن يمتص هكتار من العشب 132 طن CO_2 وينتج 88 طن O_2 سنويا. بينما يمكن لهكتار من الطحالب أن يمتص ما قدره 2436 طنا من CO_2 في السنة. وبالتالي يمكن معرفة المساحات المطلوبة لامتصاص ما يقدر بحوالي $7{,}451\times10^3$ CO_2ton المنبعثة من محطات توليد الكهرباء في السنة.وكذلك يمكن حساب تكلفة الاستثمار في هذه الأنظمة البيئية السالبة الإنبعاثات. النتائج المتحصل عليها مثلت بيانيا في الشكل 6. ويمثل الشكل 6 المساحة والاستثمار المطلوب للأنظمة البيئية سالبة الإنبعاثات لتحقيق التوازن البيئي لنظام الطاقة المدروس المبين في الجدول (1).

الجدول 6: المؤشرات التقنية والاقتصادية والبيئية لمحطات توليد الكهرباء تحت خيارات التحول نحو الاقتصاد الاخضر.

المحطة (سنة التشغيل)- تقنية التوليد	القدرة	Fuel type	Fuel cons.;	Emitted CO_2	الحالة	أسرات الكربون		حقل شمسي		أسرات كربون + حقل شمسي		Saved fuel	Benefits;
						C. Cost	Saved CO_2	C. Cost	Saved CO_2	C. Cost	Saved CO_2		
	MW		TJ/year	10^3ton/year		M$	10^3ton/year	M$	10^3ton/year	M$	10^3ton/year	TJ/year	M$/year
S-غ طرابلس (1970)	500	ثقيل	19908	1516	تفكيك	0	0	0	0	0	0	0	0.000
S -الخمس (1982)	480	ثقيل	29685	2261	تفكيك	0	0	0	0	0	0	0	0.000
G-أبو كماش (1982)	45	خفيف	4842	348	استثمار	43.2	310	228.2	89	238.3	322	1237	22.547
G-الكفرة (1982)	50	خفيف	4696	338	استثمار	48.0	301	253.6	99	263.0	314	1362	21.980
S-درنة (1985)	130	ثقيل	11845	902	تفكيك	0	0	0	0	0	0	0	0.000
S-طبرق (1985)	130	ثقيل	9094	693	تفكيك	0	0	0	0	0	0	0	0.000
G -مصراتة (1990)	570	ثقيل	43896	3343	استثمار	124.8	2975	2891.0	1061	2979.9	3115	13931	218.038
G-ج طرابلس (1994)	500	خفيف	36460	2624	استثمار	124.8	2335	2536.0	989	2599.7	2461	13743	172.237
G-الزاوية (1994)	770	NG	59459	3336	استثمار	547.2	2969	3905.3	1187	3989.1	3121	21157	218.480
C-ش بنغازي (1995)	S300+G615	NG	37451	2101	استثمار	480.0	1870	4640.7	1411	4667.6	2032	25150	142.243
G-ش بنغازي (1995)	570	NG	42928	2408	استثمار	739.2	2143	2891.0	879	2950.6	2255	15667	157.859
G-الخمس (1995)	600	NG	46947	2634	استثمار	590.4	2344	3043.1	925	3109.7	2463	16487	172.419
C-الزاوية (2000)	S450+G990	خفيف	53856	3876	استثمار	547.2	3450	7303.5	2848	7343.5	3773	39576	264.129
G-الجبل الغربي (2005)	780	خفيف	60559	4358	استثمار	576.0	3879	3956.0	1542	4065.8	4076	21428	285.351
G-مصراتة (2010)	570	NG	42914	2408	استثمار	950.4	2143	2891.0	879	2950.6	2255	15667	157.859
G-السرير (2010)	360	خفيف	33178	2388	استثمار	748.8	2125	1826.9	712	1892.2	2220	9894	155.429
G-أوباري (2022)	640	خام	55867	4747	استثمار	547.2	4225	3246.0	1494	3372.8	4422	17583	309.521
المجـــــــــوع	**9,050**		**593,585**	**40,281**		**6,067**	**31,069**	**39,612**	**14,115**	**40,423**	**32,830**	**212,882**	**2,298**

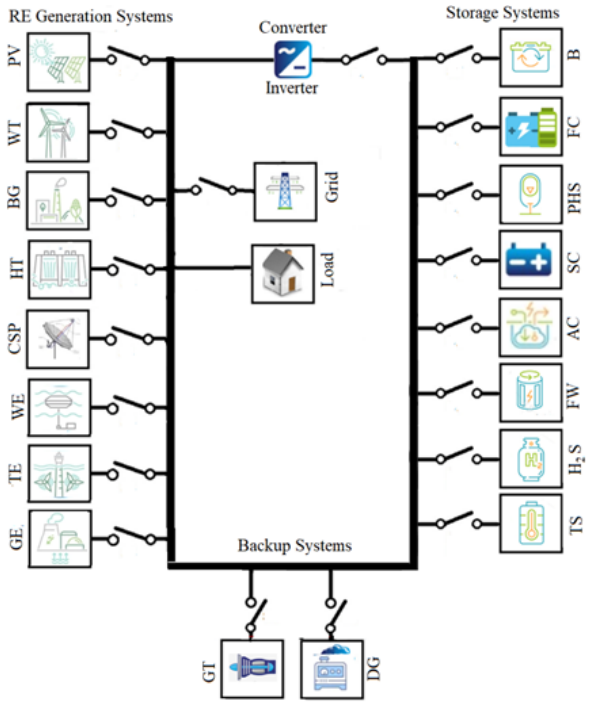
يستعرض الشكل 6 الخيارات المتاحة أمام صانعي القرار لاختيار الاستثمار الأنسب لكل حالة.
ففي الوقت الذي يتطلب إنشاء الغابات والمساحات المعشبة مساحات شاسعة قد لا تتوفر في بعض الحالات فإن الاستثمار في مزارع الطحالب يكون مجديا اقتصاديا، يتبين جدوى الاستثمار في زراعة الغابات حيث يتطلب أقل تكلفة لرأس المال مقارنة بالخيارين الآخرين. في الحقيقة يعتبر الاستثمار في الغابات من أكثر أسواق الكربون نموا، حيث يبلغ معدل النمو السنوي حوالي 20% لعام 2023، ويبلغ قيمة الاستثمار ما يزيد عن 80 مليار دولار أمريكي في عام 2021 وتركزت هذه الأسواق في أمريكيا الشمالية وأوروبا وأستراليا [61]. ويمكن ملاحظة ذلك من خلال إصدار العديد من البروتوكولات والمعايير الدولية لمشاريع الكربون في الغابات [62، 63]. إضافة إلى الوظيفة الأساسية لهذه الأنظمة البيئية وهي امتصاص الكربون من الهواء الجوي، إلا أن هذه المشاريع يمكن أن تكون مصدرا للاستثمار الحكومي أو الخاص، وذلك عن طريق زراعة الأشجار المثمرة دائمة الخضرة والمراعي والطحالب لإنتاج الوقود الحيوي أو أعلاف الحيوانات.



