










Design and Analysis of PV Solar Street Lighting systems in Remote Areas: A Case Study

Ali Alkhazmi^{1*} , Yasser Nassar¹ , Hala J. El-Khozondar^{2,3} , Sassi Rekik⁴ , Haidar Hadi⁵ ,
Monaem Elmnifi⁶ , Mohamed Khaleel⁷ , Ibrahim Imbayah⁸ , Mai Abuhelwa⁹ 

¹Mechanical & Renewable energy Eng. Dept., Engg, Faculty, Wadi Alshatti University, Brack, Libya

²Electrical Engineering and Smart Systems Departments, Islamic University of Gaza, Gaza, Palestine.

³Department of Materials and London Centre for Nanotechnology, Imperial College, LondonSW7 2AZ, UK

⁴Laboratory of Thermal and Energy Systems Studies (LESTE), University of Monastir, Monastir, Tunisia

⁵Indunor AS company, Østensjøveien 15 c, 0661 Oslo, Norway

⁶Department of Mechanical Engineering Technology, Belgorod State Technological University, Belgorod, Russia

⁷Department of Electrical-Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Karabuk University, Karabuk 78050, Turkey

⁸Department of Energy Engineering, College of Renewable Energy, Tajoura, Libya

⁹Department of Electrical Engineering and Computer Science, University of Missouri, Columbia, Missouri, USA

ARTICLE HISTORY

Received 23 November 2025

Revised 19 December 2025

Accepted 22 December 2025

Online 25 December 2025

KEYWORDS

Solar Energy;
Street Lighting;
Economic Feasibility;
Photovoltaic Systems.

ABSTRACT

This study presents the design and evaluation of a solar-powered street lighting system for the Brack Alshatti – Alshuwayrif road in southern Libya. The aim is to reduce traffic accidents on this vital north-south artery. The analysis was conducted using hourly climate data for the study area. Several software programs were employed, including System Adviser Model (SAM), MS Excel, and Dialux, to assess the technical, economic, and environmental feasibility of the proposed system and to determine the optimal street lighting design that minimizes the cost per unit of electricity production. Electronic devices and sensors were also used to monitor system performance and minimize malfunctions and energy waste. The optimum system included a 530W solar panel, a 2620Wh (12V×220Ah) storage battery, and a 100W LED light. The number of light poles required to meet traffic safety requirements and standard specifications for lighting the 280 km distance between Brack and Alshuwerif cities was estimated at 3,450 poles. The project cost was estimated at 18,265,000 LD, with a levelized cost of energy of 0.604 LD/kWh. The payback period was estimated at 21.9 years, and the annual amount of CO₂ prevented from being released into the atmosphere was estimated at 413.5 tons annually, which equivalent to 249,452 LD per year.

تصميم وتحليل نظام إنارة شوارع بالطاقة الشمسية في المناطق النائية: دراسة حالة

علي رمضان الخازمي^{1*}، ياسر نصار¹، هالة الخزندار^{2,3}، ساسي رقيق⁴، حيدر هادي⁵، منعم المنفي⁶، محمد خليل⁷، إبراهيم أمبية⁸، مي أبو حلاوة⁹

الكلمات المفتاحية

الطاقة الشمسية
إنارة الشوارع
الجدوى الاقتصادية
الأنظمة الكهروضوئية لشوارع

الملخص

تستعرض هذه الدراسة تصميمًا وتقييمًا لنظام إنارة شوارع يعمل بالطاقة الشمسية لطريق براك الشاطئ – الشويرف الواقع في جنوب ليبيا، في إطار التقليل من الحوادث المرورية في هذه الطريق. اجري التحليل استنادًا على بيانات مناخية ساعية لمنطقة الدراسة، كما استخدمت العديد من البرامج منها: (SAM) System Adviser Model، MS Excel، Dialux. يهدف تقييم الجدوى الفنية والاقتصادية والبيئية للنظام المقترح، والحصول على التصميم المثالي لإنارة الطريق والذي يحقق أقل تكلفة لوحدة إنتاج الكهرباء. كما تم استخدام أجهزة وحساسات إلكترونية لمراقبة أداء النظام لتقليل الأعطال وهدر الطاقة. أشتتمل التصميم المثالي للمنظومة على لوح شمسي بقدرة 530 واط وبطارية تخزين بسعة 2620 واط/ساعة (12V×220Ah)، ومصباح إنارة LED بقدرة 100W، وقدرت عدد الأعمدة اللازمة لتحقيق متطلبات السلامة المرورية والموصفات القياسية لإنارة طريق براك-الشويرف بطول 280 km بحوالي 3450 عموداً. وقدرت تكلفة المشروع بحوالي 18,265,000 ديناراً ليبيا، وبتكلفة إنتاج وحدة طاقة 0.604 ديناراً ليبيا لكل كيلوواط ساعة. وقدرت فترة استرداد رأس المال بحوالي 21.9 سنة، وبلغت كمية CO₂ التي منعت من الانطلاق في الهواء الجوي بنحو 413.5 طن سنوياً، وهو ما يكافئ 249,452 ديناراً ليبيا في السنة.

*Corresponding author

https://doi.org/10.63318/waujpasv4i1_01

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) (CC BY-NC 4.0).



تنوّعت الدراسات التي تناولت إنارة الشوارع باستخدام الطاقة الشمسية بين الجوانب التقنية، والبيئية، والاقتصادية [10]، وهو ما يعكس الاهتمام المتزايد بهذا النوع من المشاريع المستدامة. تهدف هذه الدراسة الى تصميم وتنفيذ نظام إنارة شوارع يعمل بالطاقة الشمسية كبديل مستدام وفعال. من خلال تزويد وحدات الإنارة في الشوارع بمكونات إلكترونية ذكية تتيح التحكم في شدة الإضاءة، استناداً إلى بيانات حقيقية بشأن حركة المركبات والمشاة في المناطق المستهدفة. ويُعد هذا النهج خطوة متقدمة نحو تحقيق مفهوم "المدينة الذكية"، حيث تتحول مكونات البنية التحتية التقليدية إلى منصات متعددة الوظائف تُسهم في تحسين كفاءة التشغيل والخدمات الحضرية [11,12].

حظيت مشاريع الطاقة الشمسية بالقدر الأكبر من الاهتمام، لما لها من أهمية كبيرة في ظل نقص الوقود والغاز. حيث حدد في دول الاتحاد الأوروبي بعدد 28 دولة تستهلك حوالي 35 تيراواط ساعة سنوياً، وهو ما يمثل حوالي 1.3% من إجمالي استهلاك الكهرباء في الاتحاد. وعلى الصعيد المالي، تشكل تكاليف الإضاءة عبئاً كبيراً، حيث تصل إلى 25% من الميزانية الإجمالية المخصصة لشبكات الطرق، بقيمة إجمالية تقدر بحوالي 3.85 مليار يورو سنوياً. وفي سياق البحث عن حلول مستدامة، أبرزت الدراسة إمكانات تقنيات الطاقة الشمسية كبديل واعد [13]، حيث أظهرت التحليلات أن فترة استرداد رأس مال مشروع الطاقة الشمسية المستخدمة في إنارة الطرق تتراوح بين 1.8 و3.3 سنوات. هذه الفترة القصيرة تؤكد على الجدوى البيئية والاقتصادية العالية لتبني أنظمة الإنارة الشمسية على نطاق واسع [14].

في تركيا استعرض Duman & Güler نماذجاً لتحليل التقني والاقتصادي لأنظمة إنارة الطرق العاملة بالطاقة الشمسية والمستقلة عن الشبكة، أظهرت النتائج تبايناً كبيراً في التكاليف. بلغت التكلفة الموحدة للطاقة (LCOE) لأنظمة إنارة الطرق المستقلة ما بين 1.603 - 2.534 ديناراً لیبياً/ك.و.س، وذلك اعتماداً على إمكانات الطاقة الشمسية في المنطقة. كما تراوحت التكلفة الحالية الصافية الإجمالية للمنظومة (NPC) لكل كيلومتر من إنارة الطرق بين 170,072 - 310,226 دينار [15].

في بنغلاديش، صمم Hasan et al نظاماً شمسياً يعمل بالخلايا الكهروضوئية (PV) لإضاءة الشوارع في جامعة شاه جلال للعلوم والتكنولوجيا. أُجري تحليل للجدوى الاقتصادية وانبعاثات CO₂ لنظام إضاءة الشوارع الشمسي المقترح باستخدام برنامج إدارة الطاقة النظيفة "RETScreen". وبالنسبة لعمر المشروع البالغ 25 عاماً، حددت الدراسة المكونات الأساسية للوحدة الواحدة في لوح شمسي بقدرة 150 واط، وبطارية بسعة 120 أمبير ساعة، ومصباح LED بقدرة 20 واط. بلغت التكلفة الإجمالية 265.30 دولاراً، وأكدت الدراسة على العائد البيئي المتمثل في تخفيض انبعاثات CO₂ بمقدار 11.42 طن سنوياً للنظام بالكامل [16].

وفي الهند، اقترح Arif et al نظاماً لطاقة هجينة يتكون من ألواح شمسية/مولد ديزل/بطارية للمناطق السكنية في المناطق النائية في الهند التي تعتمد على مولدات الديزل أثناء انقطاع التيار الكهربائي والذي قد يصل إلى 50 ساعة باستخدام HOMER، يتكون النظام المثالي من 64 كيلوواط خلايا شمسية، و53 كيلوواط ساعة من بطاريات التخزين وثلاثة مولدات ديزل

أدى النمو السكاني المتسارع والتوسع الاقتصادي إلى اتساع رقعة المدن وتزايد شبكات الطرق، مما نتج عنه ارتفاع كبير في الطلب على خدمات البنية التحتية، وعلى رأسها إنارة الشوارع. وقد أظهرت الدراسات أن إنارة الطرق تُمثل أحد أبرز مصادر استهلاك الطاقة الكهربائية في المدن، حيث تستهلك ما يُقدر بنحو 40% من إجمالي استهلاك الكهرباء على مستوى البلديات، وهو ما يعادل تقريباً ما بين 1% إلى 3% من إجمالي الاستهلاك العالمي للطاقة الكهربائية، بناءً على معامل الانبعاث المعتمد لتوليد الكهرباء في ليبيا إن الانبعاثات الناتجة عن قطاع إنارة الشوارع تُقدّر بحوالي 4.1 مليون طن من CO₂ سنوياً [1]. حيث تشكل إضاءة الطرق عنصراً حيوياً في البنية التحتية، خاصة في الطرق التي تربط المدن والقرى بعضها ببعض، مثل الطريق الواصل بين براك الشاطئ والشويرف. هذا الطريق الحيوي يشهد حركة مستمرة لنقل الأشخاص والبضائع يومياً، مما يجعل تحسين إضاءته أمراً ضرورياً لتقليل الحوادث المرورية وتحسين ظروف القيادة الليلية، حيث اشارت الدراسات المرورية إلى أن أكثر من 51% من حوادث المرور تقع خلال الفترة الليلية، وهو ما يُبرز الأهمية البالغة لإنارة الطرق كعنصر أساسي في تحسين السلامة المرورية [2]. وقد أظهرت الإحصاءات أن تحسين جودة إنارة الطرق يمكن أن يُسهم في خفض الإصابات الناجمة عن الحوادث الليلية بنسبة تصل إلى 11%، كما يقلل الحوادث المميتة بنسبة تُقدّر بحوالي 40%، وحوادث الأضرار بالململكات بنسبة ملموسة [3].

