Journal of Insights in Basic and Applied Sciences
مجلة رؤى في العلوم الأساسية والتطبيقية
Volume 2, Issue 1, 2026, Pages: 82-111
Journal homepage: https://jibas.com.ly/index.php/jibas/en

Design, Implementation, and Techno-Economic-Environmental Assessment of a Hybrid Solar Energy System: A Case Study of an Educational Institution in Al-Qubbah, Libya

Fathalla.I.Solman [1*], Zead Hamad.Abdulkarim [2], Salih Abdulqadir Salih[3], Naser F Faraj[4]
[1, 2] Department of Electrical and Electronic Engineering, College of Engineering Technology Al-Qubba, Libya
[3, 4] Department of Mechanical Engineering, College of Engineering Technology Al-Qubba, Libya

تصميم وتنفيذ وتقييم الأداء الفني والاقتصادي والبيئي لنظام طاقة شمسية هجين: دراسة تطبيقية في مؤسسة تعليمية بمدينة القبة / ليبيا

فتح الله إبراهيم سليمان [1*]، زياد حمد عبدالكريم [2]، صالح عبدالقادر صالح [3]، ناصر فضل الله فرج [4]
[2،1] قسم الهندسة الكهربائية والالكترونية، كلية التقنيات الهندسية، القبة، ليبيا
[4،3] قسم الهندسة الميكانيكية، كلية التقنيات الهندسية، القبة، ليبيا

[*]Corresponding author: fathall.i.adam1986@gmail.com

Received: November 16, 2025	Accepted: January 06, 2026	Published: January 28, 2026

Copyright: © 2026 by the authors. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Abstract

The transition toward renewable energy sources, particularly solar energy, represents a strategic approach to addressing the environmental and economic challenges associated with dependence on conventional energy sources, achieving sustainable development requirements, and reducing carbon emissions. This study aims to design, implement, and evaluate the technical, economic, and environmental performance of a hybrid solar energy system to supply part of the electrical loads of the Electrical Engineering Department at the College of Engineering Technology in Al-Qubbah, Libya.

The study adopted an integrated scientific methodology that included electrical load analysis, hybrid solar system design, and component selection based on operational efficiency and reliability criteria. This was followed by system implementation and operational testing under both no-load and actual operating conditions, in addition to a comprehensive technical and economic performance assessment. Prior to system implementation, the total electrical load of the department was 4500 W, of which 1600 W were supplied by the proposed solar system. Given that the department operates for five hours per day, the daily energy consumption of the supplied loads was estimated at approximately 8000 Wh/day. By applying a safety factor of 20%, the design energy demand was increased to 9600 Wh/day.

The system consists of six photovoltaic panels with a total rated capacity of 2760 W, a 4200 W hybrid inverter operating at 24 V equipped with an integrated 120 A charge controller, four gel batteries with a total capacity of 500 Ah configured to provide a 24 V system voltage, and a comprehensive electrical protection system. The results indicate that the system was able to supply approximately 35.5% of the department's total electrical load, demonstrating satisfactory operational efficiency and stable performance. Despite the relatively limited annual economic return of about 400 Libyan dinars, attributable to government subsidies on electricity tariffs, the findings

confirm the technical and environmental feasibility of the system through reduced conventional energy consumption and lower carbon emissions.

Keywords: Hybrid Solar Energy, Technical and Economic Performance, Energy Sustainability, Educational Institutions, Grid Dependency Reduction.

الملخـص

يُعد التحول نحو مصادر الطاقة المتجددة، ولا سيما الطاقة الشمسية، أحد التوجهات الاستراتيجية لمواجهة التحديات البيئية والاقتصادية الناتجة عن الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية، وتحقيق متطلبات التنمية المستدامة، والحد من الانبعاثات الكربونية. يهدف هذا البحث إلى تصميم وتنفيذ وتقييم الأداء الفني والاقتصادي والبيئي لنظام طاقة شمسية هجين لتغذية جزء من الأحمال الكهربائية بقسم الهندسة الكهربائية بكلية التقنيات الهندسية بمدينة القبة – ليبيا.

اعتمدت الدراسة منهجية علمية متكاملة شملت تحليل الأحمال الكهربائية، وتصميم النظام الشمسي الهجين، واختيار المكونات وفق معايير الكفاءة التشغيلية والاعتمادية، ثم تنفيذ النظام وإجراء الاختبارات التشغيلية تحت ظروف عدم التحميل والتشغيل الفعلي، إضافة إلى التحليل الفني والاقتصادي لأدائه. بلغت القدرة الكلية للأحمال الكهربائية بالقسم قبل تنفيذ النظام 4500 W، حيث تم تغذية 1600 W منها بواسطة النظام الشمسي المقترح. ونظرًا لأن فترة التشغيل اليومية بالقسم تبلغ خمس ساعات، قُدّر الاستهلاك اليومي للأحمال المغذاة بنحو 8000 Wh/day، ومع اعتماد معامل أمان بنسبة 20% وصل الاستهلاك التصميمي إلى 9600 Wh/day. تكوّن النظام من ستة ألواح شمسية بقدرة إجمالية 2760 W، وعاكس هجين بقدرة 4200 W وبجهد 24 V مزود بمنظم شحن مدمج بتيار 120 A، وأربع بطاريات جل بسعة كلية 500 Ah موصولة لتحقيق جهد 24 V، إضافة إلى منظومة حماية كهربائية متكاملة. أظهرت النتائج أن النظام استطاع تغطية نحو 35.5% من إجمالي الأحمال الكهربائية بالقسم، بما يعكس كفاءة تشغيلية جيدة واستقرارًا في الأداء. وعلى الرغم من محدودية العائد الاقتصادي السنوي، الذي بلغ نحو 400 دينار ليبي نتيجة الدعم الحكومي لتعرفة الكهرباء، أكدت النتائج الجدوى الفنية والبيئية للنظام من خلال تقليل استهلاك الطاقة التقليدية وخفض الانبعاثات الكربونية.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية الهجينة، الأداء الفني والاقتصادي، الاستدامة الطاقية، المؤسسات التعليمية، تقليل الاعتماد على الشبك.

1- المقدمة

في ظل التحديات البيئية والاقتصادية المتزايدة التي يشهدها العالم في الوقت الراهن، أصبحت الحاجة إلى مصادر طاقة بديلة وفعّالة أكثر إلحاحًا من أي وقت مضى. فمع الارتفاع المستمر في الطلب العالمي على الطاقة الكهربائية، وتزايد المخاوف المرتبطة بالتغير المناخي والانبعاثات الضارة الناتجة عن الاعتماد على الوقود الأحفوري، برزت الطاقة الشمسية بوصفها أحد الحلول المستدامة والواعدة لمواجهة هذه التحديات. وتتميز هذه الطاقة بكونها مصدرًا نظيفًا ومتجددًا [1] لا ينتج عنه انبعاثات كربونية أثناء التشغيل، ويسهم بشكل مباشر في حماية البيئة ودعم الأهداف العالمية للتنمية المستدامة. وتُعد الطاقة الشمسية خيارًا استراتيجيًا ذا جدوى عالية، خاصة في الدول ذات الإشعاع الشمسي المرتفع مثل ليبيا، حيث تتوافر الموارد الشمسية على مدار العام بكميات كبيرة. ويسهم تبني أنظمة الطاقة الشمسية في تقليل الاعتماد على الشبكات الكهربائية العامة غير المستقرة، وخفض تكاليف الطاقة على المدى الطويل [3] وتحسين موثوقية التغذية الكهربائية، ولا سيما في القطاعات الحيوية مثل قطاع التعليم. تعاني المؤسسات التعليمية في ليبيا من تحديات حقيقية نتيجة الانقطاعات المتكررة في التيار الكهربائي[4] الأمر الذي ينعكس سلبًا على استمرارية العملية التعليمية وجودتها، ويحد من كفاءة استخدام المختبرات والتجهيزات التعليمية، ويؤثر على أداء الطلبة وأعضاء هيئة التدريس. وانطلاقًا من هذه الإشكالية، يركز هذا البحث على تصميم وتنفيذ نظام طاقة شمسية هجين لتغذية جزء من الأحمال الكهربائية في قسم الهندسة الكهربائية بكلية التقنيات الهندسية–القبة، باعتباره نموذجًا تطبيقيًا لمعالجة مشكلات عدم استقرار الطاقة في المؤسسات التعليمية.

وقد تم اختيار موقع الدراسة بناءً على دراسة ميدانية شاملة شملت قياس وتحليل الأحمال الكهربائية الفعلية للقسم لمدة خمس ساعات تشغيل يوميًا. وبإضافة معامل أمان بنسبة 20% لمواجهة الزيادات المحتملة في الأحمال، بلغ إجمالي الاستهلاك الكهربائي اليومي نحو 9600Wh/day. وبالاستناد إلى هذه البيانات الواقعية، تم تصميم منظومة شمسية متكاملة تضم الألواح الشمسية، ومنظم الشحن، والعاكس (Inverter)، وبطاريات التخزين، بما يضمن توفير طاقة كهربائية مستمرة وموثوقة تلبي متطلبات التشغيل.

وبناءً على هذه الفجوة البحثية، تتمثل المساهمة الرئيسية لهذا البحث في تقديمه أول دراسة حالة تطبيقية وشاملة توثق تصميم وتنفيذ وتحليل أداء نظام شمسي هجين في مدينة القبة بشرق ليبيا. إذ تتجاوز هذه الدراسة نطاق التصميم النظري لتشمل بيانات أداء فعلية مستمدة من موقع حقيقي، مع مقارنتها بالنتائج المتوقعة من النماذج التصميمية. وبذلك، لا يهدف هذا العمل إلى إثبات الجدوى التقنية والاقتصادية لمثل هذه الأنظمة [13] في بيئة لم تحظَ بدراسات سابقة فحسب، بل يسعى أيضًا إلى إرساء خط أساس علمي (Scientific Baseline)وتوفير بيانات مرجعية موثوقة يمكن للباحثين وصنّاع القرار والمشروعات المستقبلية في المنطقة الاعتماد عليها. ولا يقتصر هذا البحث على الجانب الفني فحسب، بل يمتد ليشمل أبعادًا بيئية واقتصادية وتوعوية، من خلال إبراز دور أنظمة الطاقة الشمسية الهجينة في تعزيز الاستدامة داخل المؤسسات التعليمية. كما يقدم هذا المشروع نموذجًا عمليًا قابلًا للتكرار والتطوير، سواء في مؤسسات تعليمية أخرى أو في التطبيقات السكنية والمناطق النائية. وعليه، يمثل هذا العمل خطوة مهمة نحو دعم التحول التدريجي إلى الطاقة المستدامة في قطاع التعليم العالي بليبيا، والإسهام في بناء بيئة تعليمية أكثر استقرارًا وكفاءة، قائمة على الابتكار والاعتماد على مصادر الطاقة النظيفة.

2- مشكلة البحث:

في ظل التحديات المتزايدة التي يواجهها قطاع الطاقة الكهربائية في مدينة القبة، برزت مجموعة من الإشكاليات الفنية والاقتصادية والبيئية التي أثّرت بشكل مباشر في استمرارية وموثوقية الإمداد الكهربائي. وقد انعكست هذه المشكلات سلبًا على مختلف القطاعات الحيوية، مما يستدعي البحث عن حلول بديلة ومستدامة قادرة على تعزيز أمن الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها. وفي هذا الإطار، يمكن تلخيص أبرز هذه المشكلات فيما يلي:

1. الانقطاعات المتكررة للتيار الكهربائي **:**تعاني مدينة القبة من تكرار انقطاع الكهرباء بصورة ملحوظة، الأمر الذي ينعكس سلبًا على استقرار الحياة اليومية ويؤثر بشكل مباشر في سير الأنشطة التعليمية والخدمية والاقتصادية
2. الارتفاع المتوقّع في تكاليف الطاقة :يؤدي الاعتماد المستمر على مصادر الطاقة التقليدية إلى زيادة تدريجية في فواتير الكهرباء، مما يشكّل عبئًا ماليًا متزايدًا على الأفراد والمؤسسات، ويحدّ من قدرتهم على التخطيط المالي المستدام
3. التلوث البيئي :يسهم استخدام الوقود الأحفوري في توليد الطاقة الكهربائية في زيادة الانبعاثات الكربونية والملوثات البيئية، وهو ما يفاقم من المشكلات البيئية ويؤثر سلبًا على الصحة والتوازن البيئي.
4. قصور البنية التحتية الكهربائية :تعاني الشبكة الكهربائية في مدينة القبة من محدودية في القدرة الاستيعابية، ما يجعلها غير قادرة على تلبية الطلب المتزايد على الطاقة، خاصة في فترات الذروة
5. عدم موثوقية التغذية الكهربائية **:**لا يقتصر التحدي على الانقطاعات المتكررة فحسب، بل يمتد إلى عدم استقرار الجهد وتذبذب التردد، مما يؤدي إلى تراجع كفاءة الأجهزة الكهربائية وتسارع تلف المعدات الحساسة، خاصة في المؤسسات التعليمية والفنية.
6. الحاجة إلى حلول طاقية مستدامة :يبرز غياب البدائل الفعّالة والمستدامة لتوفير طاقة كهربائية موثوقة ومستقرة كأحد التحديات الرئيسة، مما يستدعي البحث عن حلول تعتمد على مصادر الطاقة المتجددة لضمان استمرارية الإمداد الكهربائي على المدى الطوي.

3- أهداف المشروع:

1- توفير مصدر طاقة نظيف ومستدام: تصميم نظام يعتمد على الطاقة الشمسية لتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية الملوثة للبيئة
2- تلبية احتياجات الأحمال الكهربائية: توفير طاقة كهربائية كافية لتشغيل الأحمال المدروسة
3- تعزيز كفاءة استخدام الطاقة: استخدام مكونات عالية الكفاءة مثل الألواح الشمسية، العاكس، منظم الشحن، والبطاريات لتحقيق أفضل أداء .

4- تقليل التكاليف التشغيلية: الاستفادة من الطاقة الشمسية المجانية لتقليل فواتير الكهرباء على المدى الطويل .
5- توعية المجتمع بأهمية الطاقة الشمسية: نشر الوعي حول فوائد الطاقة الشمسية وكيفية استخدامها في التطبيقات العملية .
6- توفير حلول طاقة للمناطق النائية: إظهار إمكانية استخدام النظام الشمسي في المناطق التي تفتقر إلى البنية التحتية للطاقة .
7- المساهمة في تحقيق أهداف التنمية المستدامة: دعم الجهود العالمية للحد من الانبعاثات الكربونية وحماية البيئة .
8- إجراء دراسة تطبيقية واقعية: تقديم نموذج عملي يمكن تطبيقه في مؤسسات تعليمية أو منشآت أخرى ذات احتياجات مماثلة .
9- تشجيع البحث والتطوير: فتح آفاق جديدة للبحث في مجال الطاقة الشمسية وتحسين أنظمتها.

