



Economic Feasibility Analysis of Grid-Connected Solar Power Plants in Desert Regions

Salamah O. Ihfedah¹, Mohammed A. Al-Madani *², Ihab A. Qaddoura³
Adam A. Qureshi³, Abu al-Qasim M. Al-Ghanudi³, Fahad S. Rajab³

¹Electrical and Electronic Department, Higher Institute of Science and Technology, Tamzawa, Al-Shati Libya.

²Metallurgical Engineering Department, Petroleum and Mining Engineering Faculty, Suez University, Suez, Egypt.

³Renewable Energy Department, Faculty of Technical Sciences, Mahruqa, Al-Shati, Libya.

*Corresponding author email: moh.ibrahim@sebhau.edu.ly

Received: 26-09-2025 | Accepted: 14-11-2025 | Available online: 25-12-2025 | DOI:10.26629/jtr.2025.58

ABSTRACT

The electricity crisis in Libya is a complex crisis, combining technical and administrative components. One of the most prominent solutions to address the problem of increasing demand for electricity is the use of solar energy. Desert areas are among the best locations for establishing solar power plants due to the abundance of solar radiation, the vast unused areas, and the low cost of land. Grid-connected solar power plants represent a cost-effective investment in most regions, especially as costs continue to decline and efficiency increases. The success of these projects depends on careful planning and a detailed feasibility study for each individual site. This study evaluates the generating capacity of solar photovoltaic systems at multiple locations in desert areas within Libya. In this research, to model the physical behavior of the power system, in addition to estimating the total cost of installing and operating the system during its expected lifetime, the Homer program was used. Through the results extracted from the economic feasibility analysis of the hybrid solar energy system (330 kW panels and 280 kW inverter) connected to the public grid, the data shows that the project has a high economic feasibility. Given that the cost of generating electricity was extremely low (0.02425 kWh), the total project cost was approximately 316,295 Libyan dinars. The data also confirms that solar panel costs represent the largest portion of the project's overall expenditures. Finally, solar power plants connected to the public electricity grid represent a strategic option with high benefits in the medium and long term.

Keywords: Solar Energy, Electrical Gird, HOMER, Economic Analysis of Renewable Energy.

تحليل الجدوى الاقتصادية لمحطات الطاقة الشمسية المرتبطة بالشبكة في المناطق الصحراوية

سلامة عمر أحفيظة¹, محمد الكيلاني المدنى^{2*}, إيهاب علي أقدورة³, آدم عبدالفتاح قرشي³

أوالقاسم محمد الغنودي³, فهد صالح رجب³

¹قسم الكهربائية والالكترونية، المعهد العالي للعلوم والتكنولوجيا، تامزاوه، الشاطئي، ليبيا.

²قسم هندسة الفلازات، كلية هندسة البترول والتدين، جامعة السويس، السويس، مصر.

³قسم الطاقات المتتجدة، كلية العلوم التقنية، محروقة، الشاطئي، ليبيا.

ملخص البحث

أزمة الكهرباء في ليبيا هي أزمة معقدة، تجمع بين مكونات تقنية وإدارية، وقد ازدادت عوامل بيئية مثل موجات الحرارة الشديدة التي تزيد الحمل على الشبكة. أثار هذه الأزمة خطيرة وشاملة، تتراوح من المخاطر على الصحة العامة والسلامة إلى الإضرار بالاقتصاد اليومي للمواطنين وتهديد الاستقرار الاجتماعي. من أبرز الحلول للتصدي لمشكلة تزايد الطلب على الكهرباء هو استخدام الطاقة الشمسية الكهروضوئية بسبب وفرة الإشعاع الشمسي واتساع المساحات غير المستغلة وانخفاض تكلفة الأرض. تمثل محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية المتصلة بالشبكة استثماراً مجدياً اقتصادياً في معظم المناطق، خاصة مع استمرار انخفاض التكاليف وزيادة الكفاءة. نجاح هذه المشاريع يعتمد على التخطيط الدقيق ودراسة الجدوى التفصيلية لكل موقع على حدة. تقييم هذه الدراسة القدرة التوليدية لأنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية في مواقع متعددة في مناطق صحراوية داخل ليبيا. في هذا البحث لنمدح التصرف الفيزيائي لنظام الطاقة بالإضافة إلى تقدير التكلفة الكلية لتركيب وتشغيل النظام خلال مدة العمر الافتراضية استُخدم النظم البرمجي هومر (HOMER PRO). من خلال النتائج المستخلصة لتحليل الجدوى الاقتصادية لنظام الطاقة الشمسية الهجين (330 كيلوواط ألواح 280 كيلوواط محول) والمترتب بالشبكة العامة للكهرباء، تُظهر البيانات أن المشروع يتمتع بجدوى اقتصادية عالية، حيث إن تكلفة إنتاج الكهرباء كانت منخفضة للغاية (0.02425 كيلوواط في الساعة)، وبلغت التكلفة الإجمالية للمشروع تقريباً (316,295 دينار ليبي). وتوكّد البيانات أيضاً أن مصاريف الألواح الشمسية تمثل الجزء الأكبر من تكلفة المشروع ككل. ويستخلص من هذه الدراسة البحثية أن محطات الطاقة الشمسية الكهروضوئية المرتبطة بالشبكة الكهربائية العامة تمثل خياراً استراتيجياً وذات فائدة عالية على المدين المتوسط والبعيد.

الكلمات الدالة: الطاقة الشمسية، الشبكة الكهربائية، هومر، التحليل الاقتصادي للطاقة المتعددة.

الجنوبية. هذه العوامل تجعل من ليبيا مكاناً واعداً للاستثمار في مجالات الطاقة الشمسية. تتمتع ليبيا بفترات طويلة من سطوع الشمس تصل إلى قرابة 8 ساعات يومياً، إلى جانب مساحات واسعة من الأرض، مما يجعلها بيئاً ملائمة لتبني أنظمة الطاقة الشمسية. جدول (1) يستعرض إمكانيات الطاقة الشمسية في ليبيا [2].

جدول 1. تقييم إمكانات الطاقة الشمسية في ليبيا [2].

(واط ساعةً متر مربع)	(واط ساعةً متر مربع يومياً)	(كيلوواط ساعةً متر مربع سنوياً)	الموارد الشمسية و حرارة الهواء
5359	1956	1956	الإشعاع العالمي الأفقي
5307	1937	1937	الإشعاع الطبيعي المباشر
1940	708	708	الإشعاع الأفقي المنتشر
5868 (جذب زاوي 26° متجانح 180°)	2142	2142	الإشعاع العالمي المائل
-	18.5	18.5	درجة حرارة الهواء

1. المقدمة

أزمة الكهرباء في ليبيا تعتبر من القضايا المعقدة التي تفرض ضرورة البحث عن حلول عاجلة وأخرى طويلة المدى. فعلى المدى القريب، تُركز الجهود على تعزيز استخدام مصادر الطاقة المتجدددة وترشيد استهلاك الكهرباء. في عام 2017، أفادت الشركة العامة للكهرباء بليبيا أن الطاقة الكهربائية المتاحة للشبكة بلغت 4900 ميجاواط، بعجز قدره 1600 ميجاواط [1]. نتيجةً لذلك تفاقمت أزمة انقطاع التيار الكهربائي في معظم مناطق ليبيا وخصوصاً في الجنوب. ومن بين الخيارات الأكثر فعالية للتتعامل مع ارتفاع الطلب على الطاقة، يبرز استغلال الطاقة الشمسية كحل مبتكر ومستدام. تتميز ليبيا بقدرات كبيرة في مجال الطاقة الشمسية، إذ تستفيد من أكثر من 3200 ساعة من السطوع الشمسي على مدار العام، بالإضافة إلى معدل إشعاع شمسي مرتفع يبلغ 8.1 كيلوواط/ساعة لكل متر مربع في المناطق