أما في ليبيا في عام 2024، بلغ إجمالي إنتاج الكهرباء في ليبيا حوالي 35,110 GWh، وتعتبر إنارة الشوارع من أكبر مستهلكي الطاقة الكهربائية، حيث تشير الإحصائيات إلى إنارة الشوارع تستهلك ما يقارب 3,996 GWh سنوياً، ما يُمثل ما نسبته 19% من إجمالي استهلاك الكهرباء في البلاد [3,4]. ما يعكس العبء الكبير الذي تشكله إنارة الطرق على الشبكة الكهربائية الوطنية. أما فيما يتعلق بالأثر البيئي، فإن توليد الكهرباء في ليبيا يُنتج كميات كبيرة من انبعاثات (CO₂) نظراً للاعتماد شبه الكامل على الوقود الأحفوري. وتشير التقديرات إلى أن معدل الانبعاثات الناتجة عن توليد الكهرباء في ليبيا 1,037gCO₂/kWh، وبناءً على هذا، فإن إجمالي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون الناتجة عن إنارة الشوارع تقدر بحوالي 4.144 مليون طن سنوياً [5,6].

وفي هذا السياق، تبرز الطاقة الشمسية كخيار مثالي لإضاءة الطرق في المناطق الحضرية، أما في المناطق المعزولة عن الشبكة مثل طريق براك الشاطئ_الشويرف؛ فيمثل الخيار الوحيد لتحقيق إضاءة فعالة ومستدامة. وذلك عن طريق دمج الألواح الشمسية ومصابيح LED المتطورة وبطاريات تخزين الطاقة الكهربائية مع الأجهزة الإلكترونية لمراقبة الأداء وترشيد استهلاك الطاقة. كما تعتبر هذه الطريق السريعة بيئة مثالية لتوظيف هذه التكنولوجيا بفعالية، نظراً لاتساعها وغياب العوائق العمرانية، ما يسمح بوصول الأشعة الشمسية إلى الألواح الكهروضوئية دون حواجز. كما وتُعد الأنظمة الكهروضوئية وسيلة لتقليل انبعاثات الكربون، وتخفيف الأثر البيئي، وتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة الأحفورية، ودعم التحول نحو الطاقات المتجددة والنظيفة [7-9]

يحققه النظام من توفير استهلاك الطاقة بنسبة 30%، مما يسهم بشكل مباشر في تقليل البصمة الكربونية [21].

وفي مصر، قدم Ibrahim et al تحليلاً شاملاً ومتكاملاً لتصميم وتقييم نظام إنارة شمسي ذكي في بيئة حضرية كثيفة كمحافظة الجيزة. اقترح الباحثون نظاماً يتجاوز مجرد استبدال مصابيح الصوديوم عالية الضغط (HPS) التقليدية، ويدمج تقنيات "المدن الذكية" لتحقيق أقصى قدر من الكفاءة. يتكون النظام من لوح شمسي بقدرة 320 واط، وبطارية ليثيوم حديد فوسفات (LiFePO4) بسعة 200 أمبير- ساعة، ومصباح LED بقدرة 100 واط، أظهرت نتائج التحليل الاقتصادي أن التكلفة الأولية للنظام الشمسي الذي أعلى من نظام الإنارة التقليدي المرتبط بالشبكة. ومع ذلك، فإن فترة استرداد رأس المال للمشروع قصيرة بشكل ملحوظ، حيث قدرت بـ 4.5 سنوات فقط. كما أن تكلفة الطاقة (LCOE) للنظام الشمسي بلغت 0.623 دينار/ك.و.س، وهي قيمة تنافسية للغاية مقارنة بتعريف الكهرباء المدعومة في مصر. حقق النظام انخفاضاً كبيراً في البصمة الكربونية. قدرت الدراسة أن كل مصباح ذكي يمنع انبعاث ما يقارب 1.2 طن من CO₂ سنوياً مقارنة بمصباح الصوديوم عالي الضغط 250 واط الذي يعمل على الشبكة. هذا الانخفاض ناتج عن عدم الاعتماد على الكهرباء المولدة في الغالب من الوقود الأحفوري [22].

في نيجيريا قدم Musa et al تطبيقاً لإنارة الطرق باستخدام الطاقة الشمسية، أظهرت الدراسة أن إنارة الشوارع بالطاقة الشمسية تُعد خياراً تقنياً واقتصادياً مناسباً للكهربة الريفية في نيجيريا، نظراً لوفرة الإشعاع الشمسي الذي يضمن استقرار الإمداد بالطاقة. ورغم ارتفاع التكلفة الاستثمارية الأولية التي تراوحت بين 3,640-3,185 دينار، وذلك بسبب البطاريات التي تشكل ما يقارب نصف التكلفة، فإن تكاليف التشغيل والصيانة تبقى منخفضة نسبياً 2-5% سنوياً. وتراوحت تكلفة (LCOE) 4.06-4.55 دينار/ك.و.س، وهو أعلى من تعريف الشبكة لكنه أقل من كلفة الاعتماد على مولدات الديزل، وفترة الاسترداد لا تتجاوز 4 سنوات. كما أكدت النتائج على الأثر الإيجابي لهذه الأنظمة في تعزيز الأمن، ودعم الأنشطة الليلية. مما يجعل النظام مجدياً اقتصادياً على المدى المتوسط [23].

محلياً، وعلى المستوى التطبيقي، توجد العديد من مشاريع إنارة الطرق منها في مدينة براك، وسها، وأوباري، وبنغازي، وطرابلس، إلا أنه لا توجد إحصائيات بالقدرات المركبة للطاقة الشمسية المستخدمة في إنارة الطرق. أما على المستوى البحثي، قُدمت العديد من الدراسات حول التقنيات المبتكرة للتحول نحو الطاقة النظيفة والصديقة للبيئة. ففي مدينة المرج قدم Khalil & Asheibi دراسة الجدوى الاقتصادية لإنارة شوارع بالطاقة الشمسية، تمحور تحليل الدراسة حول المقارنة بين النظام التقليدي للإنارة والنظام الشمسي لضمان توزيع إضاءة فعال وآمن يفي بالمعايير الدولية، على طول شارع رئيسي يبلغ 4 كم، وقد أسفرت هذه التحليلات عن تحديد المسافة المثلى بين الأعمدة، والتي تتراوح بين 30 و 40 متراً. وبناءً على هذا التباعد، يتطلب إنارة الشارع بالكامل تركيب ما يقارب 120 عموداً. تم تصميم منظومة شمسية مستقلة ومتكاملة تضمنت مكونات فنية دقيقة؛ فتم اعتماد لوح شمسي أحادي البلورة بقدرة 380 واط، مع بطارية تخزين من نوع

(5×2 كيلوواط و10×1 كيلوواط)، حيث بلغت نسبة مساهمة الطاقة الشمسية حوالي 34%. وبلغت تكلفة إنتاج الطاقة حوالي 2.744 دينار/ك.و.س. عند سعر وقود 1\$/ك.و.س، وقدرت قيمة الاستثمار حوالي 7,299,768 دينار [17].

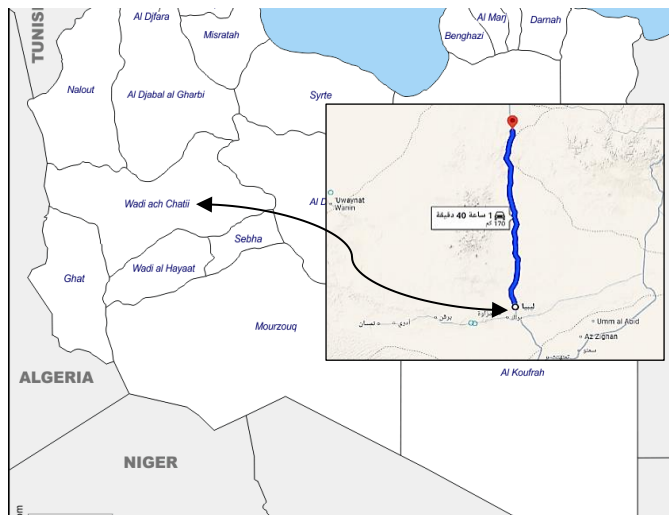
في كوريا الجنوبية، اقترح Lee & Park نموذجاً هجيناً مبتكراً لإنارة الشوارع يجمع بين لوح شمسي بقدرة 200 واط، وتوربين رياح صغير بقدرة 300 واط لكل عمود، وكانت التكلفة الإجمالية للنظام الهجين تتراوح بين 6,650-9,100 ديناراً للعمود الواحد، كانت تكلفة الصيانة السنوية لنظام تقليدي حوالي 25 دولاراً لكل عمود. بلغ الاستهلاك السنوي للنظام حوالي 438 ك.و.س. هذا يعادل توفير انبعاثات تقدر بحوالي 219 كج CO₂ سنوياً لكل عمود النظام المقترح قلل سعة البطارية المطلوبة بنسبة 30%، حيث كانت السعة الفعلية للبطارية المطلوبة في النظام الهجين تقدر بحوالي 58 أمبير ساعة. هذا الانخفاض في السعة هو ما يؤدي مباشرة إلى خفض التكلفة الأولية [18].

في فلسطين، ركز El-Khozondar et al على دراسة الجدوى الاقتصادية والبيئية لاستخدام الطاقة الشمسية ومصابيح LED عوضاً عن الإنارة التقليدية، حيث تم تطبيق الدراسة على طريق صلاح الدين الرئيسي في قطاع غزة. جدولت الدراسة كافة متطلبات منظومة إنارة الشوارع وتكونت من لوح شمسي بقدرة 540 واط، وبطارية تخزين بسعة 12V×400Ah ومصباح LED بقدرة 150 واط، حيث بلغت تكلفة استبدال مصابيح الصوديوم التقليدية بقدرة 400 واط بمنظومة الطاقة الشمسية حوالي 6,790 دينار، وقدرت التكلفة الإجمالية للمشروع حوالي 30,500,260 ديناراً ليلاً، مع صيانة سنوية تقدر بحوالي 2,079,000 دينار وفترة استرداد رأس المال حوالي 4 سنوات. كما بلغت تكلفة الطاقة المنتجة (LCOE) نحو 1.631 دينار/ك.و.س. وأشارت النتائج إلى إمكانية خفض انبعاث CO₂ 1,372 طناً سنوياً [19].

في الأردن، قدما Al-Shawabkeh & Al-Salaymeh دراسة تحليل اقتصادي مقارن لأنظمة إنارة الشوارع LED المتصلة بالشبكة الكهربائية مقابل أنظمة إنارة الشوارع التي تعمل بالطاقة الشمسية في الأردن. بلغت تكلفة تركيب نظام يعمل بالشبكة ويستخدم مصابيح LED 1,325,047.5 دينار. في المقابل، كان النظام الشمسي المستقل أكثر اقتصاداً، حيث بلغت تكلفته الإجمالية 1,245,454 دينار ليبي. حدد الباحثون المكونات الدقيقة للنظام الشمسي، والذي تضمن لكل عمود لوحين طاقة شمسية (PV) بقدرة 300 واط لكل منهما، وأربع بطاريات بسعة 100 أمبير-ساعة × 12 فولت، ومصباح LED بقدرة 110 واط. وفترة استرداد رأس المال 3.15 سنة، مما يؤكد الجدوى الاقتصادية لهذه التقنية في البيئة الأردنية [20].