4- فرضيات البحث

يعتمد هذا البحث على مجموعة من الفرضيات العلمية التي تم تبنيها من أجل تحليل الأداء الفني والاقتصادي للنظام الشمسي المدروس، وإجراء مقارنة موضوعية مع الشبكة الكهربائية العامة، وذلك ضمن إطار منهجي يراعي تبسيط التحليل دون الإخلال بدقته العلمية. ويمكن تلخيص هذه الفرضيات فيما يلي:

1- تفترض الدراسة أن النظام الشمسي يعمل ضمن ظروف تشغيل طبيعية ومستقرة، مع اعتماد متوسط الإشعاع الشمسي السنوي للموقع خلال فترة التحليل، دون التعرض لتغيرات مناخية حادة قد تؤثر بصورة جوهرية على الإنتاج السنوي للطاقة.
2- تفترض الدراسة أن العمر الافتراضي التشغيلي للنظام الشمسي يبلغ (20) سنة، مع الالتزام بإجراء أعمال الصيانة الدورية اللازمة بما يضمن الحفاظ على كفاءة التشغيل ضمن الحدود الفنية المسموح بها.
3- تفترض الدراسة ثبات أسعار مكونات النظام الشمسي وتكاليف التشغيل والصيانة طوال فترة التحليل، مع إهمال تأثير التضخم والتغيرات المستقبلية في أسعار المعدات والخدمات، وذلك بغرض تبسيط التحليل الاقتصادي.
4- تفترض الدراسة أن كفاءة مكونات النظام الشمسي، بما في ذلك الألواح الشمسية، العاكس، وحدات التخزين، والكابلات الكهربائية، تبقى ضمن القيم الاسمية المحددة من قبل الشركات المصنعة، مع أخذ الفواقد الكهربائية المختلفة في الاعتبار.
5- تفترض الدراسة أن الطاقة الكهربائية المنتجة من النظام الشمسي تُستخدم بالكامل في تغذية الأحمال الكهربائية المحددة، نظرًا لتصميم النظام بما يتوافق مع متطلبات الحمل الفعلي، دون وجود فائض طاقة غير مستغل.
6- تفترض الدراسة أن تكلفة إنتاج الكيلوواط ساعة من النظام الشمسي (C kWh) تم احتسابها بقسمة إجمالي التكلفة الاستثمارية للنظام على إجمالي الطاقة الكهربائية المنتجة خلال العمر التشغيلي الافتراضي.
7- تفترض الدراسة ثبات تعرفة الكيلوواط ساعة من الشبكة الكهربائية العامة خلال فترة المقارنة، دون التأثر بتغيرات الدعم الحكومي أو السياسات الطاقية المستقبلية.

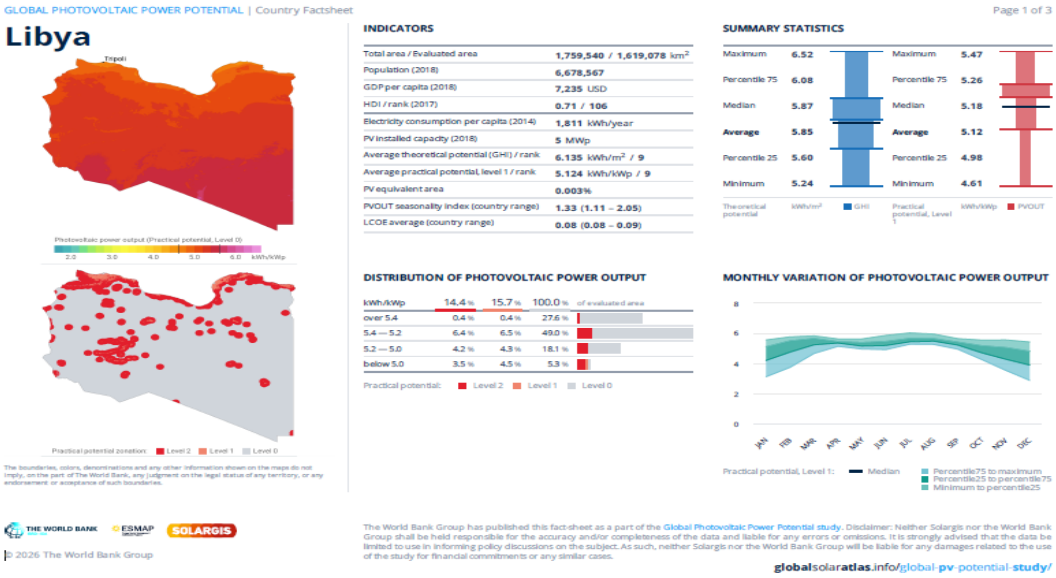
5- منهجية البحث :

اعتمد هذا المشروع على منهجية تطبيقية مع عناصر تحليلية، حيث تم تصميم وتنفيذ نظام طاقة شمسية هجين بناءً على دراسة واقعية للأحمال الكهربائية في قسم الهندسة الكهربائية والالكترونية بكلية التقنيات الهندسية/القبة. بدأ البحث بجمع البيانات الأولية وقياس الأحمال الكهربائية بشكل عملي، مما يعكس الجانب التطبيقي للمشروع. بعد ذلك، تم تحليل البيانات المجمعة لتحديد متطلبات النظام الشمسي واختيار المكونات المناسبة، مثل الألواح الشمسية، العاكس، منظم الشحن، والبطاريات، وهو ما يبرز الجانب التحليلي .تم تركيب النظام واختباره في ظروف تشغيلية واقعية، مما يعزز الجانب التجريبي للمشروع. أخيراً، تم تقييم أداء النظام وتحليل النتائج لتقديم توصيات عملية، مما يجمع بين الجوانب التطبيقية والتحليلية في منهجية

متكاملة .بهذه الطريقة، تم الجمع بين النظرية والتطبيق لضمان تحقيق أهداف المشروع بشكل علمي وعملي، مع تقديم حلول قابلة للتطبيق في الواقع.

6-التوزيع المكاني والمؤشرات الإحصائية لإمكانات الطاقة الشمسية في ليبيا

يبين الشكل (1) التوزيع المكاني للإنتاجية العملية للطاقة الشمسية الكهروضوئية (PVOUT) إلى جانب المؤشرات الإحصائية [6] للإشعاع الشمسي النظري (GHI) على مستوى ليبيا. ويتضح أن المنطقة الشمالية الشرقية، التي تقع ضمنها مدينة القبة، تتمتع بقيم مرتفعة نسبيًا من الإشعاع الشمسي والإنتاجية العملية، وهي قريبة من المتوسط الوطني العام، مما يعكس استقرار المورد الشمسي وملاءمة الموقع لتطبيقات الطاقة الشمسية.



شكل (1): يبين التوزيع الجغرافي للإمكانات الشمسية الكهروضوئية ومعدلات الإنتاج السنوي في ليبيا.

7- الموقع الجغرافي لكلية التقنيات الهندسية/ القبة

تقع الكلية في مدينة القبة، وهي إحدى مدن الجبل الأخضر في ليبيا. تقع القبة على خط عرض **32.45°** شمالاً وخط طول **22.14°شرقاً**، وتبعد حوالي 40 كيلومترًا غرب مدينة درنة، و 50كيلومتر شرق مدينة البيضاء. تتميز المنطقة بتضاريس جبلية ومناخ معتدل نسبيًا، مما يجعلها موقعًا مناسبًا للمؤسسات التعليمية والتقنية.

شكل (2): يوضح الموقع الجغرافي لكلية التقنيات الهندسية/ القبة.

8- الاتجاه الأمثل للألواح الشمسية

8-1 الاتجاه الرئيسي (Azimuth)

نظرًا لوقوع مدينة القبة في النصف الشمالي من الكرة الأرضية، فإن الاتجاه الأمثل لتركيب الألواح الشمسية هو الجنوب الحقيقي(True South) ، وليس الجنوب المغناطيسي، وذلك لتفادي الانحراف الذي يسببه الفرق بين الشمال المغناطيسي والشمال الحقيقي) [9] الانحراف المغناطيسي Magnetic – Declination). توجيه الألواح نحو الجنوب الحقيقي يضمن استقبالها لأشعة الشمس لأطول فترة ممكنة خلال اليوم، وخاصة في فصول الشتاء عندما تكون الشمس منخفضة في الأفق وتتحرك بزاوية مائلة عبر السماء[12] . يُفضَّل استخدام أجهزة تحديد الاتجاهات (البوصلة مع تصحيح الانحراف المغناطيسي) أو نظم التموضع العالمي (GPS) وبرامج تتبع مسار الشمس لضبط الاتجاه بدقة عالية.

8-2 زاوية الميل المثلى: (Tilt Angle)

تُعد زاوية الميل عاملاً أساسياً في تحديد كمية الإشعاع الشمسي الذي يسقط على سطح الألواح [17]. وبما أن القبة تقع عند خط عرض ≈ **32.45°** شمالاً، فإن الزاوية المثالية للأداء السنوي المتوازن هي تقريبًا **32°–33°**، أي مساوية تقريبًا لخط العرض الجغرافي للموقع. هذه الزاوية تعتبر حلاً وسطًا (Fixed Annual Tilt)بين الزاويتين الموسميتين الأمثل للشتاء والصيف

9- بيانات الاشعاع الشمسي للموقع

تُصنَّف ليبيا ضمن الدول ذات الإمكانات العالية في مجال الطاقة الشمسية، نظرًا لما تتمتع به من مستويات مرتفعة من الإشعاع الشمسي على مدار العام، إذ يتراوح المتوسط السنوي للإشعاع الشمسي اليومي بين **4.50-6.52 كيلوواط** ساعة/م² .وفي إطار هذه الدراسة، تم اعتماد الإشعاع الشمسي الكلي على السطح الأفقي (**Global Horizontal Irradiance – GHI**) [6] كمؤشر رئيسي لتقييم المورد الشمسي، وذلك لكونه من أكثر المعايير استخدامًا في تحليل أداء أنظمة الخلايا الكهروضوئية ذات الزوايا الثابتة، فضلًا عن توافر بياناته بدقة وموثوقية عالية ضمن قواعد البيانات العالمية المعتمدة، مثل **Global Solar Atlas.** وتشير الدراسات المناخية إلى أن المناطق الجنوبية والصحراوية في ليبيا تسجل أعلى قيم للإشعاع الشمسي[14] في حين تنخفض هذه القيم نسبيًا في المناطق الساحلية الشمالية نتيجة لتأثيرات العوامل المناخية المحلية، مثل زيادة الرطوبة وارتفاع نسبة الغيوم. وعلى الرغم من ذلك، تتمتع **مدينة القبة**، الواقعة في الجزء الشمالي من البلاد، بخصائص إشعاعية متميزة، حيث يُقدَّر متوسط الإشعاع الشمسي الكلي اليومي السنوي فيها بنحو 5 كيلوواط ساعة/م²، مما يضعها ضمن الفئة العليا من حيث الإمكانات الشمسية على المستوى الوطني.كما يُظهر التوزيع الشهري لمتوسط الإشعاع الشمسي اليومي في مدينة القبة تقلبات موسمية معتدلة، تتجلى في ارتفاع القيم خلال أشهر الصيف وانخفاضها بشكل محدود خلال فصل الشتاء، الأمر الذي يؤكد قابلية استغلال الطاقة الشمسية في المنطقة على مدار العام، خاصة عند دمجها مع أنظمة تخزين طاقة مناسبة لضمان استمرارية التغذية الكهربائية. ويُبين الجدول رقم **(2)** توزيع قيم المتوسط اليومي للإشعاع الشمسي في مدينة القبة بوحدة كيلوواط ساعة/م² في اليوم.

جدول رقم (1): يبين متوسط اليومي للإشعاع الشمسي الشهري في مدينة القبة.

الشهر	المتوسط اليومي للإشعاع الشمسي الشهري
يناير	**2.89**
فبراير	**3.82**
مارس	**5.08**
أبريل	**6.22**
مايو	**7.11**
يونيو	**7.71**
يوليو	**7.61**
أغسطس	**6.99**

سبتمبر	5.85
أكتوبر	4.48
نوفمبر	3.20
ديسمبر	2.60

المصدر: [https://globalsolaratlas.info]

هذه المؤشرات تُؤكد الجدوى الاقتصادية والفنية لتطوير مشاريع الطاقة الشمسية في المنطقة، سواءً لأغراض توليد الكهرباء أو التطبيقات الحرارية. وبالنظر إلى الاتجاه العالمي نحو تعزيز الاعتماد على الطاقة المتجددة، فإن الاستثمار في البنية التحتية الشمسية بليبيا - وخاصة في المناطق كالقبة - يُشكل فرصة استراتيجية لتنويع مصادر الطاقة وتحقيق الأمن الكهربائي.

10-امكانية التوسع المستقبلي للنظام

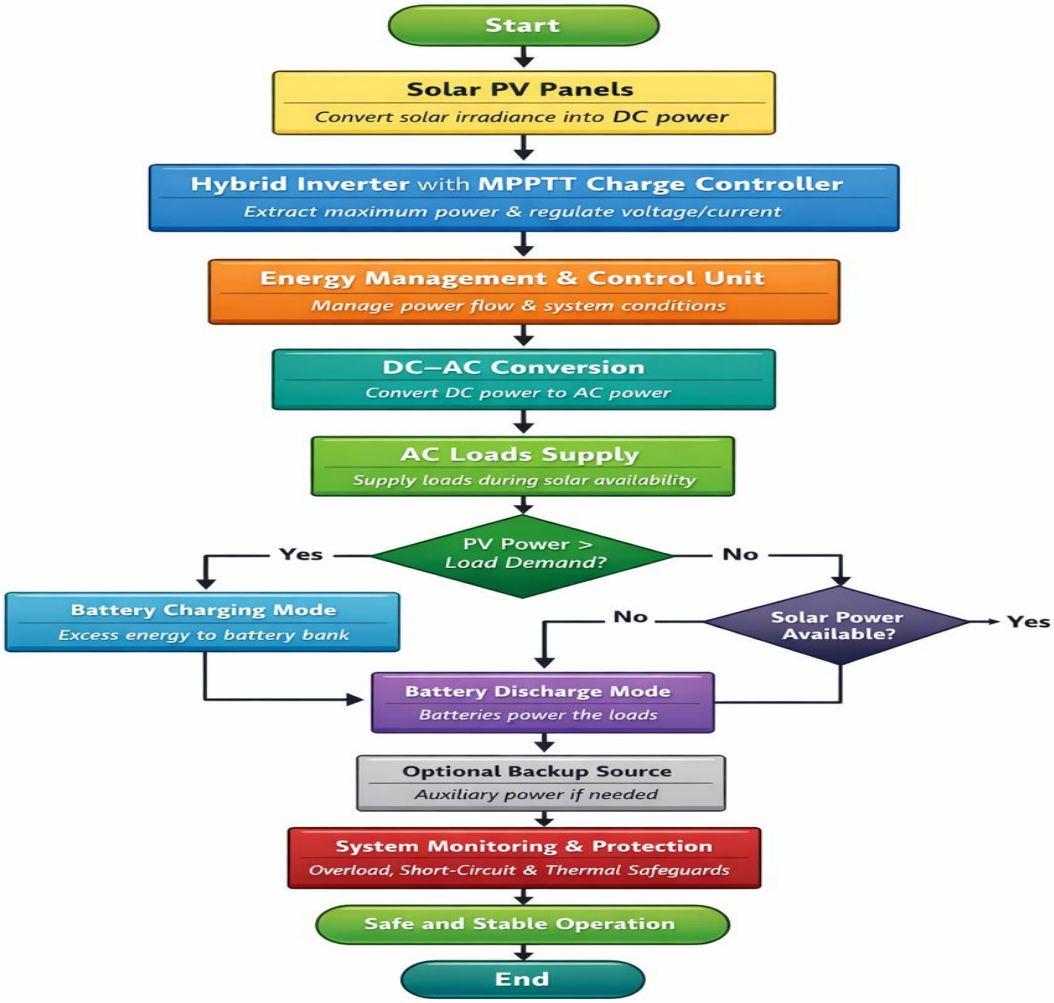
قد شغل النظام **مساحة تقارب 12** مترًا مربعًا فقط من إجمالي المساحة المتاحة لسطح قسم الهندسة الكهربائية بالكلية، والتي تقدر بحوالي 250 مترًا **مربعًا .تعكس** هذه المعطيات وجود مساحة شاسعة غير مستغلة حاليًا، مما يوفر فرصة كبيرة للتوسع المستقبلي للنظام. ففي حال الحاجة إلى زيادة القدرة الإنتاجية للطاقة أو دعم المزيد من الأحمال الكهربائية، يمكن إضافة المزيد من الألواح الشمسية والمكونات المساندة بسهولة، دون الحاجة إلى تعديل جوهري في البنية التحتية الحالية. هذا التوسع المحتمل يعزز من استدامة المشروع ويواكب أي نمو مستقبلي في متطلبات الطاقة للقسم. ويمثل التوسع في النظام خطوة مهمة نحو تعزيز الاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة داخل الكلية. كما يساهم في تقليل الاعتماد على الشبكة الكهربائية العامة، مما يقلل من تكاليف التشغيل على المدى الطويل. بالإضافة إلى ذلك، يمكن استغلال هذا التوسع في دعم مبادرات البحث العلمي والتطبيقات العملية لطلبة قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية.

شكل (3): يوضح التوزيع المكاني لمنظومة الألواح الشمسية المثبّتة على سطح المبنى (صورة جوية).