نظام تعريفة الكهرباء وإيجاد آليات لجذب الاستثمارات في مشاريع الطاقة البديلة. الانتقال نحو الطاقة المتجددة أصبح ضرورياً لتحقيق مستقبل أكثر استدامة [3]. حتى وقت قريب، كانت مصادر الوقود الأحفوري تهيمن على توليد الطاقة الكهربائية عالمياً، حيث كانت الكهرباء الناجمة عنها أقل تكلفة مقارنة بالكهرباء المولدة من مصادر الطاقة المتجددة. بناء محطات الطاقة التي تعتمد على الوقود الأحفوري كان يتميز بانخفاض تكاليفه بشكل كبير إذ أن تكلفة إنشاء محطة تعمل بالفحم كانت أقل بكثير مقارنة بمحطة للطاقة الشمسية أو الرياح، حيث كانت تكلفة المحطة الشمسية أعلى بنسبة 223%， بينما تجاوزت تكلفة محطة الرياح تلك العاملة بالفحم بنسبة 22% [4]. لكن الأمور تغيرت في الوقت الراهن، إذ أصبحت مصادر الطاقة المتجددة الآن الخيار الأقل تكلفة مقارنة بالوقود الأحفوري، هذا الانخفاض الملحوظ في تكاليف إنتاج الطاقة المتجددة ساهم بشكل كبير في زيادة الاستثمارات وبناء المزيد من المحطات المستدامة، فعلى سبيل المثال، في عام 2019 وحده، مثلت مصادر الطاقة المتجددة نسبة 72% من إجمالي الإضافات الجديدة في السعة العالمية لتوليد الكهرباء [4]. الطاقة الشمسية تعد من أكثر المصادر الوعادة لإنتاج الطاقة في ليبيا، التي تعتبر واحدة من الدول الأكثر تميّزاً عالمياً في هذا المجال. تُظهر الإحصائيات أن متوسط ساعات سطوع الشمس يبلغ حوالي 3500 ساعة سنوياً، فيما تصل شدة الإشعاع الشمسي إلى 7.1 كيلو واط/مترمربع/يوم في المناطق الشمالية، وترتفع إلى 8.1 كيلو واط/مترمربع/يوم في المناطق الجنوبية. تشير البيانات الموضحة في الشكل (1) توزيع شدة الإشعاع الشمسي على مختلف المناطق الليبية، في المناطق الجنوبية العميقة من ليبيا، فيبلغ متوسط توزيع الإشعاع الأفقي العالمي اليومي حوالي 7.1 كيلو واط/ساعة/مترمربع، بينما يبلغ متوسطه السنوي حوالي 2556 كيلو واط/ساعة/مترمربع [5].

أزمة انقطاع الكهرباء في ليبيا تمثل إحدى أبرز المشكلات التي تعيق الحياة اليومية للمواطنين بشكل كبير، مما يجعل البحث عن حلول مستدامة أمراً ضرورياً، ويبذر الاعتماد على الطاقة الشمسية كخياراً واعداً لتحسين كفاءة الشبكة الكهربائية وتخفيف الضغط عليها.

تهدف هذه الدراسة بشكل أساسي إلى تحليل الجدوى الإقتصادية والفنية لمحطات الطاقة الشمسية المتصلة بالشبكة العامة للكهرباء في المناطق الصحراوية بدولة ليبيا، باستخدام برنامج هومر (HOMER) لتقدير الأداء والتكلفة خلال العمر الافتراضي للنظام. كما تسعى إلى تحديد التصميم الأمثل من حيث عدد الألواح والعكستات وكذلك المساحة المطلوبة لتحقيق أعلى كفاءة تشغيلية وبأقل تكلفة ممكنة، ومقارنة الجدوى بين النظمتين عندما يكون متصل بالشبكة (On-Gird) وعندما يكون منفصل عن الشبكة (Off-Gird). وتهدف الدراسة أيضاً إلى تحليل فترة أسترداد رأس المال والعائد الإستثماري للمشروع، وتقديم توصيات عملية لدعم الإستثمار في مشاريع الطاقة المتجددة وتعزيز الإعتماد على الطاقة النظيفة في ليبيا، حيث أن إنتاج الطاقة النظيفة يقلل من انبعاثات الكربون مما يدعم أهداف التنمية المستدامة ويعزز حماية البيئة. إضافة إلى ذلك، تُعد مشاريع الطاقة الشمسية محركاً لتنمية الاقتصاد المحلي؛ فهي توفر فرص عمل جديدة، تجذب الاستثمارات، وتساهم في تحسين البنية التحتية للمنطقة. الطاقة الشمسية تعني الضوء والحرارة التي تستمد من الشمس، ويتم تحويلها إلى طاقة قابلة للاستخدام من خلال تقنيات حديثة مثل الخلايا والألواح الشمسية. تُستخدم هذه التقنيات لتوليد الكهرباء في المباني ولأغراض التدفئة. ورغم أن ليبيا تُعتبر أول دولة عربية اعتمدَت الطاقة الشمسية، إلا أنها تواجه حاجة ملحة لتطوير قوانين الكهرباء بما يعزز استخدام الطاقة النظيفة ويساهم في رفع مستوى التنافسية. ومن الضروري إعادة تخصيص الدعم لصالح مصادر الطاقة المستدامة وتطبيق تشريعات فعالة لضمان إدارة موارد الطاقة بشكل أفضل وحماية حقوق المستهلكين. بالإضافة إلى ذلك، تحتاج البلاد إلى تحديث

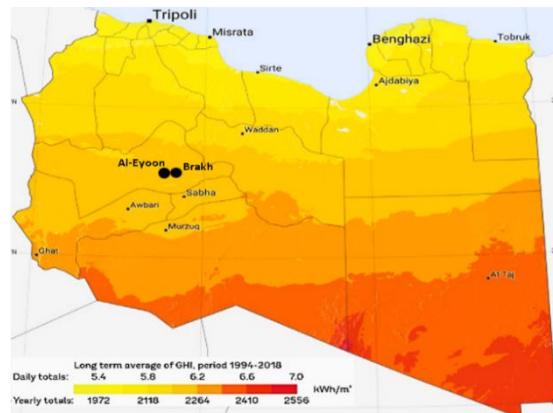
المحاكاة في هذا النظام تعتمد على حسابات توازن الطاقة لكل فترة زمنية خلال السنة. يتم خلالها مقارنة الطلب على الكهرباء والطاقة الحرارية في تلك الفترة مع الطاقة التي يستطيع النظام تقديمها. بناءً على ذلك، يتم حساب تدفقات الطاقة الداخلية والخارجية لكل عنصر من عناصر النظام [6]. يقوم برنامج هومر بإجراء الحسابات الالزمه لكل تكوين نظام يتم اختياره للدراسة، بعد ذلك يقوم بتحديد مدى جدوى هذا التكوين، أي ما إذا كان قادراً على تلبية الطلب على الكهرباء ضمن الشروط المحددة. كما يقدر تكلفة تركيب النظام وتشغيله طوال العمر الافتراضي للمشروع. يتم احتساب تكاليف النظام بناءً على مجموعة من العناصر، مثل تكلفة رأس المال وتكلفة استبدال المعدات وتكلفة التشغيل والصيانة، وتكلفة الوقود، والفائدة [6].

برنامج هومر يُعد أداة قوية لمحاكاة وتحسين أنظمة الطاقة المتتجددة، سواء كانت متصلة بالشبكة الكهربائية أو تعمل بشكل مستقل. يهدف البرنامج إلى معالجة التحديات المرتبطة بقطع الموارد المتتجددة وعدم استقرارها. يتيح للمستخدمين تقييم الجدوى الفنية والاقتصادية لمزج مختلف مصادر الطاقة، مثل الألواح الشمسية وتوربينات الرياح والمولدات والبطاريات وغيرها، من خلال إجراء محاكاة دقيقة وتحليلات حساسة تراعي تغيرات التكاليف ومستوى توفر الموارد [7]. لحساب القدرة الناتجة من النظام الكهروضوئي، يتم استخدام المعادلة الرياضية التالية (1):

$$P_{pv} = P_{STC} + \beta_p \left[(T_C - P_{STC}) \left(\frac{H_T}{H_{STC}} \right) \right] \dots (1)$$

حيث أن: (P_{pv}) لـ درجة الـ خارجـة لـ مـ طـ لـ دـ منـ النـ ظـ اـمـ
الـ لـ كـ مـ رـ وـ ضـ وـ يـ بـ لـ لـ وـ اـ طـ, (P_{STC}) لـ طـ لـ قـ صـ وـ يـ لـ خـ اـ رـ جـةـ
تـ حـتـ لـ ظـ طـ رـ وـ فـ لـ قـ يـ بـ لـ يـ, (β_p) مـ اـ مـ لـ لـ قـ دـ رـةـ - درـ جـةـ
لـ حـ رـ اـ رـ اـ تـ حـتـ لـ ظـ طـ رـ وـ فـ لـ قـ يـ بـ لـ يـةـ (واـ طـ \ درـ جـةـ يـ هـ يـةـ)
(درـ جـةـ حـ رـ اـ رـ اـ لـ قـ يـ بـ لـ يـ قـ لـ سـ طـ لـ لـ نـ يـةـ) (درـ جـةـ يـ هـ يـةـ),
(H_T) إـ شـعـ اـ عـ الشـ مـ يـ لـ لـ تـ حـ قـ يـ السـ قـ طـ يـ هـ يـ لـ لـ وـ حـ دـهـ
الـ لـ كـ مـ رـ وـ ضـ وـ يـةـ (واـ طـ اـ مـ تـرـ مـ بـ عـ), (H_{STC}) حلـةـ الـ قـ يـ دـارـ
لـ قـ يـ بـ لـ يـ قـ لـ درـ جـةـ الـ حـ رـ اـ رـةـ) (درـ جـةـ يـ هـ يـةـ [8]).