في كازاخستان، قدم Junisbekov et al دراسة لتصميم ومحاكاة وتحليل نظام إنارة شوارع يعمل بالطاقة الشمسية باستخدام الذكاء الاصطناعي، صمم النظام للعمل بشكل مستقل لمدة تصل إلى 3 أيام في الظروف الجوية القاسية. يُستخدم لوح شمسي بقدرة 200 واط، وبطارية 120 أمبير-ساعة، ومصباح LED بقدرة 60 واط. يسهم النظام المقترح في خفض الطلب على الطاقة من الشبكة الكهربائية العامة 8% صيفاً و 32% شتاءً. تراوحت التكلفة التقديرية للنموذج المقترح بين 3,850-4,900 دينار، بسبب المكونات المتقدمة اللازمة لتشغيل نماذج الذكاء الاصطناعي. وقُدر العائد البيئي الذي

والجنوب.



الشكل 1: الموقع الجغرافي لمنطقة الدراسة

تتميز منطقة الدراسة بمناخ صحراوي حار خلال الصيف وبارد وجاف خلال الشتاء. تتراوح درجات الحرارة خلال فصل الصيف بين متوسط أعلى 39°C ومتوسط أدنى 26°C ، بينما في الشتاء يبلغ متوسط درجة الحرارة الدنيا 7°C ومتوسط درجة الحرارة العليا 19°C [26].

تتمتع المناطق الجنوبية في ليبيا بقيم عالية من الإشعاع الشمسي الكلي الأفقي السنوي، والتي قد تتجاوز $2,500$ ك.و.س/م²/سنة، مما يجعلها من المواقع الواعدة لتطبيقات الطاقة الشمسية.

يُظهر الشكل (4) التغير السنوي لدرجة حرارة الهواء في الجنوب الليبي، حيث تبدأ درجات الحرارة في الأشهر الشتوية بقيم منخفضة إلى معتدلة تتراوح غالبًا بين 10°C – 15°C ، مع انخفاضات ليلية قد تقترب من 5°C . ومع دخول أشهر الربيع، ترتفع درجات الحرارة تدريجيًا لتسجل متوسطات تتراوح بين 20°C – 30°C .

وفي أشهر الصيف تبلغ درجات الحرارة ذروتها، حيث تتجاوز القيم العظمى 40°C ، بينما تستقر المتوسطات اليومية بين 30°C – 35°C ، مع تذبذب يومي واضح بين النهار والليل. ثم تبدأ درجات الحرارة بالانخفاض خلال الخريف لتعود إلى نطاق 20°C – 25°C ، قبل أن تنخفض مجددًا في نهاية العام إلى مستويات قريبة من الشتاء.

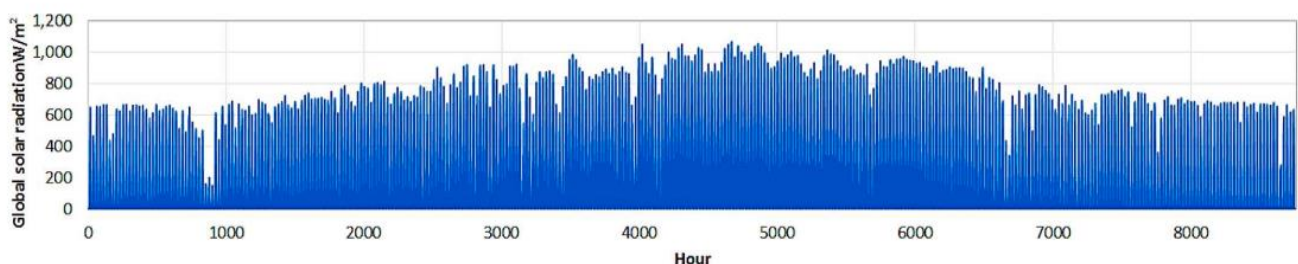
ليثيوم حديد فوسفات (LiFePO_4) بسعة تقدر بحوالي 220 أمبير ساعة، لتوفير الإضاءة، تم اختيار مصابيح LED عالية الكفاءة بقدرة 100 واط، وتم إدارتها عبر حساس لتحكم بالشحن من نوع MPPT لزيادة كفاءة الطاقة. وبلغت تكلفة إنارة الشارع بالنظام التقليدي 2,117,255 دينار ليبي. في المقابل انخفضت التكلفة الإجمالية إلى 1,250,200 ديناراً ليبيا عند تطبيق النظام الشمسي، محققةً وفوراً كبيراً يقدر بنحو 41%. أما على الصعيد البيئي؛ قدرت الدراسة أن هذا التحول سيمنع انبعاث ما يقارب 37 طناً من CO_2 سنوياً [24].

كما أجرى El-Gomati & Zarrug تحليلًا شاملاً على المستوى المحلي لتقييم جدوى استبدال 500,000 عمود إنارة تقليدي بأنظمة تعمل بالطاقة الشمسية. أخذ الباحثان في الاعتبار الظروف المناخية القاسية في ليبيا، اقترح استخدام لوح شمسي أحادي البلورة (Monocrystalline) بقدرة تقدر بحوالي 300 واط، وبطارية ليثيوم حديد فوسفات (LiFePO_4) بسعة تتراوح بين 200-250 أمبير ساعة، ومصابيح LED عالي الكفاءة بقدرة تتراوح بين 100-150 واط. قدرت التكلفة الأولية للمشروع بأكمله بحوالي 600 مليون دولاراً، أي ما يعادل حوالي 8,400 دينار للعمود الواحد. وعلى الرغم من هذه التكلفة الأولية المرتفعة، بلغت فترة استرداد رأس المال 6 سنوات فقط. كما أن المشروع سيحقق توفيراً سنوياً في فاتورة الطاقة الوطنية يقدر بحوالي 1,050 مليار دينار. أما على الصعيد البيئي، فكانت كمية CO_2 التي منعت من الانبعاث حوالي 750,000 طناً، مما يضع هذا المشروع كخطوة استراتيجية نحو مستقبل أكثر استدامة في ليبيا [25].

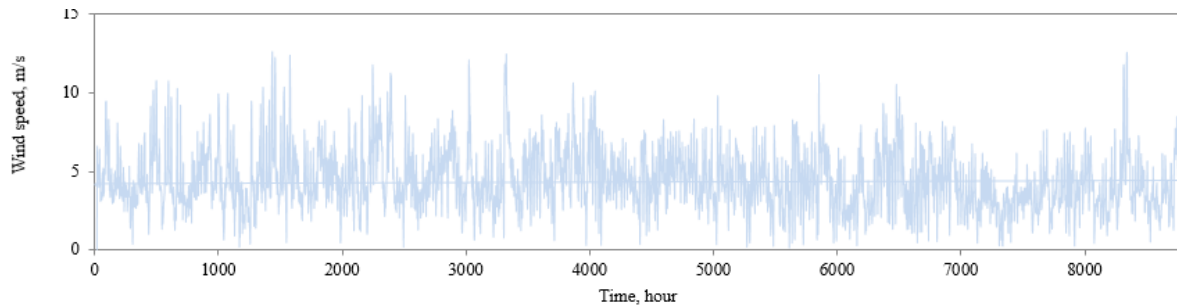
وصف موقع الدراسة

يشكل الطريق الممتد بين براك الشاطئ والشويرف واحداً من أهم المحاور البرية في جنوب ليبيا، إذ يبلغ طوله نحو 280 كيلومتراً وبعرض يقارب 11.5 متر. ويُعتبر هذا الطريق حلقة وصل أساسية بين الجنوب والشمال، حيث يربط مدن وبلدات المنطقة الجنوبية بالعاصمة والمراكز الحضرية الكبرى في الشمال، الأمر الذي يجعله شرياناً رئيسياً لحركة النقل والتجارة ونقل البضائع عبر البلاد.

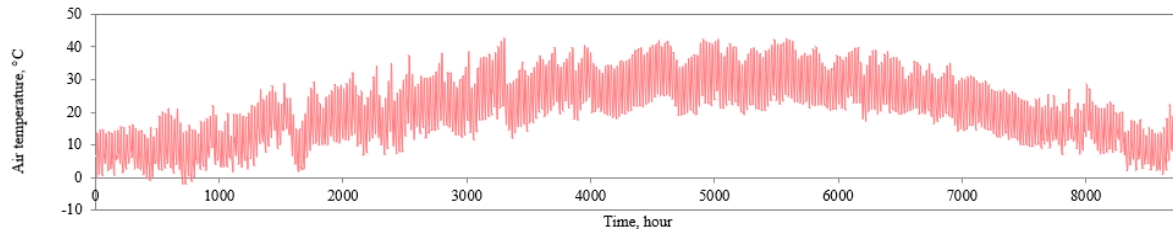
تقع براك الشاطئ في جنوب غرب ليبيا ضمن منطقة وادي الشاطئ، وتتمركز عند إحداثيات 27.550779° شمالاً و 14.268666° شرقاً، وهي من أبرز التجمعات السكانية والإدارية في الجنوب. أما الشويرف، فتقع شمالاً على طريق مزدة – براك، وتعد محطة محورية للربط بين مناطق الشمال



الشكل 2: شدة الاشعاع الكلي الأفقي الساعي



الشكل 3: متوسط سرعة الرياح الساعية



الشكل 4: متوسط درجات حرارة الهواء الجوي الساعية

$$R_r = \rho_g \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (4)$$

حيث يمثل ρ_g انعكاسية الأرض أو ما يسمى "الالبيدو"، وتقدر عموماً بحوالي 0.2 وهناك بعض المراجع تعرض قيم مخالفة لهذه القيمة، حيث قام Bakouri, et al. بقياس قيمة انعكاسية الأرض لعدة مناطق في جنوب ليبيا [30].

المواصفات القياسية لإنارة الشوارع

في هذه الدراسة، تم تحليل الاداء الطاقوي والبيئي والتقني لمنظومة طاقة شمسية متكاملة لإنارة الطريق الرابط بين براك – الشويرف (280 km) المبنية في الجدول (1). لغرض تحديد مساحة الألواح الشمسية وحجم البطاريات، مع مراعاة الشروط القياسية لإنارة الشوارع في ليبيا. حيث تختلف مستوى الإضاءة القياسي للشوارع حسب التطبيق كما هو مبين بالجدول (1).

الجدول 1: المواصفات القياسية – مستوى الإضاءة لإنارة الشوارع [31]

البند (نوع الإنارة)	القيمة (مستوى الإضاءة (لوكس))
الشوارع السكنية	20-10
مناطق المشاة	20-10
الطرق الرئيسية	50-20
لطرق السريعة	100-50

وللحصول على أفضل مستوى من الأمان والرؤية، يجب الحفاظ على مستوى الإضاءة المطلوب للمنطقة والتأكد من توزيع الضوء بالتساوي عبر الشارع. هذه تقديرات تقريبية ويمكن أن تختلف اختلافاً كبيراً اعتماداً على المتطلبات المحددة لكل موقع. بالإضافة إلى ذلك، أتاحت التطورات في تقنية إضاءة LED زيادة كفاءة الطاقة مع الحفاظ على مستويات إضاءة كافية، تحت الظروف الحقيقية المناخية منصة المعلومات المناخية للمنطقة تحت الدراسة.

