

Economic and Environmental Implications of Solar Energy Street Lighting in Urban Regions: A Case Study

Hala J. El-Khozondar^{1,2,*}, Rifa J. El-Khozondar^{3,4}, Yasser Nassar⁵, Ahmed Asfour¹, Mohammed Albardawil¹, Mahmoud El-Zesty¹, Saleh Shaheen¹, Monaem Elmnifi⁶, Mohamed Khaleel⁷, Ali Alkhazmi⁵, Ahmed Ali⁵

¹Electrical Engineering and Smart Systems Departments, Islamic University of Gaza, Gaza, Palestine.

²Department of Materials and London Centre for Nanotechnology, Imperial College, London SW7 2AZ, UK

³Physics Department, Al-Aqsa University, Gaza, Palestine

⁴Physics Department, Durham University, Durham, UK

⁵Mechanical and Renewable Energy Engineering Dept., Engineering Faculty, Wadi Alshatti University, Brack, Libya

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

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

ARTICLE HISTORY

Received 16 March 2025

Revised 27 March 2025

Accepted 30 March 2025

Online 30 March 2025

KEYWORDS

PV solar system;

Street lighting;

LED lamps;

Gaza Strip.

ABSTRACT

The current study focused on the economic and environmental impacts of using solar energy for street lighting instead of traditional lighting. As a case study, the required size of the solar energy system was calculated for illuminating the main street in Gaza Strip (Salah Al-Din Street). The study proposed replacing the existing 400W - 220V AC sodium lamps with 150W LED streetlights. The findings demonstrated the economic and environmental viability of the proposed project. To implement this project, an investment of \$4,357,170 is required, along with annual maintenance costs of \$297,000. Additionally, the batteries need to be replaced every 5 years. The cost of electricity was estimated at approximately \$0.233 per kWh, with a capital payback period of about 12.409 years. The project would prevent approximately 1,372.05 tons of CO₂ emissions from being released into the atmosphere. The study presented a comprehensive approach that can be applied to both urban areas and remote regions not connected to the public electricity grid. In such cases, additional costs for lighting poles and construction must be considered.

التبعات الاقتصادية والبيئية لإنارة الشوارع في المناطق الحضرية بالطاقة الشمسية: دراسة حالة

هالة جاراالله الخزندار^{1,2,*}، رفعه جاراالله الخزندار^{3,4}، ياسر نصار⁵، أحمد عصفور¹، محمد البرداويل¹، محمود الزبستي¹، صلاح شاهين¹، منعم المنفي⁶، محمد خليل⁷، علي الخازمي⁵، أحمد علي⁵

المخلص	الكلمات المفتاحية
ركزت الدراسة الحالية على الآثار الاقتصادية والبيئية لاستخدام الطاقة الشمسية في إنارة الشوارع عوضاً عن الإنارة التقليدية. وكحالة دراسية تم حساب تكاليف وحجم منظومة الطاقة الشمسية اللازمة لإنارة الشارع الرئيسي في قطاع غزة (شارع صلاح الدين). اقترحت الدراسة استخدام مصابيح إنارة LED بقوة 150 واط عوضاً عن مصابيح الصوديوم بقوة 400 واط - 220 فولت تيار متردد. الموجود حالياً. أثبتت الدراسة الجدوى الاقتصادية والبيئية للمشروع المقترح. ولإنجاز هذا المشروع يتطلب استثمار قدره 4,357,170 دولاراً، إضافة إلى دفعات سنوية كمصاريف صيانة تقدر بحوالي 297,000 دولار لكل سنة. وإيضاً يتطلب تغيير البطاريات كل 5 سنوات. وقدرت تكلفة إنتاج وحدة الطاقة LCOE بحوالي 0.233 \$/kWh وفترة استرداد رأس المال بحوالي 12.409 سنة. وبلغت كمية CO ₂ التي منعت من الانبعاث في الهواء الجوي حوالي 1,372.05 طن CO ₂ في السنة. عرضت الدراسة نهجاً شاملاً، يمكن تطبيقه في المناطق الحضرية والمناطق النائية البعيدة عن الشبكة العامة للكهرباء، وفي هذه الحالة يجب إضافة تكلفة اعمدة الإنارة وتكاليف البناء والتشييد.	نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية إنارة الشوارع مصابيح LED قطاع غزة

المقدمة

[1]. ومع زيادة النمو السكاني واتساع المدن، ازداد الطلب على إضاءة الطرق لتعزيز السلامة. تمثل إنارة الشوارع حوالي 15-40% من إجمالي استهلاك الطاقة في المدن الكبيرة [2]. كما تلعب إنارة الشوارع دوراً حاسماً في تعزيز السلامة المرورية وسلامة المشاة، بالإضافة إلى الحد من معدلات الجريمة [3]. وقد أظهرت العديد من الدراسات أن عدم وجود إضاءة في الشوارع - أو حتى

تطورت تكنولوجيا الطاقة الشمسية الكهروضوئية بشكل كبير بسبب الطلب المتزايد على مصادر الطاقة المتجددة والنظيفة مدفوعاً بالمخاوف البيئية على الحياة البشرية والأنظمة البيئية، مما جعل من الممكن دمجها في مجموعة متنوعة من التطبيقات، على سبيل المثال لا الحصر؛ البنية التحتية للنقل

نظام كهروضوئي مرتبط بالشبكة مع بطارية تخزين لزيادة توفير الطاقة إلى أقصى حد وزيادة قدرة الطاقة في البنية التحتية للنقل بالسكك الحديدية بما يتجاوز حدود الشبكة. استخدم الباحثان نموذجًا رياضيًا تم إنشاؤه باستخدام برنامج MATLAB وبيانات التوليد الكهروضوئي الأرشفية لتصميم معلمات النظام وموازنة جداول الأحمال وتقليل حجم البطارية ودورات التفريغ العميق. من خلال إطالة عمر البطارية وتقليل الاعتماد على الشبكة، تقدم الطريقة المقترحة حلاً فعالاً لإدارة الطاقة في الإعدادات العملية. قام المؤلفون [29] بفحص أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية خارج الشبكة لإضاءة دوار الكويت في غزة بفلسطين، مع التركيز على إضاءة LED الموفرة للطاقة مع أدوات تحكم أوتوماتيكية. وباستخدام النمذجة الرياضية وبرنامج PVSyst، يسلط العمل الضوء على الحلول المبتكرة مثل المصابيح ذات الجهد المزدوج وأجهزة التحكم في الشحن، ومعالجة التحديات مثل استهلاك الطاقة والقيود المكانية للهوض بالإضاءة الحضرية المستدامة. في دراسة أخرى [30]، اقترح الباحثون نظام طاقة شمسية خارج الشبكة لموانئ غزة لتشغيل أضواء قوارب الصيادين للصيد الليلي. ويتألف النظام من 56 وحدة كهروضوئية (20.16 كيلوواط) و7 مصفوفات فرعية و210 بطاريات. ويقلل هذا النظام من الاعتماد على الوقود الأحفوري ويقلل من الانبعاثات البيئية، مما يعزز الاستدامة في العمليات البحرية. بالنسبة للإضاءة الخارجية، أي الشوارع الحضرية، يستكشف Dutta وآخرون [31] تصميم وتنفيذ مصابيح الشوارع الكهروضوئية الشمسية كبديل فعال من حيث التكلفة وصديق للبيئة لكهرباء الشبكة. يشمل النظام الألواح الشمسية والبطاريات ومصادر الإضاءة وأجهزة التحكم في الشحن وهيكل الأعمدة، بهدف تحقيق أقصى قدر من كفاءة الطاقة وطول عمر المكونات. وهو يعزز التحول من مصادر الطاقة التقليدية إلى مصادر الطاقة المتجددة لتحقيق الاستدامة.