لحساب العائد على الاستثمار، يتم استخدام المعادلة الرياضية التالية (2):



شكل 1. توزيع شدة الإشعاع الشمسي في ليبيا [5].

رمال السيليكا، التي تُعد أحد العناصر الأساسية في صناعة الخلايا الكهروضوئية، تتوفّر بكميات كبيرة في صحراء ليبيا وبالتالي، تمتلك الطاقة الشمسية في ليبيا آفاقاً واعدة، بالإضافة إلى ذلك فإن الانتشار الواسع للإشعاع الشمسي في البلاد يعزّز أهمية الاعتماد على الطاقة الشمسية كمصدر رئيسي لإنتاج الكهرباء في المستقبل.

برنامح هومر (**HOMER**) يعد أداة برمجية متقدورة تُستخدم لتقدير وتصميم أنظمة الطاقة الهجينية، حيث يتم دمج مصادر الطاقة المتجددة مع التقليدية للحصول على حلول فعالة ومستدامة. يعتبر هذا البرنامج المرجع العالمي في مجال نموذجة وتحسين أنظمة الطاقة الهجينية، يتم تشغيله بناءً على إدخال بيانات تشمل تكاليف المكونات ومدى توفر مصادر الطاقة، ليقوم بتشغيل نموذج حاكاة يعتمد بشكل أساسي على هذه البيانات، يوفر البرنامج إمكانية حاكاة مجموعة متنوعة من تكوينات النظام المختلفة، مع توليد نتائج مفصلة تعرض في صورة قائمة خيارات منطقية. يتميز بقدراته على حاكاة النظام الكهربائي على مدار 8760 ساعة سنوياً، حيث يحسب التوازن الطاقي في كل خطوة زمنية على مدار العام [6]. وعقب انتهاء عملية المحاكاة، يتم تقديم قائمة بالتكوينات المثلث التي تسهم في دعم اتخاذ القرار واختيار أفضل البديل المتاحة بناءً على مقارنة النتائج من الجوانب الفنية والاقتصادية، علاوةً على ذلك يسمح البرنامج بعرض النتائج باستخدام تمثيلات رسومية وجدولية، مما يساهم في تقدير أداء كل نظام من حيث الكفاءة والتكلفة. عملية

(HOMER Pro) لإجراء تقييم فني للجذوى الاقتصادية لنظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية المتصل بالشبكة بسعة 15 كيلوواط. أشارت النتائج إلى أن التصميم قادر على توفير 85% من احتياجات المنزل من الكهرباء. وكانت مدينة الكفرة الموقع الأمثل من حيث الجذوى الاقتصادي والبيئي لشبكة الكهرباء ونظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية، حيث بلغت التكلفة الأولية للنظام 9,570 دولاراً أمريكياً، وتكلفة الطاقة 0.0314 دولاراً أمريكياً. وخلصت الدراسة أن أنظمة الطاقة الكهروضوئية المتصلة بالشبكة السكنية تشكل خياراً فعالاً لإدارة الطاقة في معظم المدن الليبية [11].

في عام 2024، قام سلامة عمر إحفىطة وأخرون بتحليل الجوانب التقنية والاقتصادية لنقنيات تطوير الطاقة الشمسية في التجمعات السكنية في جنوب ليبيا. واستُخدمت كلّاً من الأنظمة البرمجية التالية (HOMER PRO و Simulink MATLAB) في عملية المحاكاة، ويُعد هذا العمل مهمًا لتحليل فترة الاسترداد المخصومة لثلاثة أحمال ثلاثة على عكس الأحمال المنخفضة والمتوسطة، يُعد ذي الأحمال العالية عملياً أكثر من حيث فترة الاسترداد السريعة، وأدي إلى عائد مالي مقبول من حيث التكلفة في غضون 6.2 سنة. لذلك، تتمتع الطاقة الشمسية الكهروضوئية بالقدرة على أن تكون حلّاً عملياً لانقطاعات التيار الكهربائي وتذبذباته في ليبيا وبالذات في مناطق الجنوب الليبي [12].

في عام 2022، قام سعدون عايد وأخرون بتحليل الجذوى الاقتصادي والفنية لشبكة طاقة متعددة هجين متصلة بالشبكة العامة في ليبيا في موقع مختلف، حيث تم استخدام برنامج (HOMER PRO). اختيرت سبع مدن مختلفة في ليبيا. أظهرت نتائج المحاكاة أن النظام المقترن مجدي اقتصادياً في كلّاً من مدن درنة وطربرق ومصراتة، ويتميز نظام هذه المدن بأقل تكلفة صافية حالية وتكلفة موحدة للطاقة، وأعلى طاقة يمكن بيعها للشبكة. يُعد التصميم المقترن لهذا النظام الهجين المتصل بالشبكة مناسباً لجميع

$$\text{ROI} = \left[\frac{G_I - C_I}{C_I} \right] \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

حيث أن: (RIO) عائد الاستثمار و(G_I) الربح من الاستثمار و(C_I) تكلفة الاستثمار [9]. يمكن الجمع بين العائد على الاستثمار ومعدل العائد لتقييم المشاريع، حيث يركز معدل العائد على الإطار الزمني المرتبط بالمشروع. بالإضافة إلى ذلك يمكن الاعتماد على صافي القيمة الحالية الذي يأخذ بعين الاعتبار التغيرات في قيمة النقود بمور الوقت بسبب تأثير التضخم. وعند استخدام صافي القيمة الحالية لتقدير معدل العائد، يُعرف هذا النهج عادة باسم معدل العائد الحقيقي [9]. ينبغي أن تحتوي المقدمة على التوصيف النظري لمشكلة البحث والأبحاث ذات الصلة الموافقة والمعارضة لرأي الباحث وأن تقرر المقدمة الغرض الرئيسي من العمل المقدم، من المهم جداً أن تحدد الأهداف الرئيسية أو الفرضيات بوضوح.

لقد درس العديد من الباحثين العلميين استخدام الطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء، فعلى سبيل المثال في عام 2025، أجرى إيفان أيوكينا وويرنكار باسيل نسانيوبي دراسة لتوفير مصدر طاقة مستدام وموثق للعاملين وأسرهم في المناطق النائية ذات الوصول المحدود إلى الشبكة في الكاميرون. باستخدام برنامج (PVsyst.)، تمت محاكاة النظام لتقييم جدواه الفنية والاقتصادية. تشير النتائج إلى أن نظاماً للطاقة الشمسية الكهروضوئية سواء ثابتاً ومتصلة بالشبكة بقدرة 200 كيلوواط ذروة، قادر على توليد 389 ميجاوات ساعة من الكهرباء سنوياً بتكلفة طاقة موحدة تبلغ 0.0725 دولاراً لكل كيلوواط ساعة، وهو أقل من متوسط تعريفات الكهرباء المنزلية.

وخلصت الدراسة إلى أن أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية قادرة على توفير الكهرباء المستدامة وبأسعار معقولة [10].

في عام 2024، أجرى منعم المنفي وأخرون دراسة جدوى فنية واقتصادية لتركيب ألواح الطاقة الشمسية الكهروضوئية على الشبكة الكهربائية لمنزل سكني عائلي في عدد 6 مدن ليبية بمواقع مختلفة. تم استخدام برنامج

اليومي لكل منزل، وحساب القدرة الإجمالية المطلوبة لمنظومة الطاقة الشمسية بالكيلوواط. كما جرى تقدير التكلفة الإجمالية للمشروع وتحديد المساحة اللازمة لتركيب الألواح الشمسية لضمان فعالية النظام واستدامته. إن الاستغناء عن البطاريات يغير طبيعة المشروع بشكل جزئي، حيث يتحول من نظام مستقل خارج الشبكة (Off-Grid) قادرًا على توفير الكهرباء على مدار 24 ساعة إلى نظام متصل بالشبكة (On-Grid)، إن النظام الأول له تأثير أقل على الحمل من النظام الثاني، حيث أنه يعطي استهلاك الكهرباء أثناء النهار فقط، ويعتمد على شبكة الكهرباء العامة خلال الليل [14]. تم تحديد حجم ومكونات المنظومتين بشكل أساسي في كلاً حالتي الاستخدام (On-Gird) و(Off-Gird). كما تم إجراء حساب دقيق للتالييف في كلتا الحالتين مع إجراء مقارنة تفصيلية بينهما، وتشكل البطاريات حوالي 60% من التكلفة الإجمالية للمشروع. إذا كان الهدف الاستقلال عن شبكة الكهرباء، فإن نظام (On-Gird) هو الحل رغم تكلفته الباهظة. أما إذا كان الهدف تخفيض التكلفة، فإن النظام (Off-Gird) هو الخيار الأمثل [14].

