









Simulating the Energy, Economic and Environmental Performance of Concentrating Solar Power Technologies Using SAM: Libya as a Case Study



Yasser F. Nassar^{1,2} , Hala J. ElKhozondar^{3,4*} , Mohammed H. Abouqeelah¹,
Ahmed A. Abubaker¹ , Abdulhakeem B. Miskeen¹ , Mohamed M. Khaleel⁵ ,
Abdussalam A. Ahmed⁶ , Abdulgader Alsharif⁷ , Monaem Elmnifi⁸ .

¹Mechanical engineering and renewable energies, Wadi Alshatti University, Brack -Libya.

²Center for renewable energy and sustainable development research and studies, Wadi Alshatti University, Brack-Libya.

³Electrical engineering and smart systems, Faculty of engineering, Islamic University of Gaza, Palestine.

⁴ Materials and London centre for nanotechnology, Imperial College, London-UK.

⁵Research and Development, College of Civil Aviation, Misrata-Libya.

⁶Mechanical Engineering, Bani Waleed University, Bani Waleed-Libya.

⁷Division of Electric Power engineering, Faculty of engineering, Universiti Teknologi Malaysia, UTM, Skudai, Johor-Malaysia.

⁸Faculty of Engineering Technologies, Bright Star University, Libya.

E-mail: ³ hkhzondar@iugaza.edu.ps.

ARTICLE INFO.

Article history:

Received 28 May 2023

Received in revised form 16 August 2023

Accepted 30 August 2023

Available online 14 September 2023

KEYWORDS

Hydropower energy, wastewater treatment plant, potential energy, biomass energy, Gharyan, Libya.

ABSTRACT

According to the Libyan government's newly released strategic plan, renewable and environmentally friendly energy sources would provide 30% of the country's power by 2030. The goal of this research is to shed light on solar energy technologies that may be used to generate clean and sustainable electricity. An energy-economic-environmental study of five Concentration Solar Power (CSP) technologies (parabolic trough, solar dish, linear Fresnel reflector, solar tower, and concentrated PV solar cell) was conducted for 22 selected locations in Libya. The Levelized Cost Of Energy (LCOE) was chosen as a reference for identifying which technology would be most suited for each site.

The economic estimates include the cost of environmental damage caused by carbon dioxide gas (CO₂) emissions from fossil-fuel-powered power plants. This technique allows clean and renewable energy to compete fairly in the global energy market, even in countries that produce oil and subsidize electricity.

*Corresponding author.

According to the data, the solar mirror technology in Libya has the lowest LCOE of all the technologies evaluated in this study. The LCOE estimates varied from 0.01 to 0.04 dollars per kWh. The clean energy produced by the solar tower surpassed 100 MW, or about 400.332 GWh. Furthermore, the adoption of clean concentrating solar energy technology avoided the discharge of 4,235 tCO₂/year/MWp.

محاكاة الاداء الطاقوي والاقتصادي والبيئي لتقنيات الطاقة الشمسية المركزة باستخدام SAM : ليبيا كحالة دراسية.

ياسر فتحي نصار، هالة جارالله الخزندار، محمد حسام أبوقيلة، أحمد أبوبكر، عبد الحكيم بشير بن مسكين، محمد محمد خليل، عبد السلام علي أحمد، عبد القادر الشريف، منعم المنفي.

ملخص: تهدف تنفيذا للخطة الاستراتيجية للحكومة الليبية في زيادة مساهمة الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة في خليط الطاقة الكهربائية لعام 2030 ليصل الى 30%، تأتي هذه الدراسة لتسلط الضوء على أنسب تقنيات الطاقة الشمسية المركزة والتي يمكن استخدامها في مجال توليد الطاقة الكهربائية. حيث تم محاكاة الاداء الطاقوي-الاقتصادي-البيئي لعدد خمس تقنيات من تقنيات الطاقة الشمسية المركزة (القطع المكافئ، والصحن الشمسي، وعاكسات فريزل الخطية، والبرج الشمسي، والخلايا الشمسية المركزة) ولعدد اثنين وعشرون مدينة في ليبيا. تم اعتماد تكلفة إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية (LCOE) كمرجع لاختيار التقنية المناسبة لكل موقع. كما تم ادراج تكلفة الضرر البيئي الناجم عن انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون CO₂ من محطات توليد الطاقة الكهربائية العاملة على الوقود الأحفوري في الحسابات الاقتصادية، هذا النهج يعطي فرصة عادلة للطاقات المتجددة والنظيفة للتنافس في سوق الطاقة حتى في الدول النفطية والدول التي تدعم الكهرباء. تشير النتائج أن تقنية المرايا الشمسية هي الأنسب في كافة مدن ليبيا حيث كانت LCOE الأقل من بين كافة التقنيات التي وضعت تحت الدراسة. حيث تراوحت قيمة LCOE حوالي (\$/kWh) 0.01 – 0.04 . وبلغت ادنى قيمة للطاقة السنوية المنتجة من حقل البرج الشمسي بقدرة 100MW حوالي 400.332 GWh. كما قدرت كمية CO₂ السنوية التي مُنعت من الانبعاث نتيجة لاستخدام تقنيات الطاقة الشمسية المركزة النظيفة بحوالي 4,235 tCO₂/year/MWp.

1. مقدمة

يُعتبر ازدياد قلق العالم حول المشاكل البيئية والتي تشكل تهديدا على الحياة البشرية والانظمة البيئية على الكرة الأرضية، مثل ظاهرة الاحتباس الحراري، وارتفاع درجة حرارة سطح الأرض، وتغير المناخ. ويعتبر غاز ثاني أكسيد الكربون (CO₂) المتهم الأول في هذه الظواهر جميعها. ويعتبر حرق الوقود الأحفوري لتوليد الطاقة الكهربائية والحرارية المصدر الأكبر لانبعاث غاز CO₂. ومن جهة أخرى، الالتزام بتلبية الطلب المتزايد على الطاقة بصفة عامة والطاقة الكهربائية بصفة خاصة والتي تمثل حوالي 68% من إجمالي إنتاج الطاقة العالمية. ويتوقع نمو في سوق الطاقة بمعدل سنوي يقارب 0.58% خلال الفترة 2020 – 2025، وهذا النمو بسبب زيادة الطلب على الطاقة الكهربائية وسيحدث بشكل رئيسي في محطات الطاقة الحرارية العاملة على الوقود الأحفوري [1]. تعتمد العديد من دول العالم بصورة كبيرة على حرق الوقود الأحفوري (الفحم الحجري، والنفط، والغاز الطبيعي) في صناعة الطاقة، وينتج عنه كميات كبيرة من غاز CO₂.

تعتبر محطات توليد الطاقة الكهربائية (79% من الكهرباء تأتي من حرق الوقود الأحفوري، ومعظمه من الفحم والغاز الطبيعي) المصدر الأكثر تلوثا من بين كافة القطاعات الأخرى ويمثل حوالي 25% من إجمالي انبعاثات غاز CO₂ في العالم [2]، وفي ليبيا يمثل حوالي 35% من إجمالي انبعاثات CO₂ [3].

ومن هذا المنطلق، سيمثل قطاع صناعة الطاقة الهدف المنشود في اجراءات تطيف تأثيرات غاز CO₂ والحد من التدهور البيئي، وذلك باعتماد النظم الكهربائية وكفاءة الطاقة كمحركين أساسيين لتحويل قطاع الطاقة نحو الطاقات الصديقة للبيئة والمستدامة، مثل: الطاقات المتجددة، والهيدروجين. وللتزام بتوصيات المؤتمرات والاتفاقيات الخاصة بالمناخ، وتخفيض درجة حرارة الأرض بمقدار 1.5°C يتطلب العمل الجاد وتكثيف الجهود لخفض انبعاثات غاز CO₂ بنحو 37.09 مليون طن في السنة بحلول عام 2050 [4].

في مؤتمر المناخ مؤتمر الأمم المتحدة للتغير المناخي 2022 (COP27) الذي عقد بمدينة شرم الشيخ بمصر في الفترة 6-18 / نوفمبر/ 2022؛ أعلنت العديد من دول العالم عن خططها الاستراتيجية للتحويل نحو توليد الكهرباء عن طريق الطاقات المتجددة التزاماً منها بمعاهدة باريس لتغير المناخ. ليبيا وكونها إحدى الدول المصدقة على جميع المعاهدات والاتفاقيات الخاصة بالتغير المناخي وعضو في الهيئة الحكومية الدولية المعنية بتغير المناخ (IPCC)؛ أعلنت عن خططها الاستراتيجية في جعل مساهمة الطاقات المتجددة في مزيج الطاقة الكهربائية المنتجة للعام 2030 يصل الى 30% وسيكون نصيب الطاقات المتجددة حوالي 60% من مزيج الطاقة بحلول عام 2050 [5].

تقع ليبيا في منتصف شمال أفريقيا وبمساحة 1,760,000 كيلومتراً مربعاً، ويقدر عدد سكانها بحوالي 6.735 مليون نسمة حسب احصائيات عام 2021. وتقع ليبيا في منطقة تسمى «الحزام الشمسي»، حيث يقدر الاشعاع الشمسي الكلي الافقي السنوي بحوالي (2300 kWh/m²) وبنفس القدر من الاشعاع الشمسي العمودي المباشر، ومتوسط عدد ساعات سطوع شمسي حوالي 3500 ساعة [6]. ويفضل في منطقة «الحزام الشمسي» التطبيقات الحرارية للطاقة الشمسية لتوليد الطاقة الكهربائية مثل: حقول المريا، ومركزات القطع المكافئ، ومركزات فريزل، والخلايا الشمسية المركزة، والصحون الشمسية المركزة [7]. وتحت هذه الظروف، تعد الطاقة الشمسية المركزة من أكثر التقنيات الواعدة في مجال توليد الطاقة الكهربائية كونها صديقة للبيئة ومستدامة وبتكلفة منافسة في سوق الطاقة حتى بالنسبة للدول المنتجة للنفط. بالإضافة الى وجود تجارب لمثل هذه التطبيقات في العالم [8] والدول المجاورة مثل: مصر [9] والمغرب [10]، والسعودية [11]، والامارات العربية المتحدة [12]، وفلسطين [13].