11- التفاصيل التقنية لمسار الطاقة في النظام الشمسي الهجين

يبدأ مسار تدفّق الطاقة في النظام الشمسي الهجين من الألواح الشمسية كما هو موضح بالشكل رقم (4) حيث يتم تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية على شكل **تيار مستمر .(DC)** تنتقل هذه الطاقة مباشرة إلى العاكس الهجين المدمج مع منظم شحن داخلي يعتمد على خوارزمية[2] تتبع نقطة الاستطاعة العظمى**(MPPT)** والذي يتولى معالجة القدرة الكهربائية القادمة من المصدر الشمسي دون الحاجة إلى منظم شحن خارجي. يقوم منظم الشحن المدمج بضبط الجهد والتيار القادمين من الألواح بما يتوافق مع

متطلبات منظومة التخزين، مع تعظيم الاستفادة من الطاقة الشمسية المتاحة. في الوقت نفسه، يعمل العاكس الهجين على إدارة تدفّق الطاقة وتوزيعها وفق الحالة التشغيلية للنظام[9] حيث يتم تحويل التيار المستمر إلى تيار متردد (AC) لتغذية الأحمال بشكل مباشر عند توفر الإنتاج الشمسي. فعند وجود فائض في القدرة المنتجة مقارنة بالأحمال، تُوجَّه الطاقة الزائدة إلى شحن البطاريات وفق استراتيجية شحن متعددة المراحل تهدف إلى الحفاظ على سلامة وحدات التخزين وإطالة عمرها التشغيلي. أمّا في حالات انخفاض الإشعاع الشمسي أو غياب الإنتاج خلال فترات الليل، فيقوم النظام تلقائيًا بتغذية الأحمال من البطاريات عبر العاكس [10] دون حدوث انقطاع في التيار الكهربائي. كما يتيح العاكس الهجين إمكانية التحويل الذكي بين مصادر الطاقة المختلفة[11] حيث تُعطى الأولوية للطاقة الشمسية، تليها الطاقة المخزنة في البطاريات، مع إمكانية الاعتماد على مصدر احتياطي عند الحاجة. وخلال جميع أوضاع التشغيل، يقوم العاكس بمراقبة المتغيرات الكهربائية والحرارية، ويطبق منظومة حماية داخلية تشمل الحماية من زيادة الأحمال [15] والقصر الكهربائي، وارتفاع الجهد، والحماية الحرارية، بما يضمن تشغيلًا آمنًا ومستقرًا للمنظومة على المدى الطويل.



شكل (4): يبين **مخطط تدفّق الطاقة ومنطق التشغيل للنظام الشمسي الكهروضوئي الهجين.**

2-11 استراتيجية إدارة الطاقة والتحكم (Energy Management Strategy-EMS)

تعد استراتيجية إدارة الطاقة (EMS) الركيزة الأساسية في تصميم المنظومات الهجينة[1] حيث يمثل المنطق البرمجي الذي يحكم عمل العاكس الهجين (Hybrid Inverter) كمدير مركزي لتدفقات الطاقة تهدف هذه الاستراتيجية الى موازنة العرض والطلب بين مصادر الطاقة المتاحة (الألواح الكهرو ضوئية.

البطاريات. والمصدر البديل) ويبين الاحمال الكهربائية مع إعطاء الأولوية القصوى للاستدامة والكفاءة التشغيلية

3-11 آلية اتخاذ القرار وأولويات التشغيل

تعتمد الاستراتيجية المصممة في هذا النظام على تسلسل هرمي للأولويات بهدف تحقيق الاستغلال الأمثل لمصادر الطاقة المتجددة المتاحة مع ضمان استمرارية التغذية الكهربائية للأحمال وحماية المكونات الحساسة للمنظومة من الإجهاد التشغيلي. وتتجسد هذه الألية في نظام إدارة ذكي يقوم بالمفاضلة بين المصادر (الألواح الكهروضوئية. بنك البطاريات. مصدر بديل) [10] بناء على متغيرات اللحظية الانية للإشعاع الشمسي وحالة شحن البطاريات وذلك وفقآ للأوضاع التشغيلية التالية:

1- **وضع الأولوية الكهرو الضوئية (PV Priority Mode)**

في هذا الوضع تعطى الأولوية القصوى للطاقة المنتجة من الألواح لتغطية الطلب اللحظي للأحمال. وفي حال تجاوز الإنتاج حاجة الأحمال يتم توجيه الفائض لشحن البطاريات مما يقلل [8] الاعتماد على المصادر التقليدية ويحقق اقصى كفاءة للنظام

2-وضع دعم التخزين (Storages Support Mode)

عند انخفاض مساهمة الطاقة الشمسية عن المستوى المطلوب ينتقل النظام آليآ لسحب العجز من بنك البطاريات وتستمر هذه العملية طالما بقيت حالة الشحن (SOC) ضمن الحدود الامنة مما [16] يضمن استقرار الجهد والتيار المورد للأحمال دون انقطاع

3- وضع الحماية والتحول الألي (Automatic Bypass Mode)

يمثل هذا الوضع خط الدفاع الأخير لحماية المكونات فعند وصول البطاريات الى الحد الأدنى المسموح من الطاقة المخزنة يقوم النظام باتخاذ قرار فوري بالتحول الى المصدر البديل (الشبكة الكهربائية. المولد) تضمن هذه الألية حماية البطاريات من التفريغ العميق وتأمين استمرارية الخدمة للأحمال الحيوية في كافة الظروف الجوية مع إمكانية البدء[18] في شحن البطاريات من هذه المصادر.

12- كفاءة النظام الشمسي (Overall System Efficiency)

بعد عرض الوصف العام للنظام الشمسي الهجين وشرح المسار التقني لتدفق الطاقة بين مكونات المنظومة المختلفة، تأتي هذه المرحلة لتحديد الكفاءة الكلية للنظام باعتبارها أحد أهم الافتراضات التصميمية التي تُبنى عليها الحسابات اللاحقة. في هذه الدراسة تم افتراض كفاءة كلية للنظام الشمسي قدرها % 80في المرحلة الأولية من التحليل، وذلك قبل إجراء الحسابات التصميمية التفصيلية. ويعكس هذا الافتراض الموضح بالجدول رقم (2) مجموع الفواقد المتوقعة في مكونات المنظومة المختلفة، والتي تُقدَّر بحوالي 20% من الطاقة المنتجة اسميًا. وتعود هذه الفواقد إلى الخسائر الطبيعية الناتجة عن ظروف التشغيل البيئية مثل ارتفاع درجة الحرارة وتراكم الغبار على الألواح الشمسية، إضافةً إلى فواقد التحويل الكهربائية في منظم الشحن والعاكس، وفواقد الشحن والتفريغ في البطاريات، وكذلك فواقد الكابلات والقواطع الكهربائية. وقد تم توزيع هذه الفواقد على مكونات النظام اعتمادًا على قيم نموذجية شائعة في الأنظمة الشمسية التجارية وتوصيات الأدبيات العلمية

جدول (2): يبين توزيع كفاءة مكونات النظام الشمسي الهجين.

م	مكون النظام الشمسي	الكفاءة%	الخسائر%	سبب الفقد(الخسائر)
1	الالواح الشمسية Modules PV	90%	10%	الفقد الحراري- التلوث والاوساخ- التقادم
2	منظم الشحن Charge Control	97%	3%	تحويل الطاقة_ كفاءة التتبع
3	العاكس Inverter	96%	4%	تحويل التيار (DC T0 AC) - الاستهلاك الذاتي
4	البطاريات Bank Battery	97%	3%	كفاءة الشحن والتفريغ- التدهور الكيميائي
5	الاسلاك والتوصيلات	99%	1%	المقاومة الكهربائية- جودة التوصيلات
	الكفاءة الاجمالية للنظام	79.9%	20.1%	-

13- خطوات تصميم النظام الشمسي الهجين

13-1 تحليل متطلبات النظام و حساب الاستهلاك اليومي

تتضمن هذه الخطوة حصر جميع الأجهزة الكهربائية المستخدمة والمراد ربطها بالنظام داخل القسم حيث يوضح الجدول (3) الأحمال الكهربائية المختلفة في قسم الهندسة الكهربائية مع قدرتها الاسمية وساعات تشغيلها اليومية. تم حساب الطاقة المستهلكة يوميًا لكل حمل بضرب القدرة الاسمية في عدد ساعات التشغيل، ومن ثم جمع القيم للحصول على الاستهلاك اليومي الكلي للأحمال، والذي بلغ **8000 *Wh*/day**. ولضمان استقرار النظام ومواجهة الاحمال المفاجئة[5] وتقادم المكونات تم اعتماد معامل امان (Safety Factor) بنسبة **20%** ليكون الاستهلاك التصميمي **9600 *Wh*/day** في حسابات تصميم النظام الشمسي الهجين.

جدول (3): الأحمال الكهربائية المختلفة في قسم الهندسة الكهربائية.

الموقع	نوع وعدد الأحمال	قدرة الاحمال(w)	ساعات التشغيل اليومية (h/day)	الطاقة المطلوبة يوميًا (wh/day)
مكتب قسم الهندسة الكهربائية	1 لامبة LED	100	5	500
ممر القسم	5 لمبات LED	250	5	1250
قاعة4	2لمبات LED	100	5	500
المكتبة	10 لمبات LED	360	5	1800
قاعة1	2لمبات فلورسنت	150	5	750
قاعة2	2لمبات LED	100	5	500
قاعة3	2لمبات LED	140	5	700
القسم العام + قسم الكهرباء	2 جهاز كمبيوتر	400	5	2000
المجموع	-	1600	-	8000

13-1-1 حساب قدرة الألواح الشمسية

يتم تقدير القدرة الإجمالية للألواح الشمسية التي يمكنها توليد الطاقة المطلوبة خلال عدد ساعات سطوع الشمس المتاحة يوميًا، مع مراعاة كفاءة النظام والخسائر المحتملة في التحويل والتوصيل، كما يلي:

$$\text{القدرة المطلوبة للألواح} = \frac{\text{الاستهلاك اليومي}}{\text{ساعات الاشعاع الشمسي} \times \text{كفاءة النظام}}$$

$$2400W = \frac{9600Wh/day}{0.8 \times 5h/day} =$$

13-1-2 تحديد عدد الألواح الشمسية

يتم تحديد عدد الألواح اللازمة من خلال قسمة قدرة الالواح المطلوبة للنظام على القدرة الاسمية للوح الواحد، مع تقريب الناتج إلى أقرب عدد صحيح لضمان تغطية كاملة للطلب، كما يلي:

إذا. بما ان كل لوح مستخدم في النظام بقدرة **460 W**

$$\textbf{عـدد الألـواح} = \frac{\text{قدرة الالـواح}}{\text{قدرة اللـوح الواحد}} = \frac{2400}{460} = 5.21) \quad \textbf{نحتاج إلى 6 ألواح)}$$

13-1-3 حساب المساحة المطلوبة للألواح الشمسية

بعد تحديد عدد الألواح، يتم حساب المساحة الإجمالية التي ستشغلها هذه الألواح على السطح من خلال ضرب عدد الألواح في مساحة اللوح الواحد، وذلك للتأكد من توفر مساحة تركيب مناسبة وآمنة، كما يلي:

الألواح الشمسية بقدرة w_460 عادةً ما تكون من النوع 72 خلية، وأبعادها التقريبية هي:

1- الطول: حوالي 2 م **2- العرض**: حوالي 1 م **3- المساحة**: لكل لوح 2 **م².**

4- السمك 3-4 سم **5- الوزن** 22-25 كجم لكل لوح.

إجمالي المساحة المطلوبة = عدد الالواح × المساحة لكل لوح = 6 2 = 12 م².

4-1-13 تحديد سعة منظومة تخزين الطاقة للنظام وعدد البطاريات

لتحديد السعة المثلى لمنظومة تخزين الطاقة (بنك البطاريات)، تم اعتماد منهجية حسابية منهجية تهدف إلى ضمان تلبية متطلبات الحمل اليومي للنظام بكفاءة وموثوقية. وقد أُخذ في الاعتبار الجهد الكلي للمنظومة عند إجراء هذه الحسابات، بما يحقق التوافق بين مكونات النظام المختلفة ويضمن الأداء الأمثل لمنظومة التخزين.

أ-حساب السـعة التخزينية المطلوبة للنظام

الخطوة الأولى تتمثل في تحديد السعة الاسمية المطلوبة من بنك البطاريات وذلك بتحويل اجمالي استهلاك الطاقة اليومي من وحدة Whالى Ahمع الأخذ في الاعتبار كلا من جهد تشغيل المنظومة وعمق التفريغ المسموح به وذلك باستخدام العلاقة التالية:

$$\text{السـعة المطلوبة} = \frac{\text{الاستهلاك اليومي}}{\text{عمق التفريغ} \times \text{جهد النظام}} = \frac{9600}{24 \times 0.85} = 470.6\ A.h$$

(علية يتطلب النظام بنك بطاريات ذا سعة لا تقل عن 470.6 A .h عند جهد 24V)

ب- تصميم مصفوفات البطاريات

لتكوين بنك بطاريات يفي بالسعة المطلوبة. تم استخدام بطاريات نوع GELبالمواصفات التالية: -

- الجهد الاسمي للبطارية الواحدة 12V
- السـعة الاسـمية للبطارية الواحدة 250Ah

تم تصميم مصفوفة البطاريات على مرحلتين لتحقيق الجهد والسعة المطلوبين كما يأتي

- **تحقيق جهد النظام (24V) عبر التوصيل على التوالي:**
- لتحقيق جهد النظام باستخدام بطاريات 12V يجب توصيل بطاريتين (2) على التوالي. عند توصيل البطاريتين بهذه الطريقة ينتج عن ذلك سلسلة (String) واحدة بجهد 24Vوسعة 250
- **تحقيق السعة المطلوبة (470.6Ah)عبر التوصيل على التوازي:**

بعد تكوين سلاسل بجهد 24V وسعة 250A.h لكل سلسلة يتم توصيل عدد كاف من هذه السلاسل على التوازي للوصول الى السعة الاجمالية المطلوبة باستخدام العلاقة التالية

$$\text{عدد السلاسل المطلوبة} = \frac{\text{السعة الاجمالية االمطلوبة}}{\text{سعة السلسلة الواحدة}} = \frac{470.6}{250} = 1.88$$

نقرب الناتج الى اقرب عدد صحيح 2(أي سلسلتان)

ج- التكوين النهائي وعدد البطاريات الكلي

بناء على الحسابات السابقة، يتكون بنك البطاريات من سلسلتين (2) موصولتين على التوازي حيث تتكون كل سلسلة من بطاريتين (2) موصولتين على التوالي

- **العدد الكلي للبطاريات = عدد البطاريات في كل سلسله × عدد السلاسل المتوازية= 2 ×2 = 4**
- **السعة الاجمالية للمصفوفة= سعة السلسلة الواحدة × عدد السلاسل المتوازية = 250Ah × 2 = 500Ah**

هذا التكوين سوفر سعة اجمالية تبلغ 500Ah وهي تتجاوز السعة المطلوبة 470.6 Ah مما يضمن تلبية احتياجات الحمل بشكل كامل

د- حساب القدرة التخزينية للبطاريات

القدرة التخزينية للبطاريات = 500Ah × 24V =12000Wh

5-1-13 تحديد حجم العاكس المناسب للنظام

يعد العاكس (Inverter) المكوّن المحوري في منظومة الطاقة الشمسية، إذ يتولى مهمة تحويل الطاقة الكهربائية المستمرة إلى طاقة متناوبة قابلة للاستخدام من قبل الأحمال. ويجري اختيار العاكس بعناية استنادًا إلى قدرته على تحمّل القدرة القصوى للأحمال المتوقع تشغيلها في آنٍ واحد، إضافةً إلى قدرته على استيعاب تيارات البدء العالية لبعض الأجهزة الكهربائية. كما يُشترط أن تكون القدرة الاسمية المستمرة للعاكس قريبة من القدرة الكلية للألواح الشمسية أو أعلى منها قليلًا لضمان توافق عناصر المنظومة وتحقيق أداء مستقر.