تحديد حجم منظومة الإنارة

يقدم هذا الجزء من الدراسة تحليلاً لإنتاجية الخلايا الشمسية وبطاريات التخزين واستهلاك مصباح LED للمنظومة المقترحة المبنية في الشكل (5).

اختبار صلاحية منصة المعلومات Soda-pro وتقدير شدة الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح مائل

نظراً لعدم وجود بيانات مقاسة للبيانات المناخية اللازمة لإتمام عملية التصميم فقد تم الاعتماد على منصة البيانات المناخية المجانية Soda-pro. تقدم المنصة معلومات مناخية لفترات زمنية متتابة، مثل شدة الإشعاع الشمسي، وسرعة واتجاه الرياح، ودرجات حرارة الهواء. وبالنظر إلى نموذج تحويل الإشعاع الشمسي الأفقي إلى مائل المستخدم في المنصة تبين أنه يستخدم نموذج (Munier) لتحويل الإشعاع الشمسي الأفقي إلى الإشعاع الشمسي المائل وهذا لا يتطابق مع النموذج الموصي به من قبل عدة بحاث محليين لموقع الدراسة والذين أوصوا باستخدام نموذج تحويل Liu & Jordan [27]. وقد جرى معالجة مكونات الإشعاع الشمسي الأفقي المتحصل عليه من منصة SODA باستخدام برنامج Microsoft Excel لتقدير الإشعاع الشمسي الساقط على سطح اللوح الشمسي $H_t(t)$ من المعادلة التالية [28]:

$$H_t(t) = R_b H_b(t) + R_d H_d(t) + R_r H_h(t) \quad (1)$$

حيث: H_b الإشعاع الشمسي المباشر $H_d, W/m^2$ الإشعاع الشمسي المنتشر من السماء $H_h, W/m^2$ الإشعاع الشمسي الكلي الأفقي W/m^2 . ويعطى معامل التحويل R_b كدالة للمعلمات الهندسية للسطح المائل وموضع الشمس بواسطة [29]:

$$R_b = \max\left(\frac{\cos \theta_i}{\cos \theta_z}, 0\right) \quad (2)$$

حيث θ_z, θ_i تمثلان زاوية سقوط الإشعاع الشمسي وزاوية السم، على التوالي.

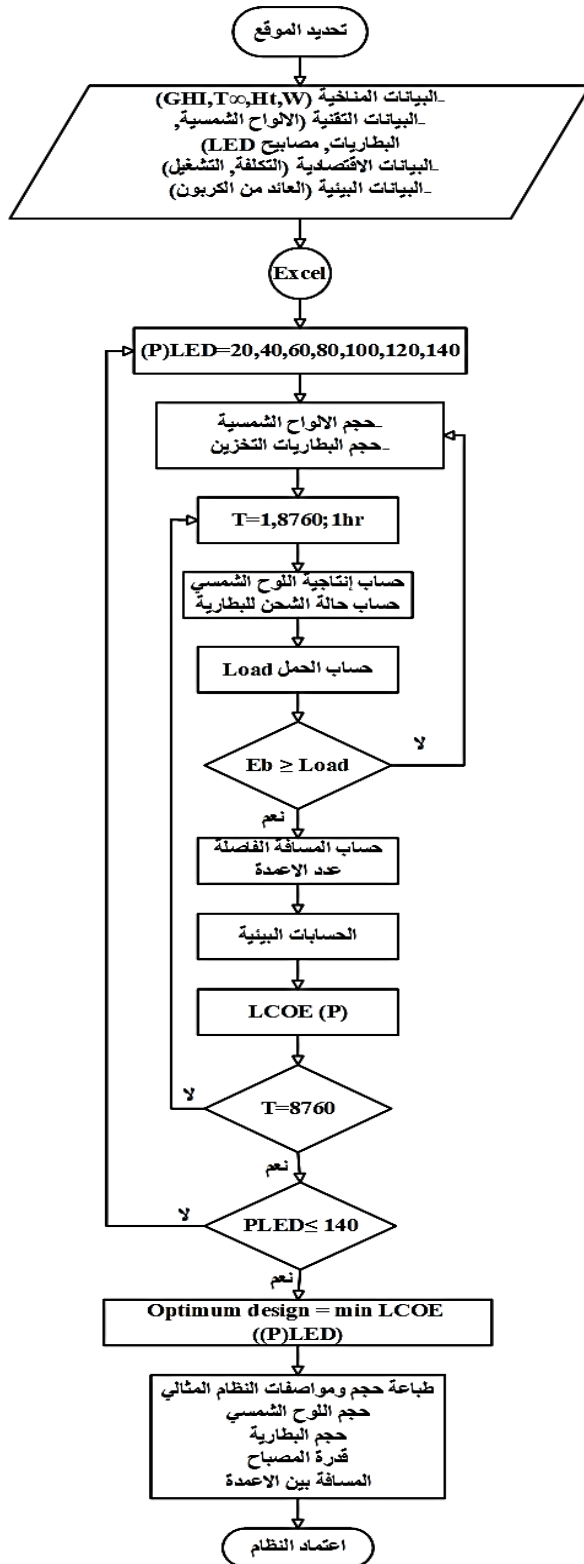
أما معامل إنتشار الإشعاع الشمسي من السماء فيمكن حسابه باستخدام نموذج Liu & Jordan من المعادلة التالية [28]:

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (3)$$

وبالمثل، R_r يمثل معامل التحويل للإشعاع الشمسي المنعكس من الأرض، ويمكن اعتبار أن الأرض متجانسة ويعطى بالعلاقة التالية [28]:

الجدول 2: الموصفات القياسية - شدة الإضاءة لكل مصباح [19]

البند (نوع التطبيق)	القيمة (شدة الإضاءة (لومن))
الطرق السكنية	5000-2000
ممرات المشاة	5000-1000
الطرق الشريانية	20,000-10,000
الطرق السريعة	50,000-20,000



الشكل 6: منهجية الدراسة

ويمكن إيجاد السعة التخزينية للبطارية P_B بوحدة Ah عن طريق المعادلة [37]:

$$P_B = \frac{\max[SoC(t)]_{t=1,8760}}{DoD \times V_{sys}} \times CF_T \times SF \quad (8)$$



الشكل 5: المعدات المستخدمة

تقدير الطاقة الناتجة من الألواح الشمسية

تقدر الطاقة المنتجة من لوح شمسي معين تحت الظروف المناخية الحقيقية من المعادلة التالية [32]:

$$P_{PV} = P_{STC} [1 + \beta_p (T_{cell} - T_{STC})] \frac{H_t}{H_{STC}} \quad (5)$$

حيث P_{PV} , P_{STC} تمثل قدرة اللوح الشمسي تحت الظروف القياسية والحقيقية على التوالي.

β_p معامل درجة الحرارة للقدرة، T_{cell} درجة حرارة سطح الخلية الشمسية، T_{STC} درجة حرارة الاختبار القياسية (25°)، H_t شدة الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح اللوح الشمسي.

H_{STC} شدة الإشعاع الشمسي في ظروف الاختبار القياسية (1000 W/m^2).

ويمكن حساب T_{cell} من المعادلة التالية [33]:

$$T_{cell} = T_{\infty} + 0.078 H_t \quad (6)$$

حيث T_{∞} درجة الحرارة النهائية. تم اختبار اللوح الشمسي استناداً على دراسات محلية سابقة [1, 19, 34, 35]. الخصائص الفنية والكهربائية للوح الشمسي المختار مدرجة في الجدول (3).

حساب حجم البطارية

تمت عملية حساب حجم البطارية بالاعتماد على معلومات مناخية وتشغيلية حقيقية ساعية. كما أخذ في الاعتبار نوع البطارية المستخدمة ودرجة حرارة

الهواء الجوي [22]، وعمق التفريغ (Depth of Discharge, DoD) [36]

$$SoC(t) = SoC(t-1) \cdot (1 - \sigma) + \eta_b (P_{PV}(t) - P_L(t)) \quad (7)$$

حيث σ يشير إلى استهلاك البطارية الذاتي (1% لكل يوم)، η_b يمثل كفاءة البطارية، $P_{PV}(t)$ يمثلان الحمل الكهربائي وإنتاجية اللوح الشمسي عند زمن t على التوالي.

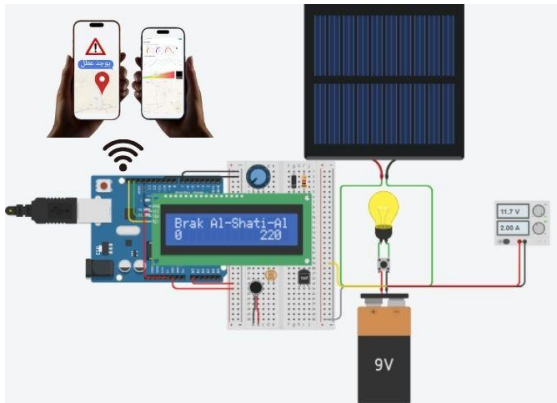
η - الفعالية، Al - مستوى الإضاءة (لومن)، P - القدرة الكهربائية للمصباح (الوات).
ولتحديد نوع المصباح المناسب الذي يوفر أمان أعلى وإضاءة جيدة تم اختيار مصباح 100 من شركة فليس. يبين الجدول (5) الخصائص الكهربائية للمصباح المختار.

الجدول 5: المواصفات الفنية لمصباح الانارة

البند	القيمة
نوع المصباح	GRN78 [LED GreenLine]
نوع التقنية	Bridgelux high efficiency 4040 LEDs
بلد المنشأ	Eindhoven, Netherlands
القدرة	100 واط
فرق الجهد	18.0 V

منظومة الكشف المبكر للأعطال

تُرسل البيانات بشكل دوري عبر شبكات اتصالات منخفضة الطاقة مثل LoRaWAN أو عبر شبكات الهاتف المحمول (GSM) إلى وحدة تحكم مركزية أو منصة سحابية. بعد ذلك، يتم تحليل البيانات باستخدام خوارزميات مبنية على تقنيات التحليل التنبئي والذكاء الاصطناعي للكشف عن أي انحرافات عن الأداء الطبيعي للنظام. على سبيل المثال، انخفاض الجهد أو التيار قد يشير إلى تراكم الأوساخ على اللوح أو حدوث تلف داخلي، والشكل (7) آلية العمل لنظام كشف الأعطال. للمنظومة، يبين الجدول (6) الحاساسات المستخدمة في النظام [43].



الشكل 7: آلية العمل لنظام كشف الأعطال

الاعتبارات البيئية والاقتصادية لمنظومة الإنارة

ادراج تكلفة الضرر البيئي الناجم من الغازات الدفيئة في الحسابات الاقتصادية يُدعم الوضع التنافسي للطاقت المتجددة والنظيفة في سوق الطاقة حتى في الدول المنتجة للنفط والتي تدعم الطاقة الكهربائية مثل ليبيا. يمكن تقدير كمية CO_2 الصافية التي يمكن منعها من الانبعاث في الهواء الجوي عن طريق استخدام الإنارة بالطاقة الشمسية من المعادلة التالية [44]:

$$NQ_{CO_2} = E_{LED}(E_{CO_2} - LCA_{CO_2}) \quad (13)$$

حيث DoD يمثل عمق الشحن (80%)، V_{sys} يمثل فولتية النظام وعادة ما تكون 12 أو 24 فولت. SF فيمثل معامل الأمان (1.2)، CF_T فهو معامل تصحيح لتعويض فقد الطاقة في البطارية عند درجات الحرارة المتدنية، ويعطى بالعلاقة التالية [38]:

$$CF_T = 0.0004T^2 - 0.0246T + 1.3961 \quad (9)$$

حيث T تمثل أدنى درجة حرارة متوقعة في السنة $^{\circ}C$.