وبالرغم من المقدرات المثبتة للبلاد من الطاقة الشمسية، والتي كانت هدفا لإنشاء مشروع «الطاقة من الصحراء» الأوروبي والذي يهدف لتوليد الطاقة الكهربائية من تقنيات عديدة للطاقات الشمسية المركزة؛ إلا انه لا توجد دراسات محلية تغطي كافة البلاد الشاسعة، فهناك دراستان اجراها المركز الليبي لبحوث ودراسات الطاقة الشمسية لمدينتي طرابلس والزاوية، ودراسة أخرى لمدينة سبها في الجنوب الليبي.

اجريت جميع هذه الدراسات على حقل القطع المكافئ، وتم اثبات الجدوى الاقتصادية عن طريق إجراء محاكاة للنظام المقترح باستخدام برنامج (SAM) System Advisor Model. بينت نتائج الدراسة أنه يمكن توليد الطاقة الكهربائية بتقنية القطع المكافئ وبأسعار منافسة اقتصادياً. إلا ان الدراسات السابقة جميعها قدمت تحليلاً لنوع واحد من التقنيات لبعض المدن ولكن ليس لكل مدن ليبيا، كما لم تأخذ الدراسات السابقة التأثير البيئي بالحسبان. اقليمياً؛ في مصر؛ بحث Abdelhady في الأداء التقني والاقتصادي لمحطة الطاقة نوع الصحن الشمسي في ظل الظروف الصحراوية في مدينة بنبان بالقرب من مدينة أسوان في جنوب مصر. تم تصميم وإجراء محاكاة لاداء محطة طاقة بقدرة 50 ميجاوات باستخدام برنامج SAM. تم حساب الطاقة المنتجة السنوية وتكلفة وحدة الطاقة المنتجة (LCOE).

تظهر النتائج أن إنتاج الطاقة السنوي يقدر بحوالي (105 GWh) ويقدر LCOE بحوالي (13.38 ¢/kWh). وكمية انبعاثات غازات الدفيئة التي تم تجنبها حوالي 54 مليون طن سنوياً من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وكمية الوقود الأحفوري الموفرة تعادل 21.64 ألف طن من النفط المكافئ سنوياً [14].

اجريت دراسة في السعودية، تم اختبار أنواع مختلفة من تقنيات الطاقة الشمسية المركزة تحت الظروف المناخية لعشرة مواقع في جميع أنحاء المملكة العربية السعودية بهدف تحديد التقنية المناسبة لكل المواقع. حيث بينت الدراسة ان تقنية القطع المكافئ يعتبر المرشح الافضل في سوق الطاقة السعودي وبلغت تكلفة الكهرباء بحدود 6.0 – 22.0 سنتا/كيلوواط ساعة [15].

كما قدم Ali et al. تصميماً لمنظومة هجينة معزولة عن الشبكة الكهربائية العامة، وتتكون من مزرعة رياح وحقل صحون شمسية لتزويد مدينة الغردقة بمصر بالطاقة الكهربائية. تمت المحاكاة باستخدام برنامج SAM، بينت الدراسة ان أداء الصحن الشمسي أفضل من أداء الألواح الشمسية وذلك بسبب تأثير درجات الحرارة المرتفع في مدينة الغردقة. وبلغت قيمة LCOE حوالي (27.0 ¢/kWh) [16]. وفي نفس السياق لدراسة في الأردن؛ قدم Thabit et al. تصميماً لنظام هجين يتكون من محرقة نفايات ومحطة القطع المكافئ لتوليد الطاقة وتحلية المياه. يمكن توليد حوالي (34 MW) من الطاقة و حوالي (13,824 m³/day) من المياه. بلغت قيمة LCOE حوالي (11.0 ¢/kWh) وحالت دون انبعاث حوالي 2,450 طن شهرياً من CO₂ بسبب استخدام حقل القطع المكافئ [17]. أيضاً قدم Okonkwo et al. امكانيات والنهيات لادماج الطاقات المتجددة في الشبكة العامة للكهرباء لدولة قطر. بينت الدراسة انه يمكن الوصول الى نسبة مشاركة الطاقات المتجددة الى ما يقارب 80% . حيث تكونت المنظومة الهجينة المقترحة من 28.3% حقل خلايا شمسية، 23.4% مزرعة طاقة رياح، 38.2% حقل مرآة شمسية [18]. وهناك العديد من الدراسات حول العالم والتي ادخلت المركزات الشمسية كشريك في منظومات الطاقة الهجينة [19-23].

وفي السودان، قام Gamil et al. بتحليل تقني اقتصادي لإثنين من أكثر تقنيات الطاقة الشمسية المركزة انتشاراً، وهما برج الطاقة الشمسية وتقنية مركزات القطع المكافئ لإنتاج الكهرباء. تمت المحاكاة باستخدام SAM على ست مناطق. أشارت النتائج المتحصل عليها إلى أن منطقتان في الولاية الشمالية هما الأكثر ملاءمة لإنشاء محطات الطاقة

الشمسية المركزة. كما بينت الدراسة ان تقنية برج الطاقة الشمسية أفضل من مركبات القطع المكافئ، كما خلصت الدراسة بتقديم سياسات لتعزيز صناعة الطاقات المتجددة وتحقيق أهداف التنمية المستدامة في البلاد [24]. وفي ليبيا، قام Belgasim et al بدراسة إمكانية تسخير الطاقة الشمسية المركزة في توليد الكهرباء في ليبيا. حيث تم التحقيق بالتفصيل في تقييم معالم الموقع المطلوبة لمحطات الطاقة الشمسية المركزة بما في ذلك الموارد الشمسية والأراضي والتضاريس والموارد المائية والبنية التحتية.

بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء محاكاة اقتصادية لمحطة طاقة قطع مكافئ بقدرة 50 ميغاواط في مدينة طرابلس. كما أجريت مقارنة لنتائج الأداء مع محطة مرجعية Andasol-1 في إسبانيا. وقدرت تكلفة إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية الناتجة من المحطة حوالي (¢/kWh) 24.0. ويرجع سبب ذلك الارتفاع ان المحطة المقترحة تقع على الساحل الشمالي حيث تكون موارد الطاقة الشمسية عند أدنى حد لها مقارنة بالمناطق الأخرى في البلاد [25]. كما قدم Ehtiwesh et al. أيضاً تحليلاً لأداء المركبات الشمسية من نوع القطع المكافئ لمدينة طرابلس، وقدر LCOE بحوالي (¢/kWh) 17.0 [26]. كذلك قام Sharif and Eslayem بدراسة أداء عاكسات فريزل الخطية في مدينة سبها [27]. كما قام Sharif بتحديد أفضل اتجاه للمجمعات الشمسية من نوع القطع المكافئ لمدينة سبها [28]. وفي دراسة أخرى؛ أظهر تحليل الطاقة لمحطة القطع المكافئ في مدينة سبها؛ ان انتاجية الطاقة السنوية تبلغ (GWh) 406.26، وأن قيمة LCOE بلغت (¢/kWh) 13.0 وبلغ معامل القدرة حوالي 47.9% [29]. كما أجرى Abuashe et al. دراسة لأداء حقل شمسي من نوع القطع المكافئ بقدرة (MW) 30 لمدينة الزاوية - ليبيا، وتم تحديد المواصفات الهندسية للمحطة وان قيمة المضاعف الشمسي المثالي كانت 1.5، كما تم تقدير كمية غاز CO₂ السنوية التي منعت من الانتشار في الهواء الجوي جراء استخدام هذه المحطة وقدرت بحوالي 1,857 طنناً [30]. دولياً؛ وفي جنوب غرب أفريقيا قام المرابا الشمسية ومركبات القطع المكافئ، وكان كل منهما في موقعين مختلفين في غانا باستخدام برنامج (SAM). أظهرت نتائج المحاكاة أن قيمة LCOE والتي بلغت حوالي (¢/kWh) 13.67 و 14.73 لحقول المرابا الشمسية. سجلت أيضاً محطة توليد الكهرباء لمركبات القطع المكافئ التي تمت محاكاتها في موقعين أيضاً LCOE قدره (¢/kWh) 28.83 و 25.83. وخلصت الدراسة إلى أن تقنية حقول المرابا الشمسية هي النظام الأمثل لظروف الطقس الغائبة [31]. أجرى Islam et al. تحليلاً اقتصادياً تقنياً لعدة تقنيات للطاقة الشمسية المركزة (CSP) في ماليزيا، أعتمد فيه تقييم الموارد الشمسية في عدة مواقع باستخدام قاعدة بيانات ناسا للأرصاد الجوية. حيث تم تقييم ثلاث تقنيات مختلفة، مركبات القطع المكافئ، وحقل المرابا الشمسية، والصحن الشمسي المركز وفقاً لمعايير اقتصادية مختلفة. وقد أظهرت النتائج أن تقنيات مركبات القطع المكافئ وحقل المرابا الشمسية مناسبة بشكل خاص للمواقع في شرق وشبه جزيرة ماليزيا. واعتبر صافي القيمة الحالية ومعدل العائد كمؤشرات اقتصادية لاختيار أفضل التقنيات. وعليه فقد وُجد أن تقنية مركبات القطع المكافئ ستكون الأكثر تأهيلاً لتطوير صناعة الطاقة الشمسية المركزة في ماليزيا. وتم أيضاً إجراء تحليل الحساسية للتحقق من تأثير سعر بيع وحدة الطاقة الكهربائية المنتجة على الفترة الزمنية لاسترداد رأس المال. اختتمت الدراسة بوضع استراتيجيات وسياسات لتطوير صناعة الطاقة المتجددة الإقليمية، واوصت بإشراك أنظمة الطاقات المتجددة الهجينة مع الغاز الحيوي والكتلة الحيوية [32].