وبما أن القدرة اللحظية للأحمال تبلغ نحو 1600 W، فإن العاكس يجب أن يكون قادرًا على توفير هذه القدرة في أي لحظة لضمان التشغيل الموثوق للأحمال. ومن أجل الاستفادة الكاملة من القدرة القصوى المنتجة من الألواح الشمسية، والبالغة 2760W ينبغي أن يمتلك العاكس القدرة على التعامل مع هذا المستوى من القدرة دون قيود تشغيلية. وبناءً على ذلك، يُعد اختيار عاكس بقدرة اسمية تبلغ 4000W خيارًا مناسبًا من الناحية الفنية، إذ يلبّي متطلبات الأحمال الكهربائية بكفاءة، ويتيح الاستفادة القصوى من طاقة الألواح الشمسية، بما ينعكس على تحسين إنتاج الطاقة وتسريع عملية شحن البطاريات. علاوة على ذلك، يوفر هذا الاختيار هامش أمان تشغيليًا يمنح مرونة مستقبلية لإضافة أحمال كهربائية جديدة دون الحاجة إلى استبدال العاكس

6-1-13 اختيار منظّم الشحن

تم اختيار منظّم الشحن (Charge Controller) بحيث يكون قادرًا على تحمّل متطلبات منظومة الألواح الشمسية، مع توفير الحماية اللازمة للبطاريات ضد حالات الشحن الزائد والتفريغ المفرط، بما يسهم في إطالة عمرها التشغيلي وتحسين موثوقية المنظومة. قد تم اعتماد منظّم شحن في هذا النظام من نوع تتبّع نقطة القدرة العظمى (MPPT) لتميزه بقدرته على استخلاص القدرة القصوى من الألواح تحت تغير ظروف الإشعاع ودرجة الحرارة ورفع كفاءة الاستفادة من الطاقة مقارنة بالأنواع التقليدية. ولأغراض التصميم المبدئي، تم تقدير **أقصى تيار شحن نظري (حد أعلى تقريبي)** اعتمادًا على جهد النظام الاسمي (24V)وفق العلاقة**:** التالية

$$\textbf{اقصى تيار الشحن} = \frac{\text{قدرة الالواح الفعلية}}{\text{جهد النظام}} = \frac{\mathbf{2760W}}{\mathbf{24V}} = \mathbf{115A}$$

7-1-13 معدل الشحن وتفريغ البطاريات

بالاعتماد على عمق تفريغ DOD 85% وسعة بنك بطاريات 500Ah فإن زمن الشحن النظري عند تيار 115 Aيساوي:

$$\textbf{وقت الشحن} = \frac{\text{سعة البطاريات} \times \text{عمق التفريغ}}{\text{تيار الشحن}} = \frac{\mathbf{0.85 \times 500A.h}}{\mathbf{115A}} = \mathbf{3.7h\ (ساعات)}$$

مع الإشارة إلى أن زمن الشحن الفعلي قد يكون أكبر بسبب فواقد التحويل وتغير تيار الشحن خلال مراحل الشحن المختلفة.

2-13 الملخص التصميمي للنظام الشمسي الهجين

تم إجراء كافة العمليات الحسابية لتصميم النظام الشمسي الهجين وفق المعايير الهندسية المعتمدة، شملت تحديد عدد البطاريات وسعتها لضمان توفير الطاقة المطلوبة خلال فترة الاستقلالية، واختيار العاكس المناسب لتلبية الأحمال اليومية، بالإضافة إلى حساب أقصى تيار شحن للألواح الشمسية لضمان توافقها مع النظام وكفاءته. كما تم تحديد قدرة الألواح الشمسية وعددها، فضلاً عن مساحة تركيبها على السطح لتحقيق الاستفادة المثلى من الإشعاع الشمسي، كما هو موضح بالجدول رقم (5)، وذلك لضمان أداء النظام الأمثل وتغطية الأحمال اليومية بكفاءة عالية، مع إمكانية استخدام التغذية من الشبكة الكهربائية عند الحاجة.

جدول رقم (4): يبين المكونات الرئيسية للنظام الشمسي الهجين.

الرقم	المكون	النوع/ المواصفات	الكمية	الملاحظات
1	الألواح الشمسية	قدرة كل لوح 460 W جهد 35 V تيار A 13	6	أحادية البلورة متصلة لتكوين نظام شمسي بقدرة كلية مناسبة للنظام
2	عاكس هجين	EVO Series 4200W، جهد 24 V DC MPPT 120 A مدمج بمنظم شحن	1	عاكس هجين يحتوي على شاحن شمسي الكتروني وقلاب الكتروني
3	البطاريات	Enersun GEL، 250 Ah، 12 V DC	4	متصلة بطريقة مركبة لتكوين جهد 24V للنظام والسعة المناسبة
4	صندوق الحماية	–	1	يشمل عدد2 قواطع DC لحماية الالواح والبطاريات وقاطع AC لتغذية الالواح من الشبكة الكهربائية

14-التركيب والتنفيذ العملي وتقييم أداء مكونات النظام الشمسي الهجين

14-1 الألواح الشمسية (Solar Panels – 6 ألواح × 460 واط)

تم تركيب **6** ألواح شمسية بقدرة اسمية **460**W لكل لوح، وبمواصفات كهربائية تبلغ جهدًا مقداره 35.07V وتيارًا مقداره 13.11A لكل لوح .تم توصيل الألواح على التوالي بهدف رفع الجهد النظام الى210V وهو ضمن مجال جهد دخل العاكس (الانفرتر) المسموح به ((450V-60V، وهو ما يحقق كفاءة أعلى في عملية تحويل الطاقة وتقليل الفواقد في التوصيلات.

الشكل (5): يبين التركيب الفعلي لمنظومة الألواح الشمسية الكهروضوئية على سطح المبنى

14-1-1 اختبار وتشغيل الألواح الشمسية

بعد الانتهاء من أعمال تركيب الألواح الشمسية وإتمام التوصيلات الكهربائية وفق التصميم المعتمد، أُجريت اختبارات تشغيلية وقياسات ميدانية لتقييم الأداء الفعلي لمنظومة الألواح والتحقق من تقاربها مع القيم التصميمية. وقد تم تنفيذ القياسات ضمن حالتين تشغيليتين كما يلي:

الحالة الأولى: التشغيل بدون أحمال

تم تشغيل النظام في وضع عدم وجود أحمال كهربائية متصلة، حيث أظهرت القياسات أن القدرة الناتجة من منظومة الألواح الشمسية بلغت نحو 2600 W، وهي قيمة قريبة من القدرة التصميمية الكلية البالغة 2760 W. ويعكس هذا التقارب سلامة التوصيلات وجودة التركيب وكفاءة الألواح، مع وجود فواقد طبيعية مرتبطة بظروف التشغيل الفعلية مثل ارتفاع درجة الحرارة وزاوية السقوط وتراكم الغبار.

الحالة الثانية: التشغيل مع الأحمال (نهارًا)

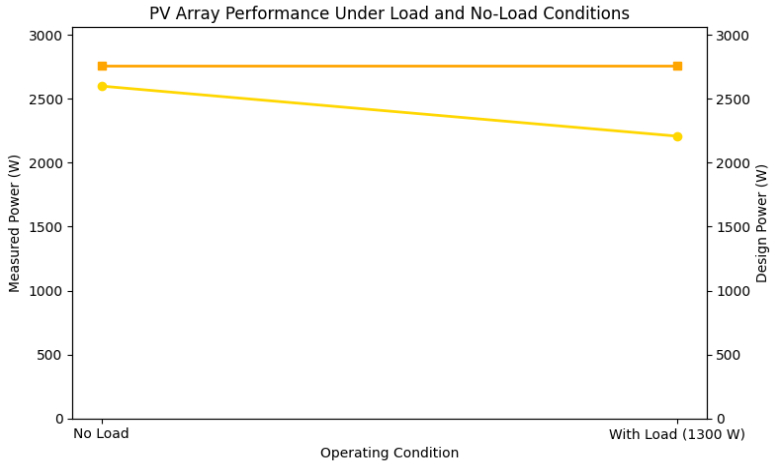
عند توصيل حمل كهربائي فعلي بقدرة اسمية تقارب 1600 W خلال فترة النهار، لوحظ أن القدرة الخارجة من منظومة الألواح أصبحت متغيرة تبعًا لشدة الإشعاع وحالة شحن البطاريات. وخلال فترات الذروة سُجلت قدرة تشغيل تقارب 2205 W وبناءً على ذلك، فإن القدرة المنتجة لم تُغذِّ الأحمال فقط، بل تم تخصيص جزء منها لشحن البطاريات؛ إذ يقدَّر فائض الشحن بنحو:

$$P_{battery} = 2205 - 1600 = 605\ W$$

ويُعزى الانخفاض النسبي مقارنة بالقدرة التصميمية إلى الفواقد التشغيلية المتوقعة مثل ارتفاع درجة حرارة الألواح، وفواقد الكوابل، وعدم التطابق بين الألواح(Mismatch) ، إضافة إلى فواقد التحويل والتنظيم في العاكس ومنظم الشحن، كما هو موضح في الجدول رقم.(9)

جدول رقم (5): يبين قياسات أداء الالواح (احمال/بدون احمال).

الحالة التشغيلية	القدرة التصميمة (وات)	القدرة المقاسة (وات)	مقدار الفقد(وات)	نسبة الفقد (%)
بدون احمال	2760	2600	160	%5
مع الأحمال	2760	2205	555	% 20



شكل (6): يبين أداء الألواح الشمسية تحت الأحمال.

2-14 الانفيرتر (EVO-4200-24V Hybrid Solar Inverter)

في هذا المشروع تم اختيار وتركيب عاكس من سلسلة Evo Series كما هو موضح بالشكل (7) وهو أحد العناصر المحورية في منظومة الطاقة الشمسية المنفذة ضمن المشروع، حيث يجمع بين القدرة العالية والكفاءة التشغيلية والمرونة في العمل. يتميز بكونه انفيرترًا هجينًا، إذ يقوم بدمج مصادر الطاقة المختلفة (الألواح الشمسية، البطاريات، والشبكة العامة) والتحكم فيها بطريقة ذكية تضمن تحقيق أعلى استفادة ممكنة من الطاقة المتوفرة. وتكمن مهمته الأساسية في تحويل التيار المستمر (DC) القادم من الألواح الشمسية أو البطاريات إلى تيار متردد (AC) يمكن استخدامه لتغذية الأحمال الكهربائية.

شكل رقم (7): يوضح (EVO-4200-24V Hybrid Solar Inverter)

14-2-1 اختبار وتشغيل الأنفيرتر

بعد الانتهاء من تركيب العاكس وتوصيله مع باقي مكونات النظام (الألواح الشمسية، منظم الشحن، البطاريات، والأحمال)، تم إجراء سلسلة من القياسات الفنية لتقييم أدائه في مرحلتين مختلفتين:

الحالة الأولى: التشغيل بدون أحمال

تم تشغيل العاكس دون توصيل أي أحمال على خرج التيار المتردد، حيث أظهرت القياسات أن القدرة المسحوبة من العاكس كانت قريبة من الصفر، ويقتصر الاستهلاك في هذه الحالة على الاستهلاك الذاتي للعاكس (Self -Consumption) ويؤكد ذلك سلامة دوائر التحكم والتحويل وعدم وجود فواقد غير طبيعية أثناء وضع الاستعداد.(Standby Mode)

الحالة الثانية: التشغيل مع الأحمال

عند توصيل الأحمال الكهربائية الفعلية داخل قسم الهندسة الكهربائية بقدرة إجمالية تقارب 1600 W أثناء تشغيل العاكس على منظومة الألواح الشمسية، أظهرت القياسات أن العاكس استطاع تغذية الأحمال بصورة مستقرة، مع الحفاظ على جهد الخرج ضمن الحدود المسموح بها تشغيليًا. وتشير هذه النتائج إلى أن أداء العاكس يقع ضمن النطاق التشغيلي المتوقع للعاكسات الهجينة التجارية ذات كفاءة تحويل مرتفعة، كما تؤكد توافق الأداء العملي مع القيم التصميمية المعتمدة للنظام الشمسي الهجين، كما هو موضح في الجدول رقم (6) الذي يبين قياسات أداء العاكس تحت الأحمال أثناء التشغيل على الألواح الشمسية.

جدول رقم (6): يبين قياسات أداء العاكس (احمال/بدون احمال).

الحالة التشغيلية	القدرة التصميمة (W)	القدرة المقاسة (W)	(ملاحظات)
بدون احمال	4200	50	استهلاك ذاتي فقط
مع الأحمال	4200	1600	تشغيل مستقر

14-3 البطاريات (وحدة التخزين)

تُعدّ منظومة البطاريات أحد المكونات الأساسية في أنظمة الطاقة الشمسية، إذ تقوم بدور محوري في تخزين الطاقة الكهربائية المولّدة من الألواح الشمسية خلال فترات الإشعاع الشمسي المرتفع، وإتاحتها للاستخدام خلال فترات الليل أو عند انخفاض شدة الإشعاع، بما يضمن استمرارية التغذية الكهربائية واستقرار تشغيل الأحمال. في هذا المشروع تم اعتماد أربع بطاريات من نوع Enersun GEL ، بسعة اسمية 250 Ah وجهد 12 **V DC** لكل بطارية. وقد جرى توصيل البطاريات وفق نظام التوصيل المركب **(توالي–توازي)** Series–Parallel بهدف تحقيق توافق مع جهد النظام المعتمد وتحسين السعة التخزينية. وأسفر

هذا التوصيل عن تكوين بنك بطاريات بجهد كلي **24 V**وسعة كلية تبلغ **500 Ah**، وبطاقة تخزينية إجمالية تُقدَّر بحوالي .**12000 Wh** وتُعد هذه السعة التخزينية مناسبة لتغذية الأحمال الكهربائية الأساسية داخل القسم، حيث تتيح للنظام تشغيل هذه الأحمال لمدة تقارب **5**ساعات تشغيل متواصلة في ظروف التشغيل العادية، مع مراعاة حدود التفريغ الآمن للبطاريات، بما يسهم في إطالة عمرها التشغيلي وتعزيز موثوقية المنظومة.

الشكل (8): يبين يوضح منظومة بطاريات التخزين الخاصة بالنظام الشمسي.

14-3-1 طريقة القياس والمتابعة التشغيلية للبطاريات

عد تركيب بنك البطاريات وربطه بالعاكس ومنظم الشحن، أُجريت سلسلة من القياسات الميدانية لتقييم أدائه أثناء عمليتي الشحن والتفريغ في ظروف التشغيل الواقعية. وقد تم الاعتماد على جهاز قياس الجهد والتيار المستمر(DC Clamp Meter) ، إضافة إلى شاشة التحكم الرقمية للعاكس، لمتابعة حالة الشحن والتفريغ بدقة.

