Wadi Alshatti University Journal of
Pure and Applied Sciences

مجلة جامعة وادي الشاطئ
للعلوم البحتة والتطبيقية

Volume 3, No. 1, January-June 2025 Online ISSN: 3006-0877 المجلد 3، الاصدار 1، يناير- يونيو 2025

RESEARCH ARTICLE **RENEWABLE ENERGY**

Design of Hybrid Renewable Energy System (PV/Wind/Battery) 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

Abdulhafiz A. Aqila[1,*], Yasser F. Nassar[2], Hala J. El-Khozondar[3,4], Seham F. Suliman[5]

[1]Department of Mechanical and Renewable Energy Engineering, Engineering Faculty,Wadi Elshatti University, Libya
[2]Research Center for renewable and sustainable development studies, Wadi Alshatti University, Libya
[3]Electrical Engineering and smart systems Department, Islamic University of Gaza, Gaza, Palestine
[4]Department of Materials and London Centre for Nanotechnology, Imperial College London, UK
[5]Libyan Center for Solar Energy Research and Studies, Tripoli, Libya

ARTICLE HISTORY
Received 22 March 2025
Revised 17 April 2025
Accepted 20 April 2025
Online 22 April 2025

KEYWORDS
Solar energy;
Wind energy;
Hybrid renewable energy;
Electrical loads;
Real time analysis;
Libya.

ABSTRACT

The increasing research interest in Hybrid Renewable Energy Systems (HRESs) reflects a global desire for development and sustainability. Hybrid renewable energy systems aim to meet the energy demand loads, including residential loads, which constitute the largest electricity-consuming sector in Libya, accounting for approximately 56% of the total electric energy consumed in the country in 2022. Consequently, this paper presents a novel approach by designing and analyzing a hybrid renewable energy system to cover the electrical load based on the power capacity of the devices and the actual operational time. The study relied on real-time measured data at 10-minute intervals for climatic conditions (solar radiation intensity, wind speed, and ambient air temperature) as well as the electrical loads consumed in a household located in Samno, Sabha, Libya. A dynamic simulation of the proposed system's performance was conducted using the SAM simulation software, and the results were processed using Microsoft Excel. The results showed that the proposed hybrid renewable energy system is capable of meeting the required electrical load, especially during peak times, and supplying power to the electrical grid. The economic results show that the levelized cost of energy (LCOE) is US$0.0107/kWh.

تصميم منظومة طاقة متجددة هجينة (الطاقة الشمسية الفوتو ضوئية – طاقة الرياح – بطاريات) تحت الظروف الحقيقية المناخية والتشغيلية لتغطية الاحمال الكهربائية في القطاع السكني: دراسة حالة منزل في منطقة سمنو في المنطقة الجنوبية من ليبيا

عبدالحفيظ أحمد عقيلة[1,*]، ياسر فتحي نصار[2]، هالة جارالله الخزندار[3،4]، سهام فرج سليمان[5]

الكلمات المفتاحية
الطاقة الشمسية
طاقة الرياح
منظومات الطاقات الهجينة
الأحمال الكهربائية
تحليل الوقت الحقيقي
ليبيا

الملخص

يعد الاهتمام المتزايد بأنظمة الطاقة المتجددة الهجينة (HRESs) اسلوبًا عمليًا للحد من التلوث وتلطيف الضرر البيئي وكذلك تحقيقا لأهداف التنمية المستدامة. تسعى أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة لتغطية الطلب على الطاقة الكهربائية، بما فيها الاحمال السكنية التي تعتبر أكثر القطاعات استهلاكاً للكهرباء في ليبيا، حيث يقدر نسبة استهلاك الطاقة في القطاع المنزلي بحوالي 56% من اجمالي الطاقة الكهربائية المستهلكة في البلاد للعام 2023. وبالتالي تقدم هذه الورقة نهجًا جديدًا من خلال تصميم وتحليل وأثمدة منظومة طاقة متجددة هجينة لتغطية الحمل الكهربائي على أساس قدرة الأجهزة والفترة الزمنية الفعلية لتشغيلها. اعتمدت الدراسة على بيانات حقيقية مقاسة لكل 10 دقائق للبيانات المناخية (شدة الاشعاع الشمسي، وسرعة الرياح، ودرجة الحرارة الهواء الجوي) وكذلك الاحمال الكهربائية المستهلكة في منزل في منطقة سمنو – سبها – ليبيا. اجريت المحاكاة الديناميكية لأداء المنظومة المقترحة باستخدام برنامج المحاكاة SAM، وتمت معالجة البيانات باستخدام برنامج الإكسل من الميكروسوفت. أظهرت النتائج بأن منظومة الطاقة المتجددة الهجينة المقترحة المتكونة من لوح شمسي واحد بقدرة 560W وخمس توربينات رياح بقدرة 500W و4 بطاريات تخزين بقدرة 500Ah؛ قادرة على تغطية الحمل الكهربائي المطلوب والمقدر بحوالي 51238 kWh. كما سيتم تصدير الفائض وقدره 342kWh الى الشبكة الكهربائية لتحقيق أكبر عائد اقتصادي وبيئي من المنظومة. وقدرت التكلفة المستوية للطاقة (LCOE) بحوالي 0.0107$/kWh.

*Corresponding author: a.aqela@wau.edu.ly
https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_23

المقدمة

يشهد العالم مدفوعاً بضغوط البيئية تحولاً نحو الطاقات البديلة والصديقة للبيئة، حيث بلغت السعات المركبة من الطاقات المتجددة في نهاية سنة 2024 حوالي 3,372 GW، بلغت مساهمة الطاقة الشمسية الفوتوضوئية حوالي 1,600 GW وكان نصيب طاقة الرياح حوالي 1,021 GW بينما بلغت مساهمة طاقة الكتلة الحيوية حوالي 150.260 GW ونصيب الطاقة الحرارية لجوف الارض حوالي 16.335 GW. وبالرغم من ذلك لم تتجاوز مساهمة الطاقات المتجددة 29% من اجمالي الطاقة الكهربائية المنتجة في العالم [1]. ويعتبر قطاع صناعة الطاقة من أكثر القطاعات تلوثاً بنسبة تصل الى 75% من اجمالي التلوث في العالم [2]. مما دفع هذا إلى إعادة تقييم شامل لموارد الطاقة المتاحة لتحديد البدائل المستدامة والنظيفة التي يمكن أن تلبي النمو السريع للطلب على الطاقة. ومن المتوقع أن تلعب الطاقة المتجددة دوراً كبيراً في تلطيف الضرر البيئي، وذلك عن طريق تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون في نظام الطاقة العالمي بمقدار 3.6 Gton في عام 2035 [3]. وفي ضوء التحديات المرتبطة بارتفاع استهلاك الطاقة، فقد شكل القطاع السكني حوالي 30% من إجمالي الطاقة المستهلكة في العالم، وساهم بحوالي 27% من إجمالي انبعاثات الكربون الناتجة عن قطاع الطاقة [4]. ويختلف الوضع بشكل كبير في الدول النامية، حيث يقدر استهلاك القطاع السكني بين 40% - 60% من إجمالي الطاقة المستهلكة .

وفي ليبيا، تصل نسبة استهلاك القطاع السكني حوالي 56% من استهلاك الطاقة الكهربائية في البلاد. والذي يعتبر من أكثر القطاعات استهلاكًا للكهرباء في عام 2023 [5]. يقدر انتاج ليبيا من الطاقة الكهربائية حوالي 31 TWh من الكهرباء وبشكل أساسي من الغاز والنفظ. مع ذلك سيزداد الطلب على الطاقة بشكل كبير في المستقبل القريب نتيجة التنمية الاقتصادية والاستقرار السياسي التي تشهده البلاد في السنوات الاخيرة. سيؤدي هذا إلى زيادة استهلاك النفظ والغاز في انتاج الكهرباء مما يؤدي الى المزيد من انبعاثات الكربونية [6]. وكون ليبيا إحدى الدول الموقعة على جميع المعاهدات والاتفاقيات الخاصة بالتغير المناخي باعتبارها أكبر منتج للنفظ في شمال أفريقيا، واعتمادها الأساسي على الغاز والنفظ في معظم إيرادات البلاد وإنتاج الكهرباء، هنا تبرز الحاجة الماسة لاستخدام أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة لتوليد الطاقة وتقليل البصمة الكربونية. وتتمتع ليبيا بإمكانات مثبتة من موارد الطاقة المتجددة المتنوعة التي يمكن أن تلعب دوراً حيوياً في مزيج الطاقة وطنية [7-17]. ولذلك، يتعين على ليبيا الاستفادة من مواردها الطبيعية، مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح وطاقة الكتلة الحيوية وطاقة حرارة جوف الارض، لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة، وتقليل الاعتماد على الوقود الاحفوري واستغلاله في الصناعات البتروكيمياوية بدلا من حرقه لانتاج الطاقة. وتبرز اهمية هذه الدراسة كونها تأتي متسقة مع تطلعات الدولة الليبية لزيادة مساهمة الطاقات المتجددة في مزيج الطاقة الكهربائية المنتجة بنسبة 30% بحلول عام 2030، وأكثر من 50% بحلول عام 2050 [18]. كما يمكن لهذه المنظومات ان تلعب دورًا مهمًا في تزويد القطاع السكني بالطاقة اللازمة لتغطية كل الاحمال الكهربائية والحرارية .

حققت أنظمة الطاقة الهجينة على نطاق واسع محلياً ودولياً نجاحات باهره بكافة المقاييس العلمية والعملية من خلال العدد الكبير من الأبحاث العلمية المنشورة في هذا المجال. توفر مراجعة الأبحاث السابقة المدرجة في هذه الدراسة نظرة عامة على التطورات الرئيسية في هذا المجال. مع تسليط الضوء على أهمية البحث الحالي وكذلك تحديد الفجوة العلمية في الدراسات السابقة في هذا المجال.

محلياً؛ أجريت دراسة لتصميم منظومة طاقة لمنزل معزول عن الشبكة العامة للكهرباء في مدينة المقرون – بنغازي (شرق ليبيا). تتكون منظومة من توربينات الرياح بقدرة 6 kW وبطاريات بسعة 3 kWh، بهدف تلبية الطلب على الطاقة الكهربائية لهذا المنزل والمقدر بحوالي 35 kWh/day . قدرت الطاقة السنوية المنتجة من نظام طاقة الرياح حوالي 23,894 kWh/year بمعامل سعة حوالي 19%[23].