وفي باكستان قام Tahir et al. بتحليل الوضع الحالي والآفاق المستقبلية لإنتاج الطاقة النظيفة من محطات الطاقة الشمسية المركزة (CSP)، تم اختيار سنة مواقع محتملة لإنشاء محطات الطاقة الحرارية الشمسية على أساس تقييم الموارد الشمسية وتوافر الأراضي والبنية التحتية. أجريت محاكاة محطة الطاقة الحرارية الشمسية لهذه المواقع باستخدام برنامج (SAM). وتم الحصول على الحجم المثالي لحقل المركبات الشمسية وكذلك لمنظومة تخزين الطاقة الحرارية، وذلك للحصول على الحد الأدنى من تكلفة وحدة الطاقة الكهربائية المنتجة LCOE لكل المواقع. أشارت النتائج إلى أن وحدة الطاقة الكهربائية المنتجة في ظل التصميم الأمثل لمحطة مركبات القطع المكافئ يمكن تقليله إلى 14.7 سنتاً/كيلوواط ساعة. كما أبرز دور البنية التحتية مثل خطوط النقل والمياه والشبكة الكهربائية، فبغض النظر عن ان قيمة LCOE كانت الأعلى في منطقة ما، الا ان وجود بنية تحتية مناسبة جعلها موقعا أكثر ملاءمة لتكوين محطة الطاقة الحرارية الشمسية [33]. كما قام Kamel et al. بفحص الإمكانيات التقنية والاقتصادية لمحطات الطاقة الشمسية المركزة على تقنية فريزل وتقنية حقول المرابا الشمسية المركزة لتوليد الكهرباء في دول شرق إفريقيا مع دراسة الحالة عن إثيوبيا. أجريت محاكاة باستخدام برنامج (SAM) من أجل تقدير المؤشرات الاقتصادية لمحطتي الطاقة، واعتمدت وحدة الطاقة الكهربائية المنتجة (LCOE) وصافي القيمة الحالية (NPV) كمرجعية للمقارنة. أنتجت محطة فريزل طاقة سنوية تبلغ 528 تيراواط ساعة بمعامل قدرة (CF) 60.3%، بينما أنتجت محطة حقل المرابا طاقة سنوية بلغت 540 تيراواط ساعة عند CF حوالي 61.9%، وبلغت تكلفة وحدة الطاقة الكهربائية المنتجة في حقل المرابا حوالي 9.44 سنتاً/كيلوواط ساعة مقابل 10.35 سنتاً/كيلوواط ساعة فريزل. وكنتيجة للمحاكاة تم تحديد تقنية حقل المرابا كأفضل تقنية لتوليد الكهرباء في ظل الظروف المناخية في إثيوبيا [34]. قام Ahmad and Zaashan بفحص مدى ملاءمة تقنية مركبات القطع المكافئ لعدة مواقع مختلفة في باكستان

باستخدام برنامج المحاكاة SAM. تمت المحاكاة بالأخذ بعين الاعتبار تكلفة استخدام المياه في تقدير تكلفة وحدة الكهرباء المنتجة LCOE إلى جانب معايير أخرى، وقدرت بحوالي 9.6 سنتا/كيلوواط ساعة، وتم أيضا العثور على تسعة مواقع لديها إمكانات توليد أكبر من 1200 تيرا واط ساعة/سنة [35].

عرض Hernández et al. خريطة محتملة لإنشاء محطات الطاقة الشمسية بتقنية حقول المرايا اعتمادا على الظروف المناخية ووفرة الإشعاع الشمسي في تشيلي. أجريت المحاكاة على محطة طاقة شمسية مركزة بقدرة 130 ميغاواط لتقدير إنتاج الكهرباء السنوي لكل المواقع، لتحديد التكاليف الرأسمالية والتشغيلية وتكلفة إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية. وكشفت النتائج عن مناطق ذات إمكانات كبيرة لتطوير محطات الطاقة الشمسية المركزة على نطاق واسع، وبالتالي تحقيق تكلفة منخفضة المستوى للطاقة، حيث بلغ متوسط التكلفة 8.9 سنتا/كيلوواط ساعة، وفي بعض المناطق بلغت القيمة حوالي 7.6 سنتا/كيلوواط ساعة [36].

أجرى Sultan et al. تقييما تقنيا لمركزات القطع المكافئ لتوليد الكهرباء في الكويت، وقد تم إجراء التقييم على محطة عاملة في إسبانيا، وقد تجاوز الإشعاع العمودي المباشر (DNI) في إسبانيا مثيله في الكويت بفارق 176.2 كيلوواط ساعة/مترا مربعا. ولكن الأداء العام للمحطة في الكويت يفوق أدائها في إسبانيا مع التبريد الرطب، وتجاوز صافي إنتاج الكهرباء السنوي في حالة الكويت إنتاج إسبانيا بمقدار 14,534 ميغاواط ساعة مع التبريد الجاف، وتوصلت النتائج إلى أن المضاعف الشمسي الأمثل هو 3.3 وهو ما يقابل أدنى وحدة إنتاج للطاقة الكهربائية وهو 15.0 سنتا/كيلوواط ساعة وبوجود تخزين حراري لمدة 16 ساعة [37]. وفي الصين قام Ling-zhi et al. بدراسة الأداء الاقتصادي لصناعة الطاقة الشمسية المركزة، حيث بينت النتائج أن تقنية الأبراج الشمسية تعتبر الأفضل اقتصاديا لصناعة الطاقة الشمسية المركزة في الصين، مقارنة بمركزات القطع المكافئ وتقنيات فريزل، وبلغت متوسط تكلفة وحدة الطاقة الكهربائية المنتجة حوالي 14.8 سنتا/كيلوواط ساعة [38].

وتتميز الدراسة الحالية عن الدراسات السابقة [25،26]؛ بشموليتها حيث قامت الدراسة الحالية بدراسة الجدوى الاقتصادية لخمس تقنيات مركزات شمسية لإنتاج الطاقة الكهربائية ولعدد 22 موقعا في ليبيا (كما هو مبين في الشكل 1). كما تميزت هذه الدراسة عن الدراسات السابقة بادراج العامل البيئي في الحسابات الاقتصادية، الأمر الذي سيدعم صناعة الطاقة المتجددة والصدقية للبيئة وإيجاد ميزان عادل لتقييمها مقارنة بالطاقات التقليدية الأخرى. جغرافيا، تمت الأراضي الليبية على رقعة واسعة، ويتضاريس مختلفة (الجبال والوديان والسهول الصحارى)، وبظروف مناخية متباينة، وعليه فمن الصعب تحديد تقنية معينة من التقنيات العديدة لتوليد الطاقة الكهربائية من الطاقة الشمسية دون إجراء مسح شامل لمقدرات البلاد واستنادا على معلومات مناخية حقيقية. وعليه يهدف هذا البحث الى تحديد التقنية المناسبة لكل موقع في ليبيا على اساس تكلفة وحدة إنتاج الطاقة LCOE. وذلك عن طريق تقسيم البلاد الى مقاطعات على اساس التضاريس والمناخ السائد في المقاطعة، وحساب انتاجية الحقول الشمسية المختلفة وتحديد LCOE لكل تقنية وبالتالي سيتم اختيار التقنية الأقل تكلفة لكل مقاطعة. استخدم البحث المعلومات المناخية المقدمة من منصة Solargis وبرنامج المحاكاة (SAM). تباعا، تنقسم هيكلية البحث الى ثلاثة أجزاء أخرى، قدم الجزء الثاني مراجعة سريعة لتقنيات الطاقة الشمسية المركزة. ودرجت المنهجية المتبعة في تحليل الطاقة والاقتصاد والبيئة في الجزء الثالث «منهجية البحث»، بينما مثلت النتائج المتحصل عليها بيانيا ونوقشت تباعا في الجزء الرابع «النتائج والمناقشة»، وصيغ ما خلصت اليه الدراسة في الجزء الخامس «الاستنتاجات»، واختتمت بقائمة المراجع المستخدمة في البحث.



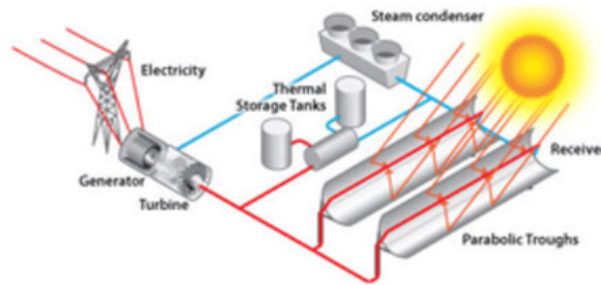
الشكل (1): خارطة ليبيا مبينا عليها المدن التي تمت دراستها

2. تقنيات الطاقة الشمسية المركزة

توجد خمس تقنيات تجارية مختلفة لتوليد الكهرباء باستخدام الطاقة الشمسية. وتتميز هذه التقنيات بقدرتها على تركيز الأشعة الشمسية وتحويلها إلى طاقة حرارية، ومن ثم توليد الكهرباء بشكل فعال. تشير الاحصائيات الى ان مجموع القدرات المركبة من محطات الطاقة الشمسية المركزة حول العالم بلغت 6.48 جيجاوات [39]. وسيتم تسليط الضوء على تقنيات الطاقة الشمسية المركزة في هذا الجزء بايجاز.

1.2. القطع المكافئ

يتم تصنيع أنظمة القطع المكافئ الشمسية بثني صفيحة من المعدن المصقول العاكس على شكل قطع مكافئ، ويتم وضع أنبوب معدني أسود مغطى بأنبوب زجاجي على طول الخط البؤري لجهاز الاستقبال لتقليل فقد الحرارة، كما هو موضح في الشكل (2). ونظرًا للخبرة الكبيرة في تطوير أنظمة القطع المكافئ وتصنيعها، فإن تقنية القطع المكافئ تعتبر الأكثر تقدمًا بين تقنيات الطاقة الشمسية المركزة. ويتميز هذا النوع من التقنية بكفاءة عالية في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية، وهو يعد نظامًا فعالًا لإنتاج الطاقة الكهربائية في المناطق التي تتوفر فيها أشعة الشمس بكثافة، مثل المناطق الصحراوية. وتعد تقنية القطع المكافئ من بين التقنيات الشمسية المركزة الأكثر استخدامًا في العالم، وتستخدم في العديد من التطبيقات، بما في ذلك توليد الكهرباء، وتسخين المياه، وتدفئة المساكن. وتبلغ القدرات المركبة حول العالم حوالي 4.868 جيجاوات [39]. وتتميز هذه التقنية برخص تكلفتها، مما يجعلها خيارًا مثاليًا لتوليد الطاقة الكهربائية بطريقة صديقة للبيئة واقتصادية في نفس الوقت [40].