إجمالي استهلاك الطاقة اليومي لـ 25 منزلًا بمنطقة العيون يكون: $(25 * 57.738) = 1443.45$ كيلوواط ساعة، وهي مقدار الطاقة الإجمالية المطلوبة لتلبية احتياجات جميع المنازل يومياً. لتحليل أقصى حمل في المحولات في محطة أم الجداول أقار الشاطئ والمزودة للكهرباء للمنازل قيد الدراسة بمنطقة العيون، تم متابعة أحصار المحولين (T1) محول (1) و (T2) محول (2) ولمدة 31 يوماً متتالية، وكانت نتائج أحصار المحولين معاً بالكيلوواط لكل ساعة كما هو مبين بالجدول رقم (3).

من خلال البيانات المتحصل عليها، يتضح أن أداء المحولين متقارب في معظم الأيام، مما يشير إلى توزيع حيد للأحمال بينهما، ومع ذلك هناك استثناءات؛ حيث سجل أعلى حمل على الإطلاق للمحول الأول (T1) في اليوم السادس عشر ، وأعلى حمل للمحول الثاني (T2) في يوم التاسع والعشرون. وتتيح هذه المقارنة البصرية

الظروف المناخية والبيئية ، بالإضافة إلى انخفاض أسعار الكهرباء [13].

في عام 2016، قام يوسف كاظم قاسم وأخرون بدراسة إمكانات الطاقة الشمسية وجدو إنشاء محطة طاقة شمسية متصلة بالشبكة العامة في ليبيا، موزعة على 22 موقعًا مختارًا بقدرة 10 ميجاوات باستخدام نظام البرمجة المتداول (RET Screen) لنقدير إنتاج الطاقة والمعايير المالية. لوحظ أن أعلى مستوى للإشعاع الأفقي العالمي يقع في جنوب ليبيا، والذي تراوح بين 2100 و 2500 كيلوواط/ساعة/مترمربع. وأعلى إنتاج للكهرباء 22067.13 ميجاواط/ساعة سُجل في منطقة الكفرة، وأقل إنتاج في منطقة الجبل الأخضر بقيمة 17891.38 ميجاواط/ساعة. وقد تم تقدير الحد الأقصى للطاقة التي يمكن للمحطة تولیدها بنحو 22.06 جيجاواط [14].

2. الجانب العملي والمنهجية:

تم اختيار موقع الدراسة ليشمل 25 منزلًا في منطقة العيون، وهي إحدى التجمعات السكنية التابعة لشعبية وادي الشاطئ في جنوب غرب ليبيا. تتميز المنطقة بوجود العديد من عيون الماء الطبيعية، ويبلغ إجمالي عدد سكانها تقريرًا 5000 نسمة. الشكل (2) يوضح خريطة جوية لمنطقة العيون، حيث تظهر الصورة مباني متباشرة ذات طراز معماري بسيط، محاطة بمساحات خضراء صغيرة تضفي جمالية على المكان. تم قياس متوسط استهلاك الطاقة الكهربائية من الشبكة العامة لـ 25 منزلًا في منطقة العيون. بالإضافة إلى ذلك تم تحليل أقصى حمل في محطة أم الجداول (66 كيلوفولط) بالقرب من الشاطئ، والتي تعد المصدر الرئيسي لتزويد منطقة العيون بالكهرباء، وتشتمل على محولين للطاقة الكهربائية (T1) و (T2)، وتم إجراء مقارنة يومية لأقصى حمولة كهربائية للمحولين على مدار 31 يوماً. لإنجاز تصميم نظام الطاقة الشمسية الذي يهدف إلى تزويد 25 منزلًا بالكهرباء، تم إجراء دراسة تفصيلية تضمنت تحديد معدل الاستهلاك

ارتفاع درجة الحرارة في فصل الصيف) ولمدة 31 يوماً. يتضح من خلال البيانات أن المحول (T2) يُظهر أداءً بقدرة أعلى مقارنة بالمحول (T2) حيث بلغت قدرته العظمى حوالي 62 كيلوواط، بينما القيمة العظمى للمحول (T1) بلغت حوالي 61 كيلوواط، وبشكل مستمر، جدول 3. أقصى حمولة للمحولين (T1) و(T2) لمحطة أم الجداول بأقار الشاطئ المغذية لمنطقة العيون.

(T2) + (T1) (كيلوواط·ساعة)	التوقيت	اليوم
113	21:00	01
105	17:00	02
115	21:00	03
111	20:00	04
104	12:00	05
108	18:00	06
106	19:00	07
109	22:00	08
114	21:00	09
113	21:00	10
109	20:00	11
107	08:00	12
103	11:00	13
111	19:00	14
103	12:00	15
112	18:00	16
107	22:00	17
110	20:00	18
109	21:00	19
116	21:00	20
105	12:00	21
107	20:00	22
110	19:00	23
105	18:00	24
110	20:00	25
104	20:00	26
107	17:00	27
105	20:00	28
106	19:00	29
110	20:00	30
113	21:00	31

سواء كان ذلك في الحالات الأدنى لتشغيل المحولات (Minimum Operation) أو كام في الحالات القصوى (Maximum Operation). من خلال البيانات المدونة في الجدول (4)، نلاحظ أن أحمال المحول (T1) كانت أعلى في معظم الأيام.

للمختصين في المحطة مراقبة أداء المحولات وتحديد أي أحمال غير متوازنة لضمان كفاءة واستقرار التشغيل.



شكل 2. صورة جوية لمنطقة العيون - الشاطئ.

3. النتائج والمناقشة / أو الاستنتاجات

أولاً: حسابات الاحمال الكهربائية

الجدول رقم (2) يوضح متوسط الاستهلاك اليومي للطاقة الكهربائية لكل جهاز منزلي على حدة في كل منزل من المنازل المستهدفة في الدراسة بمنطقة العيون .

جدول 2. متوسط الاستهلاك اليومي لكل منزل.

نوع الجهاز	العدد (وحدة)	القدرة (وات)	المتوسط (كيلوواط·ساعة)
المكيف	3	0970	23.280
التثلاجة	1	1780	04.272
الغسالة	2	0900	14.400
الفريزر	1	1800	04.320
المكواة	1	1100	00.550
المروحة	1	0065	00.520
الغسالة	1	1000	01.000
المصابيح	8	0010	00.960
الدلو	8	0016	01.536
الحضانة	1	0500	00.500
الشاحن	2	0100	01.600
التلفزيون	2	0300	04.800
الأجمالي			57.738

الجدول (4) يبين تحليل بيانات القدرة الكهربائية (Electrical Power) الواردة من محطة الجهد العالي (Al-Uyun) المنفذة في أم الجداول في أقار الشاطئ (مبينة في الشكل رقم 1، والتي تبعد عن منطقة العيون حوالي 15 كيلومتر) والمغذيتان لمنطقة العيون بالكهرباء، وقد تم متابعة أقصى حمولة للمحولين (T1) و (T2) خلال شهر يوليو (دروة

ثانياً: حساب مكونات منظومة الطاقة الشمسية
 نتائج حسابات أجمالي استهلاك الكهرباء من منظومة الطاقة الشمسية ل 25 منزلًا بمنطقة العيون كانت 1443.45 كيلوواط ساعة يومياً، بحث أن معدل استهلاك كل منزل حوالي 57.74 كيلوواط ساعة يومياً. ويعتبر معدل الاستهلاك هذا مرتفعاً نسبياً، فعلى سبيل المثال تشير الدراسات أن معدل استهلاك الكهرباء للأسر الحضرية في ماليزيا يبلغ 648.31 حوالي كيلوواط/ساعة شهرياً أي ما يعادل 21.58 كيلوواط ساعة يومياً [15].
 بحث كانت نسبة الزيادة في اليومي الاستهلاك من الكهرباء حوالي 37.40 %. ويعزى هذا الارتفاع في استهلاك الكهرباء إلى عدة أسباب من بينها غياب ترشيد استهلاك الكهرباء عند استخدام أجهزة تبريد الهواء وسخانات المياه وغيرها من الأجهزة والمعدات ذات الاستهلاك العالي للكهرباء.