كما أجريت دراسة تخطيط وتقييم الجدوى الفنية والاقتصادية لنظام طاقة هجين معزول عن الشبكة لقرية البيضان الريفية بالقرب من مدينة اجدابيا شرق ليبيا؛ نظراً لعدم توفر الكهرباء في تلك المنطقة النائية، فقد أصبح تركيب أنظمة الطاقة الهجينة خارج الشبكة أمراً لا مفر منه في المناطق النائية. لقد أثبت مزيج هجين من تقنيات الطاقات المتجددة أنه بديل قابل للتطبيق في المناطق النائية والبعيدة عن الشبكة في جميع انحاء العالم. استخدام برنامج HOMER لنمذجة وتحديد المكونات وحجم النظام الهجين على أساس اقل تكلفة انتاج لوحدة الطاقة LCOE وكذلك الاقل انبعاثًا للملوثات. أظهرت النتائج ان النظام الهجين يتكون من الألواح الشمسية الكهروضوئية وتوربينات الرياح هو النظام القابل للتطبيق في هذا المشروع. كما كشفت نتائج التصميم والتحسين والحساسية أن تقنيات الطاقات المتجددة هي الخيار الفعال لتوليد الطاقة الكهربائية لقرية البيضان حيث بلغت (LCOE) حوالي 0.1801 LD/kWh [20].

كما قدمت دراسة لتحديد وتحليل حجم نظام طاقة مستقل يعمل بالألواح الكهروضوئية وبطاريات لمنزل في مدينة بنغازي – ليبيا. لغرض تلبية احتياجات الطاقة الكهربائية في المنزل. وقد تم تحديد حجم النظام المقترح باستخدام برنامج HOMER ، وتبين أن النظام يتكون من 28 لوح شمسي بقدرة (330 W/panel)، وعدد 32 بطارية من الرصاص الحمضي (219Ah_12V). تم تنفيذ النموذج الديناميكي للنظام باستخدام برنامج MATLAB/Simulink. أظهرت النتائج أن النظام المقترح قادر على تلبية الطلب على الطاقة الكهربائية عند تيار مستمر ثابت وبجهد 48 V. كما أوصت الدراسة باستخدامه لتلبية احتياجات المنازل المجتمعات الريفية ذات الاحمال المنخفضة أو ذات الاحتياجات الأساسية من الكهرباء. وقدرت التكلفة الصافية للنظام المقترح 42,892$ والتكلفة المستوية 0.365 $/kWh [21].

أجريت دراسة في فلسطين لتصميم نظام طاقة الهجينة معزولة عن الشبكة لمحافظة جنين شمال الضفة الغربية. استندت الدراسة على بيانات ساعية لمدة عامين للطاقة الشمسية وطاقة الرياح والكتلة الحيوية والحمل الكهربائي. استخدام برنامج SAM لتقدير إمكانات الطاقة المتجددة وبرنامج HOMER لتحديد المكونات وحجم نظام الطاقة المتجددة الهجين. تكون نظام الطاقة المتجددة الهجين المقترح من حقل للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة 80MW، ومزرعة رياح بقدرة66 MW، ومحرك كهربائي يعمل على الغاز الحيوي بقدرة 50MW، بلغ قيمة الاستثمار حوالي 323 مليون دولار. يولد النظام المقترح 389GWh/year وهو ما يكفي لتلبية

100% من الطلب على الطاقة الكهربائية في محافظة جنين، مع فائض في التوليد الكهرباء بنحو 4.57%. وقدرت تكلفة الطاقة بحوالي 0.131$/kWh وهو أعلى بقليل من السعر التي تورده الشركة الإسرائيلية للمواطنين (0.128$/kWh) [22].

وفي نيجيريا؛ تم اقتراح منهجية لتصميم نظام هجين مستقل يعمل بالطاقة الفوتوضوئية ومولد ديزل وبطاريات لمقر إقامة في Marcus Poli Estate Gwarinpa في العاصمة أبوجا وسط نيجيريا. وتمت نمذجة وتحسين النظام باستخدام برنامج HOMER. أظهرت نتائج التحليل أنه من بين خمسة تكوينات لأنظمة هجينة لتغطية الحمل الكهربائي، فإن النظام الهجين الذي يتألف من الطاقة الكهروضوئية ومولد الديزل والبطاريات هو الامثل لتلك المنطقة، حيث بلغت التكلفة الحالية الصافية $ 118,771 وتكلفة انتاج الطاقة 0.34$/kWh [23].

في إيران؛ أجريت دراسة مقارنة أداء أنظمة الطاقة المتجددة أحادية المصدر والهجينة لمدينة زاهدان في جنوب شرق إيران، التي تتمتع بإمكانات كبيرة من مصادر الطاقة المتجددة: الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. تمت محاكاة وتحليل ثمانية خيارات باستخدام برنامج TRNSYS. الخيار الاول: يتألف من مصدرين (الطاقة الكهروضوئية وتوربين الرياح)، والتكوينات الأخرى تشتمل على ستة أنظمة هجينة تتضمن مجموعات من الألواح الكهروضوئية وتوربينات الرياح وخلايا الوقود ومولدات الديزل. كشف التحليل أن الأنظمة الهجينة، وخاصة تلك التي تجمع بين الطاقة الكهروضوئية وتوربينات الرياح تفوقت على تكوينات المصدر الأحادي. على سبيل المثال، أدى نظام الهجين بقدرة 800 kW من الطاقة الكهروضوئية و 50 kW من طاقة الرياح إلى تقليل استهلاك الديزل بنسبة 35% وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة 45% مقارنة بنظام يعتمد فقط على مولد الديزل. على الرغم من أن أداء أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة يعتمد بشكل كبير على مزيج مصادر الطاقات المتجددة؛ الا انها توفر عموماً موثوقية عالية وفوائد بيئية [24].

في الصين؛ أجريت دراسة الجدوى التقنية والاقتصادية لنظام طاقة متجددة هجين معزول عن الشبكة الكهرباء لعدة مناطق ريفية نائية في غرب الصين. وتمت النمذجة وتحسين مجموعات مختلفة من الألواح الكهروضوئية وتوربينات الرياح ومولدات الغاز الحيوي باستخدام برنامج HOMER، بناء على الخصائص اليومية والموسمية لإمدادات الطاقة وكذلك كميات وأنماط الطلب في المناطق الريفية النائية. من أجل تحديد التكوين الأكثر تنافسية من حيث التكلفة مع ضمان إمداد طاقة موثوق لتلبية الاحتياجات في القطاعات السكنية والتجارية والزراعية لتلك المناطق. أظهرت النتائج أن التكوين الأكثر فعالية من حيث التكلفة والموثوقية النظام يتكون من الالواح الشمسية الكهروضوئية بقدرة 104 kW وعدد 3 توربينات رياح بقدرة 10 kW ومحرك يعمل بالغاز بقدرة 5 kW، وبطاريات تخزين بسعة 331 kWh ومحول تردد بقدرة 109 kW. وقدرت الانتاجية السنوية للمنظومة حوالي kWh/year 322,156 لتحقيق استقلالية القرية عن الشبكة الرئيسية، ويمكنها أيضًا توفير الكهرباء للمستهلكين بتكلفة تبلغ 0.201$ /kWh . نظام الطاقة الهجين الذي يتألف من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والكتلة الحيوية هو خيار موثوق وفعال من حيث التكلفة للكهرباء للمناطق الريفية النائية بشكل مستدام مع تحقيق الفوائد البيئية [25]. بالاضافة الى العديد من الدراسات والتي أوردها Salim et al باسهاب في [26].

تهدف هذه الورقة الى تصميم وتحليل منظومة طاقة هجينة لتغطية احمال الطاقة الكهربائية والحرارية لاحد المنازل الواقع في المنطقة الجنوبية من ليبيا، بناء على استهلاك الطاقة والموقع والقدرات المتاحة للموارد المتجددة. ولتحقيق هذا الهدف تم قياس الاحمال الكهربائية للمنزل المستهدف لكل 10 دقائق لمدة عام كامل. واستسقت البيانات المناخية من منصة Solargis التي توفر معلومات لكل 10 قائق عن شدة الإشعاع الشمسي الكلى المائل وسرعة واتجاه الرياح ودرجات الحرارة. تمت المحاكاة الديناميكية لأداء المنظومة المقترحة باستخدام برنامج المحاكاة SAM، وعولجت البيانات باستخدام برنامج Excel. وللحصول على الحجم المثالي لمكونات المنظومة تم اخضاع النتائج لعدة دوال هدف وقيود والتي تم صياغتها لتواكب الحالة الدراسية؛ وتمثلت في الجانب الاقتصادي (LCOE)، والجانب البيئي (CO_2)، والجانب التقني، واحتمالية انقطاع تزويد الطاقة (LPSP).

تتميز الدراسة الحالية عن الدراسات السابقة، في تصميم وتحليل منظومة طاقات متجددة هجينة لتغطية الحمل الكهربائي على أساس قدرة الأجهزة والفترة الزمنية الفعلية لتشغيل الأجهزة الكهربائية المنزلية والتي تبلغ 10 دقائق كحد أدنى لكل جهاز او أدوات أو معدات كهربائية، وهذا النهج يخالف الطريقة التقليدية المتبعة لحساب الاحمال الكهربائية المعتمدة على استهلاك الطاقة كحاصل ضرب القدرة في عدد ساعات تشغيل الاجهزة الكهربائية (Wh) وهذا لا يشير الى القدرة الحقيقية لمنظومة توليد الطاقة، مما يمثل نهجاً جديدا - على حسب علم الباحثين- لتصميم منظومات توليد الطاقة .

وينقسم ما تبقى من البحث الى الأجزاء التالية: تم سرد "منهجية البحث" المتبعة في الجزء الثاني، وعرضت "النتائج" بيانياً في اشكال ورقمياً في جداول وتمت مناقشتها في الجزء الثالث، وصيغت "الاستنتاجات والتوصيات" في الجزء الرابع وختمت الدراسة بقائمة المراجع المستخدمة.