في إندونيسيا، وجد Arkarnis & Devi [18] أن إضاءة الشوارع العامة المركزية في محطة توليد الطاقة المشتتة مجدية استنادًا إلى نسبة الأداء وصافي القيمة الحالية. ومع ذلك، وبسعر بيع الطاقة البالغ 9.47 سنتًا أمريكيًا/كيلوواط ساعة، فإن ذلك ليس مربحًا للمؤسسات الخاصة وهو مناسب بشكل أفضل لبرامج التعديل التحديتي التي تقودها الحكومة لاستبدال مصابيح الصوديوم بمصابيح LED. لخفض استهلاك الطاقة، تقترح [32] نظامًا للتحكم في إضاءة الطرق يستخدم كاميرا IP ومقاوم يعتمد على الضوء لتعديل سطوع مصابيح LED وفقًا لكثافة حركة المرور. تم فحص هذا التكوين، الذي تم دمج مع نظام إضاءة شمسية نانوية متناهية الصغر، تجريبيًا في الوضع المتصل بالشبكة والمستقل. وقد أظهرت النتائج أن الطريقة المقترحة تزيد من الجدوى الاقتصادية وتقلل من تكاليف بدء التشغيل وتحسن كفاءة الطاقة، حيث إن الوضع المتصل بالشبكة هو الأكثر اقتصادًا.

أجري البحث الحالي في قطاع غزة، وهي منطقة صغيرة على طول الساحل الشرقي للبحر الأبيض المتوسط، تقع على خط عرض 31° 15' شمالاً وخط طول 34° 19' شرقاً. تمتد هذه المنطقة المكتظة بالسكان على مساحة 365 كم مربع، بطول 41 كم وعرض يتراوح بين 6 و12 كم. وتواجه غزة التي يقطنها حوالي 2.5 مليون نسمة تحديات اجتماعية واقتصادية في مجال الطاقة. فقد عانت المنطقة الواقعة تحت الحصار منذ عام 2006 من قيود شديدة على

ضعفها- يزيد بشكل كبير من مخاطر حوادث الطرق [4,5]، حيث أن أكثر من 50% من حوادث المرور تحدث ليلاً. وقد تبين أن تحسين إنارة الطرقات يقلل من الإصابات الناجمة عن حوادث المرور الليلية بنسبة تصل إلى 30%، والحوادث المميتة بنسبة 64%، وحوادث الأضرار بالملتمكات بنسبة 17% [6]. علاوة على ذلك، يؤدي استخدام المصابيح الأمامية في السيارات إلى زيادة استهلاك السيارة للوقود بنسبة تتراوح بين 1-3% [7].

توفر الطرق السريعة فرصة مثالية لاستخدام الطاقة الشمسية بفعالية، لأنها تمتد على مساحات كبيرة وغير محاطة بالمباني الأمر الذي لا يحجب الأشعة الشمسية على الألواح الشمسية. وقد أصبحت الأنظمة الكهروضوئية وسيلة مجدية لخفض انبعاثات الكربون، وتلطيف الضرر البيئي، وتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة الأحفورية، ودعم التحول نحو الطاقات المتجددة والنظيفة. وتعد الطاقة الشمسية المرشح الأكثر حظاً في هذا المجال ولتوفير مصدر مستدام للطاقة، خاصة في المنطقة الواقعة في الحزام الشمسي [8-11]. وتؤكد بعض الدراسات على إمكانات الطاقة الشمسية كحل مستدام لاستخدامها في قطاعات مختلفة بما في ذلك المساكن [12]، والمؤسسات التعليمية [13-15]، والطهي [16]، والمساحات الرياضية [17]، والشوارع [18]، والسيارات [19]. حيث سلط المؤلفون الضوء على فوائد نظام الطاقة الشمسية، بما في ذلك خفض الانبعاثات، وتوفير التكاليف، والتنمية المستدامة، ومواجهة التحديات مثل العوائق الاقتصادية والاجتماعية، والسياسات، والقضايا التقنية [20,21].

يمكن دمج الطاقة الشمسية مع أنظمة الطاقة الأخرى (الأنظمة الهجينة) التي قد تكون طاقة متجددة خالصة (مثل طاقة الرياح والطاقة الحيوية والطاقة الكهرومائية) و/أو مزيج من الطاقة المتجددة وطاقة الوقود الأحفوري [22-25]. اقترح Arif وآخرون [26] نظام طاقة هجين يتكون من ألواح شمسية/مولد ديزل/بطارية للمناطق السكنية التي تتكون من 50 ساعة في المناطق النائية في الهند التي تعتمد على مولدات الديزل أثناء انقطاع التيار الكهربائي. باستخدام HOMER، يتكون النظام المثالي من 64 كيلوواط من الطاقة الكهروضوئية و53 كيلوواط من بطاريات التخزين وثلاثة مولدات ديزل (50 كيلوواط و50 كيلوواط و10 كيلوواط)، مما يؤدي إلى تغلغل الطاقة الشمسية بنسبة 34%. بسعر 1 دولار/لتر ديزل، يوفر النظام خياراً فعالاً من حيث التكلفة ومفيداً بيئياً، حيث تبلغ التكلفة 0.392 دولار/كيلوواط ساعة وشركة TNPC بقيمة 1,042,824 دولاراً.

في فلسطين، اقترح مؤلفون نظاماً هجيناً للطاقة الهجينة خارج الشبكة ألواح شمسية/طاقة الرياح/مولد ديزل لتزويد مراكز الحجر الصحي في غزة بالطاقة الكهربائية، والتي تعاني من أزمة كهرباء تفاقمت بسبب جائحة كوفيد-19. وباستخدام برنامج HOMER-Pro، يدمج النظام المحسن بين مولدات الديزل و150 كيلوواط من الطاقة الشمسية الكهروضوئية و200 كيلوواط من الرياح لإنتاج كهرباء اقتصادية وصديقة للبيئة بسعر 0.348 دولار/كيلوواط ساعة، مما يؤدي إلى تخفيض نفقات الطاقة بنسبة 54.89%. يقلل النظام من الانبعاثات ونفقات التشغيل مع تلبية احتياجات المركز من الطاقة بشكل موثوق، مع فائض سنوي يبلغ 212,553 كيلوواط/ساعة [27].

يمكن استخدام الأنظمة الكهروضوئية بمفردها لتوفير الكهرباء في قطاعات مختلفة. في قطاع النقل، حيث بحث Shavolkin وآخرون [28] في استخدام

وتسلط هذه المستويات المرورية الضوء على مدى أهمية إبقاء المصابيح مضاءة ليلاً لتقليل فرص وقوع الحوادث. ويقع تطبيق النظام في شارع صلاح الدين، الذي تم تظليله باللون الأحمر في الشكل 1، والذي يظهر قطاع غزة في أعلى الخريطة.



الشكل 1: منطقة الدراسة (شارع صلاح الدين) في قطاع غزة [36].

تعرض الشكل 2 بيانات ساعية للبارامترات المناخية الرئيسية في قطاع غزة المتحصل عليها من هيئة الارصاد الجوية بغزة لعام 2020. تتمثل هذه البيانات في: الإشعاع الشمسي الأفقي الكلي (واط/م²)، ودرجة حرارة الهواء (درجة مئوية)، وسرعة الرياح (م/ثانية)، كما هو موضح في الأشكال (أ، ب، ج) على التوالي. يمتد الموسم الحار في غزة على مدار 4.0 أشهر، من 10 يونيو إلى 10 أكتوبر، حيث تتجاوز درجات الحرارة اليومية 28 درجة مئوية في المتوسط. ويعتبر شهر أغسطس هو أكثر الشهور حرارة، حيث يبلغ متوسط درجات الحرارة المرتفعة والمنخفضة 30 درجة مئوية و23 درجة مئوية على التوالي. وعلى العكس من ذلك، يستمر موسم البرودة لمدة 3.1 شهراً، من 12 ديسمبر إلى 16 مارس، حيث يبلغ متوسط درجات الحرارة المرتفعة اليومية أقل من 20 درجة مئوية. وأكثر الشهور برودة هو شهر يناير، حيث يبلغ متوسط درجة الحرارة العظمى 17 درجة مئوية والصغرى 10 درجات مئوية.

يختلف الغطاء السحابي في غزة بشكل كبير على مدار العام. وتبدأ الفترة الأكثر صفاءً في 23 مايو تقريباً وتنتهي في 17 أكتوبر، حيث يكون شهر أغسطس هو أكثر الشهور. وتمتد الفترة الأكثر غيوماً من 17 أكتوبر إلى 23 مايو، وتبلغ ذروتها في شهر ديسمبر عندما تكون السماء ملبدة بالغيوم أو غائمة في الغالب حوالي 32% من الوقت. ويكون أقصر يوم في 21 ديسمبر، حيث تبلغ مدة النهار 10 ساعات و6 دقائق، بينما يقع أطول يوم في 21 يونيو، حيث يبلغ طول النهار 14 ساعة و12 دقيقة. ويستمر موسم الأمطار لمدة 5.3 شهراً تقريباً، من 26 أكتوبر إلى 4 أبريل، ويبلغ الحد الأدنى لهطول الأمطار التراكمي في 31 يوماً 13 ملم. ويشهد شهر يناير أعلى معدل لهطول الأمطار بمتوسط 37 ملم. بينما يمتد موسم الجفاف لمدة 6.7 أشهر، من 4 أبريل إلى 26 أكتوبر.