المناطق الصحراوية في ليبيا تتمتع بمعدل اشعاع شمسي يتراوح من 5 إلى 7 ساعات ذروة يومياً. ولحساب قدرة منظومة الطاقة الشمسية المطلوبة لعدد 25 منزلًا يتم قسمة معدل استهلاك الكهرباء اليومي للمنازل على متوسط ساعات ذروة الأشعاع الشمسي. أظهرت النتائج أن قدرة منظومة الطاقة الشمسية المطلوبة لعدد 25 منزلًا تساوي حوالي 241 كيلوواط ساعة، أي أن متوسط قدرة الطاقة الشمسية المطلوبة لكل منزل تساوي 9.52 كيلوواط ساعة.
 في هذا المشروع تطلب الأمر استخدام ألواح طاقة شمسية ذات كفاءة عالية بقدرة 550 واط، ولحساب عدد الألواح الشمسية المطلوبة لنوعية حاجة 25 منزلًا من الكهرباء يومياً تم تقسيم القدرة المطلوبة لمنظومة الطاقة الشمسية على عدد ساعات ذروة الأشعاع الشمسي، وكانت عدد الألواح الشمسية المطلوبة 438 لوحاً شمسيًا، أي بما يعادل حوالي 17.52 لوحاً لكل منزل.
 نظراً للحاجة الماسة إلى عاكسات صناعية فعالة (Industrial Inverters) قادرة على التعامل مع قدرة 241 كيلوواط. فإنه يمكن استخدام عاكس مركزي واحد كبير، أو استخدام عدة عاكسات صناعية أصغر

وسجلت أقصى قيمة في اليوم السادس عشر، وبلغت 61 كيلوواط/ساعة، بينما كانت قراءة المحول (T2) في نفس اليوم أقل. بالمقابل هناك أيام قليلة كانت فيها أحمال المحول (T1) أعلى، مثل اليوم الأول والتاسع والعشرون.

جدول 4. أقصى قدرة للمحول (T1) والمحول (T2) في محطة الجهد الفائق بمنطقة أم الجداول اقار الشاطيء .

محول (T1) كيلوواط	محول (T2) كيلوواط
58	55
53	52
59	56
56	55
53	51
56	52
54	53
55	54
58	56
58	55
57	52
56	51
56	51
58	54
53	56
53	61
58	55
55	55
57	52
52	56
53	54
56	51
59	53
54	56
58	52
53	51
53	55
55	51
54	58
56	54
58	56

ونخلص من ذلك أن المحول الكهربائي (T1) تحمل العبء الأكبر من الأحمال الكهربائية في المحطة خلال شهر يوليو مقارنة بالعبء الذي تحمله المحول (T2).

و جودة الألواح، ونوعها وتكلفه التركيب كذلك ترداد التكلفة بسبب الحاجة ألى استخدام البطاريات التي تخزن الطاقة.

جدول 5. تكاليف مشروع محطة الطاقة الشمسية لعدد 25 منزلًا بمنطقة العيون بوادي الشاطئ.

الأجمالي	التكلفة التقديرية	البند
\$48,200	\$0.20 لكل واط	الألواح الشمسية
\$30,000	\$0.15-0.10 لكل واط	العواكسات
216,600	\$400-250 لكل كيلوواط	البطاريات
\$40,000	% 20-15 من التلفة أول جلبي	الهياباكل والمكونات
\$30,000	% 20-15 من التلفة لـ مع دات	التركيب والهندسة
\$364,800		الأجمالي

من خلال البيانات في الجدول (5)، يتضح أن تكاليف البطاريات تمثل حوالي 60% من التكلفة الإجمالية للمشروع، وعليه فإنه لتقليل تكاليف المشروع يمكن الاستغناء عن البطاريات لتخزين الطاقة وربط نظام الطاقة الشمسية بالشبكة العامة. تُقدر تكلفة التشغيل والصيانة (إزالة الغبار عن سطح الوحدات الكهروضوئية) بحوالي 20 دولارًا أمريكيًا/كيلوواط ساعة، ونظرًا لأن عدد الألواح لنظام الطاقة الشمسية لهذا المشروع يعتبر كبير نسبياً (438)، فإنه يحتاج للتنظيف والصيانة [11].

ثالثًا: تصميم النظام باستخدام (HOMER)

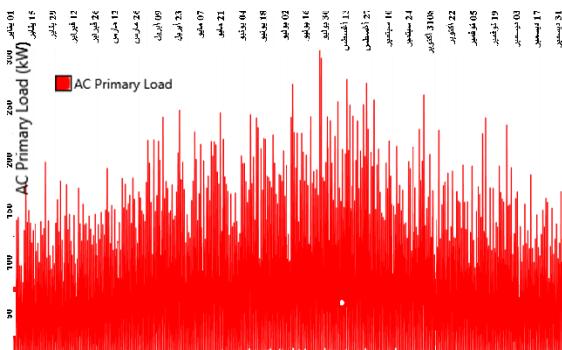
يوضح الشكل (3) نظامًا منزليًا للطاقة الشمسية الكهروضوئية متصلًا بالشبكة الكهربائية. تم اقتراح نظام بقدرة 241 كيلوواط، يتكون من 438 وحدة ألواح شمسية، بقدرة 550 واط لكل منها، وبمساحة إجمالية قدرها 2410 أمتار مربعة. بالإضافة إلى ذلك، استُخدمت خمسة محولات طاقة بقدرة 50 كيلوواط عاكس. تُوصل الخلايا على التوالي أو على التوازي لزيادة التيار أو الجهد المولود من الخلايا. في هذه الحالة، يُستخدم العاكس لتحويل التيار الكهربائي المستمر (DC) الذي تولده الخلايا إلى تيار كهربائي متعدد (AC).

(String Inverters) بقدرة 50 إلى 100 كيلوواط وذلك لسهولة الصيانة وتوزيع المخاطر. ومن المتعارف عليه، يجب أن تكون القدرة الأجمالية للعواكسات الصناعية متساوية أو أعلى من قدرة الألواح الشمسية، أي حوالي 250 كيلوواط. لتوفير الطاقة الكهربائية ليلاً أو في الأيام ذات الطقس الغائم يمكن استخدام بطاريات لغرض تخزين الطاقة الكهربائية، ومن الأفضل استخدام بطاريات الليثيوم أيون (Lithium-ion) لتصميمها الخفيف الوزن وصغر حجمها وأدائها الممتاز وموثوقيتها العالية ومتانتها الطويلة. علاوة على ذلك، تتميز بسهولة الاستخدام وعدم حاجتها للصيانة [16]. ولغرض تخزين 50% من إجمالي استهلاك الكهرباء من منظومة الطاقة الشمسية تم حساب السعة التخزينية المطلوبة لبطاريات تخزين الكهرباء، وكانت السعة التخزينية لها حوالي 722 كيلوواط ساعة يومياً.

يتم عادة تثبيت ألواح الطاقة الشمسية على أسطح المنازل أو على سطح الأرض، بناءً على حجمها وزنها، وفي هذا المشروع تم تثبيت الألواح الشمسية المطلوبة (438) على سطح الأرض، وذلك باستخدام هياباكل حديدية خاصة. لتوصيل التيار المستمر (AC) والتيار المتردد (DC) الخاصة بمنظومة الطاقة الشمسية تم استخدام كابلات ذات قدرات تحمل عالية، وكذلك تم استخدام صمامات وقاطع دوائر وأنظمة التوصيل الأرضي لحماية المنظومة. لحساب المساحة الأرضية المطلوبة لتركيب ألواح الطاقة الشمسية تطلب ذلك أتباع القاعدة العامة التي توصي بأنه يلزم توفير مساحة عشرة أمتار مربعة لنظام الطاقة الشمسية لكل قدرة واحد كيلوواط [17]. بناءً عليه فإن المساحة المطلوبة في هذا المشروع تكون $241 \text{ كيلوواط} * 10 \text{ م}^2 = 2410 \text{ م}^2$ ، أي أن المساحة المطلوبة قطعة أرض أبعاها حوالي 49.0 متر * 49.0 متر).

لتقدير التكلفة الإجمالية للمشروع، تم حساب كل بند على حدى كما هو مبين بالجدول رقم (5). وتعتبر هذه التكاليف تقريرية، بناءً على الأسعار في الوقت الحالي، وتبين تكلفة تركيب نظام طاقة شمسية للمنازل وفق الموقع الجغرافي،

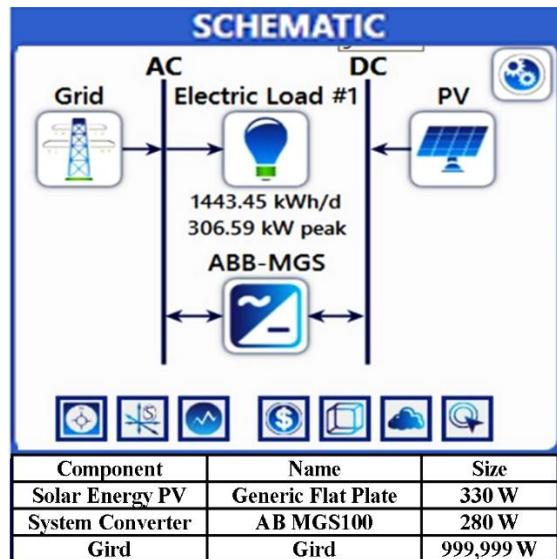
طول المدى الربيعي تقلبات واختلافات ملحوظة في الاستهلاك خلال الصيف مقارنةً بالاستقرار النسبي في فصل الشتاء. يعكس هذا التفاوت في التغير اليومي لدرجات الحرارة وال الحاجة الماسة لاستخدام أنظمة التبريد أثناء هذه الفصول من السنة ذات الطقس الحار.