الشكل 6: مقارنة متطلبات المساحة والاستثمار للأنواع الثلاثة من الأنظمة البيئية سالبة الإنبعاثات.

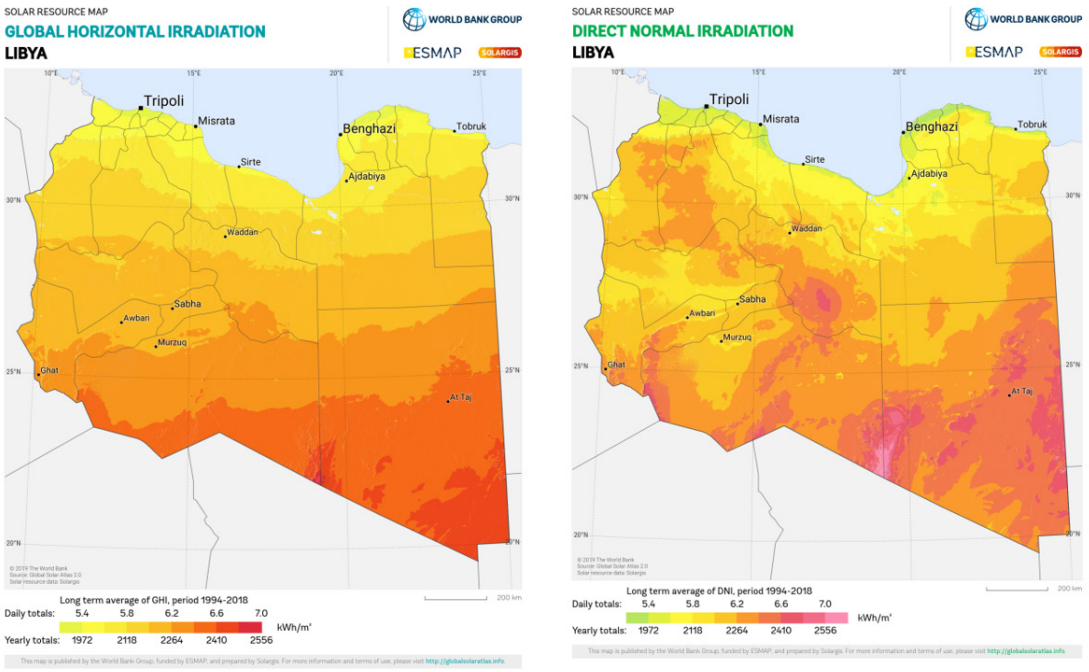
7.4. التحول نحو الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة

يأتي التحول نحو الطاقات المتجددة تلبية لمتطلبات الخطة الإستراتيجية للحكومة الليبية للثلاثين سنة القادمة (2020-2050)، والتي تقضي بزيادة مساهمة الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة في مزيج الطاقة الكهربائية المنتجة لعام 2050 ليتعدى النصف.



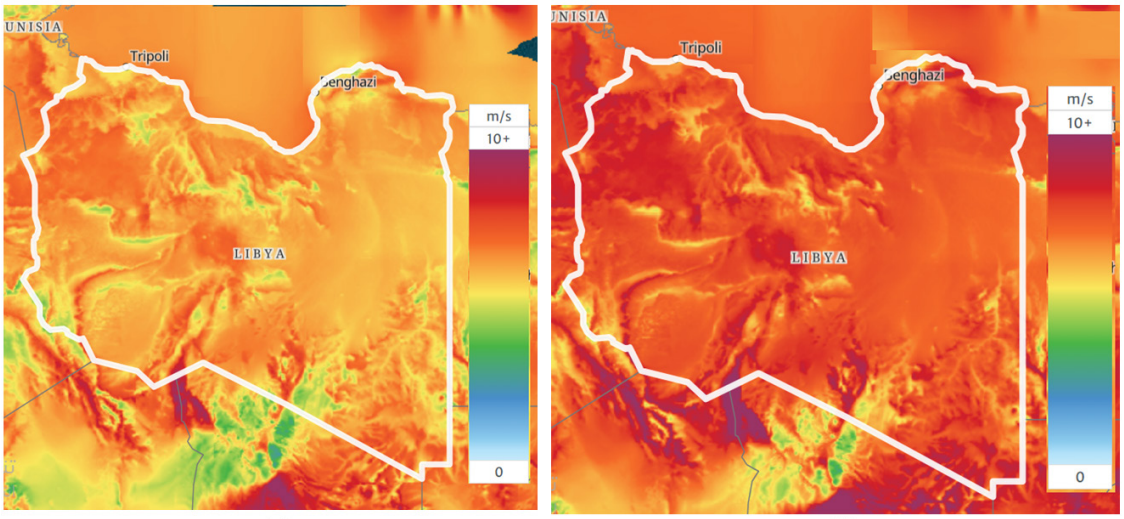
الشكل 7: رسم تخطيطي للأنظمة الهجينة المحتملة.

وذلك بالاستخدام الأمثل للطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة الكتلة الحيوية وطاقة الهيدروجين وطاقة الوضع كمنظومات منفردة [64،65] أو منظومات هجينة متكاملة [66]. يمثل الشكل 7 عدة خيارات لإنشاء منظومات متجددة هجينة مع منظومات لتخزين الطاقة، والتي تم إثبات فاعليتها الاقتصادية في العديد من المناطق في ليبيا [35]. كما تشير منصات المعلومات المتخصصة مثل Solargis [67] وأطلس الرياح (Wind Atlas) [68] إلى وجود موارد واعدة من الطاقة الشمسية (الشكل 8) وطاقة الرياح (الشكل 9) والطاقة البحرية (الشكل 10) وقدرات عالية من تخزين الطاقة كطاقة وضع صلبة أو سائلة (الشكل 11).



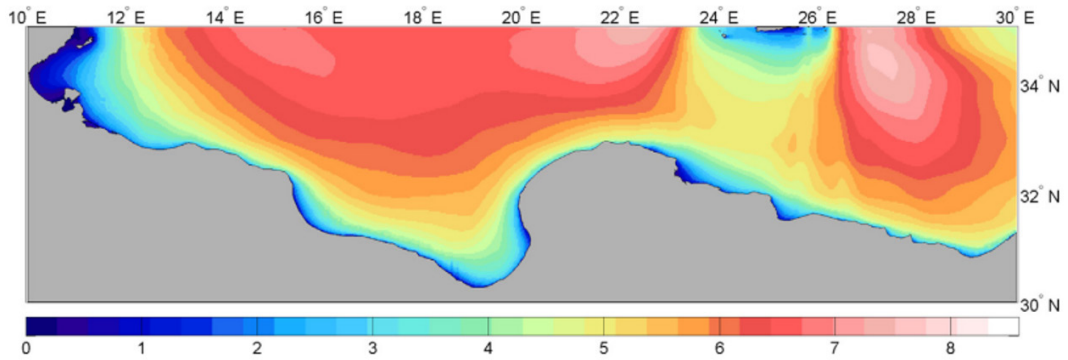
(a) **(b)**

الشكل 8: متوسط شدة الإشعاع الشمسي السنوي (a) الكلي الأفقي. (b) العمودي المباشر.