تُظهر سرعة الرياح تبايناً موسمياً معتدلاً. وتستمر فترة الرياح الأكثر شدة 4.9 أشهر، من 25 أكتوبر إلى 23 مارس، حيث يتجاوز متوسط سرعة الرياح 3.6 م/ثانية. فبراير هو الشهر الأكثر رياحاً، حيث يبلغ متوسط سرعة الرياح 3.8 م/ثانية. وتمتد الفترة الأكثر هدوءاً لمدة 7.1 شهراً، من 23 مارس إلى 25 أكتوبر، حيث يكون شهر مايو هو أهدأ شهر، بمتوسط سرعة 3.3 م/ثانية.

حركة الأشخاص والبضائع، مما أدى إلى انقطاع متكرر للتيار الكهربائي ونقص مستمر في الوقود. ونتيجة لذلك، برزت حلول الطاقة المتجددة كنهج حاسم ومستدام لمعالجة أزمة الطاقة في غزة [33].

وقد أكد Fathi & Alsadi [9] على دور الطاقة الشمسية في التخفيف من تحديات الطاقة في المنطقة، حيث قاما بتحليل 15 عاماً من بيانات الطاقة الشمسية باستخدام برنامج SAM. وقد اقترحت دراستهما سيناريوهين: خطة فورية لتلبية الطلب على الطاقة الشمسية بقدرة 552 جيغاواط/ساعة في السنة من خلال تركيب 555 ميغاواط/ساعة من الأنظمة الكهروضوئية على الأسطح بتكلفة تقدر بـ 800 مليون دولار، مما يخفف تكاليف الكهرباء إلى 0.11-0.07 دولار/كيلوواط/ساعة؛ واستراتيجية طويلة الأجل تهدف إلى تحقيق الاستقلال في مجال الطاقة. لا تعالج الطاقة الشمسية أزمة الطاقة الملحة فحسب، بل تنطوي أيضاً على إمكانية تعزيز النمو الاقتصادي وخلق فرص العمل والتنمية المستدامة في فلسطين. وقد أكدت دراسة أجريت على الوعي الاجتماعي في غزة في استخدام الطاقة الشمسية للتأكيد على أهمية التأثير الاجتماعي للطاقة الشمسية على المجتمع المحلي [34].

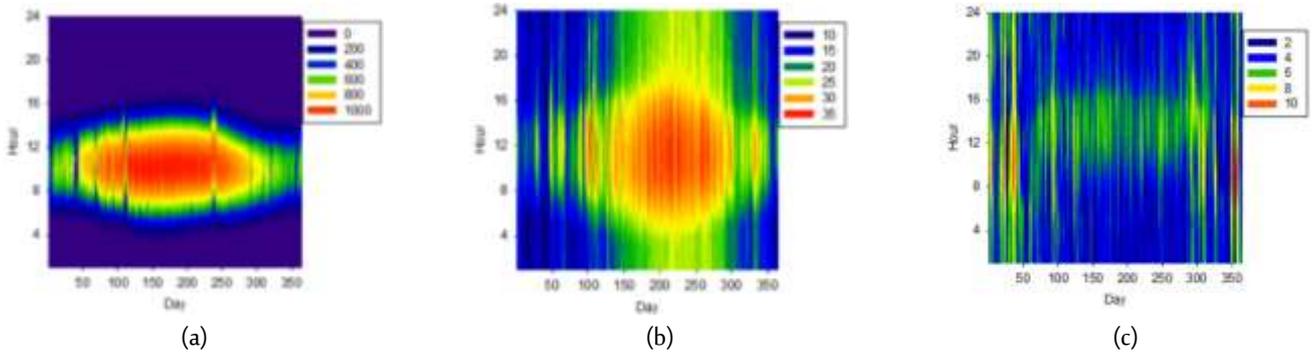
وبالنظر إلى الكثافة السكانية في غزة، فإن التواجد الكثيف للسيارات والمشاة يزيد بشكل كبير من خطر وقوع الحوادث، خاصة في الشوارع ذات الإضاءة الضعيفة. وغالباً ما يظل شارع صلاح الدين، وهو طريق حيوي يربط بين المناطق الرئيسية داخل غزة، محاطاً بالظلام، مما يفاقم هذه المخاطر. ويتمثل الحل العملي والمستدام في تركيب أعمدة إنارة تعمل بالطاقة الشمسية، والتي يمكن أن توفر إضاءة موثوقة مع تقليل الاعتماد على شبكة الكهرباء غير الموثوقة.

تؤكد هذه الدراسة على أهمية استخدام الطاقة الشمسية في إنارة الشوارع الرئيسية في غزة، مع التركيز على تطوير أعمدة إنارة تعمل بالطاقة الذاتية. وقد صُممت هذه الأعمدة لتعزيز مفهوم الطاقة المتجددة مع تلبية الحاجة الملحة لشوارع أكثر أماناً وسهولة في الوصول إليها. ويتألف كل عمود إنارة يعمل بالطاقة الذاتية من مكونات أساسية، بما في ذلك اللوح الشمسي ومصدر إضاءة ووحدة تحكم بالشحن وبطارية، مما يوفر حلاً فعالاً وصديقاً للبيئة لتحديات الطاقة والسلامة في المنطقة. ولتحديد النظام الأمثل، تقارن هذه الدراسة أيضاً بين تقنيات الإضاءة المختلفة، بما في ذلك أعمدة الإنارة التي تعمل بمصابيح LED وأعمدة الإنارة التي تعمل بمصابيح الصوديوم، من حيث كفاءة الطاقة والأداء والاستدامة. ويهدف البحث، من خلال تقييم هذه الأنظمة، إلى تحديد الحل الأكثر فعالية واقتصادية لتحسين إنارة الشوارع في غزة، بما يضمن تعزيز السلامة وتقليل الاعتماد على الطاقة.

منهجية البحث

الموقع الجغرافي والبيانات المناخية لمنطقة الدراسة

يمتد شارع صلاح الدين جنوباً إلى مصر ويعدّ رابطاً حيوياً بين المناطق الشمالية والجنوبية من القطاع كما هو مبين بالشكل (1). وتعتبر طريقاً رئيسياً، ويمر عبر مناطق مكتظة بالسكان. يبلغ طول شارع صلاح الدين حوالي 45 كيلومتراً ويتراوح عرضه 26-34 متراً. وتنقسم حركة المرور على هذا الطريق المستخدم بكثافة على النحو التالي: 66,819 مركبة يومياً في محافظة الشمال، و67,529 مركبة يومياً في محافظة غزة، و167,409 مركبة يومياً في المحافظات الوسطى، و62,269 مركبة يومياً في المحافظات الجنوبية [35].



الشكل 2: بيانات مناخية رئيسية متسلسلة زمنياً كل ساعة: (أ) الإشعاع الشمسي الأفقي العالمي (واط/م²), (ب) درجة حرارة الهواء (درجة مئوية) و(ج) سرعة الرياح (م/ث).

حيث: Al هو متوسط شدة الاضاءة بوحددة الليومن؛ UF هو الاستخدام الذي يعتمد على نوع التركيبة، MF هو عامل الصيانة (عادةً من 0.7 إلى 0.9). ويمكن صياغة علاقة كفاءة اضاءة المصباح (η) مع شدة الاضاءة (Al) وقدرة المصباح (P) بالمعادلة (2) [42]:

$$\eta = \frac{Al}{P} \quad (2)$$

وباعتبار أقصى عرض للمسار الواحد من الشارع بحدود $w=17$ متراً والمسافة الفاصلة بين الاعمدة $d=30$ متراً، $UF=0.89$ ، $MF=0.9$ وشدة الاضاءة $E=20$ لوكس. وبالتالي، من المعادلة (1)، $Al=12734$ lm. ثم من المعادلة (2)، ويفرض ان $\eta=100lm/W$ ، فإن قدرة المصباح $127.4=$ واط. لذلك، يجب أن تكون مصدر الاضاءة ذات قدرة أكبر من 128 واط، ولهذا تم اختيار مصباح LED بقدرة 150 واط.