شكل 4. حمل التيار الكهربائي المتردد على مدار السنة لـ 25 منزلًا المستهدفة في الدراسة.

شكل رقم (5) يبين السعة القصوى المتاحة من محطة الطاقة الشمسية، ويمثل الرسم البياني تصوّراً لتوزيع ثنائياً الذروة (Bimodal Distribution)، حيث يتضح جلياً أنهما متماثلان تقريباً في الشدة، كل منهما تصل شدته إلى ما يقدر بـ 95% - 90% من السعة القصوى المتاحة، والتي تمثلها الأعمدة الرئيسية الخلفية. يشير هذا التمايز إلى أن نسبة شدة الذروة الأولى إلى الثانية هي 1:1 تقريباً. تفصل بين هاتين القمتين منطقة انخفاض نسبي، حيث تهبط شدة المتغير إلى حوالي 80% - 85% من قيمة الذروة، مما يعكس انخفاضاً مؤقتاً في النشاط أو التردد بنسبة تتراوح بين 15-20%. إن وجود هامش ثابت بين قم الأعمدة البيضاء والمنحنى البرتقالي يشير إلى أن النظام يعمل ضمن سعته التشغيلية ولا يصل إلى الحد الأقصى المطلق، حتى في فترات الذروة.

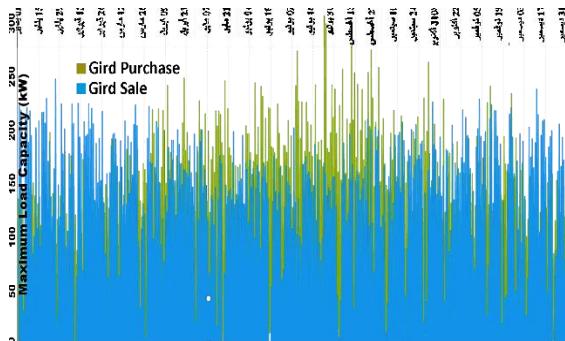
شكل (6A) و (6B) يبيان تحليل برنامج (HOMER) لنتائج الطاقة الداخلة إلى والخارجية من المحولات العاكسة (Invertors Input and Output Power) على التوالي على مدار فصول وأشهر السنة. تُظهر البيانات أن الطاقة الداخلة إلى المحولات العاكسة تعمل بمستوى أداء عالٍ ومستقر، حيث تتراوح قيمتها بين 85 و 95 كيلوواط،



شكل 3. مخطط تصميم نظام الطاقة الشمسية الكهروضوئية على الشبكة باستخدام برنامج (HOMER).

شكل (4) يبيّن تحليل برنامج (HOMER) لنتائج حمل التيار الكهربائي المتردد (AC Primary Load) على مدار السنة لـ 25 منزلًا المستهدفة في الدراسة. تُظهر البيانات بوضوح وجود نمط موسمي متكرر في متطلبات الحمل الأساسي الشهري للتيار المتردد، حيث يبدو هذا النمط مرتبًا ارتباطاً وثيقاً بالظروف المناخية السنوية. يتضح أن أدنى مستويات الاستهلاك سُجلت خلال أشهر الشتاء، إذ تصل القيمة الوسطية إلى حوالي 50 كيلوواط في شهري يناير وفبراير منخفض بسبب فترات سطوع الشمس القصيرة. ومع دخول فصل الربيع، يبدأ الحمل الأساسي في الارتفاع تدريجياً، ليبلغ ذروته القصوى خلال أشهر الصيف، خاصة في شهري يوليو وأغسطس، حيث تتجاوز القيم المتوسطة (median) 200 كيلوواط، وتصل قمم الاستهلاك إلى أكثر من 300 كيلوواط في شهر يوليو. عند المقارنة بين الفصول، نجد أن متوسط الحمل الصيفي في ذروته يفوق نظيره في الشتاء بنسبة تزيد عن 300%. هذا يشير إلى أن الحمل الأساسي للنظام يتأثر بشكل رئيسي بأنظمة تبريد الهواء المستعملة بشكل مفرط في شهور هذه الفترة من السنة. علاوة على ذلك، تُظهر البيانات خلال فصل الصيف تقلبات ملحوظة في معدلات الاستهلاك اليومي، وكذلك تُظهر الخطوط المعبّرة عن

باللون الأزرق، بينما تُبرز المبيعات باللون الأخضر. يتضح أن المشتريات تهيمن خلال فترات عدم إنتاج الطاقة الشمسية، مثل فترة الليل، حيث تصل إلى ذروة استهلاك تقارب 85% من القدرة القصوى لـ“لقطة الأحمال الأساسية”. في المقابل، تُركز المبيعات بشكل رئيسي خلال منتصف النهار، عندما تكون أشعة الشمس في أوج قوتها، مما يؤدي إلى فائض في الإنتاج الشمسي يصل إلى ذروة تصدير تُقدر بحوالي 60% من السعة. تحليل نمطي الاستيراد والتصدير يكشف عن فعالية النظم في تحقيق الاكتفاء الذاتي خلال ساعات النهار، مع استغلال الفائض الناتج لتحقيق عوائد من تصدير الطاقة للشبكة. في الوقت ذاته، يعتمد النظام على الشبكة الكهربائية كمصدر دعم رئيسي خلال فترات الليل، مما يعكس نموذجاً متكاملاً وفعالاً لأنظمة الطاقة المتعددة المتربطة بالشبكة.

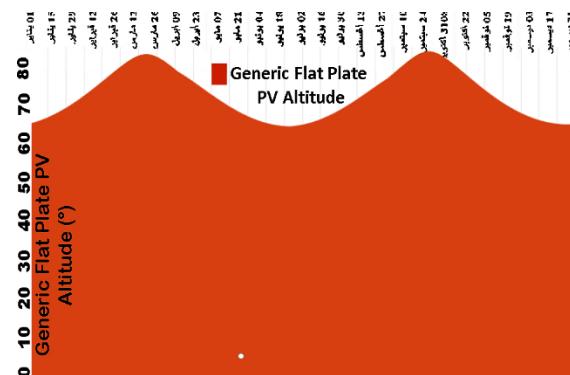


شكل 7. مبيعات ومشتريات محطة الطاقة الشمسية من القدرة الكهربائية بالكيلوواط سنويًا.

جدول 6. مبيعات ومشتريات محطة الطاقة الشمسية.

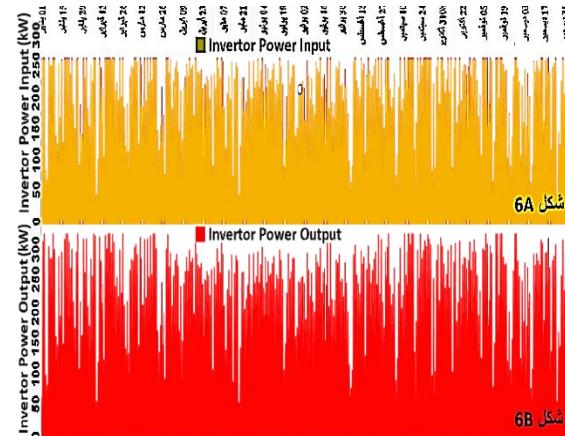
الناتج	البند
330 كيلوواط	قدرة المحطة
280 كيلوواط	قدرة المحول
الشبكة الكهربائية العامة	مصدر الطاقة الاحتياطي
الإجمالي 64.1%	نسبة الطاقة المتعددة
219,582 (د.ل.)	تكلفة الأولية
0.0241 د.أ./كيلوواط	تكلفة الإنتاج
6,003 (د.ل.)	تكلفة الصيانة

ملحق أدلى لـ“لقطة الأحمال” (HOMER)، يُمكن تتحقق التصميم الأمثل لنظام طاقة شمسية هجين متصل بالشبكة العامة كخيار اقتصاديًّا وفعالًّا لتلبية



شكل 5. السعة القصوى لمحطة الطاقة الشمسية.