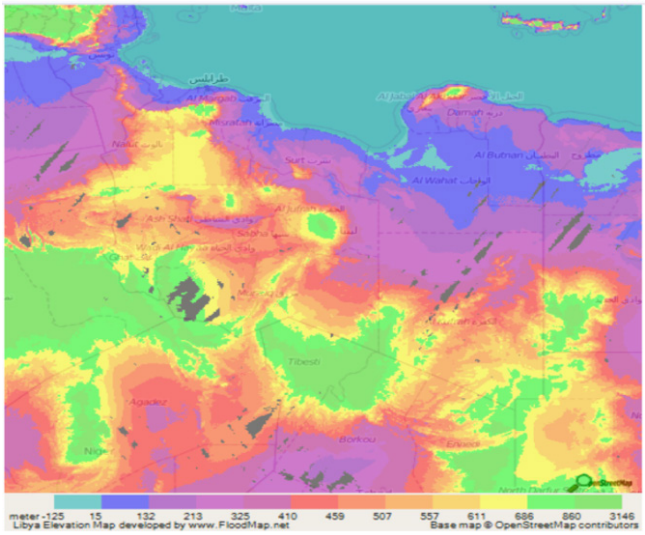


(a) **(b)**

الشكل 9: متوسط سرعات الرياح السنوية (a) على ارتفاع 50 m من سطح الأرض. (b) على ارتفاع 100 m من سطح الأرض.



الشكل 10: طاقة الأمواج (kW/m) للبحر الليبي [69].



الشكل 11: خريطة ارتفاع الأراضي الليبية كقدرات تخزين طاقة وضع [70].

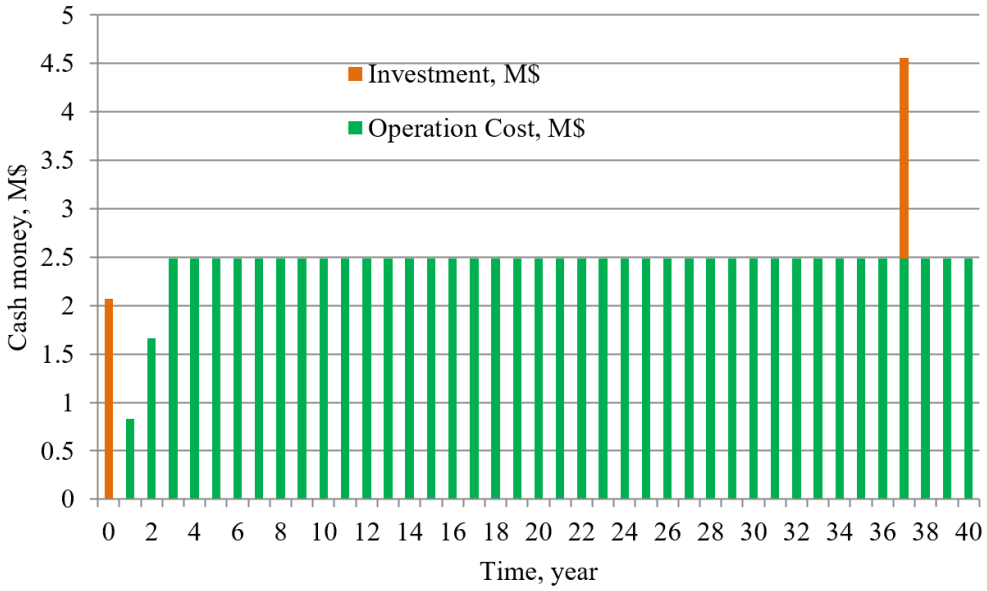
كما أشارت العديد من الأبحاث المحلية التي غطت كافة مناطق ليبيا، على نجاعة استخدام الطاقة الشمسية الحرارية [71-75] الكهروضوئية [76-84] وطاقة الرياح [85-91] وطاقة الكتلة الحيوية [92،93]. بالإضافة إلى دراسات عديدة شملت الجدوى الاقتصادية لمنظومات الطاقات الهجينة [94-97]، كذلك وجود قدرات كبيرة لتخزين الطاقة كطاقة وضع في المرتفعات [98-100].

8.4. ميزانية التحول نحو الاقتصاد الأخضر

استنادا على البيانات المدرجة في الجدول (3) والنتائج المتحصل عليها فإنه يمكن رسم المعالم الرئيسية لميزانية التحول نحو الاقتصاد الأخضر في ضوء الوضع الراهن لمنظومة توليد الطاقة الكهربائية في البلاد، وهي كالتالي:

1.8.4. زراعة الغابات

البدء في زراعة حوالي 20400 هكتارا (حوالي 40 مليون شجرة) من الغابات أو الأشجار المثمرة دائمة الخضرة لتحقيق أكبر عائد اقتصادي للمشروع،وهذا يتطلب رصد ما قيمته 2.07 مليون دولارا وحوالي 2.488 مليون دولار إضافية كميزانية تشغيلية سنوية [32]. ويتطلب هذا العمل حوالي 3 سنوات، وخلال 5-10 سنوات تبدأ الغابة في الظهور والنمو [101]. يمثل الشكل 12 تدفق السيولة السنوية لمشروع زراعة الغابات متضمنا كلفة الاستثمار الابتدائية وتكلفة التشغيل للمشروع على طول عمر المشروع والمقدر بحوالي 40 سنة.