اقترحت الدراسة الحالية استبدال مصابيح الصوديوم بقوة 400 واط وبجهد 220 فولت تيار متردد بمصابيح LED بقوة 150 واط وبجهد 220 فولت تيار متردد، لانهارة شارع صلاح الدين بمعزل عن الشبكة العامة للكهرباء. يتم الحصول على المكونات المختارة من السوق المحلية. في البداية، تمت دراسة لجزء طوله 1 كم، ثم تم توسيع نطاق النتائج لتغطية كامل الشارع البالغ طوله 45 كم.

وأخذت الاعتبارات التالية:

- المسافة بين أعمدة الإنارة 30 متراً.
- يحتوي شارع صلاح الدين على 33 عمود إنارة لكل كيلومتر.
- كل عمود إنارة مزود بمصباحين. وبالتالي يلزم 66 مصباحاً.

إجراء الحسابات

لاتمام الدراسة سيتم تنفيذ الخطوات التالية:

- (أ) تقييم متطلبات استهلاك الطاقة.
- (ب) تحديد الحجم المناسب للوحدات الكهروضوئية.
- (ج) تحديد محاولات الطاقة الشمسية ووحدات التحكم في الشحن المناسبة.
- (د) حساب سعة البطارية المطلوبة.
- (هـ) حساب الضرر البيئي
- (و) حساب تكلفة الطاقة (LCOE) وفترة الاسترداد (PP).

الحساب باستخدام النمذجة الرياضية

النظام المقترح- يتضمن كل عمود إضاءة جميع مكونات النظام الكامل: مصباح LED بقوة 150 واط وبجهد دخل 220 فولت تيار متردد. ويوضح

فرضيات وحدود الدراسة ومصادر الالاقين في النتائج

لتبسيط التحليل، تم وضع الفرضيات التالية:

1. لا تخضع الألواح للتظليل أو التظليل الجزئي.
2. يتم إهمال التدهور في إنتاج الطاقة بمرور الوقت.
3. عدم حدوث أعطال في وحدات التحكم.
4. عدم احتساب سعر الاجهزة بعد انتهاء عمرها (الرابش).

تشمل القيود الأساسية لهذه الدراسة استبعاد الظروف الجوية القاسية، مثل العواصف، من الاعتبارات المتعلقة بتشغيل الألواح وسلامتها. بالإضافة إلى ذلك، لم يتم أخذ تأثير تراكم الغبار وأنشطة التنظيف في الحساب في حسابات الطاقة والحسابات الاقتصادية [37]. لم تأخذ الدراسة أيضاً في الحساب مخططات إنارة الشوارع البديلة، كما هو موثق في [38]، وهو ما سيتم استكشافه في الأبحاث المستقبلية. ومن محدودية الدراسة المهمة الأخرى غياب تحليل الحساسية لتقييم كيفية تأثير الخصائص التقنية على الأداء العام للنظام [39].

تنبع المصادر الرئيسية لعدم اليقين في هذه الدراسة من البيانات المناخية وبيانات الأحمال، واختيار مناهج نمذجة النظام، وتقديرات البارامترات. عامل عدم اليقين الرئيسي الآخر هو تكلفة اجهزة ومعدات الطاقة الشمسية. كما لوحظ في [40]، تبينا في أسعار معدات الطاقة الشمسية بنسبة تصل إلى 360%. ومع ذلك، من بين جميع أنظمة الطاقة المتجددة، تُظهر الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) أقل نسبة عدم يقين، حيث تظل أقل من 4% [41].

تقدير متطلبات طاقة إنارة الشوارع

يختلف مستوى الإضاءة القياسي للشوارع حسب التطبيق: 10-20 لوكس للشوارع السكنية، و20-50 لوكس للطرق الرئيسية، و50-100 لوكس للطرق السريعة، و10-20 لوكس لمناطق المشاة. وللحصول على أفضل مستوى من الأمان والرؤية. لحساب القدرة الكهربائية وشدة الاضاءة للمصباح المناسبين لتركيبة أعمدة الإنارة في الشوارع، من المهم استخدام المعلمات التالية: عرض الطريق (w)، والمسافة الفاصلة بين الأعمدة الكهربائية (d)، ومتطلبات السلامة. تحسب المعادلة (1) مستوى إضاءة الشارع (E) بوحددة لوكس (lux) [42]:

$$lux(E) = \frac{Al \times UF \times MF}{w \times d} \quad (1)$$

حيث σ يشير إلى استهلاك البطارية الذاتي (1% لكل يوم)، η_{inv} ، η_b يمثلان كفاءة محول التردد والبطارية على التوالي، $P_L(t)$ ، $P_{PV}(t)$ يمثلان الحمل الكهربائي وإنتاجية اللوح الشمسي عند الزمن t على التوالي بالوات ساعة.

وعليه فإن حجم بطارية التخزين تعطى بالعلاقة التالية [48،47]:

$$P_B = \frac{\max[SoC(t)]_{t=1,8760}}{DOD} \times CF_T \quad (6)$$

حيث: DOD مستوى التفريغ في البطارية ($DOD = 80\%$)، CF_T يشير إلى

معامل التصحيح لدرجة حرارة الهواء الجوي [49]

$$CF_T = 0.0004T^2 - 0.0246T + 1.3961 \quad (7)$$

حيث T يمثل أقل درجة حرارة محتملة في موقع الدراسة وكانت لسنة 2022 حوالي $T = 6.8^\circ\text{C}$. وبالتالي فإن $CF_T = 1.247$. جدول المواصفات مدرج في الملحق A2.

محول التردد والمتحكم والمتنوع

يمكن حساب طاقة محول التردد $P_{inv}(t)$ على مدار السنة من المعادلة التالية [50]:

$$P_{inv}(t) = \frac{P_t^m(t)}{\eta_{inv}} \quad (8)$$

وعليه فإن قدرة محول التردد (P_{inv}) ستكون

$$P_{inv} = \max[P_{inv}(t)]_{t=1,8760} \quad (9)$$

جدول المواصفات مدرج في الملحق A3.

زوايا الميل والسمت المثالية للوح الخلايا الشمسية

يتم تحديد زاوية ميل واتجاه الواح الخلايا الشمسية استناداً على توصيات بُحاث محليين [51-53]، حيث قدرت زاوية الميل بحوالي 25° في اتجاه الجنوب.

المؤشرات الاقتصادية والبيئية

تكلفة إنتاج وحدة الطاقة

تكلفة الطاقة المستوية (LCOE) هي التكلفة المتوقعة بالدولار الأمريكي/كيلووات ساعة على النحو التالي [54]:

$$LCOE = \frac{\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} CE_{SLS} + OME_{SLS} - C_{CO2}}{E_{Load}} \quad (10)$$

حيث: CE_{SLS} - تكلفة رأس المال للمشروع، OME_{SLS} - مصاريف الصيانة، C_{CO2} - تكلفة الضرر البيئي، i - تسبة الفائدة السنوية الحقيقية (2.5%)، n - عمر منظومة انارة الشوارع بالطاقة الشمسية (25 سنة).

فترة استرداد رأس المال

تشير فترة الاسترداد (PBP) (بالسنوات) إلى الوقت المقدر اللازم لاسترداد الاستثمار الأولي من خلال التدفقات النقدية المتولدة [55].

$$PBP = \frac{CE_{SLS}}{AI} \quad (11)$$

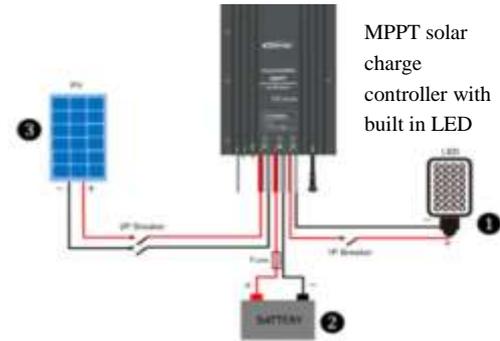
حيث AI يمثل العائد السنوي ويمثل سعر الكهرباء (0.14\$/kWh) وسعر CO_2 (70\$/ton CO_2)

تكلفة الضرر البيئي

يعتمد نظام توليد الكهرباء في قطاع غزة بنسبة 100% تقريباً على محطة توليد الكهرباء التي تعمل بالديزل في جباليا. يمكن حساب التوفير السنوي في تكلفة تخفيف ثاني أكسيد الكربون C_{CO2} على النحو التالي [56-59]:

$$C_{CO2} = EF_{CO2} \times E_{elec} \times \phi_{CO2} \quad (12)$$

الشكل 3 النظام الكهروضوئي المقترح. يشتمل هذا النظام على لوحة خلايا شمسية، ووحدة تحكم بالشحن مدمج وطريقة شحن MPPT (تتبع نقطة الطاقة القصوى)، ومصابيح LED، وبطارية.