كما تم الأخذ بعين الاعتبار استقرار الحالة عند التصميم [39]:

$$SOC(8760) = SOC(0) \quad (10)$$

الجدول 3: المواصفات الفنية للألواح الشمسية [35]

البند	القيمة
نوع اللوح	Station SN-115
نوع التقنية	الاجشية الرقيقة
بلد المنشأ	USA
القدرة	125.0wp
فرق الجهد	41.0 V
التيار	3.0A
الكفاءة	11.40
معامل درجة الحرارة للقدرة	0.4%
زاوية ميل واتجاه اللوح الشمسي	29 $^{\circ}$ ، جنوبا
ابعاد اللوح الطول* العرض* السمك	819*299*136mm

تم اختيار نوع البطارية Anern بسعة 100 أمبير/ساعة للبطاريات، نظراً لتوفرها في السوق. أدرجت الخصائص الكهربائية للبطارية المختارة في الجدول (4)

الجدول 4: المواصفات الفنية لبطارية التخزين [35]

البند	القيمة
الجهد المقدر	12.8V
السعة (12hr, 1.3V/Cell, 55 $^{\circ}C$)	100Ah
الوزن	34kg
درجات الحرارة التشغيلية	-20-55 $^{\circ}C$
عمق التفريغ	80% DoD, 6000 times
أقصى تيار للشحن	50A

تحليل استهلاك الطاقة في مصابيح الإنارة

يمكن حساب مستوى الإضاءة بدلالة المواصفات الفنية لمصابيح الانارة والطريق باستخدام النموذج التالي [41]:

$$E = \frac{A \times UF \times MF}{W \times D} \quad (11)$$

حيث E - مستوى الإضاءة باللوكس، W - عرض الطريق (متر)، D - المسافة الفاصلة بين أعمدة الإنارة (متر)، UF - معامل الاستخدام الذي يعتمد على نوع التركيبة (0.89)، MF - معامل الصيانة (0.9).

ويمكن التعبير عن علاقة بين فعالية إضاءة المصباح (η) مع شدة الإضاءة (Al) وقدرة المصباح (P) بالمعادلة التالية [42]:

$$\eta = \frac{Al}{P} \quad (12)$$

الجدول 6: الحساسات المستخدمة في الكشف عن الأعطال

ت	البند	قيمة الوحدة (دينار ليبي)	المصدر
1.	حساس درجة الحرارة	8.64	eBay: DS18B20 Temperature Sensor
2.	حساس الجهد	3.20	svb24.com: SENSE Voltage and Temperature Sensor / 12 / 24 V
3.	حساس التيار	6.90	shop.electfreaks.com ELECFREAKS Octopus Waterproof
4.	جهاز تسجيل البيانات	8.70	Aliexpress.com: UT330THC
5.	اجمالي التكلفة	27.44	

البيئي من $\$/\text{ton CO}_2$ ، E – الحمل الكهربائي لمصابيح الانارة Watt.

6.4 فرضيات وحدود الدراسة ومصادر الالايقين في النتائج

في هذه الدراسة، تم افتراض ثبات الإشعاع الشمسي على امتداد طريق براك-الشويرف رغم طول المسافة الفاصلة بين المدينتين (280 km)، عدم احتساب التوهين في الإشعاع الشمسي الناتج عن العواصف الترابية، كما افترضت الدراسة توافر بنية اتصالات مناسبة لعمل نظام الكشف المبكر عن الأعطال. وتتمثل حدود الدراسة في عدم اختبار الألواح الشمسية لمقاومة الرياح، ودراسة حساسية بعض المعلومات الاقتصادية والبيئية على اتخاذ القرار، مثل: تسعيرة الكربون، وأسعار معدات المنظومة. أما مصادر الالايقين فتكمن في: البيانات المناخية والاقتصادية والبيئية، حيث رصد Nassar & Alsadi تفاوتاً في أسعار معدات الطاقة الشمسية بنسب تتعدى 380%، وكذلك استخدام النماذج الرياضية لتحويل الإشعاع الشمسي.

تقدير كمية الإشعاع الساقط على سطح مائل

تم تقدير شدة الإشعاع الشمسي الكلي من خلال المعادلات (1) و(2) المدرجة في الفصل الرابع، يوضح الشكل (1.5) شدة الإشعاع الساعي الكلي الساقط على اللوح الشمسي المائل بزاوية 29° والمتجه جنوباً.

وتُعد المسافة الفاصلة بين أعمدة الإنارة عاملاً حاسماً في تصميم منظومات إنارة الشوارع بالطاقة الشمسية، ويعتبر الالتزام بتطبيق المواصفات الحد الفاصل لتحديد هذه المسافة. يوضح الشكل (2.5) العلاقة بين قدرة مصابيح LED وعدد الأعمدة وسعة الألواح والبطاريات. يتبين من الشكل (9) العلاقة بين عدد الأعمدة، وقدرة مصباح الإضاءة LED. وحجم المكونات الرئيسية لمنظومة الإنارة الشمسية. فمع زيادة القدرة الكهربائية للمصباح ينخفض عدد الأعمدة اللازمة لتحقيق نفس مستوى الإضاءة، إذ أن المصابيح ذات القدرة الأعلى توفر مجال إضاءة أوسع، مما يقلل الحاجة إلى نشر عدد كبير من الأعمدة على

حيث NQ_{CO_2} – كمية الإنبعاث CO_2 الصافية kg/year ، E_{LED} – الطاقة المنتجة من الإضاءة، E_{CO_2} – الطاقة المنتجة من حرق CO_2 ، LCA_{CO_2} – التكلفة السنوية CO_2 .

$$C_{CO_2} = \phi_{CO_2} \times NQ_{CO_2} \times EF_{CO_2} \quad (14)$$

وبالتالي يمكن تقدير تكلفة CO_2 من المعادلة التالية [45]:

C_{CO_2} – إجمالي التكلفة دولار، ϕ_{CO_2} – تكلفة $\$/\text{tonCO}_2$ ، 70 ، NQ_{CO_2} – كمية الانبعاث $\$/\text{ton}$ ، EF_{CO_2} – معامل الانبعاث CO_2 لمنظومة توليد الطاقة في ليبيا $1.079 \text{ kgCO}_2/\text{kWh}$.

كما يتضمن التحليل الاقتصادي دراسة عدة عناصر رئيسية، منها: تكلفة شراء وتركيب الألواح الشمسية والمصابيح والبطاريات، تكاليف الصيانة الدورية، وكذلك عمر المنظومة وكفاءتها في تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء. كما يأخذ التحليل بعين الاعتبار العوائد الناتجة عن توفير الطاقة الكهربائية، وتقليل الاعتماد على الشبكة الوطنية، وخفض الانبعاثات الكربونية، مما ينعكس إيجاباً على البيئة ويحقق وفورات مالية ملموسة للمجتمع.

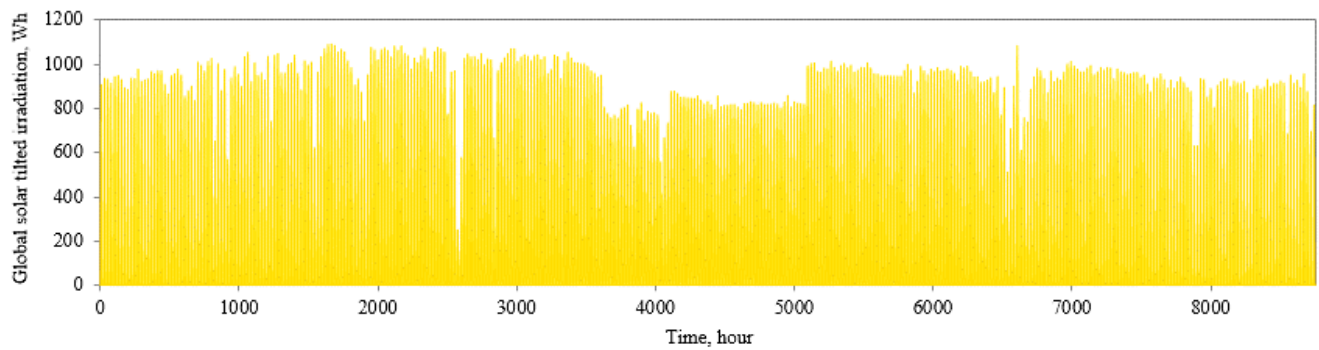
علاوة على ذلك، يوفر التحليل الاقتصادي رؤية شاملة لتحديد أفضل الخيارات التقنية والمالية، مثل اختيار نوع الألواح الشمسية، سعة البطاريات، وعدد المصابيح اللازمة لتغطية الطريق المستهدف، بما يضمن استمرارية التشغيل بأقل تكلفة ممكنة. وبالتالي، يُعتبر هذا التحليل خطوة حاسمة قبل الشروع في تصميم أو تنفيذ أي مشروع إنارة بالطاقة الشمسية كما في المعادلة التالية [46،47]:

$$LOCE = \frac{\sum_{i=1}^N \left[\frac{r(1+r)^{n_i}}{(1+r)^{n_i} - 1} C_{cap,i} + C_{o\&m,i} - C_{CO_2} \right]}{E} \quad (15)$$

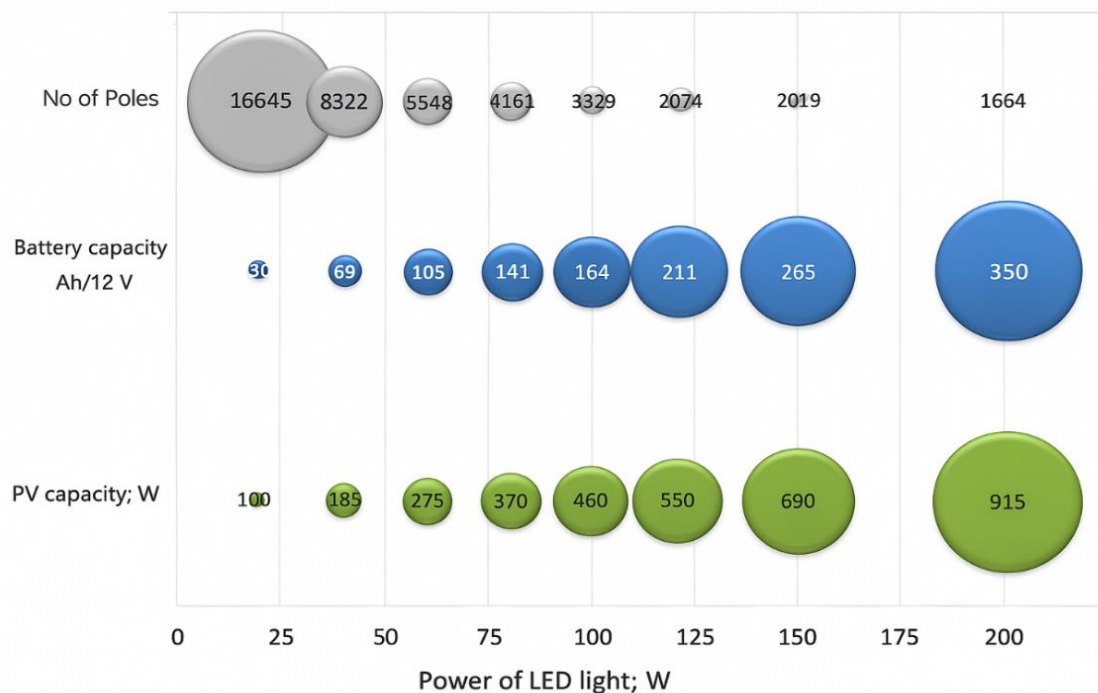
$LOCE$ – السعر لوحدة الكهرباء $\$/\text{kWh}$ ، $C_{cap,i}$ – التكلفة الكلية للمنظومة $\$/\text{kWh}$ ، $C_{o\&m,i}$ – تكلفة التشغيل والصيانة $\$/\text{kWh}$ ، C_{CO_2} – العائد

الجدول 7: كافة المعالم الاقتصادية لحساب التكلفة المستوية.