المرحلة الأولى: أثناء الشحن

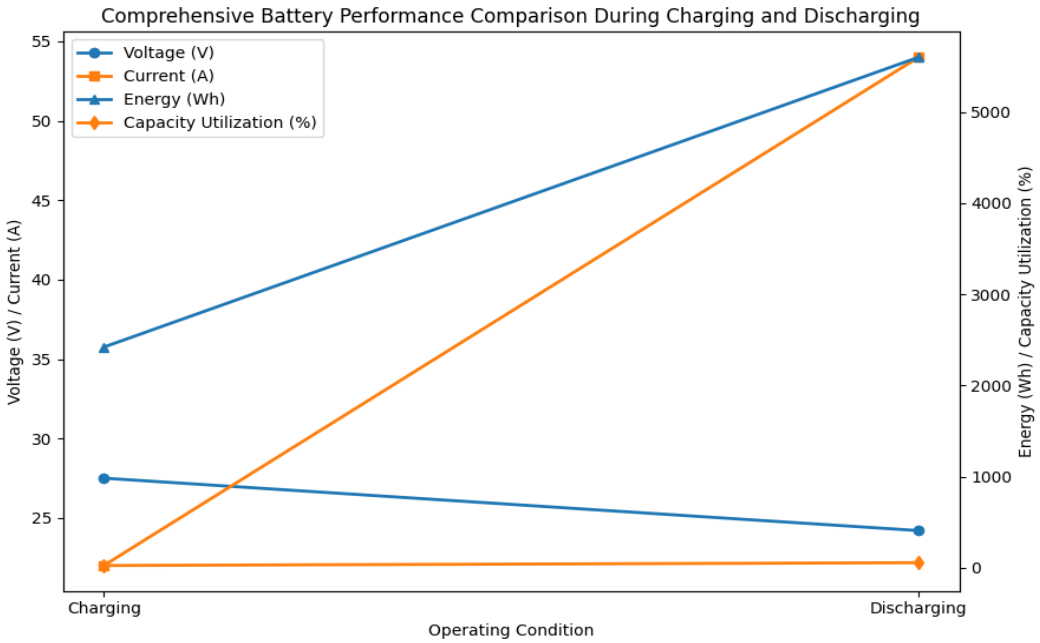
خلال فترة النهار، بلغ جهد الشحن المتوسط حوالي V 27.5**،** وتراوح تيار الشحن بين A 23–**21**بمتوسط يقارب **22 A**، مما أعطى قدرة شحن فعلية تقارب .W **605** واستمرت عملية الشحن لمدة 4 ساعات، تم خلالها إدخال طاقة كهربائية مقدارها Wh 2420 أي ما يعادل نحو 24%من السعة التخزينية الفعّالة لبنك البطاريات المقدرة بـ .Wh 10200

المرحلة الثانية: أثناء التفريغ

بعد غروب الشمس، تم تشغيل الأحمال الكهربائية المتصلة بالنظام تحت حمل فعلي مخفَّض قدره نحو W 1300 وذلك في إطار استراتيجية إدارة الأحمال المعتمدة للحفاظ على عمق تفريغ آمن لمنظومة التخزين. وخلال فترة التفريغ، بلغ الجهد المتوسط لبنك البطاريات حوالي V 24.2، في حين سُجِّل تيار تفريغ يقارب .A 54 واستمر النظام في تغذية الأحمال لمدة تقارب **4.3**ساعات، بطاقة كهربائية مستهلكة مقدارها نحو Wh 5600، وهو ما يعادل حوالي **55%**من السعة التخزينية الفعّالة لبنك البطاريات. وتقع هذه القيمة ضمن نطاق التفريغ الآمن لبطارياتGEL ، مما يؤكد سلامة تشغيل النظام وعدم تعريض وحدات التخزين لإجهاد كهربائي أو تفريغ مفرط، كما يعكس توافقًا واضحًا بين القيم المقاسة للجهد والتيار والزمن والطاقة المستهلكة.

جدول رقم (7): يبين نتائج قياسات أداء البطاريات أثناء الشحن والتفريغ.

الحالة التشغيلية	الجهد(V)	التيار (A)	الطاقة المحسوبة (W.h)	مدة التشغيل (h)	نسبة استخدام السعة (%)
اثناء الشحن	27.5	22	2420	4	24
اثناء التفريغ	24.2	54	5600	4.3	55



شكل (9): يبين سلوك الجهد والتيار والطاقة في بنك البطاريات.

4-14 تكامل منظم الشحن المدمج في العاكسEVO

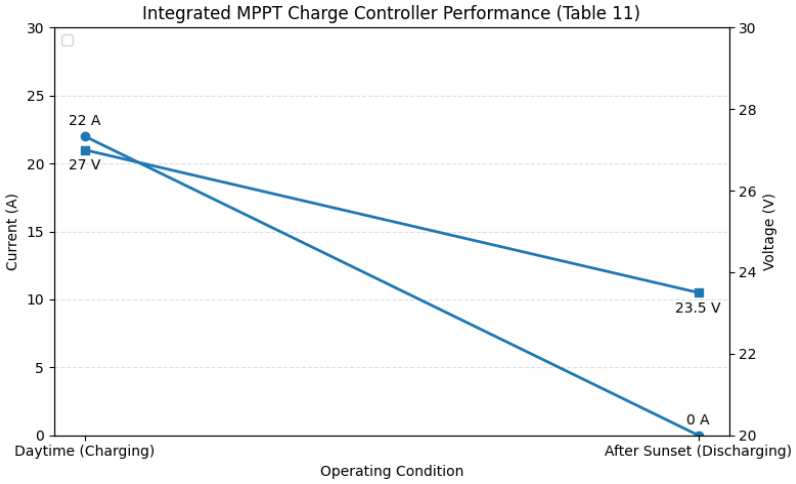
يحتوي العاكس المستخدم في النظام **(EVO – 4200 W / 24 V)** على منظم شحن مدمج يعمل بتقنية تتبّع نقطة القدرة العظمى(MPPT) وهو المسؤول عن تحسين كفاءة استغلال الطاقة الشمسية من خلال ضبط الجهد والتيار باستمرار لتحقيق أعلى استفادة ممكنة من الإشعاع الشمسي

1-4-14 اختبار أداء منظم الشحن المدمج

أظهرت القياسات ثبات جهد الشحن عند حوالي 27 V مع تيار تراوح بين 21–23 A أثناء النهار.
وبعد الغروب، انتقل النظام تلقائيًا إلى وضعية التفريغ الذكي، حيث تم فصل الأحمال عند وصول الجهد إلى 23.5 Vلحماية البطاريات من التفريغ المفرط.

جدول رقم (8): يبين نتائج قياس أداء منظم الشحن المدمج.

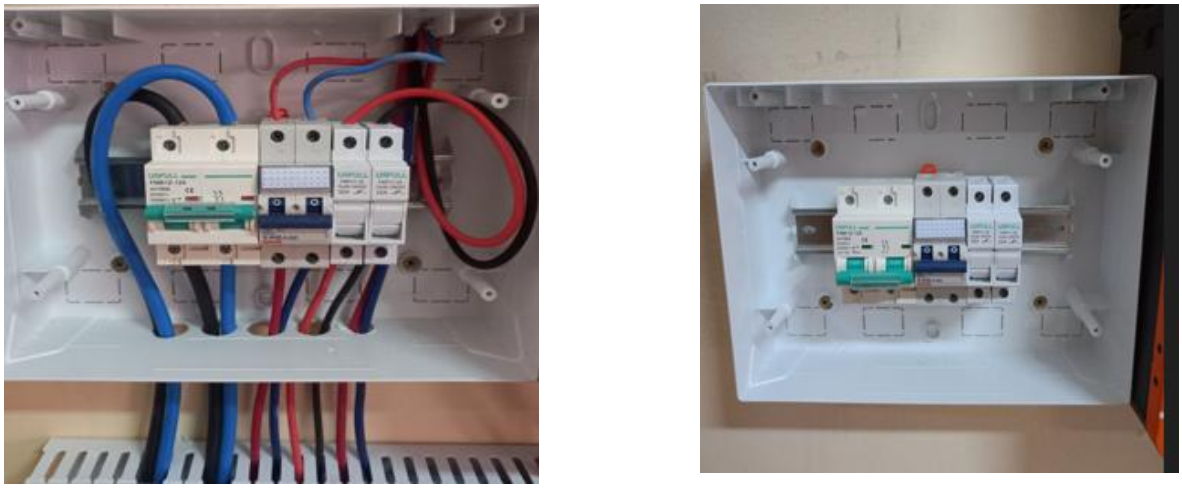
الحالة التشغيلية	الجهد(V)	التيار (A)	نمط التشغيل
اثناء النهار(شحن)	**27**	**23-21**	**تتبع نقطة القدرة (MPPT)**
بعد الغروب (تفريغ)	**23.5**	**0**	**حماية البطارية من التفريغ**



شكل (10): يبين سلوك الجهد والتيار لمنظم الشحن MPPT.

6-6 التوصيلات الكهربائية (الأسلاك، القواطع، ووسائل الحماية)

تم استخدام كابلات كهربائية بمقطع **10ملم²** لنقل التيارات الخارجة من الألواح الشمسية إلى العاكس، وذلك بما يتوافق مع متطلبات السعة الحرارية وتحمل التيار وفق المواصفات الفنية المعتمدة للنظام. كما استُخدمت كابلات ذات مقطع **25ملم²** في التوصيلات بين منظومة البطاريات ومفتاح الحماية والعاكس، نظرًا لارتفاع قيمة التيارات المارة في هذا الجزء من المنظومة، الأمر الذي يستدعي استخدام موصلات ذات مقطع أكبر لضمان الكفاءة التشغيلية، وتقليل الفواقد الكهربائية، وتعزيز عوامل السلامة. ولغرض توفير الحماية الكهربائية اللازمة، تم تركيب قاطعَيْ تيار مستمر(DC) ؛ أحدهما مخصص لحماية الألواح الشمسية A32،400V والآخر لحماية منظومة البطاريات.125A كما تم تركيب قاطع تيار متردد (AC) بتيار اسمي قدره A 16-20على خط التغذية المسؤول عن شحن البطاريات من الشبكة الكهربائية، كما هو موضح في الشكل (11). إضافةً إلى ذلك، نُفِّذت جميع التوصيلات الكهربائية داخل مواسير بلاستيكية عازلة، بهدف حمايتها من العوامل البيئية المختلفة وتقليل مخاطر التلف أو حدوث تماس كهربائي. كما يبين الجدول **(9)** المواصفات الفنية الموصي بها للكابلات والقواطع الكهربائية المستخدمة في النظام، بما يضمن التشغيل الآمن والموثوق لمختلف مكونات المنظومة.



شكل رقم (11): يبين يوضح لوحة الحماية الكهربائية لمنظومة الطاقة الشمسية.

جدول رقم (9): يبين المواصفات الفنية الموصي بها للكابلات والقواطع الكهربائية المستخدمة في النظام.

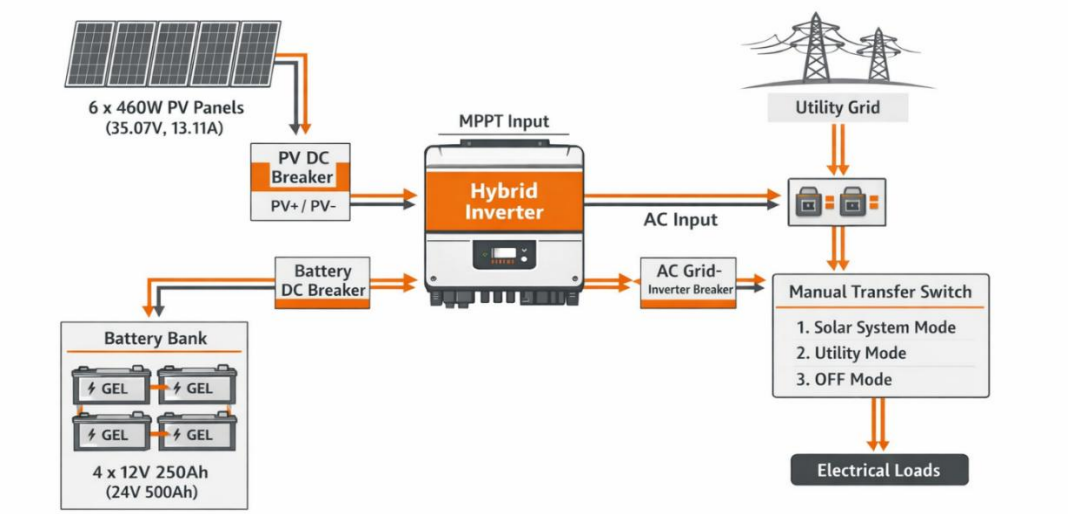
الجزء	المواصفات الموصى بها
كابلات الالواح	4Pv Cable ملم² حتى(25 م) او6 ملم² (اطول) نوع
كابلات البطاريات	20 ملم² (حد ادنى) او 50 ملم²(مفضل) مرنة وقصيرة
قاطع الالواح	A32تيار V400 الجهد DCقاطع
قاطع البطارية	125A تيار 250 V حتى جهد DC قاطع
قاطع الخرج	A16 تيار 230 V جهد AC قاطع

5-14 التكوين النهائي والترتيب الكهربائي لنظام الشمسي الهجين بعد التنفيذ

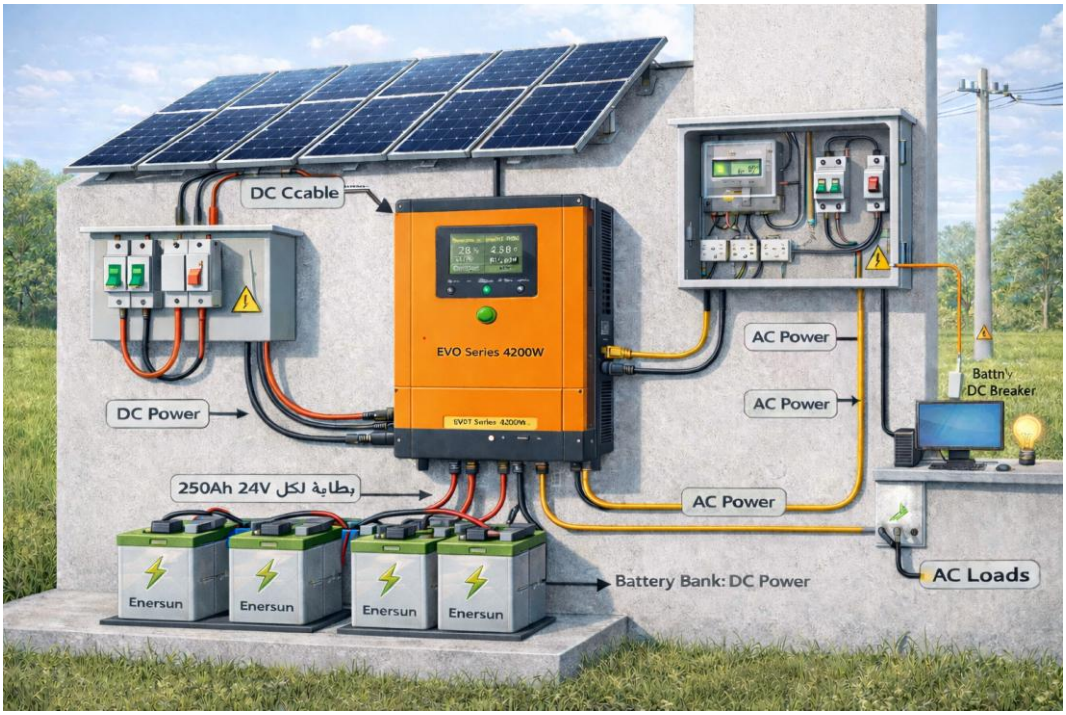
بعد استكمال أعمال التركيب الميكانيكي والربط الكهربائي لمكونات النظام، تم تثبيت ستة ألواح شمسية كهروضوئية (PV Panels) ، بقدرة اسمية مقدارها W **460 لكل** لوح، وبمواصفات كهربائية تبلغ جهدًا اسميًا قدره 35.07V وتيارًا اسميًا مقداره A **13.11**وقد جرى توصيل الألواح الشمسية على التوالي **(**Series Connection**)** بهدف رفع الجهد الكلي لمنظومة الألواح بما يتوافق مع متطلبات مدخل الألواح **(**PV Input**)**في العاكس. تم اعتماد طريقة التوصيل هذه استنادًا إلى القيم المحددة في الملصق الفني (Technical Label)للعاكس، والذي يوضح مجال الجهد المسموح به لمنظومة تتبع نقطة القدرة العظمى **(MPPT)**ويحدد آلية التوصيل المثلى، بما يضمن التشغيل الآمن والاستغلال الأمثل للطاقة الشمسية.
ونظرًا لاستخدام عاكس هجين (**Hybrid Inverter**) يعمل بجهد اسمي مقداره **24V DC**، فقد تم تكوين بنك البطاريات من **4 بطاريات** من نوع **GEL**، بسعة **250Ah**وجهد **12V**لكل بطارية. وقد تم توصيل البطاريات بطريقة **مركبة (توالي–توازي)**، حيث جرى توصيل كل بطاريتين على التوالي للحصول على جهد **24V**، ثم ربط المجموعتين على التوازي لزيادة السعة الكلية لبنك البطاريات 500Ah، بما يتناسب مع متطلبات التخزين ودعم الأحمال الكهربائية. ويحقق هذا التكوين توازنًا مناسبًا بين الجهد والسعة المطلوبة للنظام، ويضمن كفاءة عمليات الشحن والتفريغ وتوافقها مع تصميم العاكس.
تم توصيل كوابل القطبين الموجب (+) والسالب (–) الخارجة من الألواح الشمسية إلى قاطع الحماية الخاص بالألواح **(PV DC Breaker)** داخل صندوق الحماية. ومن مخرج القاطع، جرى إيصال الكوابل مباشرة إلى مداخل الألواح **(PV+ / PV–)** في العاكس، بما يوفر الحماية الكهربائية اللازمة ويحد من مخاطر التيارات الزائدة أو حالات القصر. كما تم استخدام كابل كهربائي بمقطع عرضي **25مم²** لربط بنك البطاريات بقاطع الحماية الخاص بالبطاريات **(Battery DC Breaker) داخل** صندوق الحماية، ومنه إلى مدخل البطاريات **(Battery Input)** في العاكس. وقد تم اختيار هذا المقطع بما يتناسب مع قيم التيارات العالية الناتجة عن عمليات الشحن والتفريغ، وذلك بهدف تقليل الفواقد الكهربائية ورفع مستوى السلامة التشغيلية .وبما أن العاكس المستخدم من النوع الهجين القادر على العمل مع مصادر طاقة متعددة، مثل الألواح الشمسية والشبكة الكهربائية العامة**(Utility Grid)** ، فقد تم ربط مصدر الشبكة عبر قاطع تيار متردد مخصص (**AC Grid–Inverter Breaker**) متصل بلوحة التغذية الخاصة بقسم الهندسة الكهربائية، ثم توصيله إلى مدخل التيار المتردد (**AC Input**) في العاكس. ويتيح هذا الربط إمكانية شحن البطاريات أو دعم الأحمال الكهربائية عند الحاجة. أما خرج العاكس (**AC Output**) فقد تم توصيله إلى مفتاح تحويل يدوي (**Manual Transfer Switch**) ثلاثي الوضعيات، تم تركيبه بالقرب من العداد الرئيسي للقسم. ويوفّر هذا المفتاح ثلاث حالات تشغيل رئيسية، هي:

1- تشغيل الأحمال بواسطة المنظومة الشمسية (**Solar System Mode**)
2- تشغيل الأحمال من الشبكة الكهربائية العامة(**Utility Mode**)
3- فصل التغذية الكهربائية بالكامل عن الأحمال (**OFF Mode**)

ويُسهم هذا الترتيب في تعزيز مرونة التشغيل وضمان موثوقية التغذية الكهربائية وفق ظروف التشغيل المختلفة كما هو موضح بالشكل (12).