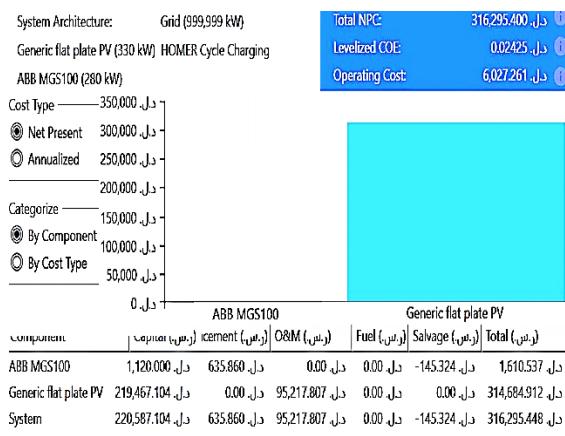
مع متوسط أداء يقارب 90% من السعة القصوى. في المقابل، تعكس الطاقة الخارجة من المحول العاكس سلوكاً ديناميكياً ومتقلباً، مما يغير عن طبيعة الأحمال المستهلكة. تتراوح قيم الطاقة الخارجة من المحول العاكس بشكل ملحوظ بين ذروة تصل إلى 85 كيلوواط وقاع ينخفض إلى 30 كيلوواط. عند مقارنة القيمتين 95 كيلوواط (الطاقة الداخلة إلى المحول العاكس) و 85 كيلوواط (الطاقة الخارجة منه)، يتضح أن النظام لم يصل في أي وقت إلى طاقته الإنتاجية القصوى. والأهم من ذلك، يظهر الفارق المستمر بين الطاقة الداخلة والخارجية عند أي لحظة كتمثيل مرجي للطاقة المفقودة الناتجة عن كفاءة المحول العاكس غير المثالية.



شكل 6. الطاقة الداخلة والخارجية للمحولات العاكسة.

يُبرز الرسم البياني في الشكل (7) التفاعل الديناميكي بين عمليات استيراد وتصدير الطاقة داخل الشبكة الكهربائية على مدار السنة. تظهر المشتريات مُحددة

منخفضة نسبياً مقارنة بالتكلفة ذاتها في المرجع [11]. حيث أن صافي تكلفة تشغيل محطة الطاقة الشمسية بمدينة مرزق حوالي 79,215 دولار، أي ما يعادل 4,405,621,440 ديناراً ليبيّاً، بمعدل انخفاض حوالي 7%. وانخفاض تكلفة التشغيل يُعد دليلاً إضافياً على أن المشروع يحقق نجاحاً كبيراً.



شكل 8. تحليل الجدوى الاقتصادية وتوزيع التكاليف لنظام طاقة شمسية هجين لعدد 25 منزلاً بمنطقة العيون بوادي الشاطئ.

الشكل رقم (8) يبين تحلیلاً للجدوى الاقتصادية وتوزيع التكاليف لنظام طاقة شمسية هجين لعدد 25 منزلاً بمنطقة العيون بوادي الشاطئ بجنوب ليبيّا باستخدام برنامج (HOMER). لتقدير جدوى المشروع تم أجراء تحليل فترة استرداد رأس المال والعائد على الاستثمار لنظام الطاقة الشمسية (Simple Payback Period)، وهي الفترة الزمنية المطلوبة والتي يستغرقها المشروع الاستثماري لاسترداد التكاليف الأولية أو رأس المال المستثمر، وذلك من خلال صافي الأرباح الناتجة عن تشغيل المشروع. ويتم حسابها بواسطة قسمة التكلفة الأولية للمشروع على صافي الأرباح التي يتحققها المشروع سنوياً. وتنص قاعدة استرداد رأس المال على أنه كلما كانت فترة استرداد تكلفة المشروع أقصر، كان المشروع أكثر جدوى اقتصادية [18]. بتطبيق ذلك على هذا المشروع، أظهرت النتائج أن استرداد تكلفة رأس المال يمكن أن يتم خلال فترة زمنية 2.43 سنة أي ما يقارب الثلاثون شهراً.

احتياجات الأحمال الكهربائية لـ 25 منزلاً في منطقة العيون بوادي الشاطئ وفقاً للمواصفات والمميزات المدرجة في الجدول (5). يتضح من النتائج المذكورة أن هذا المشروع يتمتع بجدوى اقتصادية كبيرة، إذ أن الاعتماد على الطاقة الشمسية يسهم بشكلٍ فعالاً في تخفيض تكلفة الكهرباء ويلبي معظم احتياجات الطاقة، مما يجعله خياراً استثمارياً ناجحاً ومستداماً على المدى الزمني البعيد.

الجدول (6) والشكل (8) يبيّنان تحليل الجدوى الاقتصادية وتوزيع التكاليف لنظام الطاقة الشمسية الهجين لعدد 25 منزلاً بمنطقة العيون بوادي الشاطئ، وذلك باستخدام برنامج (HOMER)، يتبيّن من المعطيات الواردة في الجدول وكذلك الشكل أن أحجمالي صافي تكلفة (Total Net Cost, TNC) مشروع إنشاء محطة طاقة شمسية لتزويد الـ 25 منزلاً بأحتياجاتها من الكهرباء تقدر بـ 316,295,400 ديناراً ليبيّاً لفترة زمنية تقدر بحوالي من 25 إلى 30 سنة، وتشمل هذه القيمة التكاليف شراء المعدات والتركيب والصيانة وكذلك استبدال قطع الغيار. قدر متوسط تكلفة إنتاج كل كيلوواط/ساعة والتي تعرف أيضاً بالتكلفة الموحدة للكهرباء التي تنتجها المحطة (Levelized Cost of Electricity, COE) بحوالي 0.02425 دينار ليبيّي لكل كيلوواط، وتعتبر هذه التكلفة منخفضة نسبياً بحوالي 14% مقارنة بالتكلفة ذاتها في المرجع [11] والتي قدرت بـ 0.0314 دولار أمريكي (حوالي 0.1746 دينار ليبيّي حسب سعر مصرف ليبيّاً المركزي لعام 2024، $1 \text{ دolar} = 5.5616 \text{ دينار ليبيّي}$). وأنخفاض هذه القيمة يعطي مؤشراً هاماً أن هذا المشروع ذو جدوى اقتصادية ممتازة وذات عائد استثماري مهم. بلغت التكلفة التشغيلية (Operating Cost) لمحطة الطاقة الشمسية بحوالي 6,027.261 ديناراً ليبيّاً سنوياً، وهي تشمل تكاليف الصيانة الدورية للمحطة وكذلك تكاليف الكهرباء المستهلكة من الشبكة العامة.

بلغ صافي تكلفة الإنتاج (Net Cost of Production, NCP) حوالي 314,911 ديناراً ليبيّاً. وتعتبر هذه التكلفة

جدول 7. حساب تكاليف المشروع باستخدام برنامج هومر (HOMER).

Export...	Export All...	Sensitivity Cases										Compare Economics		Column Choices...			
		Left on a sensitivity case to see its optimization results															
		Architecture			Cost						System			PV			
⚠	⚡	⚡	PV (kW)	Grid (kW)	ABB-MGS (kW)	Dispatch	COE (J..J.)	NPC (J..J.)	Operating cost (J..J./yr)	Initial capital (J..J.)	Fuel cost (J..J./yr)	O&M (J..J./yr)	Ren. Fra.	Total Fuel (L/yr)	Capacity	DC Capacity	Capital Co. (J..J.)
⚡	⚡	⚡	330	999,999	280	CC	0.0241..J..J.	314,911..J..J.	6,003..J..J.	219,582..J..J.	0.00..J..J.	6,000..J..J.	64.1	0	330	0	219,448

أن إجمالي استهلاك الكهرباء من نظام الطاقة الشمسية لهذه الوحدات السكنية يقدر بـ 45 كيلوواط ساعة يومياً. كما أن القدرة المطلوبة لنظام الطاقة الشمسية لهذه الوحدات تبلغ حوالي 241 كيلوواط ساعة، بينما تحتاج إلى 438 لوحاً شمسيّاً، باستخدام 5 عاكسات بطاقة 50 كيلوواط لكل عاكس. أظهرت البيانات أن المشروع يمتلك جدوى اقتصادية جيدة، حيث كانت تكلفة إنتاج الكهرباء منخفضة بشكل كبير (0.02425 ديناراً لكل كيلوواط ساعة)، وتبلغ التكاليف الإجمالية للمشروع حوالي 316,295 ديناراً ليبيّاً. في الختام، توصل البحث إلى أن أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية تمثل حلّاً فعّالاً لأزمة الطاقة في دولة ليبيا بفضل الإمكانيات العالية للطاقة الشمسية والأسعار المنخفضة، مما يساعد على تقليل فترة استرداد التكلفة الأولية لتنفيذ المشروع.

بناءً على ما توصلت إليه هذه الدراسة، يمكن أدرج بعض التوصيات التي تفيد في تطوير الأبحاث المتعلقة بأنظمة الطاقة الشمسية، وهذه التوصيات هي كما يلى:

- بما أن إنتاج الكهرباء من نظام الطاقة الشمسية ليس مستقراً دائماً خلال اليوم الواحد ويتغير أيضاً حسب فصول السنة الأربع، فإن هذا يمكن أن يؤدي بصورة مباشرة إلى عدم استقرار الشبكة الكهربائية العامة. حيث يصبح من الصعب توفير الطاقة المطلوبة بشكل فعال ومنتظم وأمن.
- لتنشيط وتشغيل أنظمة الطاقة الشمسية، يحتاج الأمر إلى مهارات وخبرات هندسية ذات كفاءة عالية وذلك لضمانربط الفعال والناجح للنظام مع الشبكة العامة.