منهجية البحث

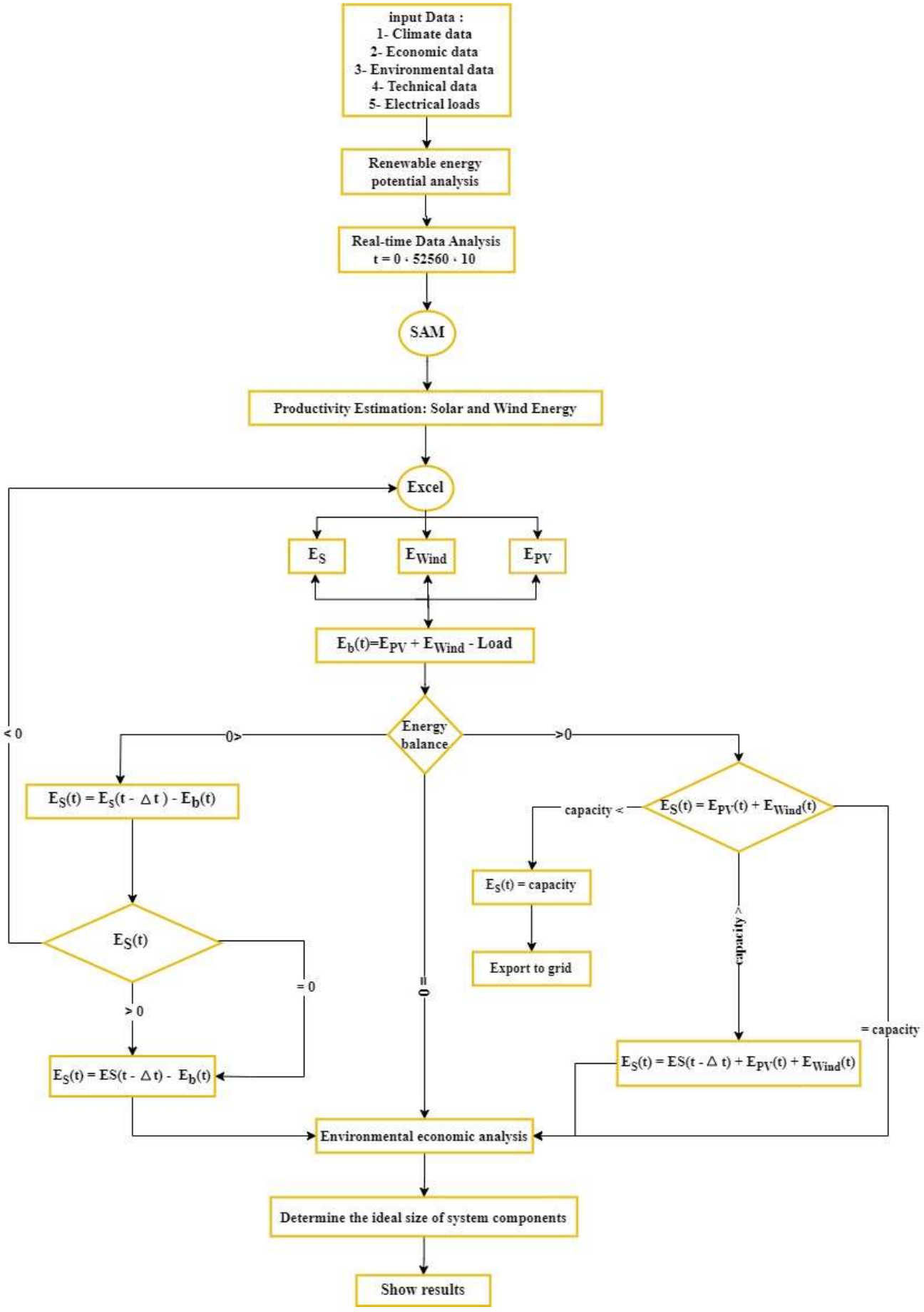
تناول هذا القسم المنهجية المتبعة لتحقيق الهدف المنشود للبحث. يبدأ النهج المتبع باستيراد البيانات من الشبكة الدولية للمعلومات، والتي تشمل: البيانات المناخية، والبيانات الاقتصادية، والبيانات الفنية، والبيانات البيئية، والاحمال الكهربائية. بعد ذلك يتم تحليل إمكانات الطاقات المتجددة في فترة الزمنية فعلية لكل 10 دقائق لمدة عام كامل باستخدام برنامج SAM. ثم يتم تحديد قدرات مصادر متجددة بما يتناسب لتغطية الحمل الكهربائي، ولتخزين فائض الطاقة في بطاريات، وأيضًا تصدير الفائض من المنظومة الى الشبكة الكهربائية الوطنية، وفي النهاية يتم اجراء تحليل اقتصادي وبيئي للمنظومة للحصول على الحجم المثالي لمكونات المنظومة. يبين المخطط الانسيابي في الشكل (1) المنهجية المتبعة في البحث.

فرضيات وحدود الدراسة ومصادر اللايقين في النتائج

لتسهيل التحليل تم تبنى الفرضيات التالية :

1. إهمال انخفاض معدل أداء الأجهزة مع الزمن .
2. إهمال سعر معدات وأجهزة بعد انتهاء فترة العمر (Rubbish) .
3. إهمال الفقد في الطاقة من خلال أسلاك التمديد ونقاط التوصيل.
4. اعتبار الكفاءات الأجهزة المساندة (محول التردد، أجهزة التحكم، المحولات، البطارية) ثابتة .

يشكل عدم اجراء دراسة حساسية النتائج لاختلاف بعض المعلمات (أسعار أجهزة ومعدات الطاقات المتجددة، اختلاف نمط منحنى الحمل) أحد حدود

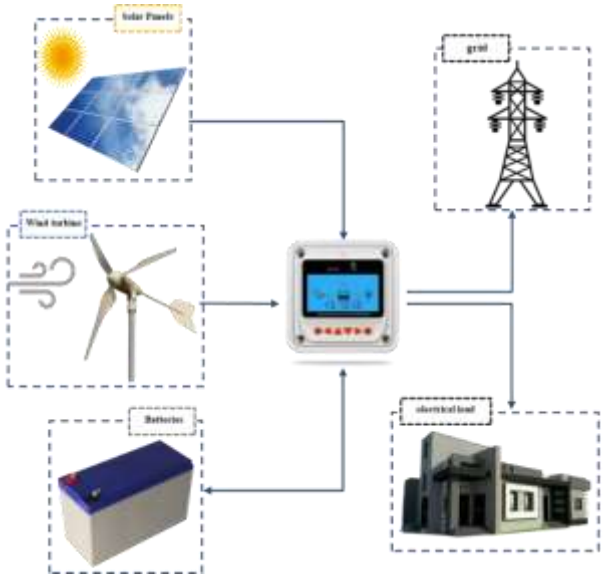


الشكل 1: المخطط الانسيابي لمنهجية البحث

الدراسة. كذلك عدم اجراء عدة سيناريوهات لمكونات المنظومة (كإضافة مولد كهربائي، والاتصال بالشبكة العامة للكهرباء) والتي سيتم دراستها في المستقبل. تعتبر البيانات أكبر مصدرًا للايقين مثل البيانات المناخية والاحمال. كذلك تعتبر أسعار معدات وأجهزة الطاقات المتجددة مصدراً من مصادر للايقين، حيث سجل تفاوتاً في سعر الخلايا الشمسية يصل الى 360% في السوق الدولية للطاقة الشمسية.

مخطط مكونات المنظومة المقترحة

يمكن أن تختلف مكونات المنظومة الطاقة الهجينة حسب التصميم والموقع الجغرافي والتطبيق المخصص لتحقيق الهدف المطلوب. مكونات المستغلة في هذه الدراسة هي مصادر الطاقة المتجددة (الطاقة الكهروضوئية وطاقة الرياح)، مع نظام تخزين (بطاريات). كما يشير الشكل (2) الى مكونات المنظومة المقترحة في هذه الدراسة.



الشكل 2: مكونات المنظومة المقترحة في هذه الدراسة

البيانات الجغرافية والمناخية والكهربائية لموقع الدراسة

يقع المنزل قيد الدراسة في بلدية وادي البوانيس، وهي بلدية من بلديات المناطق الجنوبية لليبيا، وتتكون من سلسلة من المناطق منها منطقة سمنو. حيث تعد منطقة سمنو أكبر تلك مناطق وادي البوانيس. تقع منطقة سمنو في جنوب غرب ليبيا على إحداثيات خط الطول 14.889 شرقاً وخط العرض 27.221 شمالاً، كما هو موضح في الخريطة في الشكل (3)، وتبعد حوالي 781km عن مدينة طرابلس و60 km عن مدينة سبها. يقدر عدد سكان المنطقة حسب تقرير مصلحة الأحوال المدنية بالمنطقة للعام 2024 بحوالي 16453 نسمة.

يسود المناخ الصحراوي على قرية سمنو، حيث ترتفع درجات حرارة خلال المواسم الحارة من مايو الى سبتمبر، حيث تصل متوسط درجات الحرارة إلى 32 °C .ويعد يوليو الشهر الأكثر حرارة. حيث تصل فيه درجة الحرارة الى 40 °C. بينما تنخفض درجات الحرارة بشكل ملحوظ خلال المواسم الباردة من نوفمبر الى فبراير، حيث تصل متوسط درجات الحرارة خلال تلك المواسم13 °C . و تبلغ درجات الحرارة الى أدنى مستوياتها في شهر يناير، حيث تصل فيه درجة الحرارة إلى 3 °C . هذا، ويبلغ متوسط ساعات سطوع شمسي

الشكل 3: خريطة موقع الدراسة

فيها إلى أكثر من 4300 ساعة في السنة، كذلك يشهد متوسط الاشعاع الشمسي تقلبات موسمية كبيرة على مدار العام. بحيث يصل متوسط إشعاع شمسي اليومي يصل إلى 6.1 $kWh/m^2/day$. وتتغير سرعة الرياح بشكل ملحوظ. حيث يعد شهر مايو الأكثر رياحًا حيث تصل فيه متوسط سرعة الرياح إلى 4.7 m/s. في المقابل، يعد شهر ديسمبر الأكثر هدوءً، حيث تصل متوسط سرعة الرياح فيه إلى 3.4 m/s .

يمثل الشكل (4) البيانات المناخية الرئيسية التي اعتمد عليها البحث والتي تم الحصول عليها من قاعدة البيانات SolarGis.