شكل (12): يبين المخطط العام لمنظمة الطاقة الشمسية الهجينة ومكوناتها الكهربائية.



6-14 المشاكل الفنية أثناء التنفيذ والتركيب وكيف تم حلها

خلال مرحلة التنفيذ العملي لنظام الطاقة الشمسية، واجهنا عددًا من التحديات الفنية التي تطلبت تدخلات مدروسة لحلها. فيما يلي أبرز هذه المشكلات والحلول التي تم تطبيقها:

1- عدم توفر ميل مناسب للأسطح لتركيب الألواح الشمسية: كانت أسطح المبنى أفقية بالكامل، مما يتطلب إنشاء قاعدة حديدية بزاوية ميل مناسبة (تقريبًا 30 درجة) لضمان كفاءة امتصاص أشعة الشمس. تم حل المشكلة عبر تصميم وتركيب هياكل معدنية مائلة مثبتة بإحكام باستخدام قواعد خرسانية لتوفير الثبات وتحقيق الزاوية المطلوبة.

2- تفاوت في أطوال الكابلات بين الألواح الشمسية والانفيرتر :تبين وجود اختلاف في أطوال التوصيلات بسبب المسافة بين موقع الألواح وموقع الانفرتر داخل الغرفة الفنية، مما قد يسبب فواقد في الجهد. تم حل المشكلة باستخدام كابلات ذات مقطع أكبر (10 مم²) لتعويض الفقد وتقليل المقاومة، مع توحيد أطوال الكابلات قدر الإمكان.

3- عدم توافق رؤوس الكوابل مع منافذ الأجهزة (الانفرتر والبطاريات) :عند تركيب الكوابل واجهنا صعوبة في تثبيتها داخل المنافذ بسبب اختلاف المقاسات. تم استخدام أطراف توصيل نحاسية (*Lugs*)مخصصة مع كويل حراري (*Heat Shrink*) لضمان التوصيل الجيد والعزل الكامل.

4- تداخل في مسارات الكوابل الكهربائية مع التوصيلات الأخرى داخل المبنى :بسبب وجود تمديدات كهربائية سابقة في نفس المنطقة، كان من الضروري تنظيم مسارات الكابلات الجديدة لتجنب التداخل. تم تصميم مسار خاص داخل مواسير بلاستيكية *PVC* مثبتة على الجدران بشكل مستقل عن التمديدات الأخرى.

15-النتائج الفنية للنظام الشمسي الهجين

15-1 إنتاج الطاقة اليومي:

بهدف تقدير إنتاج الطاقة الكهربائية اليومي للنظام الشمسي المقترح خلال مرحلة التصميم الأولي تم الاعتماد على القدرة الاسمية المركبة لمنظومة الألواح الشمسية ومتوسط ساعات الذروة الشمسية في مدينة القبة، والتي تُقدَّر بنحو 5ساعات **ذروة يوميًا**. بلغت القدرة الكلية المركبة للألواح الشمسية:

$$\textbf{سعة الألواح الكلية المركبة} \quad = 6 \times 460\ W = 2760\ W$$

ولغرض احتساب انتاج الطاقة المتوقع، تم اعتماد **كفاءة** كلية **للنظام** مقداره**(80%)** ، وذلك لتمثيل نسبة الطاقة القابلة للاستخدام بعد احتساب الفواقد المتوقعة في مكونات المنظومة المختلفة، مثل فواقد تنظيم الشحن، والعاكس، والأسلاك، إضافة إلى التأثيرات الحرارية والبيئية، دون أن يعكس هذا المعامل الأداء الواقعي الفعلي للنظام بعد التشغيل. وبناءً على ذلك، تم حساب الطاقة الكهربائية المنتجة يوميًا وفق العلاقة التالية:

- **الطاقة المنتجة يوميا** = سعة الالواح المركبة × الإشعاع الشمسي × كفاءة النظام

$$= 2.760\,kW \times 5h/day \times (\%80) = 11.040kWh/day)\ )$$

15-1-2 تحليل التكلفة التشغيلية السنوية للنظام

تم تقدير التكلفة التشغيلية السنوية للنظام الشمسي والتي تشمل أعمال التشغيل والصيانة الدورية بقيمة **200** دينار ليبي سنويًا. في المقابل بلغ إجمالي الطاقة الكهربائية المنتجة فعليًا من النظام خلال سنة التشغيل **4029** *kWh/year* وبناءً على ذلك، تم حساب تكلفة إنتاج الكيلوواط ساعة الواحدة وفق العلاقة التالية:

$$\text{تكلفة انتاج}\boldsymbol{kwh} = \frac{\text{التكلفة التشغيلية السنوية}}{\text{الطاقة الفعلية المنتجة سنوياً}}$$

$$\textbf{Dinar /kwh } 0.049 = \frac{200}{4029} = \boldsymbol{kwh}$$

تُظهر هذه النتيجة أن النظام يتمتع بتكلفة تشغيلية منخفضة لكل وحدة طاقة منتجة، مما يعكس جدواه الاقتصادية التشغيلية على المدى القصير والمتوسط.

15-1-3 تكلفة الطاقة المنتجة(LCOE)

لتقييم الجدوى الاقتصادية للنظام الشمسي المقترح تم استخدام مؤشر التكلفة السنوية للطاقة (Levelized Cost of Energy – LCOE) والذي يُعد من أهم المؤشرات الاقتصادية المعتمدة في دراسات أنظمة الطاقة المتجددة إذ يعبّر عن متوسط تكلفة إنتاج وحدة الطاقة الكهربائية (kwh) خلال العمر التشغيلي الافتراضي للنظام. يتم حساب هذا المؤشر من خلال قسمة إجمالي التكلفة الاستثمارية للنظام على إجمالي الطاقة الكهربائية المتوقعة إنتاجها طوال العمر الافتراضي، وفق العلاقة.

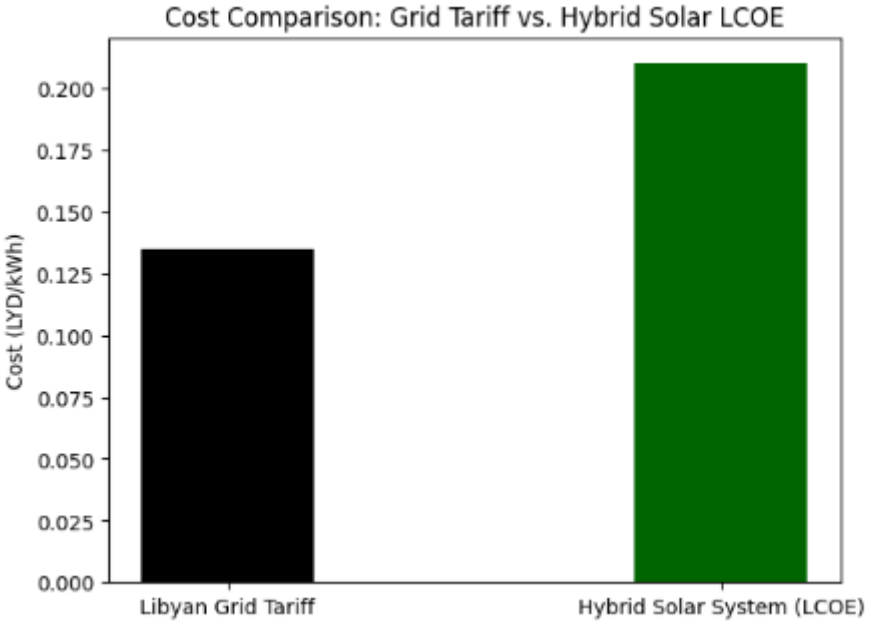
$$\text{تكلفة الطاقة المنتجة } \boldsymbol{LOCE} = \frac{\text{اجمالي تكلفة النظام}}{\text{اجمالي الطاقة المنتجة خلال العمر الأفتراضي}}$$

وبالاعتماد على نتائج حسابات إنتاج الطاقة، بلغ متوسط الإنتاج السنوي للنظام حوالي **4029 kwh/year.**
وبافتراض عمر تشغيلي افتراضي 20**سنة**، فإن إجمالي الطاقة الكهربائية المنتجة خلال فترة التشغيل يساوي:

$$E\ total = 4029 \times 20 = 80.580\ \text{kwh/20year}$$

ومع اعتبار أن التكلفة الأولية للنظام *تبلغ* ***13,000*** *دينار ليبي* وبإضافة تكاليف التشغيل والصيانة على مدى 20 سنة فإن تكلفة الطاقة المنتجة (***LCOE***) تُحسب كما يلي:

$$\text{تكلفة الطاقة المنتجة } LOCE = \frac{17000}{80,580} = 0.210\ \text{Dinar /kwh}$$



شكل (13): مقارنة التكلفة: تعرفة الشبكة مقابل تكلفة الطاقة الشمسية الهجينة

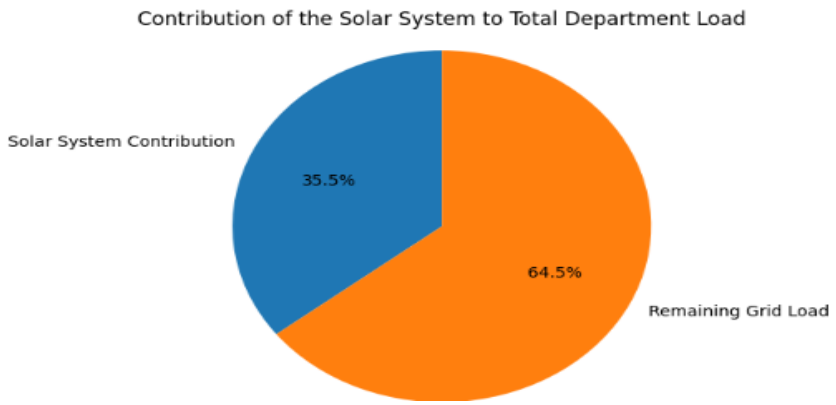
4-1-15 التغطية الكهربائية:

بناءً على حصر الأحمال الكهربائية ان إجمالي الاحمال المغداة من النظام في القسم تبلغ نحو *1600 W* وبما ان فترة الدوام اليومي للقسم *5 h/day* فإن الاستهلاك اليومي للطاقة يقدَّر بحوالي *8000 Wh/day* ولتعزيز موثوقية النظام وضمان مرونته في التعامل مع أي زيادات غير متوقعة في الأحمال تم اعتماد هامش أمان بنسبة 20% ليصبح الاستهلاك اليومي التصميمي قرابة *9600Wh/day* كما بينت النتائج الحسابية أن الطاقة المنتجة يوميًا من النظام المقترح تصل إلى نحو *11040 Wh/day* مما يؤكد قدرة النظام على تغذية الأحمال الكهربائية بالقسم بشكل كامل مع توفر هامش تشغيلي مناسب.

5-1-15 تقدير مساهمة النظام في تخفيف الحمل الكهربائي

يتمثل الأثر التقني الأساسي للنظام الشمسي في قدرته على تخفيف العبء عن الشبكة الكهربائية التقليدية. لتقدير حجم هذه المساهمة كميا، يتم مقارنة الطاقة المنتجة من النظام بإجمالي الطاقة الكلية المستهلكة بالقسم بناء على ان اجمالي استهلاك الطاقة اليومي لأحمال القسم (خلال 5 ساعات يوميا) حوالي *22.5 kwh/day* تم تصميم النظام الشمسي الهجين ليقوم بتغطية الاحمال ذات الأولوية والتي تبلغ قدرتها *8 kwh/day* لذا يمكن حساب نسبة مساهمة النظام وفقاً للمعادلة التالية:

$$\text{نسبة مساهمة النظام}(\%) = \frac{\text{الطاقة المنتجة من النظام}}{\text{اجمالي الطاقة المستهلكة}} = 100 \times \frac{8}{22.5} = 35.5\%$$



شكل (14): مساهمة النظام الشمسي في إجمالي حمل القسم.