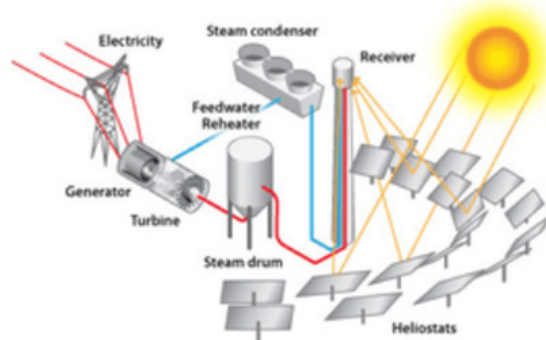


الشكل (2): محطة القطع المكافئ

[Source: <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph240/rajavi1>]

2.2. البرج الشمسي

تستخدم تقنية البرج الشمسي، في المنشآت الواسعة المخصصة لتوليد الطاقة الشمسية المركزة. يتكون النظام من برج مركزي محاط بعدد كبير من العاكسات التي تحتوي على أنظمة تتبع ثنائية المحاور، كما هو موضح في الشكل (3). وتتميز هذه التقنية بأنها تركز الأشعة الشمسية على جهاز استقبال مركب في أعلى البرج المركزي، ويتم استخدام موانع مثل الماء والملح المنصهر والهواء المضغوط. ويتم تصنيف تقنية البرج الشمسي إلى ثلاثة تكوينات، وذلك بناءً على محاذاة جهاز الاستقبال.



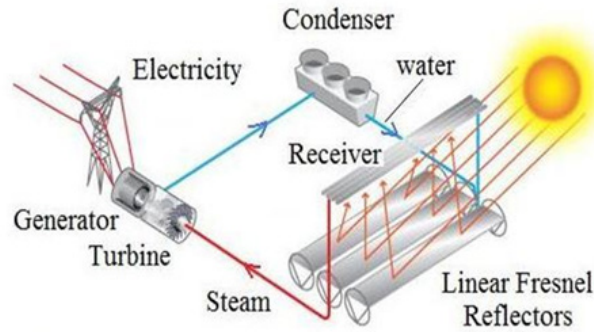
الشكل (3): محطة البرج الشمسي

[Source: <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph240/rajavi1>]

وتهدف هذه التكوينات إلى تقليل تأثيرات الظل للمظلات الشمسية، ويفضل استخدامها في المنشآت الواسعة المخصصة لتوليد الطاقة، حيث تنتج طاقة حوالي مئات الميغاواط الكهربائية [40]. وتعتبر تقنية برج الاستقبال المركزي تقنية أحدث من تقنية القطع المكافئ، وتحتاج إلى مساحة حوالي 4.6 م²/ميغاواط ساعة/سنة. ويتم استخدام هذه التقنية في توليد الطاقة الكهربائية، وتسخين المياه، وتدفئة المباني، وتعد خيارًا مثاليًا للتحويل إلى مصادر الطاقة المتجددة والصدقية للبيئة وتبلغ القدرات المركبة حول العالم حوالي 1.623 جيجاوات [39].

3.2. عاكسات فريزل الخطية

تستخدم عاكسات فريزل الخطية المرايا المستوية لتركيز الإشعاع الشمسي على الأنابيب الماصة، كما هو موضح بالشكل (4). وتستخدم تقنية تركيز البؤرة الخطية المشابهة لتقنيات القطع المكافئ. ومع ذلك، فإن لديها كفاءة بصرية أقل بسبب عدة عوامل، بما في ذلك خسائر أكبر بسبب حجب الإشعاع الشمسي المنعكس بواسطة المرايا المجاورة وعند زوايا ارتفاع منخفضة للشمس، كذلك التظليل من انبوب الاستقبال. وتعمل هذه التقنية عن طريق تركيز الإشعاع الشمسي على صف من الأنابيب الماصة الموجودة في محور العاكس لفريزل الخطي. وتقوم المرآة بتوجيه الإشعاع الشمسي المنعكس باتجاه الأنابيب الماصة، وذلك عن طريق تركيز الضوء على صف من الأنابيب في نفس الوقت. وتتميز هذه التقنية بأنها تتطلب تكاليف رأسمالية أقل من القطع المكافئ، وتستخدم في توليد الطاقة الكهربائية وتسخين المياه وغيرها من التطبيقات الصناعية والتجارية [40].

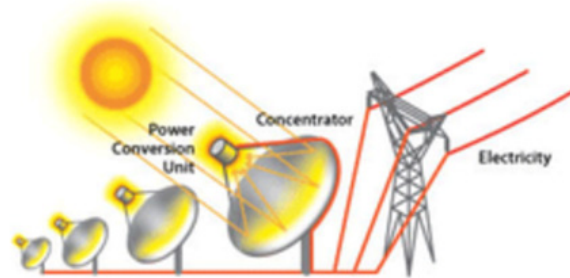


الشكل (4): محطة فريزل الخطية

[Source: <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph240/rajavi1>]

4.2. الصحن الشمسي

يتكون الصحن الشمسي من طبق مكافئ يحتوي على نظام تتبع على محورين، كما هو موضح بالشكل (5). تتركز الأشعة في البؤرة؛ النقطة التي يتم فيها وضع محرك ستيرلينغ أو مبادل حراري. ويتم توفير مبادل حراري داخل جهاز الاستقبال، الذي يسمح بنقل الحرارة إلى سائل العمل. يشبه هذا الجهاز هوائي طبق القمر الصناعي. تعتبر تقنية الصحن الشمسي وخاصة الكبيرة منها مكلفة التصنيع بسبب الدقة العالية المطلوبة في تصنيعها، مما يزيد من تكلفة الإنتاج. وتواجه هذه المجمعات صعوبات في النقل بسبب حجمها الكبير. وتستخدم مجمعات الأطباق المكافئة في توليد الطاقة الشمسية وتسخين المياه في المناطق التي تتمتع بإشعاع شمسي عالي [40].

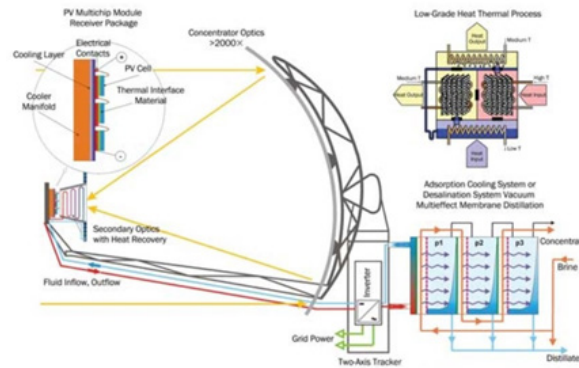


الشكل (5): محطة الصحن الشمسي

[Source: <http://large.stanford.edu/courses/2013/ph240/rajavi1>]

5.2. الخلايا الشمسية المركزة

تعتبر الخلايا الشمسية المركزة تقنية حديثة في مجال توليد الطاقة الشمسية، وتتميز هذه الخلايا بقدرتها على تركيز الإشعاع الشمسي على الخلية الشمسية، مما يزيد من كفاءتها في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. تتكون الخلايا الشمسية المركزة من عدسات مركزة تستخدم لتركيز أشعة الشمس على مادة شبه موصلة، مما يزيد من كثافة الطاقة الواردة إلى الخلية، كما هو مبين في الرسم التوضيحي في الشكل (6). وتتميز هذه التقنية بكفاءة عالية مقارنة بالخلايا الشمسية العادية، حيث يمكنها تحويل أكثر من 40% من الطاقة الشمسية المتاحة إلى طاقة كهربائية. وتستخدم الخلايا الشمسية المركزة في توليد الطاقة الكهربائية للمنازل والمباني الصناعية، وكمصادر طاقة للأنظمة الإلكترونية والاتصالات والأقمار الصناعية. ومن أهم مزايا الخلايا الشمسية المركزة هي قدرتها على توليد الطاقة الكهربائية في المناطق ذات الإضاءة المنخفضة، وتقليل حجم الخلايا الشمسية المستخدمة في التطبيقات الشمسية، مما يساعد على تقليل تكلفة التصنيع والتركيب [40].



الشكل (6): محطة الخلايا الشمسية المركزة

[Source: https://www.photonics.com/Articles/Concentrating_the_power_of_2000_suns/a54279]