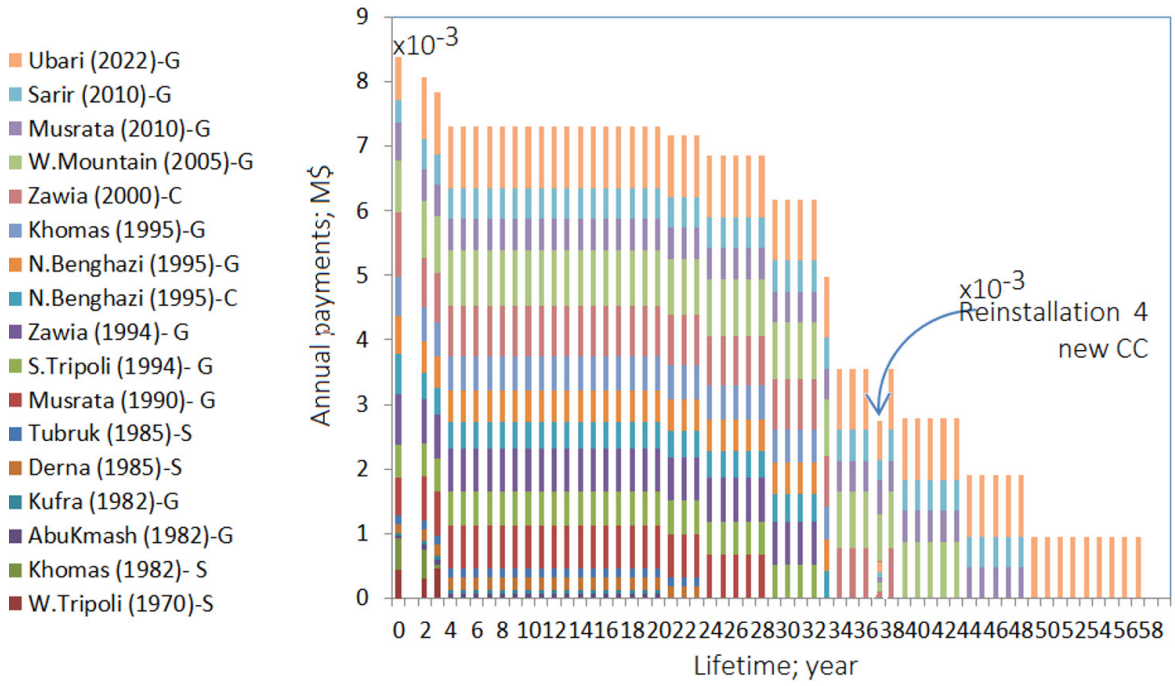


الشكل 12: تدفق السيولة لمشروع الغابات المستدام.

يتبين من الشكل 12 انه سيتم دفع قيمة الاستثمار في بداية السنة الأولى للمشروع، وعند نهاية الستة الأولى سيكون قد تم زراعة ثلث المساحة المستهدفة (باعتبار إن انجاز المشروع يتطلب ثلاث سنوات من العمل) وبالتالي سيتطلب دفع ثلث القيمة التشغيلية للمشروع والتي قدرت بحوالي 0.829 مليون دولارا، وستتضاعف هذه القيمة في السنة الثانية للمشروع وعند السنة الثالثة يكون المشروع قد أكتمل ويتوجب دفع قيمة التشغيل كاملة وهي حوالي 2.488 مليون دولارا، ويستمر هذا الحال حتى قبل ثلاث سنوات من نهاية عمر المشروع والمقدر بحوالي 40 سنة والذي يتوجب عندها البدء في قطع الأشجار القديمة وإعادة زراعة غابة جديدة عوضا عنها، وبالتالي يستوجب دفع قيمة الاستثمار مرة أخرى بينما تستمر الدفعات السنوية اللازمة لتشغيل المشروع ثابتة للأربعين سنة القادمة وهكذا تصبح لدينا غابات مستدامة.

2.8.4. تركيب أجهزة لاقطات الكربون على جميع محطات توليد الطاقة

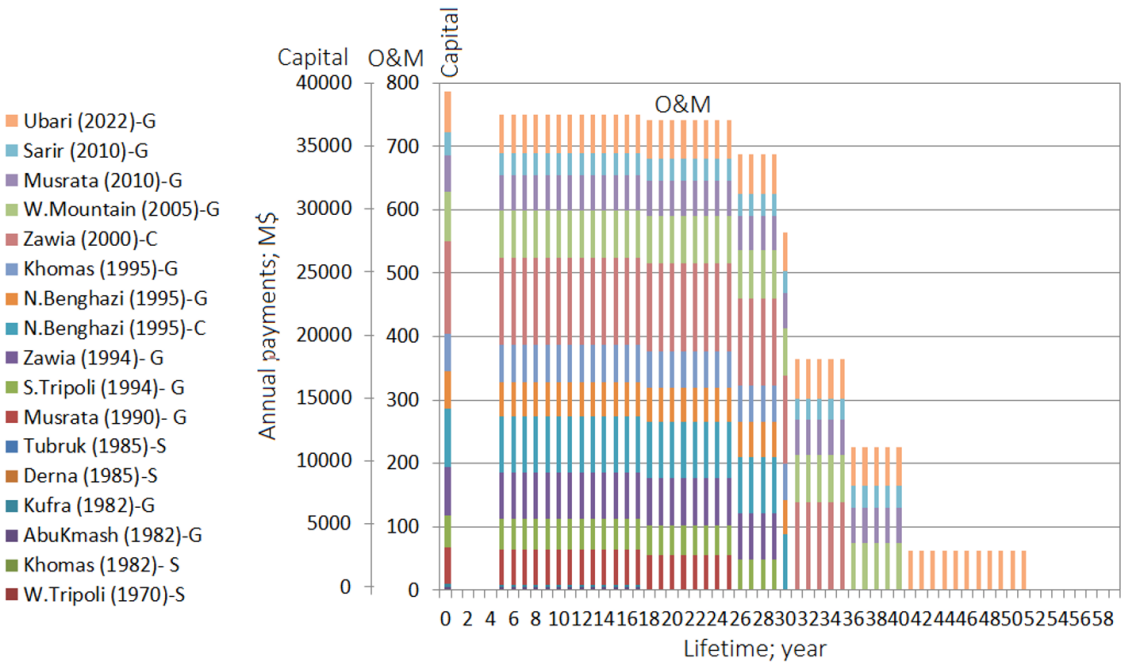
وهذا المشروع يتطلب استثمارا بقيمة 6,067 مليون دولار وبتكلفة تشغيل سنوية حوالي 8.175 مليون دولار، ويتطلب المشروع حوالي 3 سنوات للتركيب. يمثل الشكل 13 تدفق السيولة السنوية لمشروع تركيب أجهزة لاقطات الكربون متضمنا كلفة الاستثمار الابتدائية وتكلفة التشغيل والصيانة للمشروع على طول عمر محطات توليد الطاقة الكهربائية والمقدرة بحوالي 40 سنة للمحطات البخارية و 60 سنة للمحطات الغازية.



الشكل 13: تدفق السيولة لمشروع تركيب لاقطات الكربون في محطات توليد الطاقة الكهربائية.

3.8.4. التحول نحو الوقود الشمسي عوضا عن الوقود الأحفوري في بعض المحطات

وهذا يتطلب رصد ميزانية تقدر بحوالي 39,612 مليون دولارا. علما بأن العائد البيئي لهذا المشروع سيبدأ بعد 6 سنوات، وبالتالي يتطلب رصد ميزانية تشغيلية تقدر بحوالي 165 مليون دولار سنويا تستحق بعد 6 سنوات. يمثل الشكل 14 تدفق السيولة السنوية لمشروع التحول نحو الوقود الشمسي متضمنا كلفة الاستثمار الابتدائية وتكلفة التشغيل والصيانة للمشروع على طول عمر محطات توليد الطاقة الكهربائية والمقدرة بحوالي 40 سنة للمحطات البخارية وحوالي 60 سنة للمحطات الغازية.



الشكل 14: تدفق السيولة السنوي لمشروع الوقود الشمسي (المركزات الشمسية).