الشكل 3: نظام الطاقة الشمسية لانارة شارع صلاح الدين المقترح

حساب الأحمال الكهربائية

تتمثل الخطوة الأولى في تصميم نظام الطاقة الشمسية في تحديد إجمالي الطاقة واستهلاك الطاقة لجميع الأحمال التي سيزودها النظام. من المهم أن نلاحظ أن استخدام مصابيح الشوارع يختلف على مدار العام، مع استخدام أعلى في الشتاء واستخدام أقل في الصيف.

حساب حجم مكونات المنظومة

يمكن تقدير الطاقة الكهربائية المنتجة من لوح شمسي معين في ظل التشغيل الحقيقي والظروف المناخية من خلال المعادلة التالية [43]:

$$P_{PV} = P_{STC} [1 + \beta_p (T_{cell} - T_{STC})] \frac{H_t}{H_{STC}} \quad (3)$$

حيث: P_{PV} تشير إلى القدرة الحقيقية للوح الشمسي تحت الظروف الحقيقية الجوية والتشغيلية، β_p هو معامل درجة الحرارة للقدرة ($^\circ\text{C}/\%$)؛ H_t تشير إلى الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح الوحدة الكهروضوئية (W/m^2)؛ T_{cell} تمثل درجة حرارة سطح الخلية الكهروضوئية ($^\circ\text{C}$)؛ يشير الحرف السفلي STC إلى ظروف الاختبار القياسية $T_{STC} = 25^\circ\text{C}$ و $H_{STC} = 1000 \text{ W}/\text{m}^2$. وتعتبر تقدير قيمة T_{cell} تحدياً لأنه يعتمد على الظروف الجوية للموقع المحدد. وقد استخدم العديد من الباحثين معادلة تجريبية لتحديد درجة حرارة سطح الخلية T_{cell} كدالة على درجة حرارة الهواء الجوي T_∞ وشدة الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح اللوح الشمسي H_t على النحو التالي [44]:

$$T_{cell} = T_\infty + 7.8 \times 10^{-2} H_t \quad (4)$$

في هذا العمل، تم استخدام الواح الشمسية نوع HiKu6-560MS بتقنية احادية التبلور "Monocrystalline" المتوفرة في سوق غزة. يعرض الجدول 2 البيانات الكهربائية لهذا النوع من الخلايا الكهروضوئية. جدول المواصفات مدرج في الملحق A1.

البطاريات

يتم حساب مستوى الطاقة في البطارية (SoC) باستخدام المعادلة [45،46]:

$$SoC(t) = SoC(t-1) \cdot (1 - \sigma) + \left(P_{PV}(t) - \frac{P_L(t)}{\eta_{inv}} \right) \times \eta_b \quad (5)$$

يصل الاجمالي اليومي 5.7 كيلوواط ساعة لكل متر مربع. ويقدر الاجمالي السنوي بحوالي 2,185 كيلوواط ساعة لكل متر مربع. ومثلت انتاجة اللوح الشمسي من نوع HiKu6-560MS بقدرة 560 واط بيانيا في الشكل (6). اما الشكل (7) فيمثل الحمل الساعي لمصباح LED بقدرة 150 واط. حيث بلغ الحمل السنوي حوالي 613.5 كيلوواط ساعة وعدد ساعات الشغل حوالي 4090 ساعة في السنة.

ويمثل الشكل (8) مستوى الطاقة في بطارية التخزين. حيث يظهر الشكل ان بطارية بسعة 3500 واط ساعة تكفي لتغطية حمل مصباح LED بقدرة 150 واط وقدرة اللوح الشمسي 560 واط. أما سعة البطارية الحقيقية فتحسب بقسمة سعة البطارية على 12 فولت وبالقسمة على DOD (0.75) وبضرب الناتج في CF_T (1.247). وبالتالي فان سعة البطارية حوالي 578 أمبير ساعة بجهد 12 فولت! وبالتالي عدد البطاريات المتصلة على التوازي يعتمد على مواصفات البطاريات الموجودة في السوق المحلي. وعليه سيكون عدد البطاريات بطارياتان بقدرة 300 امبير ساعة.

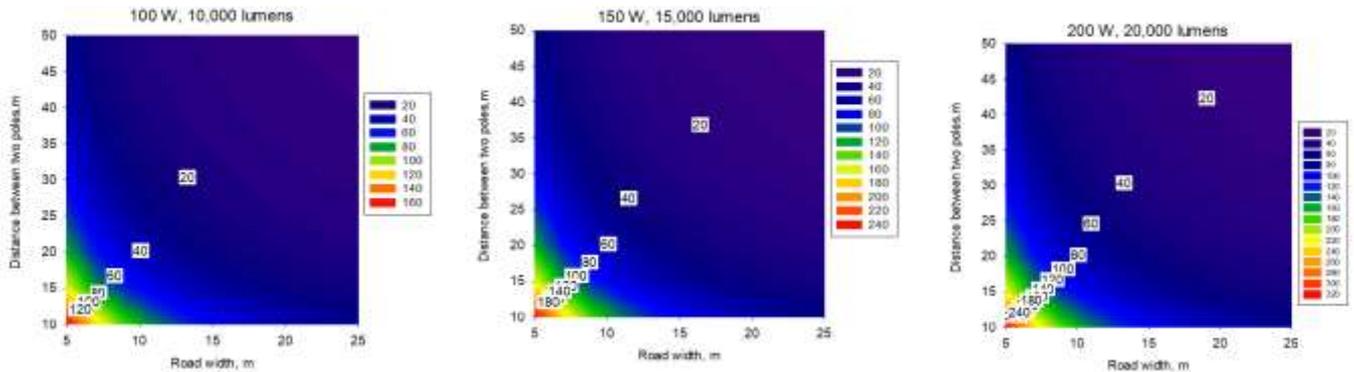
يكشف الجدول (1) تفاصيل النظام المقترح، لمسافة 1 كم من شارع صلاح الدين. فإن التكلفة الإجمالية لعمود إنارة شمسي واحد مع مصباح LED (150 واط) = 970 دولارًا، وبالتالي، بالنسبة لـ 2×33 عمود إنارة، ستكون التكلفة الإجمالية 96,826 دولارًا لكل كيلومتر.

حيث: EF_{CO_2} يمثل معامل انبعاث CO_2 لمنظومة الطاقة في غزة $EF_{CO_2} = 0.753 kgCO_2/kWh$ [61] الطاقة السنوية المنتجة من الطاقة الشمسية [ميغاواط ساعة]، ϕ_{CO_2} يشير إلى السعر الدولي لثاني أكسيد الكربون والذي يقدر بحوالي 70 دولارًا للطن الواحد من ثاني أكسيد الكربون بحلول نهاية العقد لإنجاح الأهداف المناخية العالمية، وسيرتفع إلى 85 دولارًا للطن في عام 2030 [60].