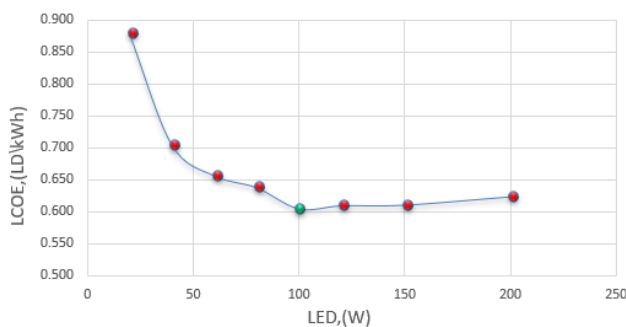
البند	قيمة العنصر (دينار ليبي)	قيمة الصيانة (دينار ليبي)	العمر الافتراضي (سنة)
الألواح الشمسية	860-500	17-15	30-25
مصابيح LED 100 W	90-10	استبدال	20-15
بطاريات (LiFePO4)	1050-1020	16-13	4-5
منظم الشحن (Charge Controller)	1200-700	70-30	30-25
عمود الإنارة المعدني	180-100	0	30-25
القاعدة الخرسانية (Foundation)	170-80	0	
كابلات وتوصيلات كهربائية	25-20	7-5	30-25
صندوق تحكم ذي / وحدة اتصال (IoT)	32.50-27.44	10-5	30-25



الشكل 8: شدة الاشعاع الساعي الكلي الساقط على اللوح الشمسي المتجه جنوباً والمائل بزاوية 29



الشكل 9: العلاقة بين المسافة بين الأعمدة وسعة الألواح الشمسية والبطاريات

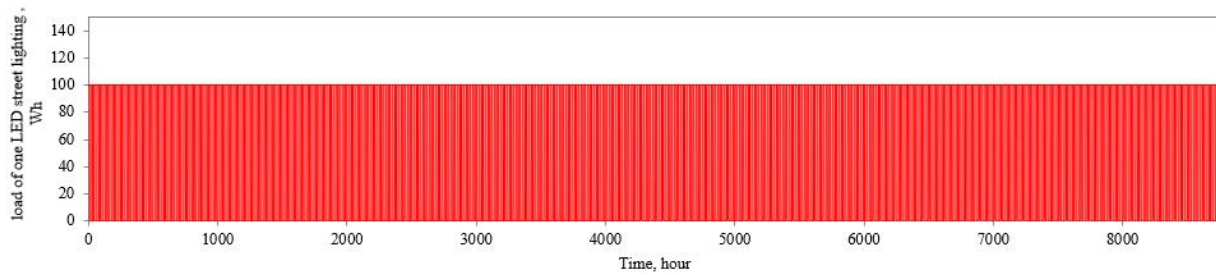


الشكل 10: العلاقة بين قدرة المصباح والتكلفة المستوية للمنظومة

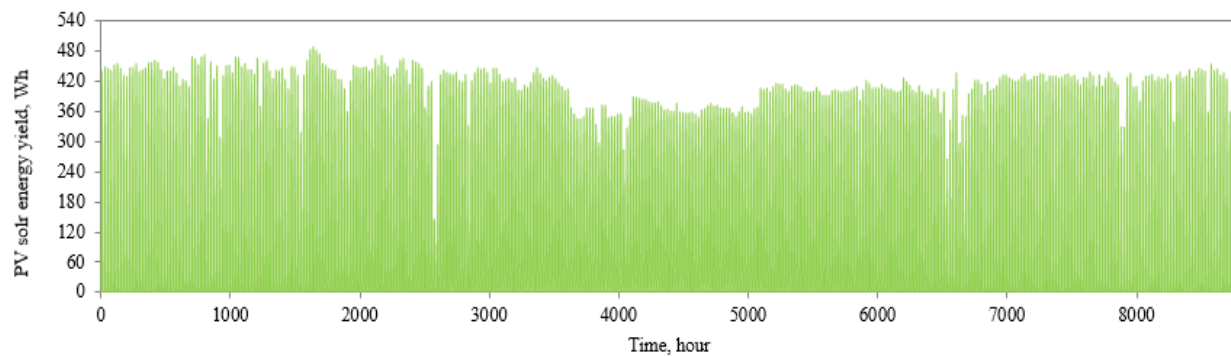
يعكس الشكل (12) الأداء التشغيلي المتكامل لمنظومة الطاقة الشمسية خلال فترة زمنية طويلة، حيث يوضح الشكل الأول إنتاجية اللوح الشمسي المستخدم بقدرة 530 واط.

الطريق. وفي المقابل، تكشف البيانات عن علاقة طردية مباشرة بين قدرة المصباح وبين كل من سعة البطارية وقدرة اللوح الشمسي؛ فكلما ارتفعت قدرة المصباح ازدادت كمية الطاقة المطلوبة لتشغيله، الأمر الذي يستلزم استخدام بطاريات بسعات أعلى لضمان تخزين كافٍ للطاقة، إلى جانب ألواح شمسية بقدرة أكبر لتأمين عملية الشحن.

يتضح من الشكل (10) أن أقل تكلفة لإنتاج الطاقة 0.604 دينار ليبي لكل كيلوواط ساعة والذي تحقق عند مصباحاً بقدرة 100 واط وقدرة اللوح الشمسي 530 واط مع بطارية بسعة 12V×200Ah. مما يضمن استمرارية الإضاءة وكفاءة الأداء ضمن الحدود التشغيلية المتوقعة، وتم التحقق من أن مواصفات منظومة الإنارة تفي بمتطلبات إنارة الطريق العام الرابط بين مدني براك الشاطئ-الشويرف كما هو مبين في الشكل (11).



الشكل 11: الحمل الكهربائي للمصابيح.



الشكل (12): إنتاجية اللوح الشمسي.

والطاقة المخزنة والطاقة المطلوبة للحمل.

الحسابات الاقتصادية والبيئية

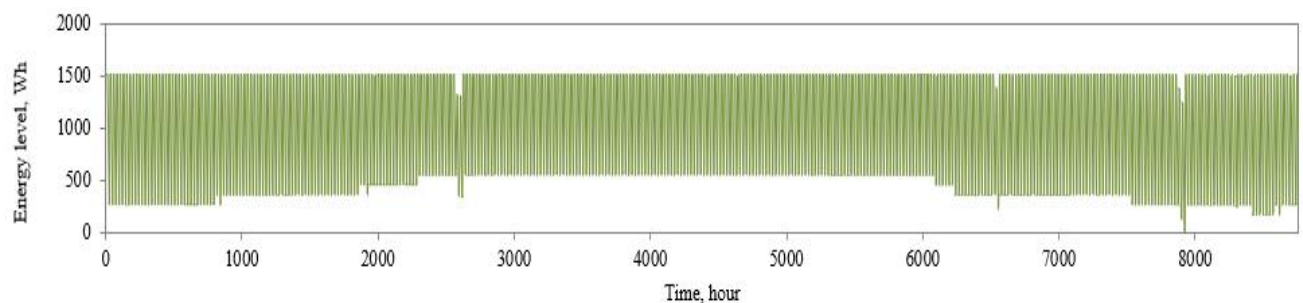
قدرت تكلفة رأس المال لنظام الإنارة المقترح بحوالي 18,264,056 ديناراً ليبيّاً، مع تكلفة صيانة وتشغيل سنوية حوالي 365,300 ديناراً ليبيّاً. وقدرت تكلفة إنتاج الطاقة الكهربائية من المنظومة بحوالي 0.604 ديناراً ليبيّاً لكل ك.و.س، وقدر زمن إسترداد رأس المال بحوالي 21.9 سنة. كما تم منع ما يقدر بحوالي 413.5 طن CO_2 سنوياً من الإنبعاث في الهواء الجوي، وهو ما يعادل حوالي 249,754 ألف ديناراً ليبيّاً (باعتبار تسعيرة الكربون 70 دولار لكل طن [49,48]). (سعر صرف الدولار يساوي 7 ديناراً ليبيّاً بتاريخ 2025/12/10).

تمثيل شدة الإضاءة في الطريق قيد الدراسة

لتأكيد صحة النتائج ومطابقتها للمواصفات القياسية، تم الإستعانة ببرنامج Dialux. وكذلك لتحديد تأثير كل من طول وزاوية ميل ذراع المصباح على شدة الإضاءة في الطريق (والتي لا يمكن للمعادلات المدرجة في فصل المواد وطرق العمل حسابها).

نلاحظ من المنحنى أن عملية توليد الطاقة اتسمت بالاستقرار النسبي على مدار ساعات التشغيل، مع ظهور بعض الانخفاضات المتقطعة التي يمكن إرجاعها إلى الظروف الجوية المتغيرة مثل أو ارتفاع درجة الحرارة أو التغير في زاوية سقوط الإشعاع الشمسي. ويكشف هذا الاستقرار شبه المتواصل عن كفاءة اللوح في تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية دون تراجع كبير في الأداء، مما يؤكد ملاءمته البيئية وقدرته على العمل بفاعلية تحت ظروف تشغيل متباينة.

أما الشكل (13) فيعرض سلوك البطارية أثناء مراحل الشحن والتفريغ الناتجة عن تذبذب إنتاج الطاقة الشمسية. ويبين المنحنى أن مستوى الطاقة داخل البطارية كان في حالة توازن مستمر، حيث يتم شحنها خلال ساعات ذروة الإشعاع، بينما ينخفض مستواها تدريجياً مع استهلاك الحمل خلال الفترات التي يقل فيها الإنتاج. ويشير هذا النمط الدوري إلى أن البطارية تعمل ضمن نطاق آمن دون الوصول إلى حالات التفريغ العميق، الأمر الذي يسهم في الحفاظ على سلامتها الكيميائية وإطالة عمرها التشغيلي. كما يعكس ذلك وجود تصميم هندسي متوازن يسمح بتحقيق توافق بين الطاقة المنتجة



الشكل (13): مستوى الطاقة في البطارية.