4.8.4. إنشاء محطات طاقات متجددة هجينة صفرية الإنبعاثات

انشاء مزارع طاقة الرياح البرية والبحرية وحقول الخلايا الشمسية والمحطات الشمسية المركزة عالية القدرات التخزينية والمحطات البحرية ومحطات حرارة جوف الأرض، عوضا عن المحطات المنتهية الصلاحية والاستمرار بتعويض منظومة التوليد عن المحطات التي ستخرج عن الخدمة في المستقبل.على غرار المحطة المصممة بقدرة 1.2 ميجاوات في مدينة براك في المنطقة الجنوبية.

تم تصميم النظام لتغطية 100% حمل المنطقة ويتكون النظام من حقل الخلايا الشمسية بقدرة 1000 كيلو واط ومزرعة رياح بقدرة 5000 كيلووات مقترنة بمنظومة تخزين الطاقة الكهرومائية بالضخ بطاقة 27,954 كيلووات ساعة(ما يعادل سعة حجمية تبلغ 166,532 مترًا مكعبًا) وبلغت كمية الطاقة السنوية المنتجة حوالي 14.6 جيجا وات/ ساعة. وقدرت تكلفة المحطة بحوالي 10.5 M$ وتكلفة وحدة الطاقة المنتجة LCOE 0.132 $/kWh وحالت دون إنبعاث 4385 طنا من CO_2 سنويا كما وفرت ما يقدر بحوالي 1.48 مليون متر مكعب من الغاز الطبيعي أو 20,700 طنا من الديزل [66].

5. الاستنتاجات

تم في هذا البحث رسم الإطار العام للتوجه نحو الاقتصاد الأخضر من حيث تحديد السياسات التي يجب أن تتبعها الأجهزة التنفيذية لقرارات صانعي القرار في الدولة وكذلك تحديد الميزانية العامة للتحول إلى الطاقات النظيفة والصديقة للبيئة في قطاع صناعة الطاقة الكهربائية في ليبيا. وتبين من خلال التحليل الاقتصادي والتقني والبيئي للخيارات المطروحة أنه يتطلب ما لا يقل عن 6 سنوات للانتقال إلى مرحلة صافي الصفر الكربوني وذلك بتسخير كافة الإمكانيات البشرية ومساندة لوجستية فاعلة والعمل على تركيب معدات لاقطات الكربون على جميع المنشآت الصناعية التي تحرق الوقود الأحفوري في عملياتها الصناعية وتشجيع الاستثمار في الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة والأنظمة البيئية السالبة الإنبعاثات مثل الغابات والمسطحات الخضراء وزراعة الطحالب.

تم اقتراح تركيب لاقطات الكربون على جميع المحطات الكهربائية العاملة، لاحتجاز ما قيمته 90% من الكربون في الغازات العادمه وتخزينه باعتبارها وسيلة فعالة للتخفيف من آثار تغير المناخ ومن التدابير للحد من انبعاثات الغازات الدفيئة، مع التحول إلى الغاز الطبيعي عوضا عن زيوت الوقود الأخرى باعتباره ألطف على البيئة. وكذلك وضع خطة للتحول الجزئي نحو الوقود الشمسي واستعاضة المحطات المنتهية الصلاحية بمحطات طاقات متجددة هجينة بالتكامل مع أنظمة تخزن محلية مثل PHS. وأيضا زيادة مساحات الغابات والمحميات الطبيعية وتشجيع المواطنين على زراعة الأشجار أمام بيوتهم وفي الشوارع والطرقات والمؤسسات الحكومية والخدمية. كما تم في هذه الدراسة تحديد الميزانيات المطلوبة على طول عمر المشروع والذي يتضمن تكلفة الاستثمار وتكلفة التشغيل والصيانة لكل المشاريع المقترحة.

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] U. E. Programme, "Green economy," 2024. [Online]. Available: https://www.unep.org/regions/latin-america-and-caribbean/regional-initiatives/promoting-resource-efficiency/green.

[2] 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. https://www.researchgate.net/publication/323526028

[3] 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. https://ijees.org/index.php/ijees/article/view/68

[4] H. Ritchie and P. Rosado, "Energy Mix," Our World In Data Organization, 2020. [Online]. Available: https://ourworldindata.org/energy-mix. [Accessed January 2024].

[5] I. Tiseo, "Annual global emissions of carbon dioxide 1940-2023," Statistas, 6 Dec 2023. [Online]. Available: https://www.statista.com/statistics/276629/global-co2-emissions/#statisticContainer. [Accessed Feb 2024].

[6] Q. Jiansheng, et. al., "Analysis of International Carbon Neutralization Strategic Actions and Technology Layout and Enlightenment Suggestions to China," Bulletin of Chinese Academy of Sciences (Chinese Version), vol. 37, no. 4, 2022. https://bulletinofcas.researchcommons.org/journal/vol37/iss4/4/

[7] F. Wang, J. Harindintwali, Z. Yuan and e. al., "Technologies and perspectives for achieving carbon neutrality," The Innovation, vol. 2, no. 4, p. 100180, 2021. https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100180

[8] L. Chen, G. Msigwa, M. Yang and e. al., "Strategies to achieve a carbon neutral society: a review," Environmental Chemistry Letters , vol. 20, p. 2277–2310, 2022. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01435-8

[9] S. Budinis, "Going carbon negative: What are the technology options?," IEA, Paris, 2020.

[10] IEA, "28th United Nations Climate Change Conference (COP28) 30 November to 12 December 2023, Dubai, UAE," IEA, 2023. [Online]. Available: https://www.iea.org/events/iea-at-cop28.

[11] Z. Liu, Z. Deng, G. He and e. al., "Challenges and opportunities for carbon neutrality in China," nature reviews earth & environment , vol. 3, p. 141–155, 2022. https://doi.org/10.1038/s43017-021-00244-x

[12] E. Loiseau, L. Saikku, R. Antikainen, N. Droste, B. Hansjürgens, K. Pitkänen, P. Leskinen, P. Kuikman and M. Thomsen, "Green economy and related concepts: An overview," Journal of Cleaner Production, vol. 139, pp. 361-371, 2016. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.024

[13] M. Ringel, B. Schlomann, M. Krail and C. Rohde, "Towards a green economy in Germany? The role of energy efficiency policies," Applied Energy, vol. 179, pp. 1293-1303, 2016. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.063

[14] S. Akalibey, A. Ahenkan, K. Duho, T. Nyamekye and J. Schneider, "Drivers of green economy in an emerging market: Generic and sector-specific insights," Journal of Cleaner Production, vol. 425, p. 138857, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138857

[15] E. Ali, V. Anufriev and B. Amfo, "Green economy implementation in Ghana as a road map for a sustainable development drive: A review," Scientific African, vol. 12, p. e00756, 2021. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e00756

[16] Y. Lin, M. Mahmood, W. Meng and Q. Ali, "Green economy transition in Asia Pacific: A holistic assessment of renewable energy production," Journal of Cleaner Production, vol. 437, p. 140648, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140648