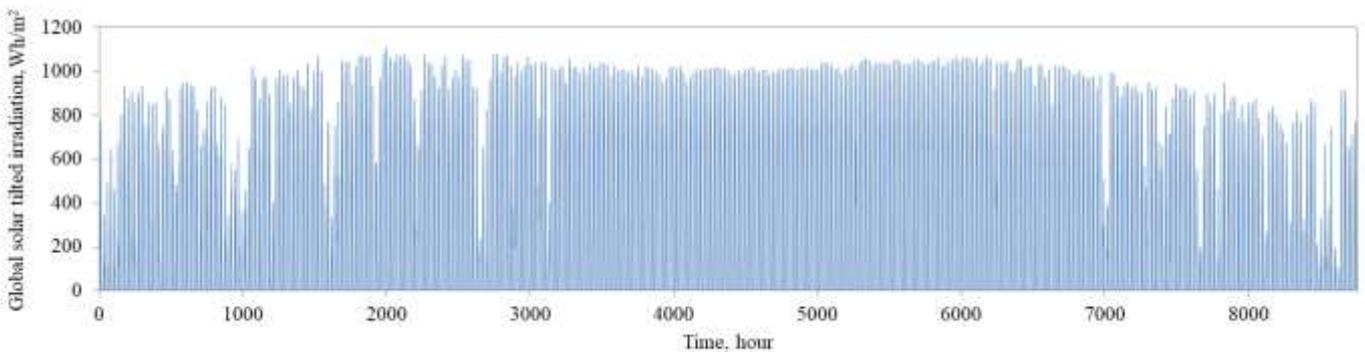
النتائج والمناقشة

أمكن تمثيل العلاقة بين مستوى الاضاءة و قدرة مصباح LED وشدة الاضاءة والمسافة الفاصلة بين أعمد الانارة وعرض الطريق تمثيلا بيانيا على صورة كونتورز حراري كما هو مبين في الشكل (4). فاذا كانت ابعاد الطريق معروفة فانه من السهل تحديد قدرة مصباح LED اللازمة لانارة الطريق. فاذا ما اعتمدت قيمة اقل مستوى اضاءة 20 لوكس لطريق صلاح الدين باعتباره طريقا رئيسيا والمسافة الفاصلة بين الاعمدة 30 مترا وعرض المسار الواحد طريق للطريق حوالي 17 مترا.

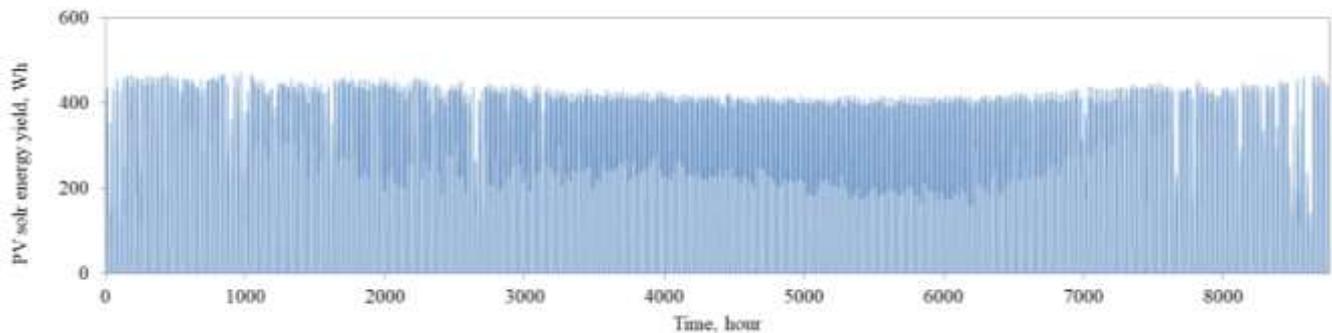
ويستعرض الشكل (5) شدة الاشعاع الشمسي الساعي الساقط على اللوح الشمسي المائل بزاوية 25° جنوبا والتي تم حسابها باستخدام نموذج HDKR كما اوصت بذلك دراسة محلية اجراها Nassar وآخرون [50]. حيث بلغ متوسط الاشعاع اليومي حوالي 468 واط ساعة لكل متر مربع ويمكن ان



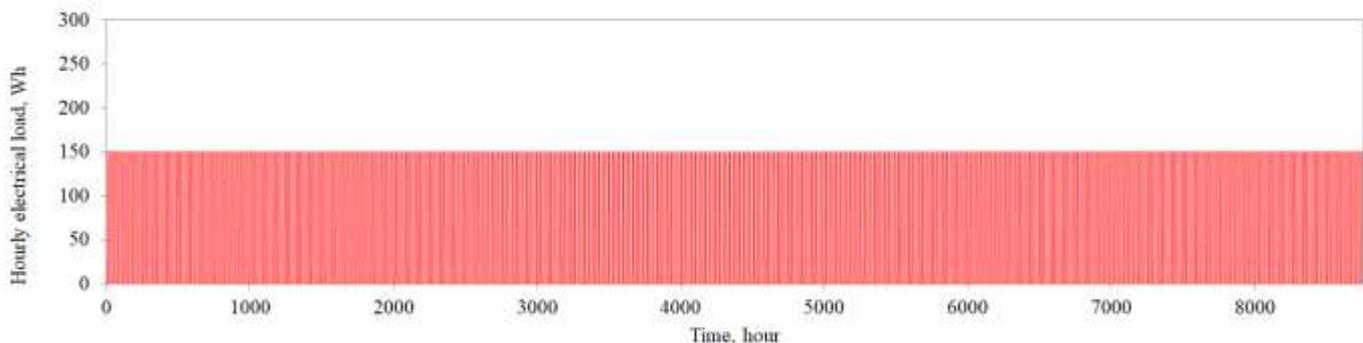
الشكل 4: العلاقة بين شدة الاضاءة و قدرة المصباح والمسافة الفاصلة بين اعمدة الانارة وعرض الطريق



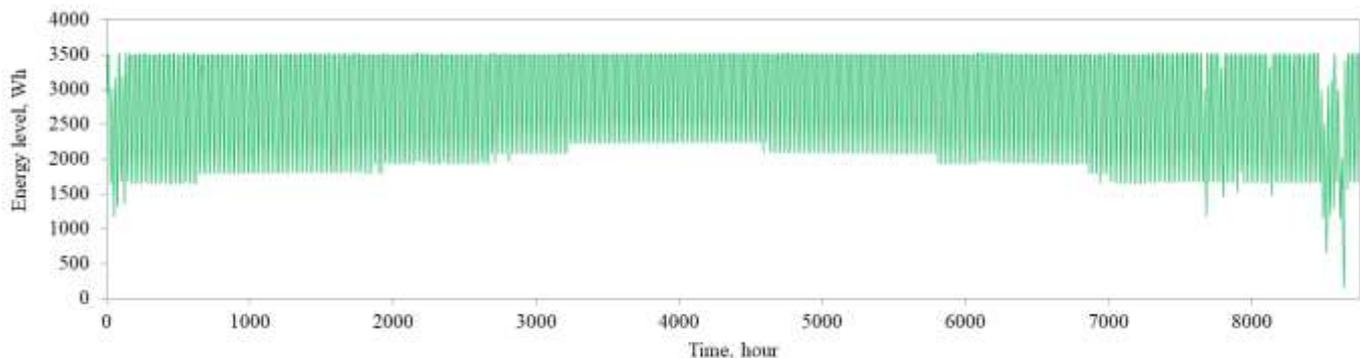
الشكل 5: شدة الاشعاع الشمسي الساعي الكلي المائل (H_t)



الشكل 6: انتاجية اللوح الشمسي من نوع HiKu6-560MS بقدرة 560 واط



الشكل 7: الحمل الكهربائي الساعي لمصباح LED بقدرة 150 واط



الشكل 8: مستوى الطاقة في البطارية

الجدول 1: مكونات وتكلفة النظام المقترح

المكون (الجهاز)	العدد	التكلفة	تكلفة المكونات (\$)
ألواح خلايا شمسية بقدرة 560Wp نوع HiKu6-560MS	1	64.05 (\$/panel)	4,228
متحكم شحن Tracer5210BPL MPPT	1	40 (\$/controller)	2,640
بطارية 300AH Type Fusion	2	600 (\$/battery)	79,200
مصابيح LED بقدرة 150W	1	50 (\$/lamp)	3,300
فيوز مع القاعدة 25A	1	5 (\$/unit)	330
قاطع دائرة 8 - 16 أمبير	2	3 (\$/unit)	198
حساس ضوء LDR	1	5 (\$/unit)	330
تكلفة التركيب [62]		50-300 (200) \$/pole	6,600
التكلفة الإجمالية		1,571	96,826
تكلفة الصيانة [62]		50-300 (200) \$/pole/year	6,600

الخلاصة

قامت الدراسة الحالية بتحليل التبعات الاقتصادية والبيئية لاستبدال مصابيح الانار الحالية لشارع صلاح الدين بمصابيح انارة LED تعمل بالطاقة الشمسية وأكدت الدراسة الجدوى الاقتصادية والفنية والبيئية من هذا المشروع. قدرت تكلفة الاستثمار حوالي 96,826 دولارا، اضافة الى دفعات

استنادا على البيانات المدرجة في الجدول (1) فانه أمكن تقدير تكلفة الطاقة المستوية (LCOE) من المعادلة (10) وقدرت بحوالي 0.233 \$/kWh وفترة استرداد رأس المال حوالي 12.409 سنة. وبلغت كمية CO₂ السنوية التي منعت من الانبعاث في الهواء الجوي بحوالي 30.490 طن CO₂ لكل كيلومتر، وقدرت تكلفة الضرر البيئي الناجم عن هذه الكمية بحوالي 2,134.3 دولارا في السنة لكل كيلومتر.