وبالمقارنة بين أطول أذرع مصباح الإنارة الثلاثة، يظهر أن الابتعاد (1m) وزاوية ميل (20°) يقلل تأثير التمرکز الشديد للإضاءة ويزيد من اتساع البقعة المضئية، بينما المسافات الأقرب (0.5m) تُظهر تجمعاً أعلى للشدة بالقرب من قاعدة المصباح. توضح هذه النماذج أهمية ضبط زاوية الميل والمسافة الجانبية لتحقيق توزيع ضوئي متجانس ومناسب لطريق المركبات أو المشاة.

الاستنتاجات

أظهرت الدراسة أن استخدام أنظمة الإنارة بالطاقة الشمسية على طريق براك الشاطئ - الشويرف يمثل خياراً عملياً وفعالاً، حيث أثبتت جدواها في توفير إنارة مستمرة بفضل وفرة الإشعاع الشمسي في المنطقة. كما وساهم نظام كشف الأعطال في زيادة إعتماذية نظام الإنارة وتقليل التكاليف التشغيلية والصيانة. تم تحديد المواصفات الهندسية المثالية لمشروع إنارة طريق براك-الشويرف حيث بلغت عدد الأعمدة اللازمة لإنارة الطريق طبقاً للمواصفات الليبية حوالي 3450 وعموداً وقدره مصباح LED 100 واط وقدره الخلايا الشمسية 530 واط والسعة التخزينية للبطارية (211Ah*12V). أما التكلفة الإنشائية للمشروع فقد قدرت بحوالي 18.365 مليون دينار ليبي، وبلغت التكلفة المستوية للطاقة المنتجة حوالي 604 دينار ليبي لكل MWh، وقد قدرت فترة إسترداد رأس المال بحوالي 21.9 سنة. أما بيئياً، فقد أسهم النظام في تقليل الانبعاثات الكربونية بحوالي (413.5) طن سنوياً والذي يقدر بحوالي 249,754 ألف ديناراً ليبياً سنوياً. كما قدمت الدراسة تحليلاً لتأثير بعض المعلمات الهندسية لأعمدة الإنارة مثل: طول الذراع وزاوية الميل على شدة إنارة الطريق، كما بينت الدراسة فعالية استخدام النظام المتناوب عوضاً عن النظام الخطي في ترتيب الأعمدة.

التوصيات

نظراً لأهمية دور أنظمة إنارة الطرق بالطاقة الشمسية في تلبية متطلبات الإنارة والتقليل من الحوادث والمساعدة في الحفاظ على الأرواح والممتلكات نوصي بما يلي:

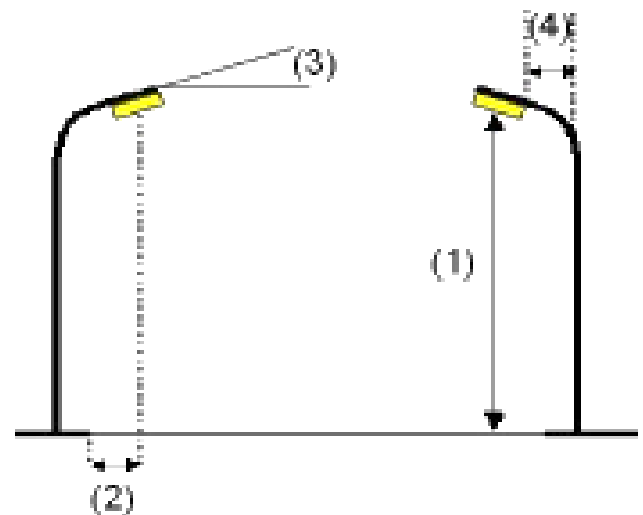
1. توسيع التجربة لتشمل مناطق حضرية داخل المدن وفي الأرياف وفي الطرقات.
2. إدراج مشاريع إنارة الطرق ضمن الخطط التنموية، لأنه يساهم في تحقيق الخطة الاستراتيجية للدولة في التحول نحو الطاقات المتجددة والصديقة للبيئة.

الدراسات المستقبلية

تتميز الدراسة بامتدادها البحثي في عدة مجالات بحيث يمكن تطويرها من خلال الآتي:

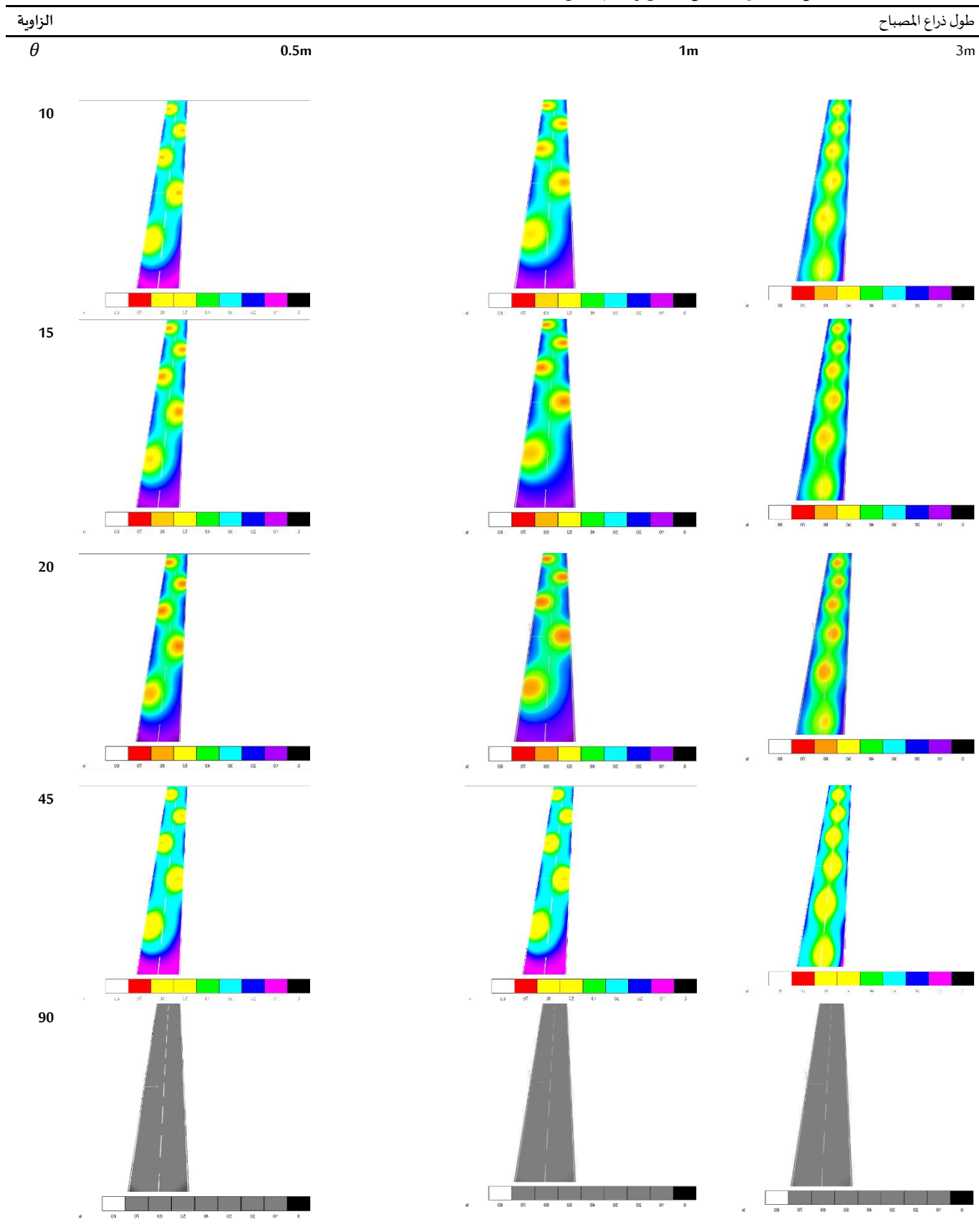
1. إجراء تحليل للإجهادات على المنظومة (الخلايا الشمسية+العمود).
2. استخدام نماذج الذكاء الاصطناعي في تصميم منظومات إنارة الطرق.
3. دراسة إمكانية إدراج طاقة الرياح للمنظومة.

يمثل الشكل (16) مخططاً مبسطاً لعمود إنارة يستخدم في أنظمة الإضاءة الخارجية، ويهدف إلى توضيح العناصر الهندسية الرئيسية التي تُعتمد عند تصميم أو تقييم أداء منظومات الإضاءة. يظهر في المخطط الارتفاع الكلي للعمود (1)، وهو البعد الأساسي الذي يحدد مستوى انتشار الضوء على سطح الطريق. كما يبين الشكل الإزاحة الأفقية أو مسافة الابتعاد (2) بين قاعدة العمود وموقع الإسقاط الرأسي لمصدر الإضاءة، وهي قيمة مهمة لتحديد موقع المصباح بالنسبة للمسار المراد إنارته. ويعرض الشكل كذلك زاوية ميل المصباح (3)، التي تعد عاملاً حاسماً في توجيه حزمة الضوء وتوزيعها بشكل يحقق أعلى كفاءة إضاءة ممكنة مع تقليل التوهج والانحراف. أما البعد (4) فهو إزاحة رأس العمود أو درجة انحنائه، ويُستخدم عادة لضبط اتجاه المصباح بحيث يتوافق توزيع الإضاءة مع متطلبات الطريق أو المنطقة المستهدفة. يقدم الشكل تصوراً هندسياً واضحاً يساعد في فهم كيفية توافق الارتفاع، الميل، والإزاحة الأفقية معاً لتحقيق تصميم إنارة فعال وذو كفاءة عالية في نظم الإضاءة التقليدية أو الشمسية. باعتبار أن كل الطريق يجب أن لا يقل شدة الإضاءة عن 25 lux استناداً على المواصفات الليبية لإنارة الطرق، يتضح من الأشكال (1-9) أن التصميم المثالي للعمود الإنارة يتمثل في طول الذراع 1 متر وزاوية الميل (20)



الشكل 16: ارتفاع العمود وزاوية ميل رأس العمود والمسافة الفاصلة بين مصباح الإنارة وقاعدة العمود

يتضح من النتائج في الشكلان (8.5-9.5) أن نمط توزيع الإضاءة يتغير بشكل واضح مع كل من زاوية الميل ذراع مصباح الإنارة. فكلما زادت زاوية الميل عن الوضع العمودي، تتجه البقع ذات الشدة العالية نحو الأسفل وإلى الأمام، بينما تتسع مناطق الانتشار الجانبي وتتغير قيم التظليل على السطح المحاكى. وعند زاوية 90° يظهر الشكل النهائي كإسقاط كامل للإضاءة موازي الأرض دون ميل، مع توزيع متناظر وشامل للطيف الشدي.