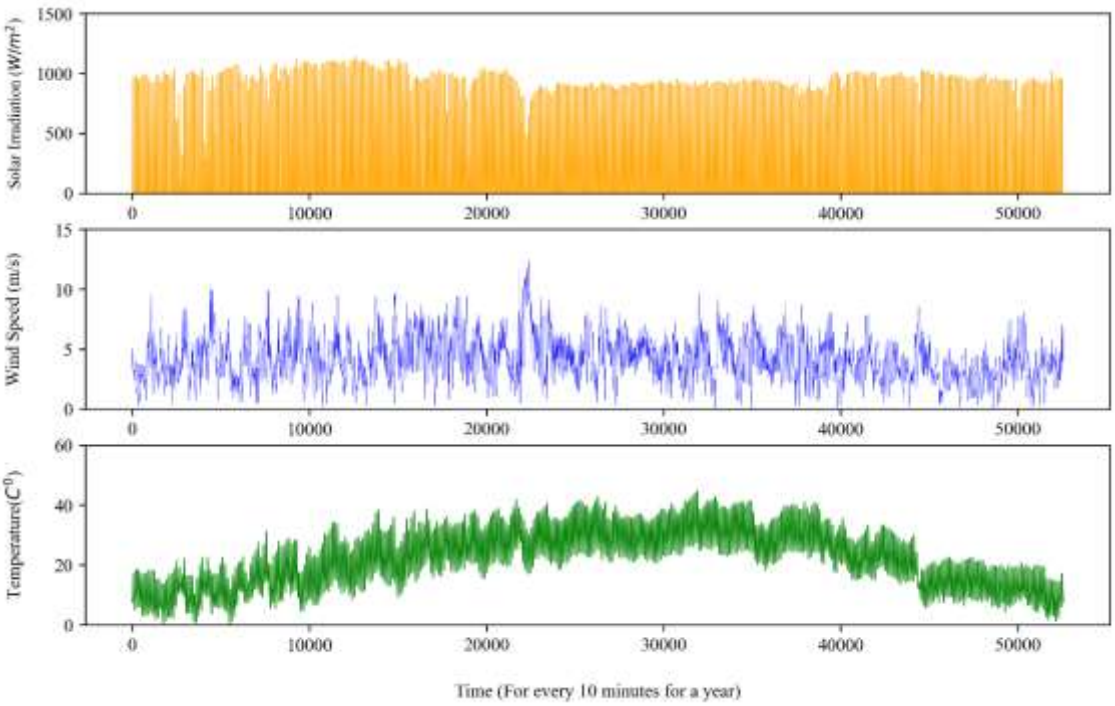
تصنيف الأحمال الكهربائية والحرارية

انطلاقًا من الهدف المتمثل في تحقيق الاستفادة القصوى من الطاقات المتجددة، تم في هذا البحث تصنيف الاحمال الكهربائية للمنزل إلى ثلاث فئات رئيسية، وذلك بهدف تحليلها ومعالجتها بشكل دقيق. تشمل هذه الفئات:

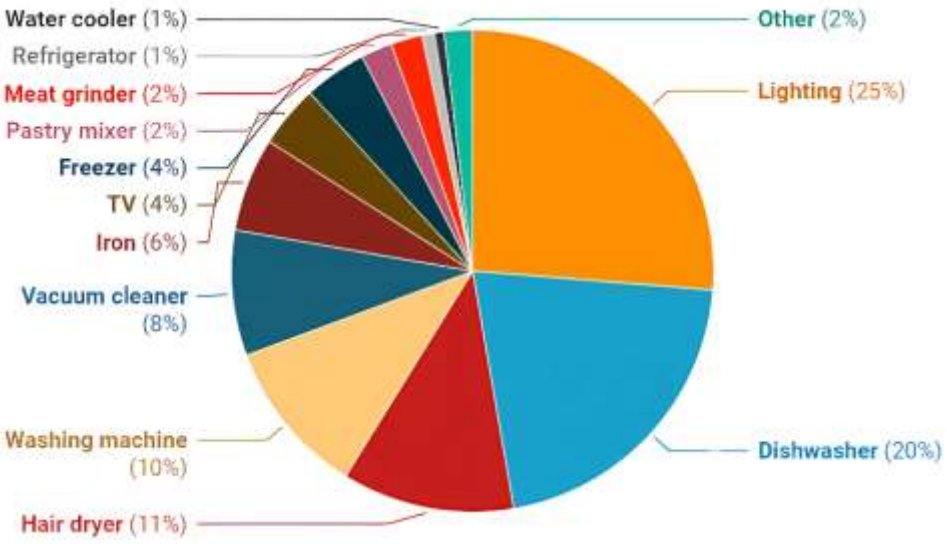
الاحمال الحرارية: تتضمن هذه الفئة الأجهزة التي تعتمد على التسخين، مثل تسخين المياه والتدفئة. والاحمال الكهربائية: تشمل هذه الفئة الأجهزة الكهربائية مثل الإضاءة، والثلاجات، والغسالات، والتليفزيونات وغيرها، وأيضًا الأجهزة الحرارية التي تكون مدة تشغيلها لا تتعدي 10 دقائق، مثل مكوه ومجفف الشعر. والأحمال الكيميائية: تتضمن هذه الفئة استخدام الغاز الطبي. يبين الشكل (5): نسب مشاركة الأجهزة الكهربائية في الحمل للمنزل قيد الدراسة. في هذا الجزء، سيتم التركيز بشكل خاص على معالجة الاحمال الكهربائية. نظرًا لأهميتها في استهلاك الطاقة داخل المنزل. من خلال تحليل أنماط الاستهلاك وتحديد أوقات الذروة. وأما بالنسبة للأحمال الحرارية والاحمال الكيميائية، فقد تم تحديد دراسات مستقبلية لتناولها بالتفصيل.

الاحمال الكهربائية لموقع الدراسة

تمت الدراسة على منزل سكني بمنطقة سمنو، تبلغ مساحة المنزل $300\ m^2$، ويتألف من 3غرف نوم و2 غرفة جلوس وصالة ومطبخ و3حمامات. ويعيش فيه 7 أفراد. حيث تم تسجيل وتيرة استخدام الأجهزة الكهربائية واستهلاكها داخل منزل لمدة عام كامل حيث بلغ قيمة الاستهلاك السنوي الفعلي kWh 51238 تم ذلك تحت الظروف الحقيقية لأدنى فترة تشغيل الأجهزة الكهربائية المنزلية والتي تبلغ 10 دقائق. كما يشير الشكل (6) و(7) وتيرة استخدام الأجهزة الكهربائية خلال يوم واحد في فصل الصيف وفصل الشتاء على التوالي. والشكل (8) الاحمال الكهربائية اليومية في فصل الصيف وفصل



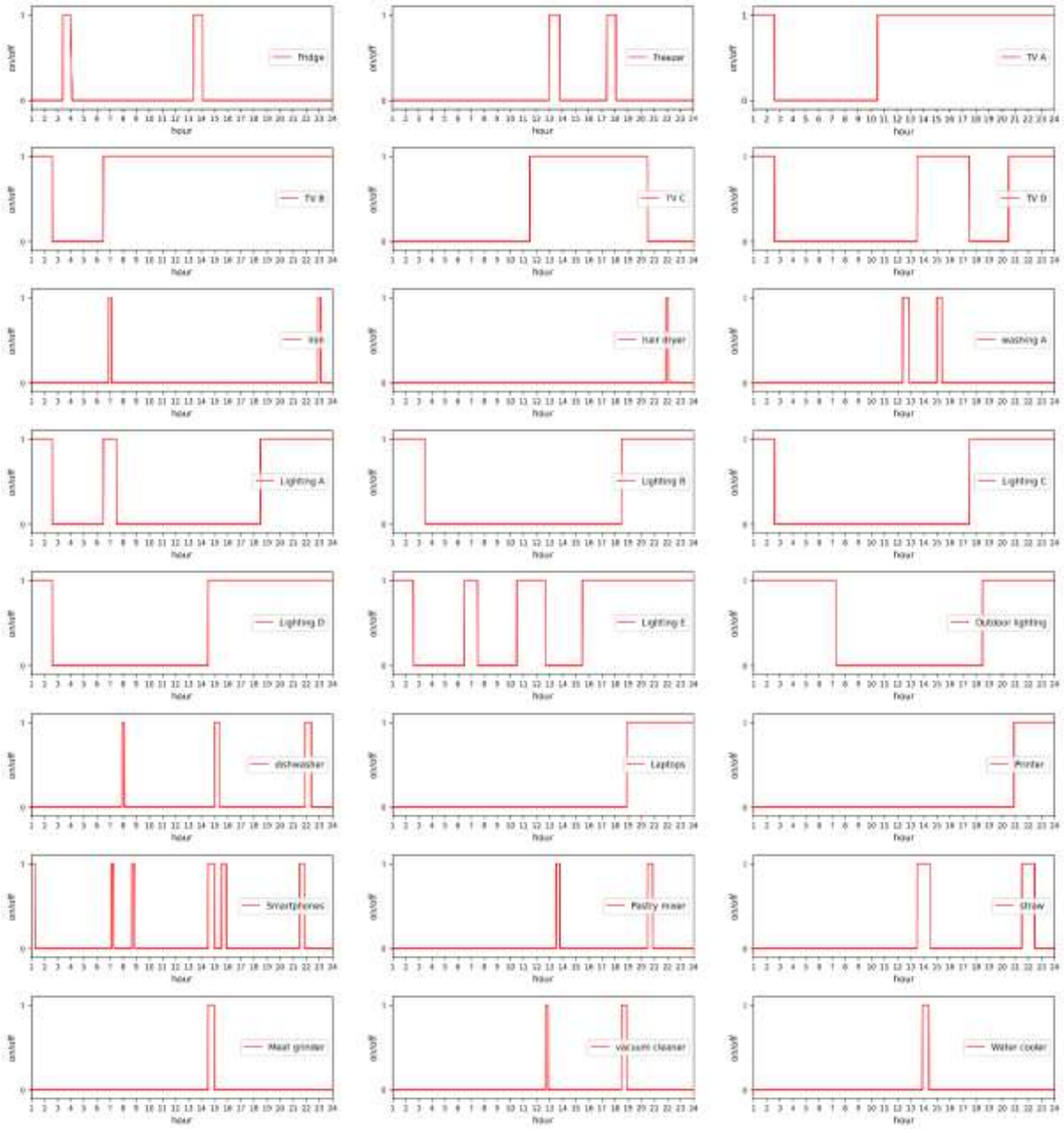
الشكل 4: الإشعاع الشمسي وسرعة الرياح ودرجة الحرارة للمنطقة تحت الدراسة



الشكل 5: نسب مشاركة الأجهزة الكهربائية في الحمل الكهربائي للمنزل قيد الدراسة

الشتاء والشكل (9) مخطط الصندوقي للأحمال الكهربائية خلال العام. وبالتالي فإن الطلب على الأحمال السكنية الذي يركز بشكل خاص على الأحمال الطلب على الكهرباء في الأسر ليبية لا يختلف بشدة من منزل إلى آخر بغض النظر عن الظروف الاجتماعية والاقتصادية لسكانه وعدد الأشخاص الذين يعيشون فيه [27].