[17] A. Aslam and G. Ghouse, "Targeting the new sustainable inclusive green growth: A review," Cleaner and Responsible Consumption, vol. 11, p. 100140, 2023. https://doi.org/10.1016/j.clrc.2023.100140

[18] M. Krishnan, H. Samandari, J. Woetzel, S. Smit, D. Pacthod, D. Pinner, T. Nauclér, H. Tai, A. Farr, W. Wu and D. Imperato, "The net-zero transition What it would cost, what it could bring," McKinsey Global Institute, 2022. http://mckinsey.com/capabilities/sustainability/our-insights/the-net-zero-transition-what-it-would-cost-what-it-could-bring

[19] 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. https://doi.org/10.51646/jsesd.v12i1.150

[20] Y. Nassar, M. Salem and H. El-Khozondar, "Estimation of CO2 Emissions from the Electric Power Industry Sector in Libya," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 14, no. 1, p. 42–55, 2025. https://doi.org/10.51646/jsesd.v14i1.415

[21] A. Makhzom, A. Eshdok, F. Yasser, S. Alsadi, T. Foqha, M. Salem, I. AlShareef and H. El-Khozondar, "Estimation of CO2 emission factor for Power Industry Sector in Libya," in The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023), Gaza Strip - Palestine, May 8-9, 2023. https://doi.org/10.1109/iecres57315.2023.10209528

[22] National Oil corporation of Libya , Alwasat Magazine, Cairo-Egypt, Janary1, 2024.

[23] IEA, "Tracking Clean Energy Progress 2023". https://www.iea.org/reports/tracking-clean-energy-progress-2023

[24] Wikipedia, "Libyan Airlines," 2022. [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Libyan_Airlines.

[25] E. R. Authority, "Power station and associated costs Benchmark reserve capacity price 2022," 2022.

[26] EIA, "Capital Cost and Performance Characteristic Estimates for Utility Scale Electric Power Generating Technologies," U.S. Department of Energy, Washington, 2024.

[27] Y. Chen, Y. Li, E. Tsoutsanis, M. Newby and X. Zhao, "Techno-economic evaluation and optimization of CCGT power Plant: A multi-criteria decision support system," Energy Conversion and Management, vol. 237, no. 6, p. 114107, 6 2021. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.114107

[28] EIA, "Cost and Performance Estimates for New Utility-Scale Electric Power Generating Technologies," U.S. Energy Information Administration, an agency of the U.S. Department of Energy, Washington, 2020. https://www.eia.gov/analysis/studies/powerplants/capitalcost/pdf/capital_cost_AEO2025.pdf

[29] IRENA, "Renewable power generation costs in 2022," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2023. https://www.irena.org/Publications/2023/Aug/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2022

[30] A. Tariq, S. Kazmi, M. Hassan, S. Ali and M. Anwar, "Analysis of fuel cell integration with

hybrid microgrid systems for clean energy: A comparative review," International Journal of Hydrogen Energy, vol. 52, pp. 1005-1034, 2024. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.07.238

[31] L. Irlam, "Global costs of carbon capture and storage," Global CC Inctitute, 2017.

[32] K. John, D. Silayo and A. Vatn, "The Cost of Managing Forest Carbon under REDD+Initiatives: A Case of Kolo Hills Forests in Kondoa District, Dodoma, Tanzania," International Journal of Forestry Research, vol. 2014, pp. 1-12, 2024. https://doi.org/10.1155/2014/920964

[33] P. Latocha, "Cost comparison - initial and maintenance costs of lawns and ground cover plants," Annals of Warsaw Agricultural University-SGGW, vol. 23, pp. 39-42, 2012. https://www.researchgate.net/publication/268872251

[34] B. Romero, J. Perales, H. Pereira, M. Barbosa and J. Ruiz, "Techno-economic assessment of microalgae production, harvesting and drying for food, feed, cosmetics, and agriculture," Science of The Total Environment, vol. 837, p. 155742, 2022 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155742

[35] N. Fathi, J. Hala and M. Fakher, "The role of hybrid renewable energy systems in covering power shortages in public electricity grid: An economic, environmental and technical optimization analysis," Journal of Energy Storage, vol. 108, p. 115224, 2025. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115224

[36] H. Awad, Y. Nassar, R. Elzer, I. Mangir, H. El-Khozondar, M. Khaleel, A. Ahmed, A. Alsharef, M. Salem and A. Hafez, "Energy, economic and environmental feasibility of energy recovery from wastewater treatment plants in mountainous areas: a case study of Gharyan city –Libya," Acta Innovations, vol. 50, no. 4, pp. 46-56, 2023. https://doi.org/10.32933/actainnovations.50.5

[37] M. Eteriki, W. El-Osta, Y. Nassar and H. El-Khozonda, "Effect of Implementation of Energy Efficiency in Residential Sector in Libya," in The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability, Gaza Strip, Palestine, May 8-9, 2023. https://doi.org/10.1109/iecres57315.2023.10209521

[38] K. Iessa, "Estimation of CO2 emission Factor from the energy sector in Libya," MSc thesis, Sebha University, Libya, 2023.

[39] A. Symons and L. Douglas, "High cost, low profitability and storage challenges: Is carbon capture a realistic climate solution?," Euronews.Green, 2023. https://www.euronews.com/green/2023/11/25

[40] IEA, "The role of CCUS in low-carbon power systems, IEA, Paris," Paris, 2023.

[41] N. Bahman, M. Al-Khalifa, S. Al Baharna, Z. Abdulmohsen and E. Khan, "Review of carbon capture and storage technologies in selected industries: potentials and challenges," Rev Environ Sci Biotechnol, vol. 22, p. 451–470, 2023. https://doi.org/10.1007/s11157-023-09649-0

[42] 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. https://doi.org/10.3103/s0003701x24600218

[43] Y. Nassar, H. El-khozondar, A. Ahmed, A. Alsharif, M. Khaleel and R. El-Khozondar, "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. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140944

[44] B. Belgasim, Y. Aldali, M. Abdunnabi, G. Hashem and K. Hossin, "The potential of concentrating solar power (CSP) for electricity generation in Libya," Renewable and sustainable energy reviews, vol. 90, pp. 1-15, 2018. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.045

[45] Y. Nassar, H. El-Khozondar, G. Ghaboun, M. Khaleel, Z. Yusupov, A. Ahmed and A. Alsharif, "Solar and wind atlas for Libya," International Journal of Electrical Engineering and Sustainability

(IJEES), vol. 1, no. 3, pp. 27-43, 2023. https://www.researchgate.net/publication/372283469

[46] F. Siala and M. Elayeb, "Mathematical formulation of a graphical method for a no-blocking heliostat field layout," Renewable energy, vol. 23, no. 1, pp. 77-92, 2001. https://doi.org/10.1016/s0960-1481(00)00159-2