بحوالي 30.490 طن CO₂، ويقدر قيمة الضرر البيئي الناجم من هذه الكمية بحوالي 2,134.3 دولار سنويا. وسيرد هذا المشروع الاستثمار 12.41 سنة. يعتبر النهج المتبع شاملا ويمكن تطبيقه دوليا للمناطق الحضرية والمناطق النائية الغير متصلة بالشبكة العامة للكهرباء، في هذه الحالة جب اضافة تكلفة اعمدة الانار وتكاليف البناء والتشييد.

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."

Acknowledgement: "The authors would like to thank the Transport Authority in the Gaza Strip for their assistance and for providing them with the necessary information to complete the research"

References

- [1] D. Sun, A. Athienitis, and K. D'Avignon. "Application of semitransparent photovoltaics in transportation infrastructure for energy savings and solar electricity production: Toward novel net-zero energy tunnel design," *Progress in Photovoltaic*, 27: 1034–1044, 2019.
- [2] S. Subramani, et al. "Energy efficiency and pay-back calculation on street lighting systems," *presented at the AIP Conf. Proc*, 2019.
- [3] B. Welsh, D. Farrington, and S. Douglas. "The impact and policy relevance of streetlighting for crime prevention: A systematic review based on a half-century of evaluation research," *Criminology & Public Policy*, 21(1): 1-28, 2022.
- [4] A. Alseed, and M. Fakroun. "Causes of Accidents between Regions and Ways to Address Them: A Case Study of the Road (Murzuq – Taraghen – Ghadwa)- Southern Region of Libya." *The First Conference on Roads and Traffic Accidents - November 23th , 2024, Brack Alshatti - Libya*, 75-78, 2025.
- [5] 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)." *The First Conference on Roads and Traffic Accidents - November 23th , 2024, Brack Alshatti - Libya*, 79-86, 2025.
- [6] C. Zhang, et al. "Reflective Properties and Lighting Quality of Urban Asphalt Roads in a Full-Service Cycle: A Longitudinal Study in Zhejiang Province, China," *Sustainability*, 15: 16784, 2023.
- [7] M. Abuqila, Y. Nassar, and M. 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*, 4(1): 58-71, 2025.
- [8] H. El-Khozondar and F. El-batta, "Solar energy implementation at the household level: Gaza Strip case study," *Energy, Sustainability and Society*, 12(1): 17, 2022.
- [9] Y. Fathi, and S. Alsadi, "Assessment of solar energy potential in Gaza Strip-Palestine," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 31: 318-328, 2019.
- [10] Y. Nassar, M. Salem, and H. El-Khozondar. "Estimation of CO₂ Emissions from the Electric Power Industry Sector in Libya." *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, 14 (1): 42–55, 2025.
- [11] F. Nassar, M. Irhouma, M. Salem, and H. El-Khozondar. "Towards Green Economy: Case of Electricity Generation Sector in Libya." *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, 14 (1), 2025. under press
- [12] H. El-Khozondar, and F. El-Batta. "Survey Study for the Usage of Solar Energy at Household by the Employees of Al-Shifa Medical Complex in Gaza Strip," *Journal of Physics: Conference Series*, 1108(1), 2018.
- [13] H. El-Khozondar, and F. El-batta. "Solar Energy as an alternative to conventional energy in Gaza Strip: Questionnaire based study," *An -Najah Univ. J. Res. (N. Sc.)*, 32(1), 2018.
- [14] K. Amer, et al. "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*, 4(1): 51-58, 2025.
- [15] H. Awad, N. Fathi, A. Hafez, M. Sherbiny, and A. Ali. "Optimal design and economic feasibility of rooftop photovoltaic energy system for Assuit University, Egypt." *Ain Shams Engineering Journal*, 13(3): 763-774, 2022.
- [16] H. El-Khozenadar, T. Khatib, B. Attaee, and R. El-Khozondar, "Assessment of solar e-cookers social acceptance in Gaza Strip," *Scientific Reports*, 12(1): 17226, 2022.
- [17] A. Safarpour, S. Laleh, and S. Soltani, "Identifying challenges, benefits, and recommendations for utilizing solar panels in sport stadiums: A thematic analysis," *Progress in Engineering Science*, 2(1): 100035, 2025.
- [18] A. Arkarnis, and S. Devi "Retrofitting Solar Power Systems on Public Street Lightings as A Dispersed Power Plant," presented at the 2019 The 3rd International Conference on Electrical, Telecommunication and Computer Engineering (ELTICOM), Medan, Indonesia, 16-17 September 2019, 2019.
- [19] A. Abodwair, et al. "Feasibility Assessment of Hybrid Renewable Energy Based EV Charging Station in Libya." *Solar Energy and Sustainable Development Journal*. 13 (2): 311-349, 2024
- [20] Y. Nassar, and S. Alsadi, "Economical and environmental feasibility of the renewable energy as a sustainable solution for the electricity crisis in the Gaza Strip." *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(3): 3-44, 2016.
- [21] K. Moumani. "Management of sustainable development in the light of Arab and international cooperation, a case study of the Arab vision of management of sustainable development." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, 1(1): 1-8, 2023.
- [22] M. Abuhelwa, et al. "Exploring the Prevalence of Renewable Energy Practices and Awareness Levels in Palestine." *Energy Science & Engineering*, 13(3): 1292-1305, 2025.
- [23] Y Nassar, et al. "Design of reliable standalone utility-scale pumped hydroelectric storage powered by PV/Wind hybrid renewable system." *Energy Conversion and Management*, 322: 119173, 2024.
- [24] M. Elnaggar, et al. "Renewable energy potential in the State of Palestine: Proposals for sustainability." *Renewable Energy Focus*, 49: 100576, 2024.
- [25] T. Djerajif, et al. "Design of an isolated renewable hybrid energy system: a case study." *Materials for Renewable and Sustainable Energy*, 11(3): 225-240, 2022.
- [26] 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*, 46(1): 9001-9023, 2024.
- [27] H. El-Khozondar, et al. "Standalone hybrid PV/wind/diesel-electric generator system for a COVID-19 quarantine center," *Environmental Progress and Sustainable Energy*, 42(3): e14049, 2022.
- [28] O. Shavolkin, I. Shvedchikova, J. Gerlici, K. Kravchenko, and F. Pribilinec, "Use of Hybrid Photovoltaic Systems with a Storage Battery for the Remote Objects of Railway Transport Infrastructure," *Energies*, 15(13): 4883, 2022.
- [29] H. El-Khozondar, et al. "Photovoltaic solar energy for street lighting: A case study at Kuwaiti Roundabout, Gaza Strip, Palestine," *Power Eng. Eng. Thermophys*, 3(2): 77–91, 2024.
- [30] H. El-Khozondar, 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)*, 8-9 May 2023 2023, pp..
- [31] J. Dutta, P. Nayak, and S. Bhowmick. "Making Solar PV Street Light – A New Convention," *International journal of innovative research in science, engineering and technology*, 13(5): 8652-8656, 2024.
- [32] P. Chiradeja, S. Yoomak, and A. Ngaopitakkul, "Economic Analysis of Improving the Energy Efficiency of Nanogrid Solar Road Lighting Using Adaptive Lighting Control," *IEEE Access*, 8: 202623-202638, 2020.
- [33] M. Khaleel, et al. "An integration PV farm to the unified power flow controller for electrical power system stability." (International Journal of Electrical Engineering and Sustainability, 1(1): 18-30, 2023.
- [34] H. El-Khozondar, R. El-Khozondar, W. Shabir, and A. Al-Jamasi. "Social Awareness of the Use of Renewable Energy among Engineering College Students at the Islamic University of Gaza, Palestine," *An-Najah University Journal for Research - B (Humanities)*, 36(6): 1174-1194, 2022.
- [35] Y. Sarraj, "Traffic Surveys of Gaza Strip 1994-2006." [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/259975120_Traffic_Surveys_of_Gaza_Strip_1994-2006
- [36] https://www.instagram.com/theglobal/p/CzKFy8qM404/?img_index=1
- [37] A. Alsharif, et al. "Mitigation of dust impact on solar photovoltaics performance considering Libyan climate zone: A review," *Wadi Alshatti Univ. J. Pure Appl. Sci.*, 1(1): 22–27, 2023.
- [38] N. Shehadeh, "Assessment of the street lighting in Lebanon," CEDRO/UNDP, 2015. <https://pdfroom.com/books/assessment-of-the-street-lighting-in-lebanon/jGk20vwKdpm>
- [39] Y. Nassar, et al. "Atlas of PV solar systems across Libyan territory," presented at the International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS), Istanbul, Turkey, 04-06 July 2022, 2022.
- [40] Y. Nassar, et al. "A new design for a built-in hybrid energy system, parabolic dish solar concentrator and bioenergy (PDSC/BG): A case study–Libya," *J. Clean. Prod.*, vol. 441, p. 140944, 2024.
- [41] Y. Nassar, et al. "Design of an isolated renewable hybrid energy system: A case study," *Mater. Renew. Sustain. Energy*, 11(3): 225–240, 2022.
- [42] H. El-Khozondar, et al. "Sustainable Street Lighting in Gaza: Solar Energy Solutions for Main Street." Unpublished.
- [43] A. Hafez, et al. "Technical and Economic Feasibility of Utility-Scale Solar Energy Conversion Systems in Saudi Arabia." *Iran J Sci Tec. T. Electr Eng*, 44(1): 213-225, 2019.
- [44] Y. Nassar, and A. Salem. "The reliability of the photovoltaic utilization in southern cities of Libya." *Desalination*, 209 (1-3): 86-90 (2007).
- [45] A. Ahmed, et al. "Strategic Renewable Energy Source Integration for Charging Stations in Plugin Hybrid Electric Vehicle Networks." 3ed EAI International Conference on Intelligent Systems and Machine Learning (ICISML-2023), 5th-6th January 2024, Pune – India.
- [46] A. Abdulhafiz, et al. "Design of Hybrid Renewable Energy System (PV/Wind/Batter) under real Climatic and Operational Conditions to Meet Full Load of the Residential Sector: A Case Study of a House in Samno village– Southern Region of Libya." *Wadi Alshatti Univ. J. Pure Appl. Sci.*, 4(1): 152–161, 2025.
- [47] A. Ahmed, A. Alsharif, and N. Yasser.. "Recent Advances in Energy Storage Technologies." *Int. J. Electr. Eng. And Sustain.*, 1(1): 9–17, 2023.
- [48] M. Amer, et al. "Critical Materials for EV Batteries: Challenges, Opportunities, and Policymakers." *Int. J. Electr. Eng. And Sustain.*, 3(1): 119–133, 2025.
- [49] Y. Nassar. Solar energy engineering active applications. Sebha University, Sebha, Libya, 2006
- [50] Y. Nassar, S. Alsadi, G. Miskeen, H. El-Khozondar, and N. Abuhamoud. "Atlas of PV Solar Systems Across Libyan Territory." 2022 International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS), Istanbul, Turkey, 04-06 July 2022.
- [51] A. Hafez, et al. "A generic model for optimum tilt angle of flat-plate solar harvesters for Middle East and North Africa region." *Applied solar energy*, 58(6): 800-812 (2022).
- [52] S. Alsadi, and Y. Nassar. "Energy Demand Based Procedure for Tilt Angle Optimization of Solar Collectors in Developing Countries." *Journal of Fundamentals of Renewable energy and applications*, 7(2): 1-4, 2017.
- [53] S. Alsadi, and Y. Nassar. "General polynomial for optimizing the tilt angle of flat solar energy harvesters based on ASHRAE clear sky model in mid and high latitudes." *Energy and Power*, 6(2): 29-38, 2016.
- [54] Y. Nassar, 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." *Journal of Energy Storage*, 108(2): 115224, 2025.
- [55] S. Mohammed. "Carbon and Energy Life Cycle Analysis of Wind Energy Industry in Libya." *Solar Energy and Sustainable Development Journal*, 12(1): 50-69, 2023.
- [56] M. Eteriki, et al. "Effect of Implementation of Energy Efficiency in Residential Sector in Libya." The 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES 2023), May 8-9, 2023, Gaza Strip, Palestine
- [57] S. Mohammed, et al. "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*, 4(1): 85-94, 2025.
- [58] M. Salem, A. Elmabruk, M. Irhouma, and I. Mangir. "Assessment of Wind Energy Potential in Western Mountain: Nalut and Yefren as Case Study." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, 4(1): 35-42, 2025.
- [59] M. Elnaggar, et al. "Assessing the techno-enviro-economic viability of wind farms to address electricity shortages and Foster sustainability in Palestine." *Results in Engineering*, 24: 103111, 2024.
- [60] M. Abdunnabi, et al. "Energy savings strategy for the residential sector in Libya and its impacts on the global environment and the nation economy." *Advances in Building Energy Research*, 17(4): 379-411, 2023.
- [61] Y. Nassar, A. Hafez, and S. Alsadi. "Multi-factorial comparison for 24 distinct transposition models for inclined surface solar irradiance computation in the state of Palestine: A case study." *Frontiers in Energy Research*, 7: 163 (2020).
- [62] <https://roadsksafety.com/how-much-do-solar-street-lights-cost-pricing-guide>
- [63] <https://www.enfsolar.com/pv/panel-datasheet/crystalline/48914>
- [64] <https://uk.renogy.com/core-mini-12-8v-300ah-lithium-iron-hosphate-battery/>
- [65] <https://www.epever.com/upload/file/2012/EPEVER-Datasheet-Tracer-BPL.pdf>