3. منهجية البحث

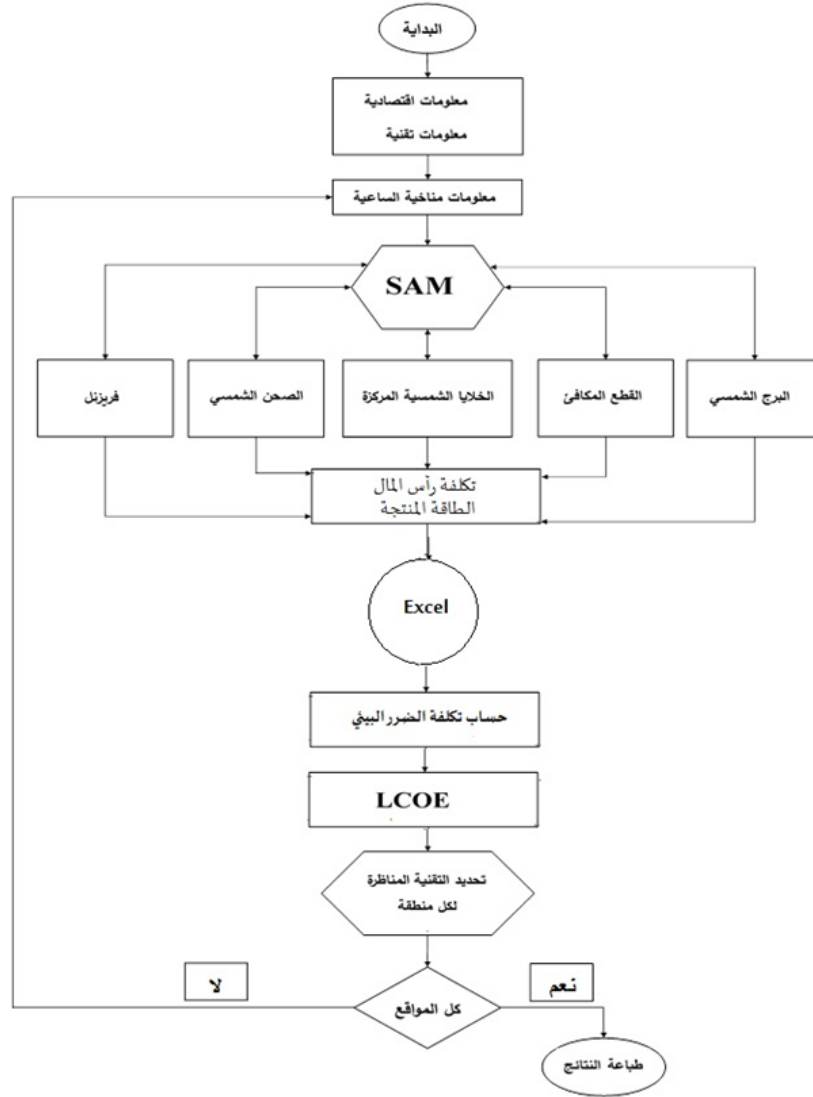
في هذا البحث تم تحليل الجدوى الاقتصادية لعدة تقنيات من الطاقة الشمسية المركزة ولعدد 22 موقعا في ليبيا. ولعدم وجود المعلومات المناخية للعديد من هذه المواقع، فقد تم الحصول على المعلومات المناخية من شركة SolarGIS والتي قدمت هذه المعلومات مجانا.

أجريت المحاكاة الديناميكية باستخدام برنامج System Advisor Model (SAM version 2020.11.29) المقدم من معمل بحوث الطاقات المتجددة القومي NREL [41]؛ للحصول على المؤشرات الطاقوية والاقتصادية ومنها: الطاقة السنوية المنتجة وتكلفة رأس المال لكل تقنية ولكل موقع. أسقطت نتائج المحاكاة على منظومة توليد الطاقة الكهربائية في ليبيا وتم حساب تكلفة الضرر البيئي الناتج عن انبعاث غاز CO₂ من محطات توليد الطاقة التقليدية في ليبيا. غُولجت النتائج البيئية والاقتصادية والطاقوية للوصول إلى سعر وحدة الطاقة الكهربائية المنتجة LCOE، والتي تم اعتبارها كمؤشر للجدوى الاقتصادية، بحيث يثل أقل قيمة للمؤشر LCOE أفضل خيار للموقع. الشكل (7) يوضح المخطط الانسيابي لمنهجية البحث المتبعة في هذه الدراسة.

هناك العديد من مؤشرات الطاقة للحقول الشمسية، ويعتبر معامل القدرة (Capacity Factor - CF) من أهمها، ويعرف على أنه النسبة بين الطاقة السنوية المنتجة من الحقل إلى تلك التي يجب إنتاجها على مدار السنة، وتصاغ على الصورة التالية [40]:

$$CF = \frac{E_{pro}}{P \times 8760} \quad \dots\dots\dots(1)$$

حيث E_{pro} = الطاقة المنتجة سنويا (MWh/year). و P = قدرة الحقل (MW). والعدد 8760 يمثل عدد ساعات السنة. يمكن حساب وحدة إنتاج الطاقة الكهربائية من المعادلة التقليدية لحساب LCOE [42]، ومن تم طرح قيمة الضرر البيئي منها لتصبح على الصورة التالية [43]:



الشكل (7): المخطط الانسيابي للدراسة

$$LCOE = \frac{\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \times C + O \& M - C_{CO_2}}{E_{pro}} \quad \dots\dots(2)$$

حيث أن: i = معدل الفائدة السنوي (8%)، n = عمر المحطة بالسنة، C = تكلفة رأس المال \$، $M\&O$ = تكاليف التشغيل والصيانة (\$/year) و C_{CO_2} = التكلفة البيئية للملوثات التي يدفعها المجتمع جراء استخدام الوقود الاحفوري والتي يمكن ان يتم تفاديها باستخدام الطاقة المتجددة، و E_{pro} = الطاقة المنتجة سنويا (MWh/year). كما يمكن تقدير كمية CO_2 السنوية (M_{CO_2}) التي حبست جراء استخدام محطات الطاقة الشمسية المركزة من المعادلة (3) [44]:

$$M_{CO_2} = EF_{CO_2} \times E_{pro} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ويحسب تكلفة الضرر البيئي C_{CO_2} من المعادلة (4) [45]:

$$C_{CO_2} = EF_{CO_2} \times E_{pro} \times \phi_{CO_2} \quad \dots\dots\dots(4)$$

حيث يمثل EF_{CO_2} معامل انبعاث غاز CO_2 والذي يساوي 0.967 ($kgCO_2/kWh$) [46]، و ϕ_{CO_2} تكلفة الضرر البيئي وتقدر بحوالي 75 (\$/ton CO_2) [47]. أو يمكن اعتبارها 79 (\$/tonGHG) [48].

1.3. البيانات الاقتصادية والتصميمية والتشغيلية لتقنيات الطاقة الشمسية المركزة

تعتبر البيانات الاقتصادية أهم عناصر التصميم التي يعتمد عليها برنامج المحاكاة SAM، وبالرغم من أهميتها فإن هناك تضاربا كبيرا بين هذه القيم. وتعتبر IRENA [49] مصدرا موثوقا للبيانات الاقتصادية والتشغيلية للعديد من تقنيات الطاقات المتجددة، وفي حالة عدم وجودها في IRENA تم اعتماد البيانات الموجودة في المقالات العلمية المنشورة في المجالات المحكمة المصنفة. كما تعتبر هذه البيانات مصدراً من مصادر الالايقين المعلن عنها في هذا العمل في الفقرة 2.2. جدولت الخصائص الفنية والاقتصادية لجميع تقنيات الطاقة الشمسية المركزة في الجدول (1).

الجدول 1: الخصائص الفنية والاقتصادية لتقنيات الطاقة الشمسية المركزة

المقياس	القطع المكافئ [50]	المرابا البرج الشمسي [51]	الصحن الشمسية [15]	عاكسات فريزيل [15]	الخلايا الشمسية المركزة [15]
رأس المال \$/kWp	4,450	5,940	2,910	6,530	5,160
الصيانة والتشغيل	66\$/kWh-year 0.02 \$/kWh	66\$/kWh-year 0.02 \$/kWh	75\$/kWh-year	66 \$/kWh-year 0.02 \$/kWh	42\$/kWh-year
عمر المحطة، سنة	25	25	25	25	25
عدد ساعات التخزين	14	14	-	14	-
المضاعف الشمسي	2.4	2.4	-	2.4	-
مساحة الارض m ² /MWp	3,330	7,655	900	1,810	255

أدرجت العديد من المواصفات التقنية والاقتصادية لجميع التقنيات الخمس في الملاحق الجداول (1 – 5).

2.3. فرضيات وحدود الدراسة ومصادر الالايقين في النتائج

اعتمدت الفرضيات التالية عند إجراء الدراسة:

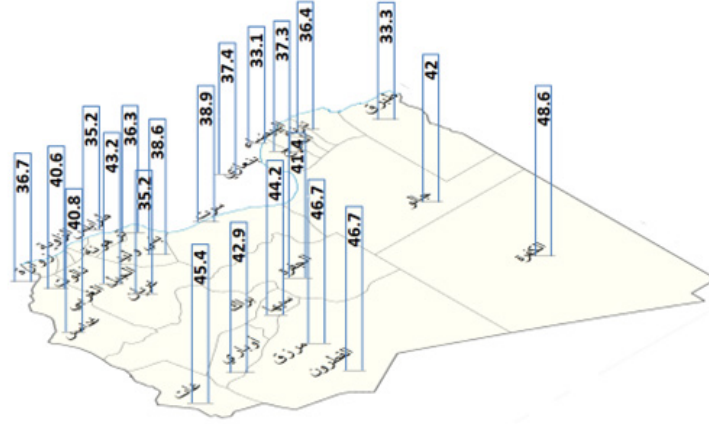
- وجود البنية التحتية اللازمة لنقل وتوزيع الطاقة المنتجة من أنظمة الطاقة المتجددة المقترحة.
 - تكلفة التشغيل والصيانة ثابتة.
 - عدم احتساب التكاليف الغير مباشرة والتي تشمل: الضرائب والاستشارات الهندسية، تكلفة شراء وتمهيد الارض ... الخ
 - الكفاءة ثابتة لجميع التقنيات.
 - الانتاجية ثابتة على طول عمر المحطة.
 - معامل انبعاث غاز ثاني اكسيد الكربون واحد لكل محطات توليد الكهرباء.
- تعتبر دراسة حساسية الحسابات الاقتصادية لظروف تغيير اسعار معدات الطاقات المتجددة وأسعار النفط احد اهم حدود الدراسة الحالية، والتي سيفرغ لها الباحثون دراسة خاصة لتعيين حساسية النتائج لبعض البارامترات، وكذلك تأثير الالايقين في النتائج على اتخاذ القرارات.
- أشار Nassar et al. بأن المعلومات والبيانات، مثل البيانات المناخية ومعلومات المُصنَّع، تعتبر أكبر مصدرًا للالايقين في الدراسات الهندسية الطاقوية والاقتصادية والبيئية. كما تعتبر التكلفة المباشرة وغير المباشرة لمرافق الطاقة المتجددة وتكاليف التشغيل والصيانة مصادر أخرى لعدم اليقين. ويسهم نقص المعلومات الاقتصادية، مثل التسهيلات المصرفية المتاحة للحصول على القروض وأسعار الأراضي والفوائد والتضخم، في زيادة عدم اليقين في الأرقام النهائية للدراسات الاقتصادية للطاقة المتجددة.