من الملاحظ خلال الاشكال السابقة أن الاستهلاك الطاقة الكهربائية يعتمد على ظروف مختلفة مثل الفصول السنة (صيف أو شتاء) بحيث يبلغ أقصى استهلاك للطاقة في فصل الصيف حوالي6000 W، بينما يبلغ في فصل الشتاء حوالى 4000 W، وهذا يؤكد بأن الاستهلاك الطاقة في فصل الصيف يكون أعلى [28،29]. ونتيجة ذلك فإن حمل الكهربائية نابع من العدد الهائل من التطبيقات الكهربائية المنزلية المعاصرة وأغلبها غير ثابتة من حيث قيمة الاستهلاك، مثل الإضاءة والثلاجات وغسالات. وهذا بدوره يضيف تعقيدًا إلى منحنى الحمل الكهربائي. مما يجعل الاستهلاك المثالي صعب التحقق من الناحية العملية. وفي واقع الأمر نجد أن خلال ساعات الصباح، يكون الاستهلاك طاقة على أجهزة المطبخ الصغيرة وأجهزة التدفئة. وبالتالي يكون استهلاك طاقة أقل عموماً خلال النهار حيث يكون السكان غالبًا خارج المنزل. ويرتفع الطلب على الطاقة مع عودة السكان إلى منازلهم بحدود ساعة الثانية ظهرًا، مما يؤدي إلى زيادة استخدام الكهرباء. وينخفض استهلاك الطاقة تدريجياً أثناء ساعات النوم، بسبب تقليل استخدام الإضاءة وأجهزة الترفيه والأجهزة الرئيسية.



الشكل 6: منحنى الاحمال للأجهزة الكهربائية خلال يوم واحد في فصل الصيف الموافق (2024/7/14)

النمذجة الرياضية لمكونات النظام

الالواح الشمسية الكهروضوئية

يمكن تقدير الطاقة الكهربائية المنتجة من الخلايا الشمسية من المعادلة التالية [30]

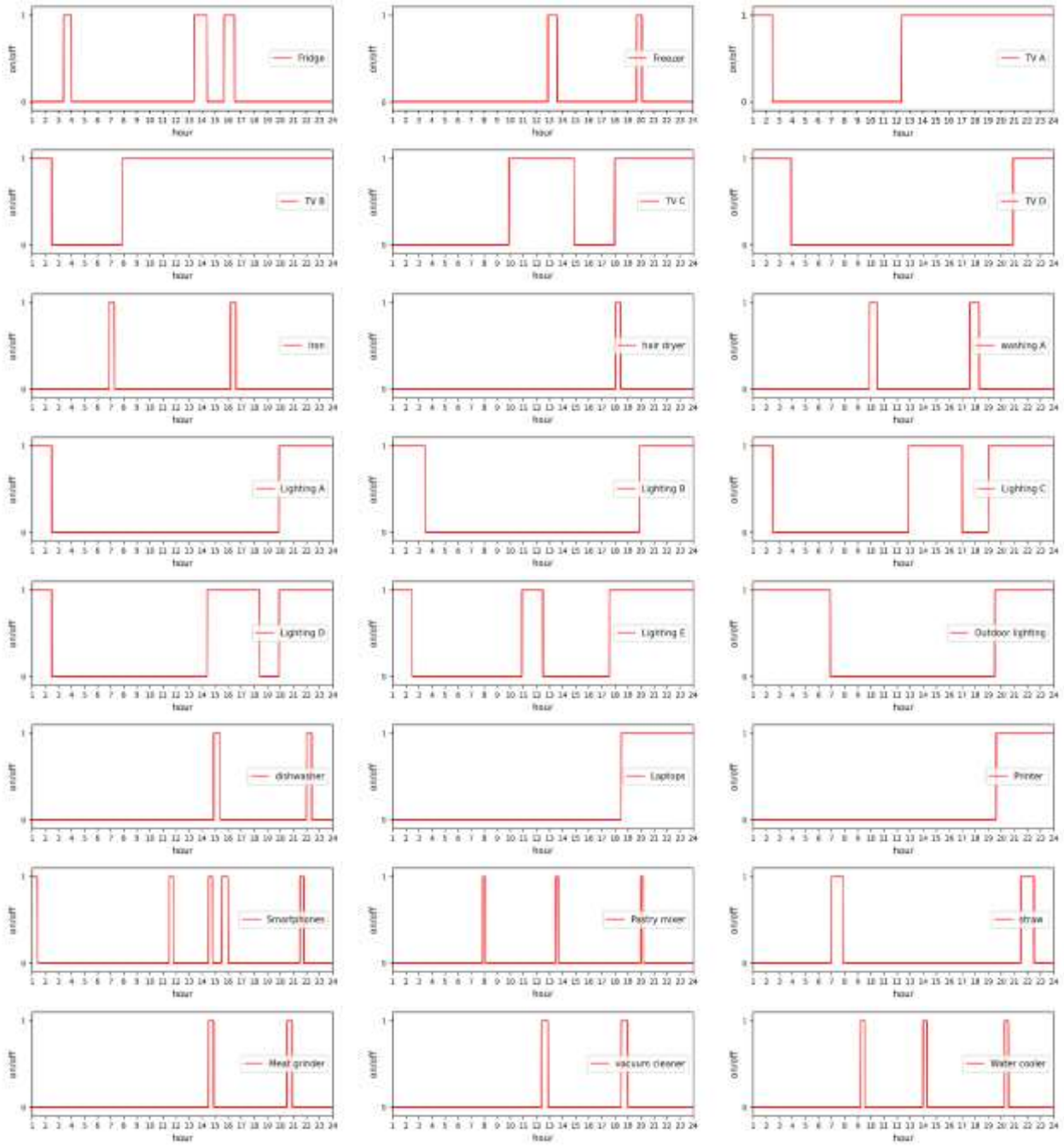
$$E_{PV} = P_{STC}\left[1 + \beta_p(T_{cell} - T_{STC})\right]\frac{H_t}{H_{STC}} \quad (1)$$

$$T_{cell} = T_{\infty} + 7.8 \times 10^{-2} H_t \quad (2)$$

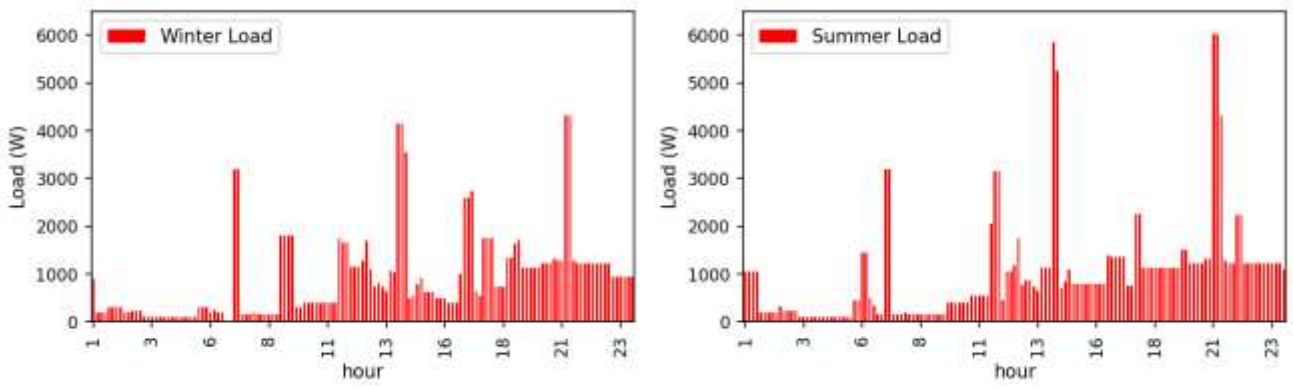
يمثل P_{STC} القدرة المنتجة من خلية الشمسية في الظروف الاختبار القياسية. β_p المعامل درجة الحرارة للقدرة، بينما يعبر T_{cell} و T_{STC} عن درجة حرارة سطح الخلية ودرجة الحرارة الخلية عند ظروف الاختبار القياسية، وكذلك تمثل H_t و H_{STC} الاشعاع الشمسي الكلي والاشعاع الشمسي عند الظروف القياسية. T_{∞} تمثل درجة الحرارة الهواء المحيط. تم اختيار نوع محدد من معدات الطاقة المتجددة استنادًا على نتائج أبحاث محلية للوصول الى أفضل أداء تحت الظروف المناخية القاسية لمدينة سبها [31]. يظهر جدول (1): مواصفات الالواح الكهروضوئية المختارة في النظام الهجين.

الجدول 1: مواصفات الالواح الكهروضوئية المختارة في النظام الهجين

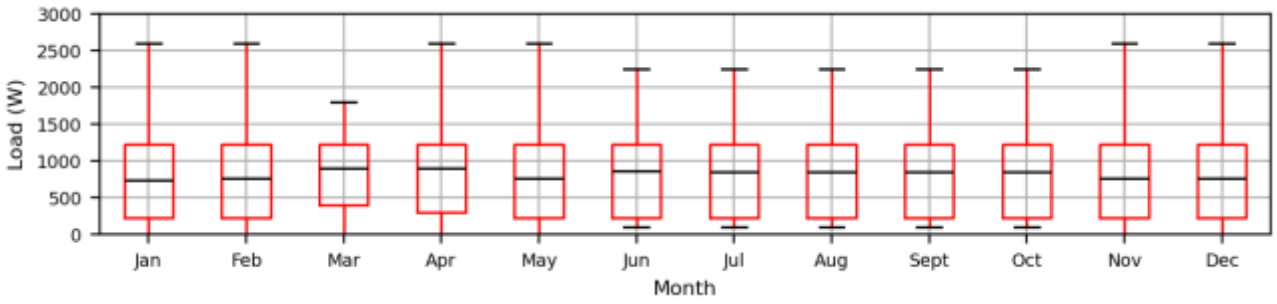
البند	المواصفات
نوع اللوح الشمسي	STM545-565-72M-T8S
القدرة	560W
الكفاءة	21.87%
معامل درجة الحرارة للقدرة	0.4%/°C
تكلفة الانشاء	$1.5/kWp
تكلفة الصيانة والتشغيل	$0.02/kWp
عمر الخلايا الشمسية	25 y



الشكل 7: وتيرة استخدام الأجهزة الكهربائية خلال يوم واحد في فصل الشتاء الموافق (2024/12/18)



الشكل 8: الاحمال الكهربائية اليومية في فصل الصيف وفصل الشتاء الموافق (7/14-12/18)



الشكل 9: مخطط الصندوقي للأحمال الكهربائية خلال العام

طاقة الرياح

يمكن تقدير كمية الطاقة الكهربائية المنتجة من طاقة الرياح باستخدام المعادلة التالية [32]:

$$E_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & v(t) \le v_{c-in} \text{ or } v(t) \ge v_{c-out} \\ P_r \dfrac{v(t) - v_{c-in}}{v_r(t) - v_{c-in}} & v_{c-in} \le v(t) \le v_r \\ P_r & v_r \le v(t) \le v_{c-out} \end{cases} \quad (3)$$

يمثل P_r القدرة المقدرة لتوربين الرياح عند سرعة الرياح التشغيلية v_r، بينما تمثل v_{c-in} وv_{c-out} السرعات الرياح عند الدخول والخروج على التوالي. وفي نفس الصدد عملية الاختيار معدات الطاقة المتجددة، وقع الاختيار في هذه الدراسة على توربينات الرياح من شركة ATO، نظرًا لاستجابتها للمناخ الصحراوي. والجدول (2) يظهر مواصفات توربينات الرياح المختارة.