[47] M. Sofiane and B. Abdelilah, "Predicting the Impact of Different Cooling Systems on the Performance of Parabolic Trough Concentrating Solar Plant based on Real Data," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 13, no. 2, p. 264–285, 2024. https://doi.org/10.51646/jsesd.v13i2.267

[48] J. Saed, M. Abdunnabi, A. Essnid and A. Buishi, "New Designed Thermosyphon Solar Water Heater with Small Sized Parabolic Trough Collectors," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 6, no. 2, pp. 30-41, 2017. https://doi.org/10.51646/jsesd.v6i2.44

[49] I. Saleh, E. Elmabrouk and F. Taher, "Design and Optimisation OF 2-D Static Solar Concentrator," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 10, no. 1, p. 65–75, 2021. https://doi.org/10.51646/jsesd.v10i1.112

[50] M. Sharif, M. hossin and S. Al-Hashmi, "Simulation and optimization of a Concentrating Solar Power Plant with Thermal Energy Storage in Sebha city by using system advisor model (SAM)," in The 4th international conference of Sciences and Technology , Sebha-Libya, 2021. https://doi.org/10.51984/jopas.v20i4.1718

[51] K. Moumani, " Management of sustainable development in the light of Arab and international cooperation, a case study of the Arab vision of management of sustainable development," Wadi AlShatti Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 1, no. 1, pp. 1-8, 2023. https://doi.org/10.63318/waujpasv1i1_01

[52] S. Ehtiwesh, A. Gabbasa and I. Ehtiwesh, "The Potential of Using the Incorporation of Concentrated Solar Power and Gas Turbines in the South of Libya," International Journal of Thermodynamics, vol. 26, no. 4, pp. 1 - 10, 2023. https://doi.org/10.5541/ijot.1293271

[53] Y. Nassar, H. ElKhozondar, M. Abouqeelah, A. Abubaker, A. Miskeen, M. Khaleel, A. Ahmed, A. Alsharif and M. Elmnifi, "Simulating the Energy, Economic and Environmental Performance of Concentrating Solar Power Technologies Using SAM: Libya as a Case Study," Solar Energy and Sustainable Development Journal, pp. 1-23, 2023. https://doi.org/10.51646/jsesd.v12i2.153

[54] 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. https://doi.org/10.1080/17512549.2023.2209094

[55] H. Hssam, "Quantity and cost of CO2 emissions de to petroleum and natural gas consumption," Seventh day magazine, Cairo, 2024.

[56] I. Parry, "FINANCE & DEVELOPMENT," International Monetary Fund, September 2021. [Online]. Available: https://www.imf.org/en/Publications/fandd/issues/2021/09/five-things-to-know-about-carbon-pricing-parry. [Accessed Janary 2024].

[57] T. Fisher, "The Political Economy of EPA's Updated Social Cost of Carbon," CATO Institute, 2024. https://www.cato.org/blog/political-economy-epas-updated-social-cost-carbon

[58] S. Jessop, "COP27," Reuters, . [Online]. Available:," Sharm El-Sheikh, Egypt, 7 November 2022.

[59] M. Khan and e. al., "The economics of concentrating solar power (CSP): Assessing cost competitiveness and deployment potential," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 200, no. 8, p. 114551, 2024. https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114551

[60] T. Nguyen, H. Cao, N. Nguyen, T. Duong, T. Tran, H. Bui and T. Ho, "Comprehensive study on the amount of CO2 absorbed by vegetation: A case study in Ho Chi Minh city, Vietnam," in E3S Web of Conferences-ICECAE 2021, 2021. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130403009

[61] V. Garlington, "Forest Carbon Credits Alternative Investment Opportunity," 19 November 2023. [Online]. Available: https://www.linkedin.com/pulse/forest-carbon-credits-alternative-investment-victor-garlington-tai0c/.

[62] T. Hartmann, M. Vöhringer, S. Mielke, E. Mannigel and S. Hörmann, "Investing in forest carbon projects: Guidelines for companies and private investors," Global nature Fund (GnF) , Germany, 2021. https://www.dehst.de/SharedDocs/downloads/EN/project-mechanisms/Carbon_Offsetting_forest_carbon_projects_guidelines.pdf?__blob=publicationFile&v=2

[63] 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. https://doi.org/10.51646/jsesd.v12i2.160

[64] Y. Nassar, "Thermodynamic Analysis and Optimization Procedure for Domestic Solar Water Heating System," American Journal of Energy and Power Engineering, vol. 2, no. 6, pp. 92-99, 2015. https://www.researchgate.net/publication/291505179

[65] W. El-Osta and Y. Kalifa, "Prospects of wind power plants in Libya: a case study," Renewable Energy, vol. 28, no. 3, p. 363–371, 2003. https://doi.org/10.1016/s0960-1481(02)00051-4

[66] F. Nassar, M. Abdunnabi, M. Sbeta, A. Hafez, K. Ali, A. Hassan 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, vol. 229, p. 113744, 2021. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113744

[67] "Solar resource maps of Libya," [Online]. Available: https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/libya.

[68] G. W. Atlas. [Online]. Available: https://globalwindatlas.info/en/area/Libya?download=print.

[69] G. Lavidas and V. Venugopal, "Wave energy resource evaluation and characterisation for the Libyan Sea," International Journal of Marine Energy, vol. 18, pp. 1-14, 2017. https://doi.org/10.1016/j.ijome.2017.03.001

[70] "Color elevation map," [Online]. Available: https://www.floodmap.net/?ct=LY.

[71] K. Bakouri, T. Foqha, O. Ahwidi, A. Abubaker, Y. Nassar and H. El-Khozondar, "Learning lessons from Murzuq-Libya meteorological station: Evaluation criteria and improvement recommendations," Solar Energy and Sustainable Development Journal , vol. 12, no. 1, pp. 30-48, 2023. https://doi.org/10.51646/jsesd.v12i1.149

[72] Y. Nassar, A. Alatrash, R. Elzer, A. Alkhazmi, H. El-Khozondar, A. Alsharif, A. Ahmed and M. Khaleel, "Optimum Number of Glass Covers of Thermal Flat Plate Solar Collectors," Wadi AlShatti Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 2, no. 1, pp. 1-10, 2024. https://www.ajol.info/index.php/waujpas/article/view/269488

[73] I. Saleh, E. Elmabrouk and F. Taher, "Design and Optimisation OF 2-D Static Solar Concentrator," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 10, no. 1, pp. 65-75, 2021. https://doi.org/10.51646/jsesd.v10i1.112

[74] I. Abuashe, E. Shuia and H. Aljermi, "Modelling and simulation of Concentrated Solar Power Plant in Ber'Alganam area (Azzawia-Libya)," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 8, no. 2, pp. 17-33, 2019. https://doi.org/10.51646/jsesd.v8i2.27

[75] A. Ramadan, K. Mufth, A. Al-Naaji, A. Al-Soul, A. Essnid and B. Sawed, "Experimental

Investigation of the Thrmal Performance of a Solar Air Heater," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 9, no. 2, pp. 46-62, 2020. https://doi.org/10.51646/jsesd.v9i2.13

[76] Y. Nassar, S. Alsadi, G. Miskeen, H. El-Khozondar and N. Abuhamoud, "Atlas of PV Solar Systems Across Libyan Territory," in 2022 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS), Istanbul, Turkey, 04-06 July 2022. https://doi.org/10.1109/icemis56295.2022.9914355

[77] A. Alsharif, A. Ahmed, Y. Nassar, M. Khaleel, H. El-Khozondar, T. Alhoudier and E. Esmail, "Mitigation of Dust Impact on Solar Photovoltaics Performance Considering Libyan Climate Zone: A Review," Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 1, no. 1, pp. 22-27, 2023.