15-1-6 تحليل معامل الأداء (Performance Ratio) للنظام الشمسي

يعتبر معامل الأداء (***PR***) أحد أهم المؤشرات لتقييم الكفاءة التشغيلية الفعلية لأنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية حيث يعكس نسبة الطاقة الكهربائية التي تم إنتاجها فعليا من النظام مقارنة بالإنتاج المرجعي النظري المتاح من الاشعاع الشمسي، آخذاً في الاعتبار جميع الخسائر التي تحدث أثناء التشغيل، مثل تأثير درجة الحرارة، وفقدان الطاقة في الأسلاك والمحول(Inverter) ، وتراكم الغبار على الألواح. إن تحليل معامل الأداء يمكّننا من مقارنة أداء النظام الفعلي مع إمكانياته النظرية، مما يساعد في تحديد أي مشاكل تشغيلية أو انخفاض غير متوقع في الإنتاجية، وبالتالي ضمان عمل النظام بأعلى كفاءة ممكنة على المدى الطويل. يُعبَّر عن معامل الأداء التصميمي بالعلاقة التالية:

$$\text{معامل الأداء}(\boldsymbol{PR}) = \frac{\text{الأنتاج المتوقع للطاقة}}{\text{الأنتاج النظري للطاقة}} \times \mathbf{100}$$

أولا: حساب الإنتاج المتوقع للطاقة (*FR*)

- يتمثل في الطاقة المنتجة يوميا وهي = ***(11.040****kWh/day* **)**

ثانيا: حساب الإنتاج النظري(المرجعي) للطاقة (*YR*)

- متوسط الإشعاع الشمسي اليومي الألواح 5 *kWh* /m²
- وباعتبار أن الإشعاع المرجعي في شروط الاختبار القياسية (STC) يساوي 1kW/m² ، فإن الإشعاع المرجعي للنظام يكون: 5 kWh/kWp/day
- القدرة الاسمية للنظام =2.760 *KWP*

الإنتاج المرجعي للنظام *YR* = 2.760 *KWP* ×5 *kWh*/ *KWP* /day = ***13.800*** **(*kWh/day*)**

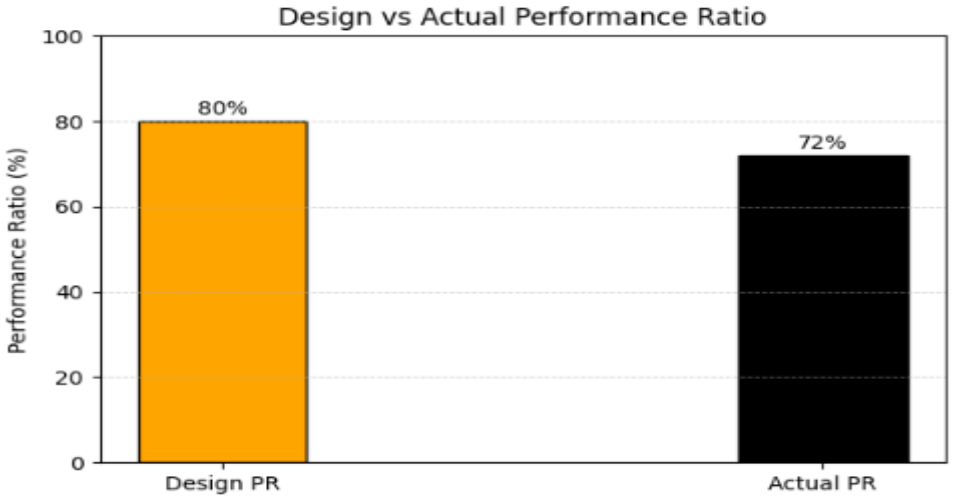
$$\text{معامل الأداء}(\boldsymbol{PR}) = 100 \times \frac{11040}{13800} = 80\%$$

تشير هذه النتيجة إلى أن معامل الأداء التصميمي للنظام يبلغ **80%** وهي قيمة منطقية تمثل درجة توافق الأداء المتوقع للنظام مع المورد الشمسي المتاح في مرحلة التصميم، مع الأخذ في الاعتبار الخسائر التشغيلية المعتادة لأنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية.

15-1-7 تأثير الخسائر الحتمية وحساب معامل الأداء الواقعي

للحصول على تقدير واقعي لأداء النظام يجب ان نأخذ في الاعتبار الخسائر الحتمية التي تحدث اثناء التشغيل الفعلي بناء على دراسة مكونات النظام والظروف البيئية تم تقدير الخسائر الإضافية التالية (خسائر حرارية +غبار 5% وخسائر العاكس 3% خسائر الكابلات 2% خسائر التقادم 1%) **هذه** الخسائر ستؤثر الإنتاج الفعلي للنظام لذلك سينخفض معامل الأداء عن القيمة التصميمية:معامل الاداء الواقعي(***PR***) = ***PR*****التصميمي** × **(1- اجمالي الخسائر) = 80% × (1- 10%) =72%** يعد تحليل الخسائر التشغيلية

نستنتج ان معامل الأداء الواقعي المتوقع للنظام 72% هذه النسبة تضع النظام ضمن فئة الأنظمة الكفاءة وتؤكد ان التصميم قادر على تحقيق أداء ممتاز وموثوق في الظروف الحقيقية.



شكل (15): نسبة التصميم إلى الأداء الفعلي.

16- الجدوى الاقتصادية للنظام الشمسي الهجين

1-16 التحليل الاقتصادي (التكاليف الأولية)

جدول رقم (10): يبين التكـلفة الأولية للنظـام.

رقم البند	بيان الاعمال	الكمية	السعر	الاجمالي
1	بطارية انيرن 250 امبير. ساعة D.C JEL	2	1725	3450
2	عاكس بقدرة 4200 وات 24 فولت	1	2490	2490
3	ألواح شمسية 460 وات	6	750	4500
4	صندوق مفاتيح الحماية (ألواح+ البطاريات)	1	650	650
5	سلك 25 مم2 نحاسي	4	30	120
6	سلك 4 مم2 نحاسي مخصص للنظام	60م	14	840
7	وصلات فردية MC4	2	35	70
8	قلاب 63 امبير	1	80	80
9	ترانك كوابل	1	70	70
10	تكلفة التركيب + اعمال كهربائية	-	750	750
	الإجمالي			13.020

2-16 تحليل استهلاك الطاقة قبل وبعد تركيب النظام الشمسي والتوفير الاقتصادي الناتج

1-2-16 الاستهلاك اليومي للقسم قبل تركيب النظام Ebefor

$$Ebefor = 4.5kwh \times 5v = 22.5kwh/day$$

2-2-16 تركيب النظام لتغذية جزء من الاحمال بقدرة (1600w) Esolar

$$Esolar = 1.6kw \times 5h/day = 8kwh/day$$

3-2-16 الاستهلاك اليومي بعد التركيب النظام (الاستهلاك المتبقي من الشبكة) Eafter

$$Eafter = 2.9kwh \times 5h/day = 14.5\ kwh/day$$

4-2-16 الطاقة التي يوفرها النظام اليومي Esaved

Esaved = Ebefor – Eaftr

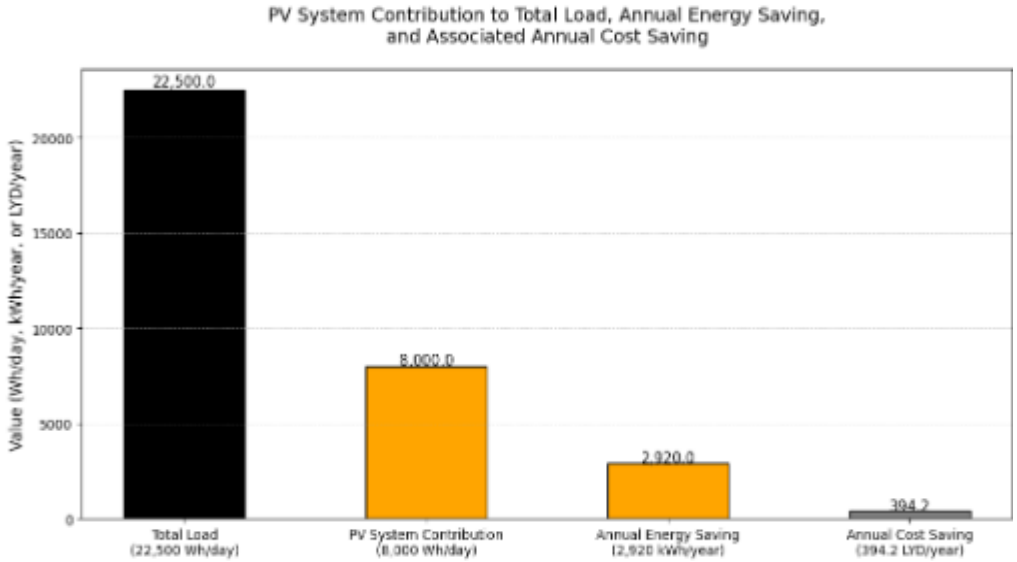
Esaved =22.5kwh/day - 14.5kwh/day = 8kwh/day

5-2-16 التوفير السنوي للطاقة E year

E year = 8 ×365 = 2920 kwh/year

6-2-16 حساب التوفير المالي السنوي بعد التركيب النظام بالقسم الكهرباء Cost saving

التوفير المالي السنوي = التوفير السنوي الطاقة × السعر الكهرباء = 2.920 × 0.135= 394.2 دينار. سنة (أي ما يقارب 400 دينار. سنة)



شكل (16): مساهمة النظام في إجمالي الحمل وتوفير الطاقة السنوي، والتوفير السنوي في التكاليف المرتبطة بذلك.

3-16 تحليل مؤشرات الأداء الاقتصادي للنظام الشمسي (ROI وPayback Period)

1-3-16 العائد على الاستثمار (ROI)

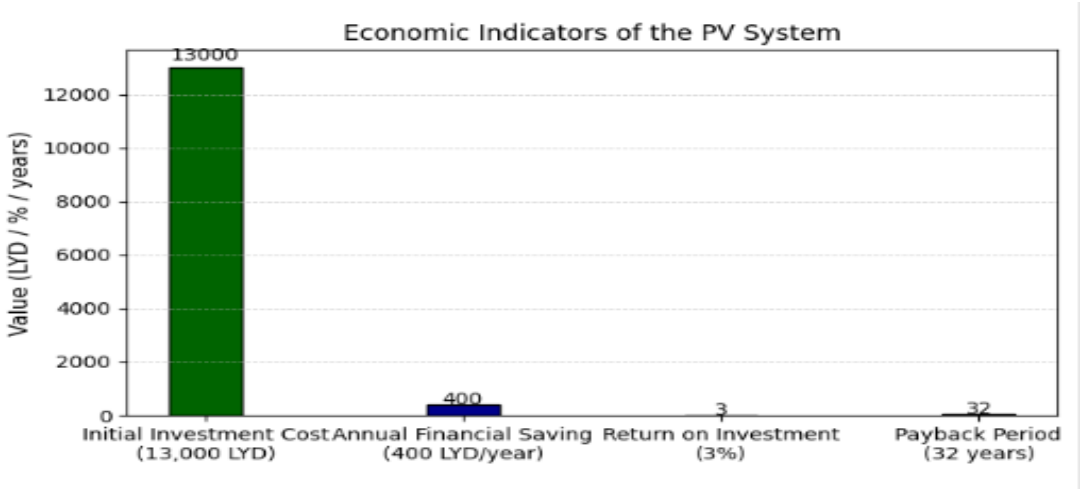
يُستخدم مؤشر العائد على الاستثمار (***ROI***) لتقييم الجدوى الاقتصادية للنظام الشمسي الهجين من خلال مقارنة العوائد المالية المتحققة من تشغيل النظام بالتكلفة الاستثمارية الإجمالية لتنفيذه. ويعكس هذا المؤشر قدرة النظام على استرداد تكاليفه وتحقيق وفورات اقتصادية على المدى المتوسط والطويل، خاصة في ظل ارتفاع تكاليف الطاقة التقليدية وعدم استقرار التغذية الكهربائية. وبناء على ذلك يحسب العائد على الاستثمار باستخدام العلاقة التالية:

$$\text{العائد على الاستثمار } \boldsymbol{ROI}(\%) = \frac{\text{اجمالي العائد السنوي}}{\text{التكلفة الاولية}}$$

$$= \mathbf{100} \times \frac{\mathbf{400}}{\mathbf{13000}} = \mathbf{3.1\%}$$ **النظام يسترد 3 % من تكلفته سنويا**

2-3-16 فترة استرداد رأس المال Payback Period

$$\text{فترة استرداد رأس المال} = \frac{\text{التكلفة الأولية}}{\text{اجمالي العائد السنوي}} = \frac{\mathbf{13000}\ \text{دينار}}{\mathbf{400}\ \text{دينار.سنة}} = \mathbf{32}\ \text{سنة}$$



شكل (17): المؤشرات الاقتصادية لنظام الطاقة الكهروضوئية.

جدول رقم (11): يبين تحليل استهلاك الطاقة والعوائد الاقتصادية للنظام الشمسي.

البند	القيمة
الاستهلاك اليومي قبل النظام	**22.5 *kwh/day***
الاستهلاك اليومي بعد النظام	**14.5 *kwh/day***
الطاقة المنتجة من النظام	**8 *kwh/day***
التوفير السنوي للطاقة	**2,920 *kwh/year***
التوفير المالي السنوي	**394.2 دينار ليبي**
تكلفة الطاقة المنتجة (LCOE)	**0. 21**
نسبة التخفيض في الطاقة	**35.5%**
العائد على الاستثمار(ROI)	**3.1%**

4-16 الأثر البيئي للنظام (الجدوى البيئية)

يقدم نظامنا الشمسي الهجين فائدة بيئية هامة تتمثل في الحد من الانبعاثات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري وبديلاً نظيفًا لا ينتج عنه أي انبعاثات أثناء تشغيله.

تعتمد اغلب محطات الكهرباء التقليدية في ليبيا على حرق الوقود الأحفوري مما يطلق غاز ثاني أكسيد الكربون (CO_2) الذي يساهم في تغير المناخ. ولتقدير هذا الأثر الإيجابي نعتمد على حقيقة أن كل (kWh) يتم إنتاجه من الشبكة الكهربائية في ليبيا يصاحبه انبعاث ما يقارب1.037 Kg Co2/KWh كيلوجرام من غاز ثاني أكسيد الكربون وذلك بسبب اعتماد محطات التوليد على الوقود الأحفوري .بناءً على ذلك يمكن حساب الأثر البيئي للنظام كما يلي:

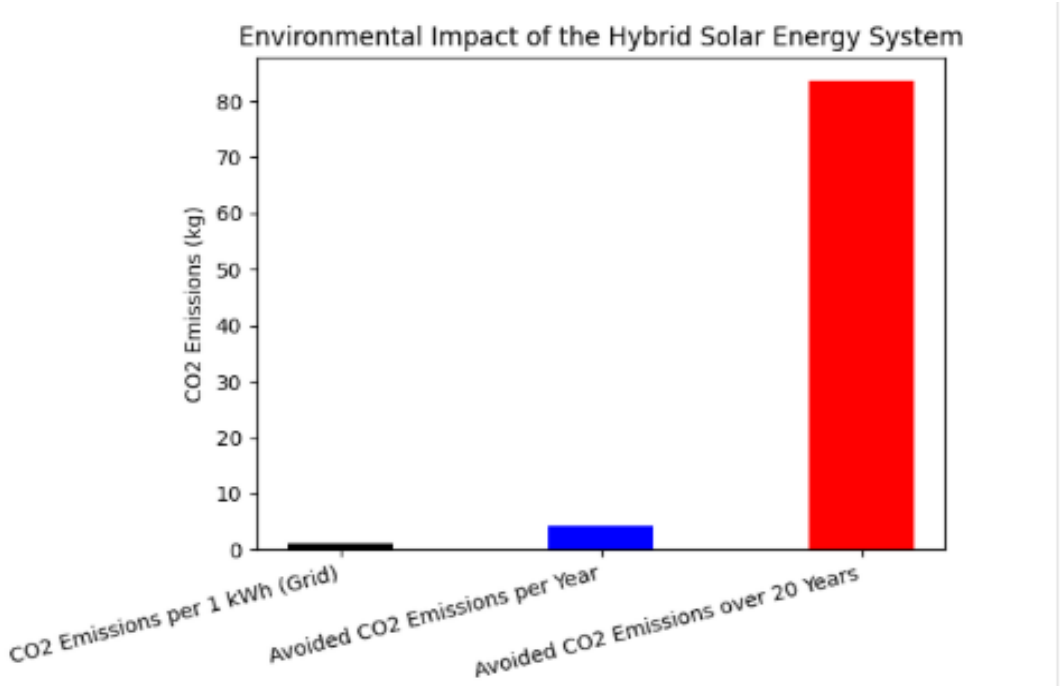
- **اجمالي الطاقة النظيفة المنتجة سنويًا**: 4.029 kwh/year. **(من التحليل الفني)**.
- **إجمالي الانبعاثات التي تم تجنبها سنوياً** = الطاقة المنتجة سنويا × كمية الانبعاثات لكل Kg Co2/KWh

4.1780 Kg Co2/ year = 1.037 Kg Co2/KWh × 4.029 KWh/year

هذا يعني ان النظام يمنع انبعاث حوالي 4.1780 كيلو جرام من ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي في السنة.

الأثر على المدى الطويل (20 سنة العمر الافتراضي للنظام)

4.1780 Kg Co2/ year. × 20 year =83.560 كيلو جرام من ثاني أكسيد الكربون خلال 20 سنة



شكل (18): التأثير البيئي لنظام الطاقة الشمسية الهجين.