4. النتائج والمناقشة

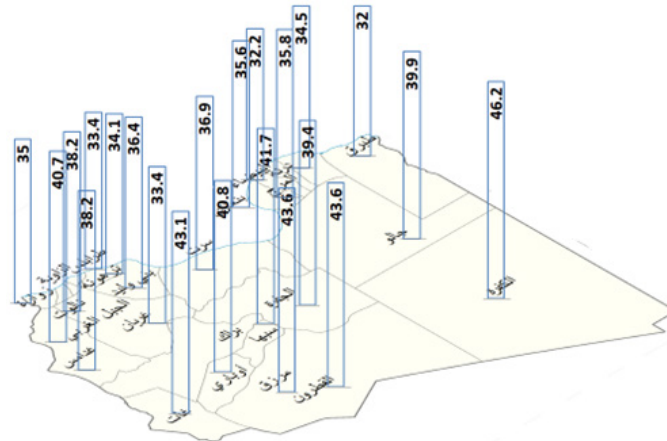
تم في هذه الدراسة إجراء التحليل الثلاثي: الطاقة – الاقتصاد – البيئة لاثنتين وعشرون مدينة في ليبيا، لاختبار الجدوى الاقتصادية لخمس تقنيات من الطاقة الشمسية المركزة. أجري تحليل الطاقة عن طريق برنامج المحاكاة الديناميكي SAM.

1.4. التحليل الطاقوي

هناك العديد من المؤشرات الهامة الدالة على الاداء الطاقوي للمنظومات الشمسية التي يمكن الحصول عليها من مخرجات برنامج المحاكاة SAM، الا انه في هذا البحث تم اعتبار معامل القدرة كمؤشر على انتاجية الحقول الشمسية. مثلت النتائج المتحصل عليها بيانيا في الاشكال (8-12).

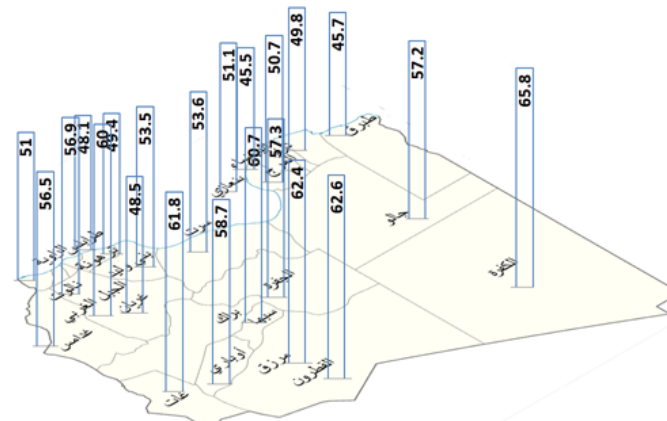


الشكل (8): معامل القدرة لحقل القطع المكافئ بقدرة (100 MW)

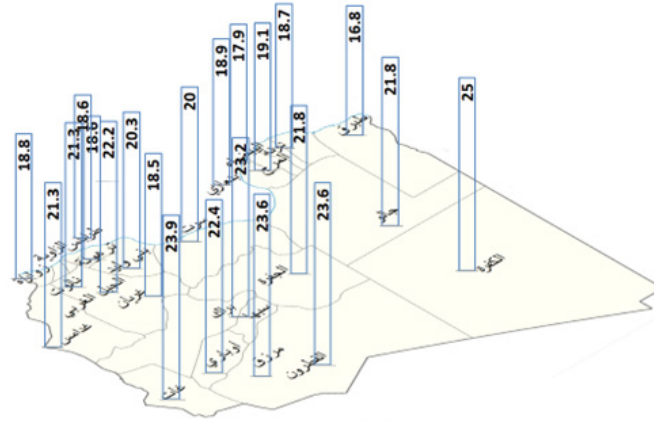


الشكل (9): معامل القدرة لحقل عاكسات فرينيل الخطية بقدرة (100 MW)

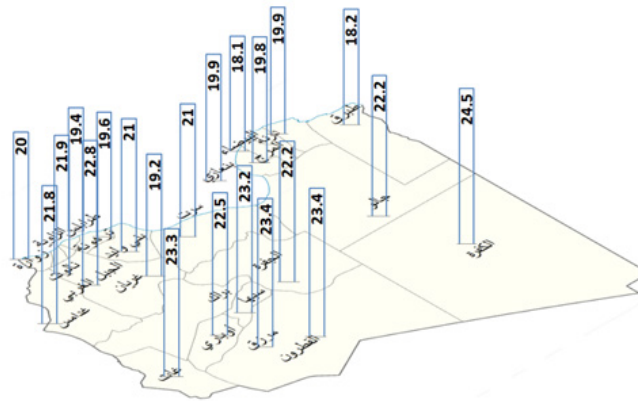
حيث يعرض الشكل (8، 9، 10، 11، 12) الطاقة الكهربائية المنتجة سنويا على صورة معامل القدرة (CF) من حقل القطع المكافئ، وحقل عاكسات فرينيل الخطية، وحقل البرج الشمسي، وحقل الصحون الشمسية، وحقل الخلايا الشمسية المركزة، على التوالي، وبقدرة (100 MW) وعدد ساعات تخزين حوالي 14 ساعة لكل حقل شمسي مركز.



الشكل (10): معامل القدرة لحقل البرج الشمسي بقدرة (100 MW)



الشكل (11): معامل القدرة لحقل الصحون الشمسية المركزة بقدرة (100 MW)



الشكل (12): معامل القدرة لحقل الخلايا الشمسية المركزة بقدرة (100 MW)

الجدول 2: تكلفة وحدة إنتاج الطاقة الكهربائية بدون احتساب الضرر البيئي

المدينة	تقنية المركبات الشمسية			
	القطع المكافئ	فريزل	الصحن الشمسي	البرج الشمسي
البيضاء	0.15	0.16	0.16	0.24
الجبيل الغربي	0.11	0.13	0.13	0.19
القطرون	0.1	0.12	0.12	0.19
الكفرة	0.1	0.11	0.11	0.18
المرج	0.13	0.15	0.15	0.22
أوباري	0.11	0.13	0.13	0.2
بنغازي	0.13	0.15	0.15	0.22
بني وليد	0.13	0.14	0.13	0.21
ترهونة	0.13	0.15	0.15	0.23
جالو	0.12	0.13	0.13	0.2
درنة	0.13	0.15	0.15	0.22
زوارة	0.13	0.15	0.15	0.22
سيها	0.11	0.12	0.12	0.19
سرت	0.13	0.14	0.14	0.21
طبرق	0.15	0.16	0.17	0.24
طرابلس	0.14	0.16	0.15	0.23
غات	0.11	0.12	0.12	0.19
غدامس	0.12	0.14	0.13	0.2
غريان	0.14	0.16	0.15	0.23
مرزق	0.11	0.12	0.12	0.19
نالوت	0.12	0.14	0.13	0.2
هون	0.12	0.13	0.13	0.2

2.4. التحليل الاقتصادي

يعتبر برنامج SAM برنامجاً ديناميكياً لمحاكاة أداء طيف واسع من الطاقات المتجددة، والذي يمكن عن طريقه إجراء دراسة اقتصادية لحساب بعض المؤشرات الاقتصادية والطاقوية العامة مثل: الانتاجية السنوية، ومعدل القدرة، و LCOE وايضا تكلفة رأس المال والقيمة الحالية الصافية (Net Present Value- NPV). تم اعتماد LCOE كمؤشر لاختيار أفضل تقنية لموقع محدد. ادرجت قيم LCOE المتحصل عليها من برنامج SAM في الجدول (2) وبدون احتساب تكلفة الضرر البيئي. يتضح من الجدول (2) أن تقنية الابراج الشمسية تعتبر المرشح الواعد لاستغلال الطاقة الشمسية المركزة لكل مدن ليبيا. غير أن الطاقة المنتجة من تقنيات الطاقة الشمسية المركزة أعلى من تلك المنتجة من تقنية الخلايا الشمسية $(\$/kWh)$ 4.1-8.8 [52]، وايضا من طاقة الرياح $(\$/kWh)$ 5.1-11.1 [53]. هذه النتائج مطابقة لتلك المتحصل عليها في محاكاة أداء الحقول الشمسية للمعمل القومي للطاقات المتجددة NREL [50]، [51].

3.4. التحليل البيئي

ان احتساب الضرر البيئي الناجم من انبعاثات غاز CO_2 من مداخل محطات توليد الطاقة الكهربائية يعطي فرصة عادلة للطاقات المتجددة والنظيفة للتنافس في سوق الطاقة حتى في الدول النفطية والدول التي تدعم الكهرباء. العديد من الارقام اعتمدت لمعالجة الضرر البيئي، استنادا الى التقارير الاخيرة لوكالة IPCC لتلخيص ضرر التغير المناخ يجب التعويض بما قيمته $(\$/tGHG)$ 170 بحلول عام 2030 للحيلولة دون ارتفاع درجة حرارة الارض اكثر من $1.5^\circ C$ [54]. الا ان مؤتمر COP27 أوصى بقيمة قدرها $(\$/tCO_2)$ 75 [55] ليتمكن العالم من الوفاء بالتزامات مؤتمر باريس، ومن المتوقع أن تصبح $(\$/tCO_2)$ 85 في نهاية هذا العقد [56]. تم اعتماد قيمة $(\$/tCO_2)$ 75 في هذا البحث، وهي القيمة التي اعتمدها العديد من البحوث محليا واقليميا [45]، [47]. جدولت النتائج في الجدول (3). وكما هو مبين بالجدول (3) وبهذا النهج يمكن لتقنيات الطاقة الشمسية المركزة الاربعة الاولى ان تنافس في سوق الطاقة المحلي جميع البدائل الاخرى وحتى التوليد التقليدي باستخدام الوفود الاحفوري حيث يبلغ LCOE الحقيقي في ليبيا بحدود (LD/kWh) 0.18 [40]. كما وان العائد سيكون مجديا؛ وذلك لان الشركة العامة للكهرباء حددت سعر شراء الطاقة الكهربائية النظيفة من المستثمرين بقيمة $(\$/kWh)$ 0.10 [53].