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] Y. Nassar *et al.*, "Assessing the viability of solar and wind energy technologies in semi-arid and arid regions: a case study of Libya's climatic conditions," *Applied solar energy*, vol. 60, no. 1, pp. 149-170, 2024. <https://doi.org/10.3103/s0003701x23601758>
- [2] A. Almahdi, M. Abossa, and M. Shiba. "Causes of Traffic Accidents and Traffic Issues for Road Users in the Southern Region (A Field Study on a Sample of Drivers in Sabha City-Libya)." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, Special Issue, pp. 79-86. <https://www.waujpas.com/index.php/journal/article/view/147>
- [3] F. Idris. "Traffic Accidents in the municipalities of North-Eastern Libya (Derna-Alqubba-Shahat-Albayda) their causes and factors for treating and reducing them." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, Special Issue, pp. 100-104. <https://doi.org/10.63318/ag8f3591>
- [4] Y. Nassar, and S. Alsadi. "Assessment of solar energy potential in Gaza Strip-Palestine." *Sustainable energy technologies and assessments*, vol. 31, pp. 318-328, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.12.010>
- [5] I. Imbayah, et al. "Design of a PV solar-covered parking system for the college of renewable energy Tajoura, Libya: A PVsyst-based performance analysis." *University of Zawia Journal of Engineering Sciences and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 288–307, 2025. <https://doi.org/10.26629/uzjest.2025.23>
- [6] E. Skoplaki, and J. A. Palyvos, "On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations." *Solar energy*, vol. 83, no. 5, pp. 614-624, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2008.10.008>
- [7] H. El-Khozondar, R. El-Khozondar, and A. Eljamassi, "Social awareness of the use of renewable energy among the students of the faculty of engineering, Islamic University, Gaza, Palestine." *An-Najah University Journal for Research-B (Humanities)*, vol. 36, no. 6, pp. 1173-1194, 2020. <https://doi.org/10.35552/0247-036-006-003>
- [8] H. El-Khozondar and F. El-Batta. "Solar Energy as an alternative to conventional energy in Gaza Strip: Questionnaire based study." *An-Najah University Journal for Research-A (Natural Sciences)*, vol. 32, no. 1, pp. 47-74, 2018. <https://doi.org/10.35552/0247-036-006-003>
- [9] H. El-Khozondar and F. El-batta. "Solar energy implementation at the household level: Gaza Strip case study," *Energy, Sustainability and Society*, vol. 12, no. 1, p. 17, 2022. <https://doi.org/10.35552/0247-036-006-003>
- [10] H. J. El-Khozondar et al. "A smart energy monitoring system using ESP32 microcontroller." *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 9, p. 100666, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2024.100666>
- [11] A. Elmanfi, E. Elsharif, Z. Rajab, A. Khalil, and F. Mohamed. "Sustainable street lighting system design in Libya." in *2019 10th International Renewable Energy Congress (IREC)*, 2019: IEEE, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/IREC.2019.8754623>
- [12] P. Sukumar, S. Jayasurya, M. Rohith, E. Premnath, K. Sugumar, and V. Mythily. "IoT-powered street light management: Enhancing fault detection and reporting." in *Challenges in Information, Communication and Computing Technology: CRC Press*, 2025, pp. 136-140. <https://doi.org/10.1201/9781003559085-24>
- [13] M. Albardawil, et al. "DC off-grid PV system to supply electricity to 50 boats at Gaza seaport." in *2023 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES)*, 2023: IEEE, pp. 1-5. <https://doi.org/10.1109/ieCRES57315.2023.10209467>
- [14] A. Picardo, M. Galván, V. Soltero, and E. Peralta, "A comparative life cycle assessment and costing of lighting systems for environmental design and construction of sustainable roads." *Buildings*, vol. 13, no. 4, p. 983, 2023. <https://doi.org/10.3390/buildings13040983>
- [15] A. C. Duman and Ö. Güler, "Techno-economic analysis of off-grid photovoltaic LED road lighting systems: A case study for northern, central and southern regions of Turkey." *Building and environment*, vol. 156, pp. 89-98, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.005>
- [16] M. Hasan, M. Hasan, R. Biswan, A. Malek, and M. Parway, "Design and Feasibility analysis of a Solar PV system for street lighting in a University campus." *International Journal of Science and Engineering Applications*, vol. 8, no. 9, pp. 432-437, 2019. <https://doi.org/10.24018/ejece.2023.7.3.507>
- [17] M. Arif, U. Mustafa, N. Prabakaran, S. Ayob, and J. Ahmad, "Performance evaluation of a hybrid solar PV system with reduced emission designed for residential load in subtropical region." *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 46, no. 1, pp. 9001-9023, 2024. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1773962>
- [18] H. Lee, E. Park, and H. Lee, "Polydopamine and its derivative surface chemistry in material science: a focused review for studies at KAIST." *Advanced Materials*, vol. 32, no. 35, p. 1907505, 2020. <https://doi.org/10.1002/adma.201907505>
- [19] H. El-Khozondar et al., "Photovoltaic solar energy for street lighting: A case study at Kuwaiti Roundabout, Gaza Strip, Palestine." *Power Eng. Eng. Thermophys*, vol. 3, no. 2, pp. 77-91, 2024. <https://doi.org/10.56578/peet030201>
- [20] L. Al-Kurdia, R. Al-Masria, and A. Al-Salaymeh, "Economical investigation of the feasibility of utilizing the PV solar lighting for Jordanian streets," *Int. J. of Thermal & Environmental Engineering*, vol. 10, no. 1, pp. 79-85, 2015. <https://doi.org/10.5383/ijtee.10.01.012>
- [21] M. Junisbekov, et al. "Design, Simulation, and analysis of a solar-powered street lighting control system for power consumption prediction." *International Journal of Innovative Research and Scientific Studies*, vol. 8, no. 5, pp. 1360–1375, 2024. <https://doi.org/10.53894/ijirss.v8i5.9136>
- [22] M. Ibrahim, A. Elwany, and L. K. Elansary, "Sustainable technical design and economic–environmental analysis of SMART solar street lighting system in Giza City, Egypt." *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, vol. 12, no. 4, pp. 739-750, 2021. <https://doi.org/10.1007/s40095-021-00403-2>
- [23] M. Musa, A. Umar, and S. Akinlabi. "Techno-economic analysis of solar street lighting for rural electrification in Nigeria." *International Journal of Renewable Energy Research*, vol. 1, no. 1309-0127, pp. 112-105, 2017. <https://www.researchgate.net/publication/395800953>
- [24] Z. Rajab, A. Khalil, M. Amhamed, and A. Asheibi, "Economic feasibility of solar powered street lighting system in Libya." in *2017 8th International Renewable Energy Congress (IREC)*, 2017: IEEE, pp. 1-6. <https://www.researchgate.net/publication/312937825>
- [25] G. Zarrug, "Economic Feasibility of Nationwide Solar Street Lighting to Alleviate Strain on the National Grid." *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 12, no. 1, pp. 9-7, 2023. <https://www.researchgate.net/publication/299453235>
- [26] N. Fathi, I. Latiwash, and A. Abubaker. "Performance analysis and sizing optimization of a utility scale stand-alone renewable energy PV/Battery storage system for urban zones." *University of Zawia Journal of Engineering Sciences and Technology*, vol. 3, no. 2, pp. 261–275, 2025. <https://doi.org/10.26629/uzjest.2025.21>
- [27] S. Abdulwahab, et al. "Meeting solar energy demands: Significance of transposition models for solar irradiance." *Int. J. Electr. Eng. and Sustain.*, pp. 90-105, 2023. <https://ijees.org/index.php/ijees/article/view/52>
- [28] Y. Nassar, "Solar energy engineering active applications." *Sebha University, Libya*, 2006. <https://www.researchgate.net/publication/288670612>
- [29] M. Almakhtar, A. Elbreki, and M. Shaaban, "Revitalizing operational reliability of the electrical energy system in Libya: Feasibility analysis of solar generation in local communities." *Journal of cleaner production*, vol. 279, p. 123647, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123647>

- [30] S. Alsadi, and N. Fathi, "A numerical simulation of a stationary solar field augmented by plane reflectors: Optimum design parameters," *Smart grid and renewable energy*, vol. 8, no. 7, pp. 221-239, 2017. <https://doi.org/10.4236/sgre.2017.87015>
- [31] H. El-Khozondar *et al.*, "Economic and Environmental Implications of Solar Energy Street Lighting in Urban Regions: A Case Study," *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, pp. 142-151, 2025.
- [32] M. Sheikholeslami and O. K. Jalil, "Numerical modeling for solar linear Fresnel system integrated with energy storage involving nanoparticles," *Journal of Energy Storage*, vol. 79, p. 110193, 2024.
- [33] G. A. Sayah, *The Use of Renewable Energy Technologies in the Libyan Energy System. Case Study: Brak City Region*. Technische Universitaet Berlin (Germany), 2017.
- [34] B. Ahmed *et al.*, "Atlas of solar (PV and CSP) and wind energy technologies in Libya," *North Afr. J. Sci. Publ.(NAJSP)*, vol. 1, no. 4, pp. 8-24, 2023.
- [35] 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, 2020.
- [36] M. Abuqila, and M. A. Nyasapoh, "Estimation of the storage capacity of electric vehicle batteries under real weather and drive- mode conditions: A case study." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 1, pp. 58-71, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_10
- [37] 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, 2017. <https://scholar.ptuk.edu.ps/handle/123456789/213>
- [38] Y. F. Nassar *et al.*, "Thermoelectrical analysis of a new hybrid PV-thermal flat plate solar collector," in *2023 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES)*, 2023: IEEE, 08-09 May 2023 Gaza, Palestine <https://doi.org/10.1109/ieCRES57315.2023.10209472>
- [39] J. Omakor, M. Miah, and H. Chaoui, "Battery reliability assessment in electric vehicles: A state-of-the-art," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 77903-77931, 2024. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3406424>
- [40] A. Teyabeen and F. Mohamed, "Estimation of the Optimum Tilt Angle of Solar PV Panels to Maximize Incident Solar Radiation in Libya," *Energies*, vol. 17, no. 23, p. 5891, 2024. <https://doi.org/10.3390/en17235891>
- [41] J. Hala, R. EL-Khozondar, Y. Fathi, and F. El-Batta, "Technical-economical-environmental assessment of grid-connected hybrid renewable energy power system for Gaza Strip-palestine," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 69, p. 102120, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2025.102120>
- [42] S. Alsadi, K. Ali, A. Yousef, and F. Massoud. "Numerical Analysis and Optimization of Area Contribution of The PV Cells in the PV/T Flat-Plate Solar Air Heating Collector." *Solar Energy Research Update*, vol. 6, pp. 43-50, 2019. <https://doi.org/10.31875/2410-2199.2019.06.5>
- [43] S. Sivagamasundari, and M. Rayudu. "IoT based solar panel fault and maintenance detection using decision tree with light gradient boosting." *Measurement: Sensors*, vol. 27, p. 100726, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2023.100726>
- [44] R. Frischknecht *et al.*, "Life cycle inventories and life cycle assessments of photovoltaic systems," National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO (United States), 2015.
- [45] S. Mohammed, Y. Nassar, H. Algassie, A. Mahammed, H. El-Khozondar, and A. Alatrash. "Exploring Promised Sites for Establishing Hydropower Energy Storage (PHES) Stations in Libya by Using the Geographic Information Systems (GIS)," *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, pp. 85-94, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_13
- [46] A. Aqila, Y. Nassar, H. El-Khozondar, and S. Suliman, "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," *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 168-181, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_23
- [47] A. Aqila, and A. Abubaker. "Design of a Hybrid Renewable Energy System to Meet Housing Thermal Loads: Performance Evaluation Under Real Conditions of a House in Samno Region, Libya." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 179-191, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_23
- [48] E. Almhdi, and G. Miskeen. "Power and carbon footprint evaluation and optimization in transitioning data centres." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 221-229, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_28
- [49] A. Abdulllah, Y. Fathi, S. Mohammed, and M. Ghatas. "Integrating Electricity Sub-Grid with Pumped Hydropower Storage System for Grid Stability and Sustainability." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 322-332, 2025. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_40