الملاحق

الجدول A3: الخصائص الكهربائية والتقنية للمتحكم والشاحن [65]		الجدول A1: الخصائص الكهربائية والتقنية للوح الشمسي نوع HiKu6-560MS [63]	
القيمة	الخاصية	القيمة	الخاصية
Tracer5210BPL	الماركة	Canadian Solar Inc	المصنع
580 W	أقصى قدرة للالواح الشمسية	Monocrystalline	النوع
100V	أقصى فولتية للالواح الشمسية	25 Years of 84.8% Output Power	العمر
20A	أقصى تيار شحن	560 Wp	أقصى قدرة (Pmax)
12 V	فولتية النظام	42.1 V	فرق الجهد عند أقصى قدرة (Vmpp)
200W	أقصى خرج للقدرة	13.31 A	التيار عند أقصى قدرة (Imp)
6.6A	أقصى خرج للتيار	50 V	فولتية الدارة المفتوحة (Voc)
		14.1 A	تيار الدارة المغلقة (Isc)
		21.7 %	كفاءة اللوح الشمسي
		-40~85 °C	مدى درجة الحرارة التشغيل
		-0.34 %/°C	معامل درجة الحرارة للقدرة القصوى
		-0.26 %/°C	معامل درجة الحرارة لفولتية الدارة المفتوحة
		0.05 %/°C	معامل درجة الحرارة لتيار الدارة المغلقة
		2278x1134x30 mm	أبعاد اللوح الشمسي (H/W/D)
		27.6 kg	الوزن
		144	عدد الخلايا في اللوح الواحد

الجدول A2: الخصائص الكهربائية والتقنية للبطارية [64]	
القيمة	الخاصية
Core - 12V 300Ah Lithium Iron Battery	الماركة
Lithium Iron Battery	نوع البطارية
5000 Cycles (80%EOL, 80%DOD)	دورة الحياة
12.8V	الفولتية الاسمية
300Ah	السعة المقدرة
3840Wh	الطاقة المنتجة المتواصلة
5 years	عمر البطارية
200Ah	تيار التفريغ المتواصل
200Ah/14.4V	تيار/فولتية الشحن المتواصل
-20°C to 55°C	درجة حرارة العمل
31.3 kg	الوزن
522 x 240 x 219 mm	الأبعاد