الجدول 3: تكلفة وحدة انتاج الطاقة الكهربائية LCOE باحتساب الضرر البيئي

المدينة	تقنية المركبات الشمسية				القطع المكافئ	فرينل	الصحن الشمسي	البرج الشمسي	الخلايا المركزة
	القطع المكافئ	فرينل	الصحن الشمسي	البرج الشمسي					
البيضاء	0.08	0.09	0.09	0.04	0.17				
الجبل الغربي	0.04	0.06	0.06	0.02	0.12				
القطرون	0.03	0.05	0.05	0.01	0.12				
الكفرة	0.03	0.04	0.04	0.01	0.11				
المرج	0.06	0.08	0.08	0.03	0.15				
أوباري	0.04	0.06	0.06	0.02	0.13				
بنغازي	0.06	0.08	0.08	0.03	0.15				
بنى وليد	0.06	0.07	0.07	0.03	0.14				
ترهونة	0.06	0.08	0.08	0.04	0.16				
جالو	0.05	0.06	0.06	0.02	0.13				
درنة	0.06	0.08	0.08	0.03	0.15				
زوارة	0.06	0.08	0.08	0.03	0.15				
سيها	0.04	0.05	0.05	0.02	0.12				
سرت	0.06	0.07	0.07	0.03	0.14				
طبرق	0.08	0.09	0.09	0.04	0.17				
طرابلس	0.07	0.09	0.09	0.04	0.16				
غات	0.04	0.05	0.05	0.01	0.12				
غدامس	0.05	0.07	0.07	0.02	0.13				
غريان	0.07	0.09	0.09	0.04	0.16				
مرزق	0.04	0.05	0.05	0.01	0.12				
نالوت	0.05	0.07	0.07	0.02	0.13				
هون	0.05	0.06	0.06	0.02	0.13				

و قدر Makhzom et al. معامل انبعاث غاز CO_2 (EF_{CO_2}) لقطاع صناعة الطاقة الكهربائية في ليبيا بحوالي 0.967 ($kgCO_2/kWh$) [46]، وبالتالي فإن كمية CO_2 التي يمكن منعها من الانطلاق في الهواء تقدر بحوالي $423,500$ ($tCO_2/year/100MWp$).

5. الاستنتاجات

تم محاكاة أداء خمس تقنيات للطاقة الشمسية المركزة في عدة مناطق باستخدام برنامج المحاكاة الديناميكي SAM. كما تم اختيار تكلفة إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية LCOE كمرجعية لاختيار انسب تقنية لكل موقع. كما تم ادراج تكلفة الضرر البيئي الناجم من انبعاث غاز CO_2 من محطات توليد الطاقة الكهربائية التقليدية في حساب LCOE. يتمثل الاجراء المتبع في الحسابات الاقتصادية في ادراج الضرر البيئي وكذلك السعر الحقيقي لإنتاج الطاقة الكهربائية (وليس السعر المدعوم)؛ يعطي فرصة عادلة للطاقات المتجددة والنظيفة للتنافس في سوق الطاقة حتى في الدول النفطية والدول التي تدعم الكهرباء. وقد تم التوصل إلى أن تقنية البرج الشمسي سجلت أقل تكلفة لوحدة إنتاج الطاقة الكهربائية لجميع المناطق التي تم دراستها، بينما سجلت الخلايا الشمسية المركزة التكلفة الأعلى لوحدة إنتاج الطاقة الكهربائية لجميع المناطق. بينت الدراسة أن تقنية البرج الشمسي يمكن أن تكون بديلاً واعداً في توليد الطاقة الكهربائية وتكلفة منافسة للعديد من خيارات توليد الطاقة الكهربائية الأخرى. وتعتبر هذه النتائج خارطة طريق لمرحلة الانتقال من التوليد التقليدي المعتمد على النفط والغاز الطبيعي إلى التوليد النظيف المعتمد على الطاقة الشمسية المتجددة والصدقية للبيئة. وستساعد هذه النتائج صناع القرار في اتخاذ القرارات المناسبة لتوليد الطاقة الكهربائية باستخدام التقنيات المتاحة وفقاً للتكلفة المناسبة في كل حالة.

Author Contributions: “Conceptualization, Nassar and El-Khozondar; methodology, Abouqeelah, Abubaker and Miskeen ; writing—original draft preparation, review and editing, Khaleel, Ahmed, Alsharif. 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] [Online]. Available: <https://www.mordorintelligence.com/ar/industry-reports/global-thermal-power-market-industry>.
- [2] EPA, “Sources of Greenhouse Gas Emissions,” [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>. [Accessed 28 April 2023].
- [3] 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.
- [4] M. Andeef, M. Bakouri, B. Ahmed, A. gait, F. El-Batta and T. Foqha, “The role of renewable energies in achieving a more secure and stable future,” *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability*, vol. 1, no. 2, pp. 11-20, 2023.
- [5] 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.
- [6] 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*, vol. 1, no. 3, pp. 27-34, 2023.

- [7] A. Salem, Y. Nassar and Y. Yousif, "The Choice of Solar Energy in the Field of Electrical Generation-Photovoltaic or Solar Thermal-For Arabic Region," in *World Renewable Energy Congress VIII, Colorado USA, August 29-September 3, 2004*.
- [8] A. Alami, A. Olabi, A. Mdallal, A. Rezk, A. Radwan, S. Rahman, S. Shah and M. Abdelkareem, "Concentrating solar power (CSP) technologies: Status and analysis," *International Journal of Thermofluids*, vol. 18, no. 5, p. 100340, 2023.
- [9] E. Shouman and N. Khattab, "Future economic of concentrating solar power (CSP) for electricity generation in Egypt," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 41, no. 1, pp. 1119-1127, 2015.
- [10] O. Jbahi, F. Ouchani, A. Merrouni, M. Cherkaoui, A. Ghennioui and M. Maaroufi, "An AHP-GIS based site suitability analysis for integrating large-scale hybrid CSP+PV plants in Morocco: An approach to address the intermittency of solar energy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 369, no. 10, p. 133250, 2022.
- [11] A. Al-Barqi, N. Bukharin, B. Zazoum and M. El Hassan, "Design of a 100 MW concentrated solar power Linear Fresnel plant in Riyadh, Saudi Arabia: A comparison between molten salt and liquid," *Energy Reports*, vol. 8, no. 13, pp. 697-704, 2022.
- [12] M. Salimi, M. Hosseinpour and T. Borhani, "Analysis of Solar Energy Development Strategies for a Successful Energy Transition in the UAE," *Processes*, 10(7):1338., vol. 10, no. 7, p. 1338, 2022.
- [13] H. El-Khozenadar, M. Elnaggar, Y. Nassar, A. Ellouh, M. Alghaffari and H. Nassar, "Linear Fresnel collector (LFC) for enhancing solar water desalination process," in *The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023), Gaza Strip, Palestine, May 8-9, 2023*.
- [14] S. Abdelhady, "Performance and cost evaluation of solar dish power plant: sensitivity analysis of levelized cost of electricity (LCOE) and net present value (NPV)," *Renewable Energy*, vol. 168, no. 5, pp. 332-342, 2021.
- [15] A. Hafez, Y. Nassar, M. Hammdan and S. Alsadi, "Technical and Economic Feasibility of Utility-Scale Solar Energy Conversion Systems in Saudi Arabia," *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Electrical Engineering*, vol. 44, no. 1, pp. 213-225, 2019.
- [16] A. Ali, E. Karram, Y. Nassar and A. Hafez, "Reliable and economic isolated renewable hybrid power system with pumped hydropower storage," in *The IEEE 22ed international Middle East power systems conference, Assiut-Egypt, 2021*.
- [17] Q. Thabit, A. Nassour and M. Nelles, "Innovative hybrid waste to energy-parabolic trough plant for power generation and water desalination in the Middle East North Africa region: Jordan as a case study," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 13150-13169, 2022.
- [18] E. Okonkwo, I. Osho, O. Bamisile, M. Abid and T. Al-Ansari, "Grid integration of renewable energy in Qatar: Potentials and limitations," *Energy*, vol. 235, p. 121310, 2021.
- [19] K. Kandil, I. Kadad, A. Ghoneim and R. Altawash, "Analysis of HCPV-LIB integrated hybrid system for renewable energy generation in Kuwait hot climate," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 53, p. 102594, 2022.
- [20] H. Allouhi, A. Allouhi, K. Almohammadi, A. Hamrani and A. Jami, "Hybrid renewable energy system for sustainable residential buildings based on Solar Dish Stirling and wind Turbine with hydrogen production," *Energy Conversion and Management*, vol. 270, p. 116261, 2022.

- [21] D. Nguen, D. Pham, G. Mingaleeva, O. Afanaseva and P. Zunino, "Assessment of efficiency and prospects for the use of hybrid thermal low-capacity power plants in the Republic of Vietnam," in *E3S Web of Conferences*, 2019.
- [22] M. Dashtebayaz, A. Nikitin, M. Norani, V. Nikitina, M. Hekmatshoar and V. Shein, "Comparison of two hybrid renewable energy systems for a residential building based on sustainability assessment and emergy analysis," *Journal of Cleaner Production*, vol. 379, p. 134592, 2022.
- [23] P. Ferrer, E. Miranda, C. Tenreiro and F. Vega, "Assessing flexibility for integrating renewable energies into carbon neutral multi-regional systems: The case of the Chilean power system," *Energy for Sustainable Development*, vol. 70, pp. 442-455, 2022.
- [24] A. Gamil, P. Li, B. Ali and M. Hamid, "Concentrating solar thermal power generation in Sudan: Potential and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 161, p. 112366, 2022.
- [25] B. Belgasim, Y. Aldali, M. J. 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.
- [26] I. Ehtiwesh, F. Silva and A. Sousa, "Performance and economic analysis of concentrated solar power plants in Libya. In 2nd International Conference on Energy and Environment: bringing together Engineering and Economics (pp. 459-6," in *2nd International Conference on Energy and Environment: bringing together Engineering and Economics*, Guimarães, Portugal , 18-19 June, 2015.
- [27] M. Sharif and I. Eslayem, "Study of the different Heat Transfer Fluids effect for a Linear Fresnel Power Plant designed in Sebha City, Libya," *Academy journal for Basic and Applied Sciences (AJBAS)*, vol. 3, no. 4, pp. 1-15, 2022.
- [28] H. Bubisir and M. Sharif, "Study of the Best Orientation for Parabolic Trough Collector Works in Sebha City," *Libyan Journal of Ecological & Environmental Sciences and Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 91-99, 2022.
- [29] 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)," *Sebha University Journal of Pure & Applied Sciences*, vol. 20, no. 4, pp. 125-131, 2021.
- [30] I. Abuashe, E. Shuia and H. Aljeremi, "Modelling and simulation of Concentrated Solar Power Plant in Ber'Alganam area (Azzawia-Libya)," *Solar Energy And Sustainable Development Journal*, vol. 9, no. 2, pp. 11-18, 2020.
- [31] E. Agyekum and V. Velkin, "Optimization and techno-economic assessment of concentrated solar power (CSP) in South-Western Africa: A case study on Ghana," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 40, p. 100763, 2020.
- [32] M. Islam, N. Huda and R. Saidur, "Current energy mix and techno-economic analysis of concentrating solar power (CSP) technologies in Malaysia," *Renewable Energy*, vol. 140, pp. 789-806, 2019.
- [33] S. Tahir, M. Ahmad, H. Abd-ur-Rehman and S. Shakir, "Techno-economic assessment of concentrated solar thermal power generation and potential barriers in its deployment in Pakistan," *Journal of Cleaner Production*, vol. 293, p. 126125, 2021.
- [34] S. Kamel, E. Agyekum, T. Adebayo, I. Taha, B. Gyamfi and S. Yaqoob, "Comparative analysis of Rankine cycle linear Fresnel reflector and solar tower plant technologies: techno-economic analysis for Ethiopia," *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1677, 2022.