[78] M. Sbeta and S. Sasi, "On the Field Performance of PV Water Pumping System in Libya," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 1, no. 1, pp. 1-7, 2012. https://doi.org/10.51646/jsesd.v1i1.101

[79] A. Elfaqih, "Design of photovoltaic system powered a small-scale SWRO desalination plant," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 5, no. 1, pp. 12-21, 2016. https://doi.org/10.51646/jsesd.v5i1.66

[80] M. Shabat, H. El-Khozondar, S. Nassar, G. Zoppi and N. Yasser, "Design and Optimization of Plasmonic Nanoparticles-Enhanced Perovskite Solar Cells Using the FDTD Method," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 13, no. 1, pp. 43-56, 2024. https://doi.org/10.51646/jsesd.v13i1.170

[81] M. Aljuboori, M. Oglah and A. Hasan, "Enhancing Photoconversion Efficiency by Optimization of Electron/Hole Transport Interlayers in Antimony Sulfide Solar Cell using SCAPS-1D Simulation," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 13, no. 1, pp. 97-113, 2024. https://doi.org/10.51646/jsesd.v13i1.175

[82] K. Amer, M. Irhouma, M. Hamdan, A. Aqila, A. Ahmed, M. Fakher and A. Alkhazmi, "Economic-Environmental-Energetic (3E) analysis of Photovoltaic Solar Energy Systems: Case Study of Mechanical & Renewable Energy Engineering Departments at Wadi AlShatti University," Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 3, no. 1, pp. 51-58, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_09

[83] S. Alsadi, et al. " Mapping of PV solar module technologies across Libyan territory," In Iraqi International Conference on Communication and Information Technologies (IICCIT), 07-08 September 2022, Basrah, Iraq. https://doi,org/10.1109/IICCIT55816.2022.10010476

[84] H. El-Khozondar, R. El-Khozondar, Y. Nassar, A. A. M. Asfour, M. El-Zesty, S. Shaheen, M. Elmnifi, M. Khaleel, A. Alkhazmi and A. Ali, "Economic and Environmental Implications of Solar Energy Street Lighting in Urban Regions: A Case Study," Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 3, no. 1, pp. 142-151, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_21

[85] 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. https://doi.org/10.51646/jsesd.v8i2.28

[86] F. Ahwide and A. Ismail, "Wind Energy Resources Estimation and Assessment For AL-Maqrun Town - Libya," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 5, no. 1, pp. 22-41, 2016. https://doi.org/10.51646/jsesd.v5i1.67

[87] 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 Assessment of Height-Dependent Wind Energy in Libya," Applied Solar Energy., vol. 59, no. 3, 2023. https://doi.org/10.3103/s0003701x23600212

[88] W. Abuzend, W. El-Osta, M. Ekhlat and E. Borass, "Projected Avoided Costs of Conventional

Power Plants in Libya Using Wind Energy," Solar energy and sustainable development Jpurnal, vol. 1, no. 1, p. 32–41, 2012. https://doi.org/10.51646/jsesd.v1i1.105

[89] K. Alshoshan, W. El-Osta, Y. Kahlifa and I. Saleh, "Feasibility Study of Zero Energy Houses: Case Study of Magrun City - Libya," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 7, no. 2, p. 59–77, 2018. https://doi.org/10.51646/jsesd.v7i2.41

[90] A. Elmariami, W. El-Osta, Y. Nassar, Y. Khalifa and M. Elfleet, "Life Cycle Assessment of 20 MW Wind Farm in Libya," Applied Solar Energy, vol. 59, no. 1, pp. 64-78, 2023. https://doi.org/10.3103/s0003701x22601557

[91] M. Salem, A. Elmabruk, M. Irhouma and I. Mangir, "Assessment of Wind Energy Potential in Western Mountain: Nalut and Yefren as Case Study," Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 3, no. 1, pp. 35-42, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_7

[92] A. Miskeen, R. Elzer, I. Mangir, Y. Nassar, H. El-Khozondar, M. Khaleel, A. Ahmed, A. Alsharif and M. Salem, "Energy from Wastewater Treatment stations," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 12, no. 2, 2023. https://doi.org/10.51646/jsesd.v12i2.156

[93] 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. https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100650

[94] 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. https://doi.org/10.51646/jsesd.v12i1.146

[95] 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. https://doi.org/10.51646/jsesd.v12i1.151

[96] E. Salim, A. Abubaker and Y. Nassar, "A Brief Overview of Hybrid Renewable Energy Systems and Analysis of Integration of Isolated Hybrid PV Solar System with Pumped Hydropower Storage for Brack city - Libya," Wadi Alshatti Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 3, no. 1, pp. 152-167, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_22

[97] A. Aqila, Y. Nassar, K. Amer and H. El-Khozondar, "Design of Hybrid Renewable Energy System (PV/Wind/Batter) under real Climatic and Operational Conditions to Meet Full Load of the Residential Sector: A Case Study of a House in Samno village– Southern Region of Libya," Wadi Alshatti University of Pure and Applied Sciences, vol. 3, no. 1, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_23

[98] M. Elmnifi, N. Khaleel, S. Vambol, S. Yeremenko, N. Yasser and O. Dzhulai, "Ensuring sustainability in Libya with renewable energy and pumped hydro storage," Ecological Questions, vol. 35, no. 3, pp. 1-17, 2024. https://doi.org/10.12775/eq.2024.036

[99] S. Mohammed, H. Algassie and A. E.-K. H. Mahammed, "Exploring optimum sites for exploitation hydropower energy storage PHES using geographic information system (GIS) platform in Libya" , Solar energy and Sustainable development Journal, vol. 14, no. 1, 2025, Unpblished.

[100] S. Mohammed, Y. Nassar, H. Algassie, A. Mahammed, H. El-Khozondar and A. Alatrash, "Exploring Promised Sites for Establishing Hydropower Energy Storage (PHES) Stations in Libya by Using the Geographic Information Systems (GIS)," Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences, vol. 3, no. 1, pp. 85-94, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_13

[101] [Online]. Available: https://erc.cals.wisc.edu/woodlandinfo/files/2017/09/FR-426.pdf.