الجدول 2: مواصفات توربينات الرياح المختارة في الدراسة

البند	المواصفات
نوع التوربينة	ATO-X5-500
القدرة	500W
سرعة الرياح لتشغيل التوربينة	2m/s
سرعة الرياح لفصل التربينة	50m/s
سرعة الرياح المقدرة	12m/s
تكلفة الانشاء	1.2$/kW
تكلفة الصيانة والتشغيل	0.081$/kW
عمر الخلايا الشمسية	25y

البطاريات

يمكن تقدير مستوى الطاقة الكهربائية المخزنة في مجموعة البطاريات على النحو التالي:

$$E_{Batt}(t) = E_{Batt}(t-1)(1-\delta) + \left[E_{PV} + E_{WT} - \frac{E_{Load}}{\eta_{inv}}\right] \times \eta_{Batt} \quad (4)$$

حيث $E_{Batt}(t-1)$ تمثل حالة شحن مجموعة البطاريات عند زمن $(t-1)$، و$E_{PV}(t)$ و$E_{WT}(t)$ هما الطاقة المنتجة من الالواح الكهروضوئية والتوربينات الرياح على التوالي. ويمثل $E_{Load}(t)$ الحمل الكهربائي المطلوب تغطيته. بينما يعبر ζ_{inv} وζ_{Batt} كفاءة كل من العاكس والبطارية. كما يظهر جدول (3) مواصفات البطاريات المختارة لدعم النظام الهجين.

الجدول 3: المواصفات الفنية للبطارية المختارة

البند	المواصفات
نوع البطارية	DG12-33
الفولتية	12V
تكلفة الانشاء	$1.4/Wh
تكلفة الصيانة والتشغيل	$0.005/Wh
عمر البطارية	5

يجب أن تكون المنظومة المتقرحة آمنّة وموثوقة في دعم امداد الطاقة، لذلك تم اعتبار نسبة موثوقية إمداد الطاقة للمنظومة ($LPSP$) القيد الفاصل للتصميم. ويمكن حسابه باستخدام المعادلة التالية [33]:

$$LPSP = \frac{\sum_{i=1}^{52560}[E_{Load}(t_i) - E_{HR}(t_i)]}{\sum_{i=1}^{52560} E_{Load}(t_i)} \quad (5)$$

يمثل E_{HR} الطاقة المنتجة من النظام الهجين، وأما E_{Load} تمثل الحمل الكهربائي المطلوب تغطيته.

التحليل الاقتصادي والبيئي

تم اعتبار التكلفة المستوية للطاقة ($LCOE$) كدالة هدف، حيث يتم تقديرها جنباً الى جنب مع وقت الاسترداد المال ($PBTM$)، مع الاخذ في الاعتبار تكلفة الضرر البيئي (C_{CO_2}). ويحسب ذلك بالمعادلات التالية [35]:

$$LCOE = \frac{\left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}\right) \times (C_{PV} + C_{Wind}) + \left(\frac{i(1+i)^m}{(1+i)^m-1}\right) \times C_{Batt} + C_{O\&M} - C_{CO_2}}{\sum_{t=1}^{52576}(E_{Load}(t) + E_{grid}(t))} \quad (6)$$

$$PBTM = \frac{C_{PV} + C_{Wind} + 5C_{Batt}}{I_H} \quad (7)$$

$$C_{CO_2} = EF_{CO_2} \times \emptyset_{CO_2} \sum_{t=1}^{52576} E_{Load}(t) + E_{grid}(t) \quad (8)$$

حيث أن: n تشير الى عمر المحطة، وهو 25 عامًا للأنظمة الكهروضوئية والتوربينات الرياح، بينما m هو عمر الافتراضي للأنظمة التخزين، ويمكن اعتبارها 5 أعوام. ويمثل i معدل الخصم الحقيقي، وتم اعتماد قيمته 0.08. أما C_{PV} و C_{Wind} و C_{Batt} فتمثل رأس المال لكل من الأنظمة الكهروضوئية وتوربينات الرياح وأنظمة التخزين (البطاريات) على التوالي. وكذلك يعبر $C_{O\&M}$ عن التكلفة التشغيل والصيانة السنوية للمنظومة المقترحة. ويشير I_H الى الدخل السنوي للنظام الهجين من مبيعات الكهرباء، ويشير E_{Load} الى الحمل الكهربائي المطلوب تغطيته، وأيضا E_{grid} يشير الى طاقة المصدرة للشبكة. بينما يمثل EF_{CO_2} معامل انبعاث ثاني أكسيد الكربون لنظام الطاقة في ليبيا (1.037 tonCO2/MWh) [35]. و $\emptyset_{CO_2}$ نمثل التكلفة الاجتماعية للكربون، والتي يمكن اعتبارها 70 $\$/tonCO_2$ [36].

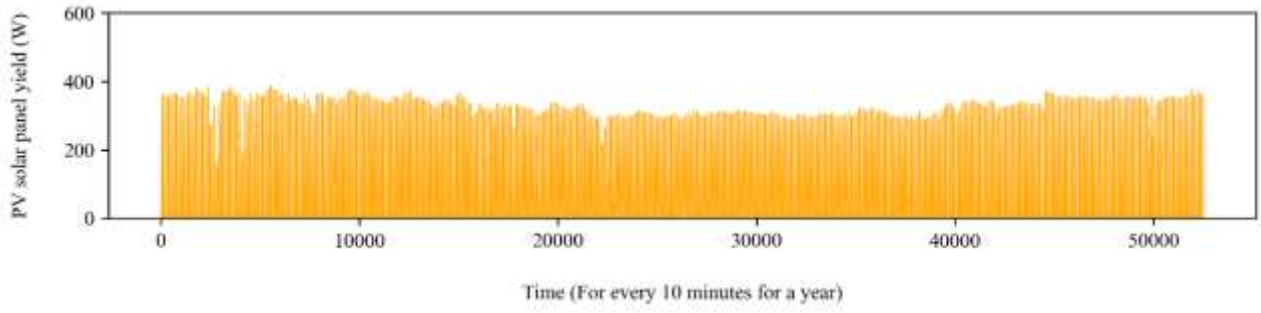
النتائج والمناقشة

في هذا القسم، يتم عرض ومناقشة النتائج المتحصل عليها من عملية تصميم وتحليل منظومة طاقة متجددة هجينة تشمل: الالواح الكهروضوئية وتوربينات الرياح والبطاريات تحت الظروف الفعلية لتغطية الاحمال الكهربائية في منزل في منطقة سمنو. باستخدام برنامج SAM وبمساعدة برنامج الاكسل وبرنامج جوبيتير، للتقدير إنتاجية لوح شمسي كهروضوئي بقدرة 560 W وتوربين الرياح بقدرة 500 W لكل 10 دقائق، كما موضح في الشكل (10) و(11).

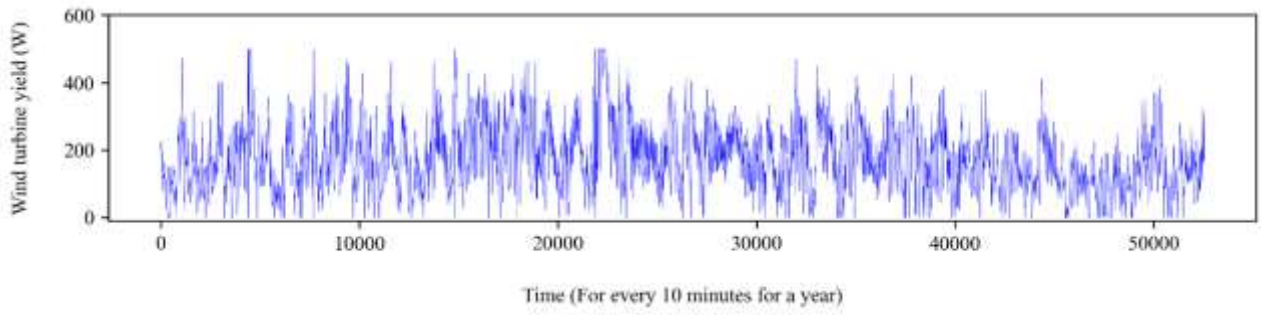
ويتضح من الشكل (12) نموذج لمفهوم مستوى تخزين الطاقة في إحدى البطاريات منظومة الطاقة الهجينة لكل 10 دقائق لمدة عام كامل. وفي هذه الدورة، يتساوى مستوى التخزين عند بداية الدورة عند مستواه عند نهايتها، مما يشير إلى أن دورة مغلقة. وبالتالي، فإن جميع البطاريات المستخدمة في منظومات الطاقة الهجينة في هذه الدراسة تتبع هذا المفهوم في مستوى التخزين الطاقة. وهذا ما يؤدي إلى تكرار مفهوم سلوك التفريغ الطاقة بشكل دوري سنوياً.

ومن خلال التحليل الشكل (13)، يظهر بوضوح كيف أن دمج المصادر الطاقة المتجددة مثل الالواح الكهروضوئية والتوربينات الرياح، مع بطاريات يمكن أن يؤدي هذا المزيج إلى تحسين كفاءة نظم الطاقة الهجينة. باستخدام هذا النهج المتكامل، يمكن توفير الطاقة الكهربائية بشكل مستدام ومتناسق وخاصة في فترت الذروة. لذلك، تم تكوين 10 تكوينات متنوعة تختلف في مشاركة مصادر الطاقة في تزويد الطاقة الكهربائية. هذه الاستراتيجية تعكس كيفية استفادة الأنظمة الهجينة من توازن متناغم بين مصادر الطاقة لتلبية احتياجات الطاقة بكفاءة وفعالية. كما يشير أيضا الشكل (13) تأثير مشاركة مصادر الطاقة المتجددة (الالواح الكهروضوئية والتوربينات الرياح) على سعة البطاريات.