- [35] M. Ahmad and M. Zeeshan, "Validation of weather reanalysis datasets and geospatial and techno-economic viability and potential assessment of concentrated solar power plants," *Energy Conversion and Management*, vol. 256, p. 115366, 2022.
- [36] C. Hernández, R. Barraza, A. Saez, I. M. and D. Estay, "Potential map for the installation of concentrated solar power towers in Chile," *Energies*, vol. 13, no. 9, p. 2131, 2020.
- [37] A. Sultan, K. Hughes, D. Ingham, L. Ma and M. Pourkashanian, "Techno-economic competitiveness of 50 MW concentrating solar power plants for electricity generation under Kuwait climatic conditions," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 134, p. 110342, 2020.
- [38] R. Ling-zhi, Z. Xin-gang, Z. Yu-zhuo and L. Yan-bin, "The economic performance of concentrated solar power industry in China," *Journal of cleaner production*, vol. 205, pp. 799-813.
- [39] T. Aseri, C. Sharma and T. Kandpal, "A techno-economic appraisal of parabolic trough collector and central tower receiver based solar thermal power plants in India: Effect of nominal capacity and hours of thermal energy storage," *Journal of Energy Storage*, vol. 8, no. 4, p. 103976, 2022.
- [40] Y. Nassar, *Solar Energy Engineering- Active Application*, Sebha - Libya: Sebha University, 2006.
- [41] NREL, "System Advisor Model (SAM)," 2020. [Online]. Available: <https://sam.nrel.gov/download.html> (accessed 9.15.20)..
- [42] Y. Nassar and S. Alsadi, "Assessment of solar energy potential in Gaza Strip-Palestine," *Sustainable Energy Technology and Assessments*, vol. 31, pp. 318-328, 2019.
- [43] Y. 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.
- [44] A. Makhzom, K. Aissa, A. Alshanokie, Y. Nassar, H. El-Khozondar, M. Salem, M. Khaleel and M. Elmnifi, "Carbon Dioxide Life Cycle Assessment of the Energy Industry Sector in Libya: A Case Study," *International Journal of Electrical Engineering and sustainability (IJEES)*, vol. 1, no. 4, pp. 1-20, 2023.
- [45] 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," *Advances in Building Energy Research*, 2023.
- [46] A. Makhzom, A. Eshdok, Y. Nassa, 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*, Gaza Strip, Palestine, May 8-9, 2023.
- [47] H. El-Khozondar, F. El-batta, R. El-Khozondar, Y. Nassar, M. Alramlawi and S. Alsadi, "Standalone hybrid PV/wind/diesel-electric generator system for a COVID-19 quarantine center," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, pp. 1-18, 2022.
- [48] 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.

- [49] IRENA, *Renewable Power Generation Costs in 2021*, Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency, 2022.
- [50] P. Kurup and C. Turchi, "Parabolic Trough Collector Cost Update for the System Advisor Model (SAM)," *National Renewable Energy Laboratory*, pp. NREL/TP-6A20-65228, 2015.
- [51] K. Parthiv, S. Akar, S. Glynn, C. Augustine and P. Davenport, "Cost Update: Commercial and Advanced Heliostat Collectors," Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP-7A40-80482., 2023.
- [52] Y. Nassar, S. Alsadi, G. Miskeen, H. El-Khozondar and N. Abuhamoud, "Mapping of PV Solar Module Technologies Across Libyan Territory," in *Iraqi International Conference on Communication and Information Technologies (IICCIT)*, Basrah, Iraq, 2022.
- [53] S. Mohammed, Y. Nassar, W. ElOsta, H. ElKhozondzr, A. Miskeen and A. Basha, "Carbon and Energy Life Cycle Analysis of Wind Energy Industry in Libya" *Solar Energy and sustainable Development Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 50-69.
- [54] IPCC. [Online]. Available: <https://systemschangelab.org/finance/price-greenhouse-gas-emissions-and-other-environmental-externalities#factors> . [Accessed 20 June 2023].
- [55] S. Jessop, "COP27 Reuters," [Online]. Available: <https://www.reuters.com/business/cop/exclusive-cop27-imf-chief-says-75ton-carbon-price-needed-by-2030-2022-11-07/>. [Accessed 8 November 2022].
- [56] J. Chemnick, "Scientific American, E&E News," [Online]. Available: <https://www.scientificamerican.com/article/cost-of-carbon-pollution-pegged-at-51-a-ton/>.. [Accessed 1 March 2023].

الملاحق

الجدول أ1: البيانات التصميمية لمحطة الطاقة الصحن الشمسي

القيمتة	المقياس
100 MWe	سعة المحطة
900000 m ²	المساحة الحقل الشمسي
91 m	مساحة السطح العاكس الكلية
50x80=4000	عدد الصحون = عدد الصحون في الاتجاه الشمالي-الجنوبي x عدد الصحون في الاتجاه اشرقي-الغربي
0.846	الكفاءة البصرية
15m x15 m	المسافة الفاصلة بين الصحون
25kW	قدرة محرك ستيرلينغ
993 K	درجة حرارة التسخين
1800 rpm	سرعة الدوران
V50% EG	مائع التبريد
9 gal/min	معدل تدفق مائع التبريد
2,901.77 \$/kW	تكلفة الانشاء
200 W/m ²	أقل شدة اشعاع شمسي

الجدول 2: البيانات التصميمية لحقل القطع المكافئ الشمسي

المقياس	القيمة
سعة المحطة	100 MWe
المضاعف الشمسي	2.4
المساحة الحقل الشمسي	877000 m ²
مساحة الصف الواحد	5248 m ²
الكفاءة البصرية	0.721
المسافة الفاصلة بين الصفوف	15 m
عرض وطول فتحة المجمع الواحد	6 x 14.375 m ²
عدد المجمعات في الصف الواحد	8
المائع العامل	Therminol VP-1
أقل وأعلى معدل تدفق للمائع العامل	1 – 12 kg/s
درجة حرارة دخول وخروج المائع العامل	293-391 °C
حجم الخزان الحراري	57021.6 m ³
القدرة الاستيعابية الحرارية للخزان	4365.17 MWh
مادة التخزين	Hitec Solar Salt Therminol VP-1
عدد ساعات التخزين	14 h
تكلفة الانشاء	6,083 \$/kW

الجدول 3: البيانات التصميمية لحقل البرج الشمسي

المقياس	القيمة
سعة المحطة	100 MWe
المضاعف الشمسي	2.4
المساحة الحقل الشمسي	7656652 m ²
مساحة الهليوستات الواحدة	12.2 x 12.2 m ²
المساحة الكلية للهليوستات	1,269,054 m ²
ارتفاع البرج	193.45 m
المائع العامل	Salt (60%NaNO ₃ and 40%KNO ₃)
أعلى معدل تدفق للمائع العامل	1565.64kg/s
درجة حرارة دخول وخروج المائع العامل	290-574 °C
حجم الخزان الحراري	18,180 m ³
القدرة الاستيعابية الحرارية للخزان	3,907.8 MWh
عدد ساعات التخزين	14 h
تكلفة الانشاء	6,621 /kW\$

الجدول 4: البيانات التصميمية لحقل عاكسات فريزل الخطية

المقياس	القيمة
سعة المحطة	100 MWe
المضاعف الشمسي	2.4
المساحة الحقل الشمسي	884324 m ²
مساحة العاكسات	850000 m ²
المائع العامل	Hitec Solar Salt
أقل وأعلى معدل تدفق للمائع العامل	3.0-14.5 kg/s
درجة حرارة دخول وخروج المائع العامل	293525 °C
حجم الخزان الحراري	21955.8 m ³
القدرة الاستيعابية الحرارية للخزان	3918.27 MWh
عدد ساعات التخزين	14 h
مادة التخزين	Hitec Solar Salt
تكلفة الإنشاء	6,525.55 \$/kW

الجدول 5: البيانات التصميمية لحقل الخلايا الشمسية المركزة

المقياس	القيمة
سعة المحطة	100 MWe
المساحة الحقل الشمسي	11782 m ²
نسبة التركيز	700
عدد المركبات	20
عدد الألواح الشمسية في كل مركز	150
مساحة اللوح الشمسي الواحد	1.4 m ²
الكفاءة	29.8 %
معامل درجة الحرارة للقدرة	0.15- %/°C
أقصى درجة الحرارة للعمل	60 C°
نوع محول التردد - retrevnI	Advanced Energy Industries Solaron 333kW, 480V
الكفاءة	97.5 %
عدد المحولات	4
تكلفة الإنشاء	5160 \$/kW