17-النتائج:

1. **كفاءة الألواح الشمسية بعد التركيب :**أظهرت القياسات العملية أن الألواح الشمسية الستة بقدرة تصميمية 2760wأنتجت قدرة فعلية تصل إلى 2208wعند تشغيل الأحمال، أي ما يعادل كفاءة تشغيلية تقارب 80%، مما يعكس جودة التركيب وسلامة التوصيلات، مع الفاقد المتوقع الناتج عن مقاومة الأسلاك وفقد التحويل في العاكس.
2. **أداء العاكس المدمج بكفاءة عالية:** أثبت العاكس EVO بقدرة 4200 w /24 v قدرته على تحويل التيار المستمر من الألواح والبطاريات إلى تيار متردد بكفاءة بلغت حوالي 90% أثناء التشغيل على الأحمال، مع استقرار الجهد الخارج ضمن ±2% من القيمة الاسمية، مما يضمن تزويد الأحمال بالطاقة بشكل مستمر وآمن.
3. **فعالية التخزين في البطاريات:** أظهرت البطاريات بقدرة تخزينية كلية *wh* 12000 قدرة تشغيلية فعالة بلغت حوالي 80% من السعة النظرية أثناء التفريغ، مما يكفي لتشغيل الأحمال الأساسية للقسم لعدة ساعات. كما أن المنظم المدمج في العاكس أدار عملية الشحن والتفريغ بكفاءة عالية، مما يحافظ على عمر البطاريات ويضمن استمرارية تشغيل.
4. **توفير الطاقة الكهربائية:**بعد تركيب النظام الشمسي الهجين، انخفض الاستهلاك اليومي للطاقة الكهربائية من الشبكة التقليدية إلى *kw/day* 14.5 أي تقليل بنسبة 35.5٪ مقارنة بالاستهلاك السابق. يمثل هذا الانخفاض توفيرًا سنويًا يقدر بحوالي 2920 ك .و. س/سنة ، ما يعكس قدرة النظام على تغطية جزء كبير من احتياجات الطاقة اليومية للقسم.
5. **التوفير المالي والجدوى الاقتصادية :**يترجم تقليل الاستهلاك الكهربائي إلى توفير مالي سنوي يقدر بحوالي 400 دينار ليبي، مما يعكس جدوى استثمارية واضحة للنظام الشمسي الهجين .وعلى الرغم من نجاح النظام في تغطية 35.5٪ من احمال القسم الا ان التوفير المالي السنوي كان محدودا بسبب الدعم الحكومي لأسعار الكهرباء في ليبيا حيث بلغ سعر الكيلوواط/ساعة 135 درهم للمرافق العامة وفقآ لقرار حكومة الوحدة الوطنية رقم 92/لسنة 2023. الا أن الاستثمار في النظام الشمسي يعتبر خيارًا استراتيجيًا طويل المدى، خاصة في ظل احتمالية رفع الدعم الحكومي عن أسعار الكهرباء أو ارتفاع تكلفة الكيلوواط/ساعة مستقبلًا.
6. **كفاءة وإنتاجية النظام :**بلغت كفاءة النظام الكلية نحو 80%، وذلك بعد احتساب كفاءة مكونات النظام المختلفة، بما في ذلك العاكس، ومنظومة البطاريات، إضافةً إلى الفواقد الكهربائية في

الأسلاك والتوصيلات. ويُقدَّر متوسط الطاقة المنتجة يوميًا بحوالي 11.040 kWh/day، الأمر الذي يساهم بشكل فعّال في تقليل الاعتماد على الشبكة الكهربائية العامة، ويعزز من استمرارية التغذية الكهربائية داخل القسم، خصوصًا في حالات انخفاض أو انقطاع إمدادات الشبكة.

7. **تحليل الفارق بين تكلفة الطاقة الشمسية وتعرفة الشبكة العامة:** اظهرت النتائج أن تكلفة إنتاج الكهرباء من النظام الشمسي الهجين على مدى العمر الافتراضي للنظام (20 سنة) بلغت **دينار/ *0.210KWh*** متجاوزة تعرفة الشبكة العامة الليبية البالغة **دينار/ *0.135KWh*** يُعزى هذا الفارق إلى العوامل الهيكلية المرتبطة ببيئة التطبيق، وعلى رأسها الاعتماد على منظومات التخزين ذات الكلفة الاستثمارية المرتفعة، وارتفاع أسعار مكونات الأنظمة الشمسية في السوق المحلي، فضلًا عن الدعم الحكومي الكبير لتعرفة الكهرباء، الأمر الذي يجعل المقارنة المباشرة بين النظامين غير معبّرة بدقة عن الجدوى الاقتصادية الحقيقية للنظام الشمسي. ومع ذلك يوفر النظام الهجين استقلالية تشغيلية كبيرة ويشكل قيمة مضافة للمؤسسة، خاصة مع توقع ارتفاع أسعار الكهرباء في المستقبل، إضافةً إلى أن الشبكة العامة الحالية في ليبيا تعاني انقطاعات متكررة نتيجة ضعف البنية التحتية مما يجعل النظام خيارًا مستدامًا وموثوقًا لتغطية الأحمال الأساسية وتقليل الاعتماد على الشبكة.
8. **معامل الأداء: أظهرت** النتائج الفنية للمشروع أن معامل الأداء التصميمي للنظام الشمسي بلغ حوالي **80%**، وهي قيمة تعكس كفاءة النظام في مرحلة التصميم وتُعد ضمن الحدود المقبولة لأنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية. وبعد احتساب الخسائر التشغيلية الحتمية، انخفض معامل الأداء الواقعي للنظام إلى نحو **72%**. وتشير هذه النتيجة إلى أن أداء النظام الفعلي ما يزال ضمن النطاق التشغيلي الطبيعي، ويؤكد توافق الأداء الواقعي مع التوقعات التصميمية عند الأخذ في الاعتبار ظروف التشغيل الحقيقية للموقع.
9. **الأثر البيئي والاستدامة:** بين تحليل النتائج أن النظام الشمسي الهجين يحقق فائدة بيئية مهمة، حيث يؤدي إلى تقليل الاعتماد على الكهرباء المولدة من الوقود الأحفوري، وبالتالي خفض انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون. وبالاعتماد على معامل الانبعاثات للشبكة الكهربائية في ليبيا1.037 Kg Co_2 KWh فإن إنتاج النظام لطاقة نظيفة سنوية قدرها 4.029 Kwh/year يسهم في تجنّب انبعاث نحو 4.18 Kg من CO_2 سنويًا، مما يعكس دور النظام في الحد من الآثار البيئية السلبية وتعزيز الاستدامة البيئية.
10. **العائد على الاستثمار:** أظهرت نتائج التحليل الاقتصادي ان العائد على الاستثمار للنظام الشمسي يبلغ حوالي 3% سنويا مما يشير الى ان الجدوى الاقتصادية المباشرة للنظام محدودة نسبيا. ومع ذلك فان أهمية النظام لا تقتصر على العائد المالي فقط بل تمتد لتشمل تحسين موثوقية التغذية الكهربائية وتعزيز استمرارية الخدمة وتقليل الاعتماد على الشبكة الكهربائية التقليدية.
11. **الأثر العام على كفاءة استخدام الطاقة :** يُسهم النظام الشمسي المقترح في رفع كفاءة استخدام الطاقة من خلال الحد من الهدر في الطاقة وتعظيم الاستفادة من الطاقة الشمسية المتاحة، وذلك عبر تحسين آليات التحويل والتخزين والاستخدام النهائي للطاقة الكهربائية. كما يوفر هذا النظام نموذجًا تطبيقيًا قابلًا للتوسع لاعتماد الطاقة المتجددة داخل المبنى أو المؤسسة، الأمر الذي يدعم توجهات الاستدامة طويلة الأمد، ويعزز فرص التوسع المستقبلي في مشاريع الطاقة النظيفة، بما ينسجم مع استراتيجيات تحسين كفاءة الطاقة وتقليل الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية.
12. **المرونة التشغيلية واستقرار الإمداد الكهربائي:** يوفر النظام إمكانية التشغيل الهجين، حيث يمكن الاعتماد على الشبكة عند انخفاض إنتاج الطاقة الشمسية، ما يزيد من مرونة واستقرار الإمداد الكهربائي.يساهم هذا في تقليل مشاكل الانقطاعات المفاجئة وضمان توافر الطاقة للأحمال الحيوية في القسم بشكل مستمر.
13. **تعزيز الوعي والتعليم حول الطاقة المستدامة:** يعتبر النظام نموذجًا عمليًا لتطبيق الطاقة الشمسية، مما يزيد وعي الطلاب والعاملين بأهمية الطاقة المتجددة والحفاظ على البيئة.

18- التوصيات:

تحسين كفاءة الألواح الشمسية مستقبلاً :يُوصى بالاعتماد على برامج صيانة دورية تشمل تنظيف الألواح الشمسية ومراجعة زوايا الميل والاتجاه بشكل منتظم، وذلك للحفاظ على الكفاءة التشغيلية المرتفعة التي بلغت نحو 90% بعد التركيب، وتقليل الفواقد الناتجة عن الاتساخ والعوامل البيئية.

1- **تعزيز أداء منظومة التحويل (العاكس)** :نظرًا لارتفاع كفاءة العاكس واستقرار الجهد الخارج، يُوصى باعتماد هذا النوع من العواكس المدمجة في الأنظمة المشابهة، مع إجراء اختبارات أداء دورية تحت أحمال مختلفة لضمان استمرارية الكفاءة التشغيلية وحماية الأحمال الحساسة.

2- **تحسين إدارة منظومة التخزين** :توصي الدراسة بالتركيز على تطوير استراتيجيات الشحن والتفريغ للبطاريات، مثل استخدام أنماط تشغيل ذكية وتقنيات مراقبة الحالة الصحية للبطاريات (State of Health)، بهدف رفع الاستفادة الفعلية من السعة التخزينية وإطالة العمر التشغيلي للبطاريات.

3- **زيادة مساهمة الطاقة الشمسية في تغطية الأحمال**: نظرًا لأن النظام يغطي حوالي 35.5% من أحمال القسم، يُوصى بتوسعة المنظومة مستقبلًا من خلال زيادة القدرة المركبة للألواح أو تحسين إدارة الأحمال، بما يسهم في تقليل الاعتماد على الشبكة التقليدية وزيادة نسبة التوفير في الطاقة.

4- **تبني رؤية اقتصادية طويلة المدى** :بالرغم من محدودية التوفير المالي السنوي في ظل الدعم الحكومي لأسعار الكهرباء، توصي الدراسة بالنظر إلى النظام الشمسي الهجين كاستثمار استراتيجي طويل الأجل، خاصة في حال رفع الدعم أو ارتفاع تعرفة الكهرباء مستقبلاً، مما سيعزز الجدوى الاقتصادية للنظام بشكل ملحوظ.

5- **تحسين الكفاءة الكلية للنظام** :لتحقيق كفاءة أعلى من 80%، يُوصى بتقليل الفواقد في الأسلاك باستخدام مقاطع مناسبة، وتحسين توافق النظام، واعتماد معدات ذات كفاءات أعلى في التحويل والتخزين ضمن المشاريع المستقبلية.

6- **تعزيز الأثر البيئي الإيجابي**: توصي الدراسة بتوسيع تطبيق الأنظمة الشمسية الهجينة في المؤسسات التعليمية والخدمية، لما لها من دور واضح في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري، بما يدعم أهداف الاستدامة البيئية على المستوى المحلي

7- **تحسين الجدوى الاقتصادية عبر سياسات داعمة**: يُوصى بأن ترافق مشاريع الطاقة الشمسية سياسات تحفيزية، مثل الإعفاءات الضريبية أو برامج الدعم الجزئي للمعدات، بهدف رفع العائد على الاستثمار وتشجيع التوسع في استخدام الطاقة المتجددة

8- **توسيع نطاق التطبيق المؤسسي** تمثل نتائج هذا النظام قاعدة عملية يمكن الاستفادة منها لتطبيق أنظمة مشابهة في أقسام أخرى أو مبانٍ مجاورة، مع الاستفادة من البيانات التشغيلية الفعلية لتحسين التصميم المستقبلي وتقليل عدم اليقين في التقديرات النظرية.

9- **تعزيز موثوقية الإمداد الكهربائي**: توصي الدراسة بالاعتماد على الأنظمة الهجينة في المواقع التي تعاني من عدم استقرار الشبكة الكهربائية، لما توفره من مرونة تشغيلية عالية وقدرة على ضمان استمرارية التغذية للأحمال الحيوية.

10- **دعم الجانب التعليمي والبحثي** يُوصى باستخدام النظام كنموذج تطبيقي في العملية التعليمية والبحثية، من خلال إدماجه في المختبرات والمقررات الدراسية بما يسهم في رفع الوعي بالطاقة المستدامة وتشجيع البحث العلمي في مجال الطاقات المتجددة.

المراجع:

1. Hassan, Q., Algburi, S., Sameen, A. Z., & Salman, H. M. (2023). A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications.Results in Engineering.

2. Kedir, N., Nguyen, P. H. D., Pérez, C., Ponce, P., & Fayek, A. R. (2023). Systematic Literature Review on Fuzzy Hybrid Methods in Photovoltaic Solar Energy: Opportunities, Challenges, and Guidance for Implementation. Energies, 16(9), 3795

3. علي سليم أبونوار، احمد الطاهر زقلم، إسماعيل الطاهر زقلم ، (2025) دراسة تحليلية عن الطاقة الشمسية كطاقة متجددة وتأثيرها على التنمية المستدامة في ليبيا.African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences .

4. احمد السنوسي العربي، أريج أحمد تيتيوي ، لميس ادم سعد، (2025) .استراتيجية الطاقة الشمسية في ليبيا (الإمكانات – التخطيط – آليات التنفيذ).African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences

5. كمال محمد خوجه & فتحي حسن الامين .(2025) .تصميم ودراسة جدوى تركيب منظومة طاقة شمسية لمنزل في ليبيا باستخدام برنامج SAM. NJSAP .

6. بشارة أحمد، رحمة الزير، محمد أبوقيلة، سهيلة محمد، علي الخازمي، عبد السلام علي أحمد، إبراهيم أمبية، ياسر نصار، عبد القادر الشريف، محمد محمد خليل .(2023) .أطلس تقنيات الطاقة الشمسية وطاقة الرياح في ليبيا.NAJSP .

7. Saleh, U. A., Johar, M. A., Jumaat, S. A. B., Rejab, M. N., & Wan Jamaludin, W. A. (2021). Evaluation of a PV-TEG Hybrid System for Sustainable Energy Applications. International Journal of Renewable Energy Development.

8. Rahman, I., Suha, F., & Ahmed, A. (2024). Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy Based Microgrid System. arXiv preprint.

9. Sulaiman, M., & Al-Tamimi, A. (2022). Design and performance analysis of a standalone solar PV system in arid regions. Renewable Energy, 190, 123–137.

10. Chowdhury, S., Afrin, S., & Hossain, M. (2021). Techno-economic analysis of hybrid renewable energy systems for rural electrification. Energy Reports, 7, 6781– 6795.

11. Ibrahim, H., & Mahmoud, A. (2020). Performance evaluation of hybrid photovoltaic–diesel–battery systems in desert environments. Solar Energy, 204, 488–501.

12. Ahmed, K., & Ali, S. (2019). Impact of tilt angle and orientation on PV system energy yield: Case study of North Africa. Renewable Energy, 136, 1197–1208.

13. Al-Mamari, F., & Al-Salmi, M. (2020). Feasibility study of hybrid solar PV and battery systems in Libya. Journal of Renewable Energy, 2020, Article ID 4827152.

14. Mohamed, R., & El-Fadel, M. (2018). Environmental benefits of solar PV systems: Reduction of CO2 emissions and energy savings. Journal of Cleaner Production, 187, 664–675.

15. Saleh, A., & Hassan, R. (2017). Economic analysis of hybrid photovoltaic–diesel–battery power systems. Renewable Energy, 114, 1073–1084.

16. Khatib, T., Mohamed, A., & Sopian, K. (2016). A review of hybrid renewable energy systems for off-grid communities in Africa. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 58, 104–116.

17. Rehman, S., Al-Hadhrami, L., & Alam, M. (2015). Pioneering hybrid solar energy systems: Design, operation, and economic assessment. Energy Conversion and Management, 98, 304–315.

18. Adeyemi, A., & Oladipo, O. (2019). Sustainable hybrid energy systems: A review of optimization and performance assessment techniques. Renewable Energy, 134, 1048–1062.

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions, and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of **JIBAS** and/or the editor(s). **JIBAS** and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content.