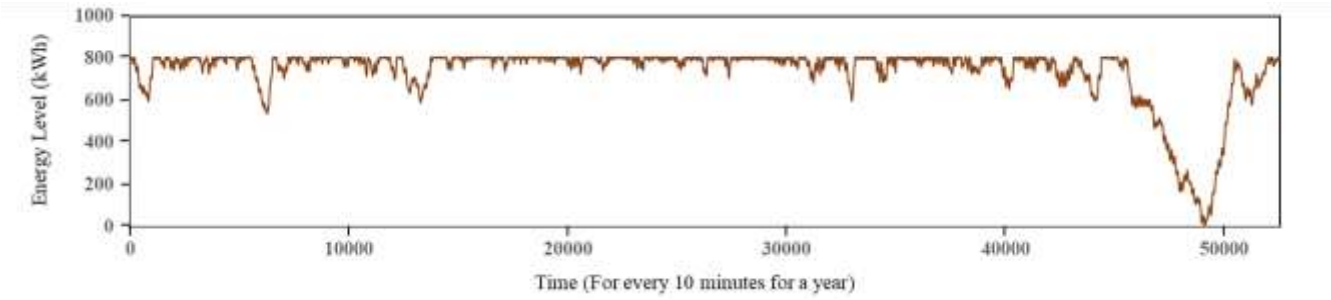
وتماشيًا مع ماتم ذكره، تم تطبيق دالة الهدف من خلال حساب تكلفة الطاقة المستوية (LCOE) ضمن المعايير المحددة في اطار البحث والتي تعتبر الفيصل في تحديد حجم منظومة الطاقة الهجينة المقترحة. تم دمج تحليل دورة حياة ثاني أكسيد الكربون لجميع مكونات منظومة الطاقة الهجينة. وفقاً للمعادلة (6). يوضح الشكل (14) تكلفة الطاقة المستوية (LCOE) لجميع تكوينات مصادر الطاقة المتجددة الهجينة في هذه الدراسة.



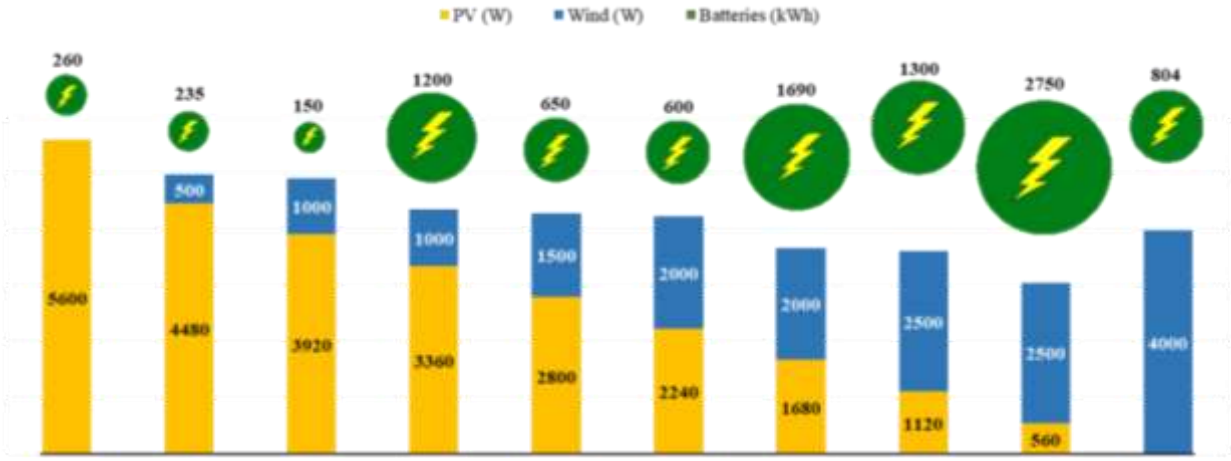
الشكل 10: إنتاجية لوح الطاقة الشمسية بقدرة 560W لكل 10 دقائق



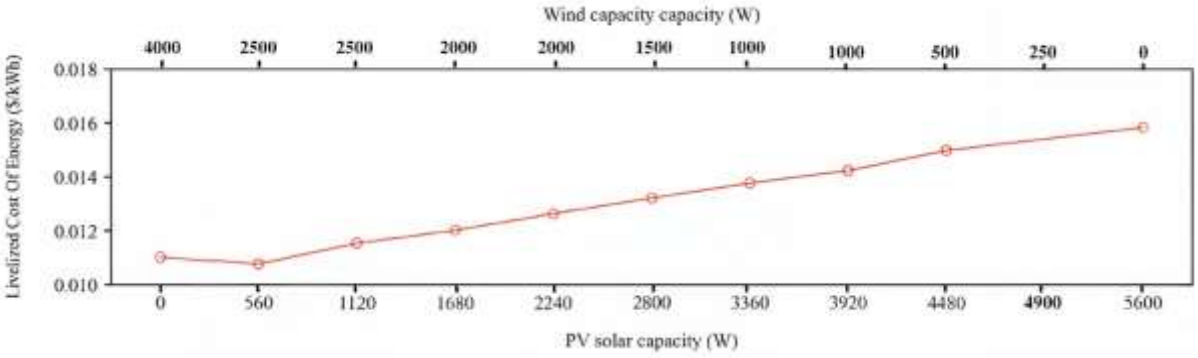
الشكل 11: إنتاجية توربينة الرياح بقدرة 500W لكل 10 دقائق



الشكل 12: مستوى تخزين الطاقة في البطاريات لكل 10 دقائق



الشكل 13: تكوينات من مصادر الطاقة المتجددة لتزويد الطاقة الكهربائية

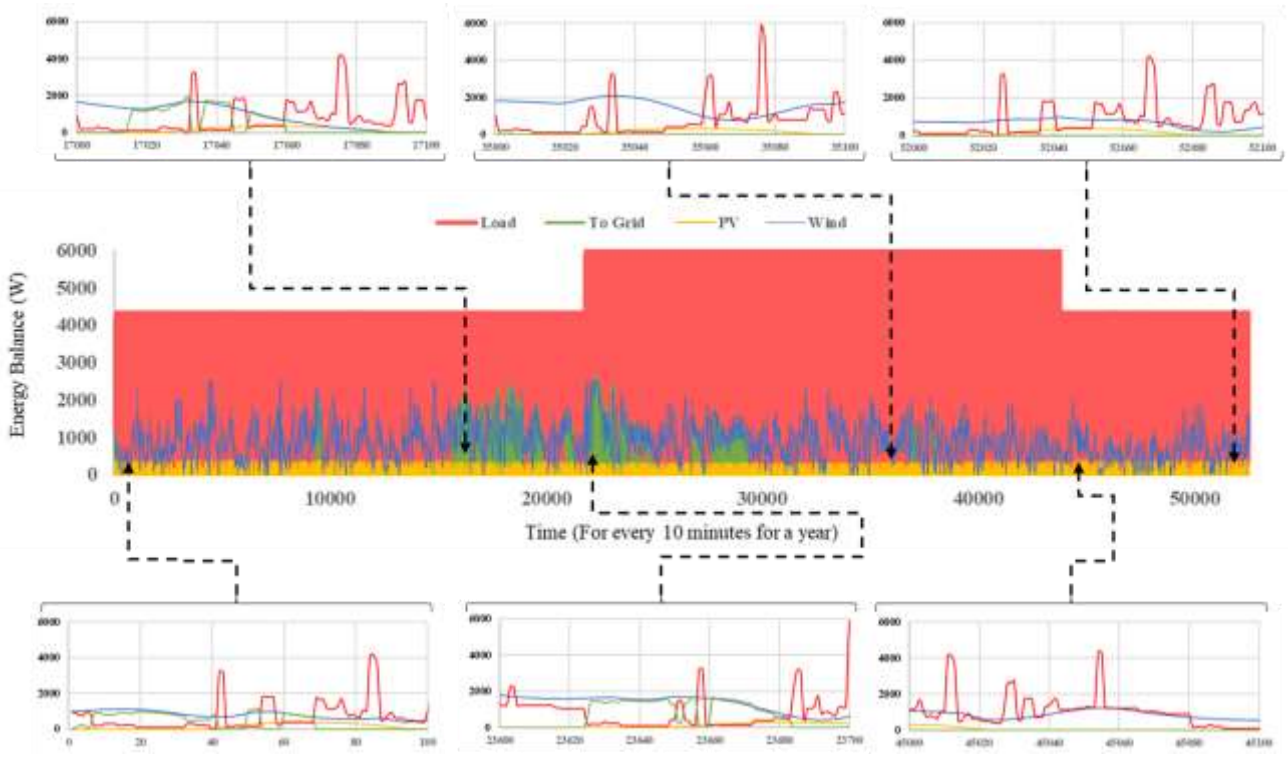


الشكل 14: تكلفة الطاقة المستوية (LCOE) لتكوينات المصادر الطاقة المتجددة الهجين

يشير التحليل الاقتصادي الموضح في الشكل (14) إلى أن الحد الأدني لتكلفة الطاقة المستوية (LCOE) 0.0107 $/kWh. وقد تمثلت هذه التكلفة في السعات التالية: 560 W طاقة الشمسية الكهروضوئية، و 2500 W طاقة الرياح، و 2750 kWh نظام تخزين (بطاريات). هذه القيمة من التكلفة (LCOE) تعكس كفاءة المنظومة الهجينة المقترحة تعتمد على مصادر متعددة للطاقة. تلك النتائج تبرز أهمية الاستثمار في الطاقات المتجددة، سواء على مستوى المحلي أو الدولي. مما يعكس ذلك التزامنا بتحقيق التنمية المستدامة والحفاظ على البيئة.

ومع ذلك، تم تمثيل عملية اتزان الطاقة بين التوليد والحمل الكهربائي تحت الظروف الزمنية الفعلية، والتي كانت لكل 10 دقائق لمدة عام كامل. وهنا تجدر الإشارة الى أن تمثيل هذا الكم الهائل من البيانات يصعب توضيح سلوك العملية بشكل دقيق، ولذلك تم تقسيم البيانات الى فترات زمنية أصغر لتوضيح سلوك العملية بدقة أكبر. تم اختيار بعض الفترات الزمنية مع الشكل العام. كما موضح في الشكل (15).

يشير الشكل (15) توازن الطاقة بين توليد الطاقة الكهربائية وحمل الكهربائي الذي يتمثل في الحمل الكهربائي المنزلي والحمل المصدر للشبكة. تضم منظومة توليد الطاقة الهجينة لوح شمسي كهروضوئي بقدرة 560 W، وعدد خمس توربينات الرياح قدرة كل منها 500 W، بقدرة اجمالية تبلغ 2500 W، وبطاريات تخزين بسعة 2750 kWh لتلبية الطلب السنوي على الطاقة الكهربائية يبلغ 51238 kWh. في المقابل، بينما تبلغ إجمالي الطاقة السنوية التي تولدها المنظومة 51580 kWh. تبلغ مشاركة الطاقة الشمسية حوالي 5388 kWh. بينما تسهم طاقة الرياح بإنتاج 45909 kWh. هذه الطاقة تكفي لتلبية الحمل الكهربائي المطلوب، ويصدر الفائض والذي يقدر بحوالي 342 kWh الى الشبكة العامة الكهربائية.