4. الخاتمة والتوصيات

نظراً للزيادة السريعة في الحاجة إلى الكهرباء نتيجة للنمو السكاني في المناطق الجنوبية من دولة ليبيا، بالإضافة إلى التحديات التي يواجهها قطاع إنتاج الكهرباء مثل ضعف الإنتاج بسبب تداخل العديد من العوامل الفنية والمالية والإدارية والسياسية، اضطرت الشركة العامة للكهرباء إلى تقليل الحمولة بشكل منتظم. هذا الأمر يؤثر بشكل سلبي على حياة الناس، وبالأخص في القرى البعيدة والنائية. وبعد استخدام أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية المتصلة بالشبكة الكهربائية خياراً ملحاً لتوليد الطاقة النظيفة بواسطة الطاقة الشمسية. لقد أظهرت الأبحاث أن الاعتماد على الطاقة الشمسية لا يساعد فقط على تقليل التكاليف التشغيلية مقارنة بمصادر الطاقة التقليدية الأخرى، بل يعزز أيضاً من أمان الطاقة الوطني ويقلل من الانبعاثات الكربونية، وهذا ينماشى مع التوجهات العالمية نحو الطاقة النظيفة والمستدامة. ويساهم الانخفاض المستمر في أسعار وحدات الطاقة الشمسية الكهروضوئية ومكوناتها في تحقيق توازن قريب من مستوى الشبكة، بالإضافة إلى طول عمرها الافتراضي، واحتياجها القليل للصيانة، وانخفاض استهلاكها للطاقة. في هذه البحث تمت دراسة جدوى نظام طاقة شمسية كهروضوئية متصل بالشبكة الكهربائية باستخدام برنامج هومر (HOMER) لنموذج الطاقة المتعددة . تم إجراء دراسة جدوى لـ 25 وحدة سكنية في منطقة العيون بوادي الشاطئ في جنوب غرب ليبيا. من خلال تحليل النتائج التقنية والاقتصادية، وُجد

ومصر، مما يسهم في بناء نموذج محلي ناجح يتناسب مع الخصوصيات الأقليمية في المناطق الصحراوية.

- يمكن أن يكون الاستثمار في تقنيات تخزين الطاقة مناسباً للمناطق النائية، مثل استخدام البطاريات التي تحمل درجات حرارة مرتفعة أو النظم الهجينة التي تجمع بين الطاقة الشمسية والديزل، لتأمين استمرارية توفير الكهرباء بالقدرات المطلوبة في المناطق البعيدة والنائية.

المراجع

- [1] Kassem Y, Camur H, Abughinda AM. Solar energy potential and feasibility study of a 10 MW grid-connected solar plant in Libya. *Eng Technol Appl Sci Res*. 2020;10(4):5358–66.
- [2] Elmnifi M, Amhamed M, Abdelwanis N, Imrayed O. Solar supported steam production for power generation in Libya. *Acta Mech Malays*. 2018;2(2):5–9.
- [3] Review AI, Alkadeeki A. Developing and implementation of clean energy sources in Libya. *Abaad Iktissadia Rev*. 2024;14(1):346–67.
- [4] Makken S. A comprehensive economic analysis of solar and wind power and its suitability to Libya. *Proc 1st Int Conf Renewable Sustain Energy*, Elbeida, Libya. 2021;1:294–302.
- [5] Maka AOM, Salem S, Mehmood M. Solar photovoltaic (PV) applications in Libya: challenges, potential, opportunities and future perspectives. *J Cleaner Eng Technol*. 2021;5:1–20.
- [6] Panhwar I, Sahito AR, Dursun S. Designing off-grid and on-grid renewable energy systems using HOMER Pro software. *J Int Environ Appl Sci*. 2017;12(4):270–85.
- [7] Kavadias KA, Triantafyllou P. Hybrid renewable energy systems' optimization: a review and extended comparison of the most-used software tools. *Energies*. 2021;14(24):1–28.
- [8] Hafez AA, Nassar YF, Hammdan MI, Al-Sadi SY. Technical and economic feasibility of utility-scale solar energy

- تعد قدرة الشبكة الكهربائية على استيعاب الكهرباء من نظام الطاقة الشمسية محدودة، مما قد يسبب ضعفاً في نقل الكهرباء من نظام الطاقة الشمسية إلى الشبكة العامة.

- بسبب التغيرات الصعبة في مستوى الجهد الكهربائي وصعوبة الحفاظ على استقراره، قد يكون من الصعب توصيل نظام الطاقة الشمسية بالشبكة الكهربائية العامة. أما بخصوص التوصيات العامة والتي تهدف إلى تحسين الجدوى الفنية والاقتصادية لمشاريع الطاقة الشمسية المتصلة بالشبكة الكهربائية العامة، فهي كما يلي:

- تحسين السياسات بالعمل مع الحكومة المحلية في المناطق النائية، وإعداد خطط لدعم مشاريع الطاقة الشمسية، التي تتضمن تسهيلات استثمارية وإعفاءات من الضرائب لتحفيز الاستثمار الأمثل في هذا القطاع.

- تشجيع الأبحاث والدراسات العلمية التي تركز على طبيعة المناخ والطقس في المناطق الداخلية والنائية، مثل ارتفاع درجات الحرارة والعواصف الرملية، من أجل إيجاد تقنيات مناسبة تتلاءم مع طبيعة المناخ في هذه المناطق.

- تطوير بنية شبكة الكهرباء العامة وذلك بزيادة الاستثمار في تعزيز شبكات النقل والتوزيع، مما يساهم ذلك في ضمان اتصالية محطات الطاقة الشمسية بالشبكة الوطنية. كما يسهم ذلك في تقليل الضغط على الشبكة العامة.

- ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية وتنظيم حملات توعوية في القرى والمدن، بالإضافة إلى تحفيز السكان على استخدام الأجهزة التي توفر الطاقة واتباع أنظمة العزل الحراري في المباني.

- تشجيع المشاريع الصغيرة للطاقة الشمسية في القرى والأحياء السكنية، مما يساعد في خلق فرص عمل للمهتمين وتعزيز مفهوم وتقنية الاعتماد على الطاقات المتجددة.

- تعزيز فكرة الاستفادة من التجارب الإقليمية في البيئات المشابهة مثل الصحاري في تونس والجزائر والمغرب

- Integration of Renewable Energy, New Delhi. 2019.
- [18] Kunduz A. Financial evaluation of investment projects. Arab Monetary Fund. 2022;27:8.
- [9] Hassanzadeh M, Bigdeli TB. Return of investment (ROI) in research and development (R&D): towards a framework. Proc 14th Int Conf Webometrics Informetrics Scientometrics & 19th COLLNET Meeting. 2018;31–9.
- [10] Ayuketah Y, Nsanyuy WB. Feasibility study of a 200 kWp solar PV system for residential camps in remote locations: case study of Ndawara Tea Estate, Cameroon. Energy Sci Eng. 2025;13:3945–53.
- [11] Elmnifi M, Mhmod AH, Abdullah Saied AN, Alturaihi MH, Ayed SK, Majdi HS. Technical and economic feasibility study for on-grid solar PV in Libya. J Math Model Eng Probl. 2024;11(1):91–7.
- [12] Ihfedah SO, Al-Madani MA, Gnefid SA. Techno-economic analysis of solar energy developing technologies in Libyan residential communities. J Solar Energy Sustain Dev. 2024;137–64.
- [13] Ayed SK, Elmnifi M, Moria H, Habeeb LJ. Economic and technical feasibility analysis of hybrid renewable energy (PV/Wind) grid-connected in Libya for different locations. Int J Mech Eng. 2022;7(1):930–43.
- [14] Algaddafi A, Alshahrani J, Hussain S, Elnaddab K, Diryak E, Daho I. Comparing the impact of the off-grid system and on-grid system on a realistic load. Proc 32nd Eur Photovolt Solar Energy Conf Exhib. 2016;2144–50.
- [15] Ali SSS, Rizal-Razman M, Awang AAA, Asyraf MRM, Ishak MR, Ilyas RA, Lawrence RJ. Critical determinants of household electricity consumption in a rapidly growing city, Malaysia. Sustainability. 2021;13(8):1–20.
- [16] Zubi G, Adhikari RS, Sánchez NE, Acuña-Bravo W. Lithium-ion battery packs for solar home systems: layout, cost and implementation perspectives. J Energy Storage. 2020;32.
- [17] Mathur A, Prakash V. Study and design of 10 kWp rooftop solar PV system: case study of Suncity Todhpur (Rajasthan). Proc 2nd Int Conf Large-Scale Grid