الشكل 15: اتزان الطاقة في المنظومة الطاقة المتجددة الهجينة المقترحة

الاستنتاجات والتوصيات

تم في هذه الدراسة تصميم منظومة طاقة متجددة هجينة تتضمن الطاقة الشمسية الفوتو ضوئية وطاقة الرياح وبطاريات تحت الظروف الزمنية الفعلية لتغطية الاحمال الكهربائية في القطاع السكني. تم دراسة على منزل يقع في منطقة سمنو احدى المناطق الجنوبية من ليبيا. تظهر نتائج الدراسة بأن استخدام انظمة الطاقة المتجددة الهجينة في قطاع السكني مجديًا من الناحتيين الفنية والاقتصادية والبيئية. مما يساهم في توليد الطاقة بأعلى كفاءة وبأقل تكلفة وأكثر مراعاة للبيئة من ناحية تقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري. أظهرت نتائج أن منظومة الطاقة الهجينة المقترحة تتألف من لوح شمسي كهروضوئي بقدرة 560 W، و خمس توربينات الرياح كل منها بقدرة 500 W، بقدرة اجمالية تبلغ 2500 W. بإضافة الى بطاريات تخزين بسعة 2750 kWh. كما أظهرت النتائج بأن منظومة الطاقة المتجددة الهجينة المقترحة قادرة على تغطية الحمل الكهربائي المطلوب والذي بلغ 51238kWh سنويًا، خاصة في أوقات الذروة وأيضًا امداد الطاقة للشبكة الكهربائية. وتبزر النتائج الاقتصادية للمنظومة المقترحة بأن تكلفة المستوية للطاقة (LCOE) تبلغ 0.0107 $/kWh. مما يشجع الاستثمار في مصادر الطاقات المتجددة المدمجة في الشبكة. وقد يعزز البحث بشكل مقنع قبول مصادر الطاقة المتجددة في جميع بيئات استنادًا إلى الفوائد البيئية والاقتصادية.

Author Contributions: "All authors have made a substantial, direct, and intellectual contribution to the work and approved it for publication."
Funding: "This research received no external funding."
Data Availability Statement: "The data are available at request."
Conflicts of Interest: "The authors declare no conflict of interest."

References

[1] "IRENA_RE_Capacity_Statistics_2024.pdf." [Online]. Available: https://www.irena.org/
[2] K. Davda, "Top 10 Most Polluted Cities in the World (2025)," 2025. [Online]. Available: https://oizom.com/top-10-most-polluted-cities-in-the-world/
[3] "Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector". [Online]. Available: https://iea.blob.core.windows.net
[4] "Buildings." [Online]. Available: https://www.iea.org/energy-system/buildings.
[5] "Share of electricity in final consumption," 2023. [Online]. Available: https://www.iea.org/countries/libya/electricity
[6] A. Khalil, Z. Rajab, and A. Asheibi, "The Economic Feasibility of Photovoltaic Systems for Electricity Production in Libya," 2019. [Online]. Available: http://repository.uob.edu.ly/handle/123456789/758
[7] Y. F. Nassar and H. J. El-Khozondar, "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, pp. 149–170, 2024. https://link.springer.com/article/10.3103/S0003701X24600218
[8] Y. Kassem, H. Camur, and O. A. M. Abughinda, "Solar Energy Potential and Feasibility Study of a 10MW Grid-connected Solar Plant in Libya," Eng. Technol. Appl. Sci. Res., vol. 10, no. 4, pp. 5358–5366, Aug. 2020, https://doi.org/10.48084/etasr.3607.

[9] 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

[10] Y. F. Nassar et al., "Solar and Wind Atlas for Libya." International Journal of Electrical Engineering and Sustainability, vol. 1, no. 3, pp, 27-43, 2023. https://www.researchgate.net/publication/372283469

[11] Y. F. Nassar, S. Y. Alsadi, and G. M. Miskeen, "Mapping of PV Solar Module Technologies Across Libyan Territory," Iraqi International Conference on Communication and Information Technologies 2022. https://doi.org/10.1109/IICCIT55816.2022.10010476

[12] B. Belgasim and Y. Aldali, "Review on Solar Thrmal Electricity in Libya," Solar Energy and Sustainable Development Journal, vol. 7, no. SI, pp. 48–60, 2018. https://doi,org/10.51646/jsesd.v7iSI.74.

[13] A. Guwaeder, H. Sarhan, and I. Aldaouab, "A study of the penetration of photovoltaic generation into the Libyan power system," Inst. Electr. Electron. Eng., 2017. https://ieeexplore.ieee.org/document/8167477

[14] H. Mokhtar Ali and M. Zakaria Ahmed, "Estimation of Wind Power Potential for Alasaba Region - Libya," Inst. Electr. Electron. Eng., 2023. https://ieeexplore.ieee.org/document/10249619

[15] G. Ali S A, "Evaluating renewable energy applications in Libya," Online Res. Cardiff, 2024. https://orca.cardiff.ac.uk/id/eprint/167884

[16] M. A. A. M. Albreki and F. A Mohamed, "Performance evaluation of different solar photovoltaic technologies in Libya," Inst. Electr. Electron. Eng., 2021. https://www.researchgate.net/publication/348418342

[17] M. Almaktar and M. Shaaban, "Prospects of renewable energy as a non-rivalry energy alternative in Libya," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 143, p. 110852, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.110852. https://ideas.repec.org/a/eee/rensus/v143y2021

[18] H. Awad et al., "Energy, economic and environmental feasibility of energy recovery from wastewater treatment plants in mountainous areas: A case study of gharyan city – LIBYA," Acta Innov., no. 50, pp. 46–56, Dec. 2023, doi: 10.32933/ActaInnovations.50.5. https://www.proakademia.eu/

[19] K. H. Alshoshan, W. B. El-Osta, Y. M. Kahlifa, and I. M. Saleh, "Feasibility Study of Zero Energy Houses: Case Study of Magrun City - Libya," 2018. https://doi.org/10.51646/jsesd.v7i2.41

[20] N. M. Bauid and M. Rahman, "Providing electricity access for unelectrified people in remote areas: demonstrated to a case study in Libya",2022. https://doi.org/10.54279/mijeec.v4i2.247735

[21] Y. Dabas and M. Iqbal, "Sizing and Analysis of a DC Stand-Alone Photovoltaic-Battery System for a House in Libya," Jordan J. Electr. Eng., vol. 7, no. 2, p. 84, 2021, doi: 10.5455/jjee.204-1612977821. https://ejmanager.com/fulltextpdf.php?mno=54817

[22] Y. F. Nassar et al., "Design of an isolated renewable hybrid energy system: a case study," Mater. Renew. Sustain. Energy, vol. 11, no. 3, pp. 225–240, Dec. 2022, doi: 10.1007/s40243-022-00216-1. https://link.springer.com/10.1007/s40243-022-00216-1

[23] D. Abah, N. Iliyasu, A. Aliyu, and A. Kabir, "Design and simulation of hybrid power supply for residential consumer," 2023. https://www.researchgate.net/publication/376608180

[24] A. Ariaei, M. Fakhr, R. Ahmadi, and M. Jahangiri, "Comparative Analysis of Hybrid and Single-Source Power Systems for Sustainable Electricity Generation for Remote Areas: A Case Study in Zahedan," Int. J. Photoenergy, vol. 2024, no. 1, p. 1929512, 2024, https://doi.org/10.1155/2024/1929512.

[25] J. Liu, "Optimal design and techno-economic analysis of a solar-wind-biomass off-grid hybrid power system for remote rural electrification: A case study of west China," Energy, vol. 208, 2020. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544220314948

[26] E. Salim, A. Abubaker, B. Ahmed, and N., Yasser. "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 University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 152-167, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_22

[27] M. Abdunnabi, N. Etiab, and Y. F. Nassar, "Energy savings strategy for the residential sector in Libya and its impacts on the global environment and the nation economy",2023. https://doi.org/10.1080/17512549.2023.2209094

[28] M. I. Alowa, M. A. Hossin, M. A. Hamoudah, and H. A. Said, "Impact of wall material types on cooling and heating loads of a residential building at Sebha city conditions," no. 01, 2024. https://doi.org/10.51984/sucp.v3i1.3540

[29] M. A. Umbark, S. K. Alghoul, and E. I. Dekam, "Energy Consumption in Residential Buildings: Comparison between Three Different Building Styles," Sustain. Dev. Res. ISSN 2690-9898 E-ISSN 2690-9901, vol. 2, no. 1, p. p1, Mar. 2020, doi: 10.30560/sdr.v2n1p1. https://j.ideasspread.org/index.php/sdr/article/view/470

[30] K. Amer, M. Irhouma, M. Ibrahim, and A. Aqila, "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

[31] K. Amer *et al.*, "Power Losses on PV Solar Fields: Sensitivity Analysis and A Critical Review," *Int. J. Eng. Res.*, vol. 9, no. 09. https://www.researchgate.net/publication/344520794

[312 M. Elnaggar, H. El-Khozondar, and Y. Nassar, "Assessing the Techno-enviro-economic viability of wind farms to address electricity shortages and Foster sustainability in Palestine," *Results Eng.*, vol. 24, 2024, [Online]. Available: : www.sciencedirect.com/journal/results-in-engineering

[33] A. Alsharif, E. Almabsout, A. Ahmed, M. Khaleel, Y. Nassar, and H. El-Khozoadar, "Optimal Sizing of Hybrid Renewable System for Residential Appliances," in *2024 IEEE 4th International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*, Tripoli, Libya: IEEE, May 2024, pp. 290–295. doi: 10.1109/MI-STA61267.2024.10599729.

[34] Y. Fathi, H. El-Khozondar, 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," *J. Energy Storage*, vol. 108, 2025. https://doi.org/10.1016/j.est.2024.115224

[35] Y. Nassar, M. Salem, K. Iessa, I. AlShareef, K. Ali, and M. Fakher, "Estimation of CO2 emission factor for the energy industry sector in Libya: a case study," *Environ. Dev. Sustain.*,

vol. 23, no. 9, pp. 13998–14026, Sep. 2021, https://doi.org/10.1007/s10668-021-01248-9.

[36] S. Mohammed, et al., "Carbon and Energy Life Cycle Analysis of Wind Energy Industry in Libya," *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 50–69. 2023. https://doi.org/10.51646/jsesd.v12i1.150