



تصميم نظام هجين للطاقة المتجددة خارج الشبكة (طاقة شمسية/كتلة حيوية) لتلبية الاحتياجات الطاقوية للقطاع الزراعي في ليبيا.

سعيد عبد الوهاب¹، ياسر ف نصار²، مصباح سالم³، مصطفى النظيف¹

¹كلية الهندسة، جامعة فزان، ليبيا

²قسم الهندسة الميكانيكية والطاقة المتجددة، كلية الهندسة، جامعة وادي الشاطئ، ليبيا

³الأكاديمية الليبية، سبها، ليبيا

الملخص

يستعرض هذا البحث أداء منظومة طاقة هجينة (HRES) تهدف إلى تعزيز استدامة الطاقة، وتحقيق الاكتفاء الذاتي في القطاع الزراعي في ليبيا. يتكوّن النظام الهجين المقترح من منظومة خلايا شمسية بقدرة 8 كيلوواط، وهاضم حيوي بسعة 15 مترًا مكعبًا، إضافةً إلى مولّد كهربائي بقدرة 12 كيلوواط. أظهرت نتائج الدراسة أن النظام المقترح قادر على تغطية 100% من الاستهلاك السنوي للمزرعة من الطاقة الكهربائية 56 ميغاواط-ساعة، والطاقة الحرارية 27.5 ميغاواط-ساعة، ووقود التشغيل 2700 لتر من الديزل، وغاز الطهي 325 كيلوغرامًا. وبلغت التكلفة الإجمالية للنظام نحو 50,000 دولار أمريكي، في حين قُدرت التكلفة السنوية للطاقة الكهربائية بحوالي 0.038 دولار لكل كيلوواط-ساعة، وللطاقة الحرارية بنحو 0.042 دولار لكل كيلوواط-ساعة، وغاز الميثان بحوالي 0.16 دولار لكل كيلوغرام، مع فترة استرداد لرأس المال تُقدّر بحوالي 3.9 سنوات. كما بلغت كمية CO₂ التي جرى تجنّب انبعاثها سنويًا نحو 78.5 طنًا، بما يعادل قيمة اقتصادية تُقدّر بحوالي 5,497 دولارًا أمريكيًا، وهو ما يبرز الدور الفعال لمنظومات الطاقة المتجددة الهجينة في الحد من الانبعاثات الكربونية، وتعزيز التنمية الزراعية المستدامة، ودعم استراتيجية الدولة الليبية في التحول نحو مصادر الطاقة المتجددة والنظيفة.

الكلمات المفتاحية: منظومات الطاقة المتجددة الهجينة؛ الطاقة الشمسية الكهروضوئية؛ طاقة الكتلة الحيوية؛ الاستدامة الزراعية؛ ليبيا.

Design of an Off-Grid Hybrid Renewable Energy System (Solar Photovoltaic and Biomass) to Meet the Energy Requirements of the Agricultural Sector in Libya

S. Abdulwahab¹ and Y. Nassar² and Mesbah Salem³ and Mostafa A. Alnadhif¹

¹Faculty of Engineering, University of Fezzan, Libya

² Mechanical and Renewable Energy Eng. Dept., Engineering Faculty, Wadi Alshatti University, Libya

³The Libyan Academic, Sebha, Libya,

Abstract:

This study examines the performance of a Hybrid Renewable Energy System (HRES) aimed at enhancing energy sustainability and achieving self-sufficiency in

Libya's agricultural sector. The proposed hybrid system consists of an 8-kW photovoltaic (PV) array, a 15 m³ biogas digester, and a 12-kW electric generator. The results indicate that the system is capable of covering 100% of the farm's annual energy demand, including electrical energy (56 MWh), thermal energy (27.5 MWh), operational fuel (2,700 liters of diesel), and cooking gas (325 kg). The total system cost is approximately \$50,000, with the levelized cost of electricity estimated at about \$0.038/kWh, thermal energy at \$0.042/kWh, and methane gas at around \$0.16/kg, while the capital payback period is estimated at approximately 3.9 years. Furthermore, the system prevents approximately 78.5 tons of CO₂ emissions annually, corresponding to an economic value of about \$5,497. These results underscore the significant role of hybrid renewable energy systems in reducing carbon emissions, enhancing sustainable agricultural development, and supporting Libya's national strategy for transitioning toward renewable and clean energy sources

Keywords: Hybrid renewable energy systems (HRES), solar photovoltaics (PV), biomass energy, agricultural sustainability, Libya.

1-المقدمة

تواجه الأنظمة الزراعية الحديثة تحديات بيئية واقتصادية متزايدة نتيجة الاعتماد على مصادر الطاقة الأحفورية، التي باتت تُشكل عبئاً ثقیلاً على البيئة والاقتصاد معاً [1]. إذ يُسهم القطاع الزراعي بنحو 10-12% من إجمالي انبعاثات الغازات الدفيئة على المستوى العالمي، وذلك بسبب استخدام الوقود الأحفوري في تشغيل المعدات الزراعية وأنظمة الري والنقل، فضلاً عن الانبعاثات الناجمة عن سوء إدارة المخلفات الحيوانية والنباتية [2] [3]. وتشير التقديرات الحديثة إلى أن استهلاك الطاقة في قطاع الري وحده يبلغ نحو 800 تيراواط-ساعة سنوياً، وهو ما يؤدي إلى انبعاث أكثر من 384 مليون طن (CO₂) [4] [5] [6]. وتُبرز هذه المؤشرات بوضوح الأثر البيئي الكبير المرتبط بالأنشطة الزراعية التقليدية. وقد تفاقم حدة هذه التحديات خلال السنوات الأخيرة نتيجة الأزمات الدولية المتلاحقة التي أثرت بصورة مباشرة في استقرار إمدادات الطاقة والغذاء. إذ أدت الحرب في أوكرانيا إلى اضطراب الأسواق العالمية وارتفاع غير مسبوق في أسعار الوقود الأحفوري، الأمر الذي انعكس سلباً على تكاليف الإنتاج الزراعي وأسعار السلع الغذائية، وأسهم في تراجع الإنتاجية الزراعية في العديد من الدول النامية [7] [8]. ولا يقتصر الاعتماد المفرط على الوقود الأحفوري على زيادة الانبعاثات الكربونية فقط، بل يُمثل في الوقت ذاته تهديداً مباشراً للأمن الغذائي والطاقي، خاصة في الدول المعتمدة على استيراد الطاقة لتشغيل القطاع الزراعي [9]. أما في ليبيا، فتتضاعف هذه التحديات بفعل الظروف الاقتصادية والسياسية الخاصة التي تمر بها البلاد. ولمواجهة ذلك، قدّم عدد من الباحثين المحليين حلولاً علمية وعملية ناجحة تهدف إلى الحد من الأضرار البيئية والتخفيف من حدة أزمة الطاقة التي تعاني منها البلاد [10] [11] [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18]. ويُقدّر استهلاك قطاع الزراعة في ليبيا بنحو 6 آلاف طن سنوياً من المنتجات النفطية، إضافةً إلى ما يقارب 2,142 جيجاوات ساعة من الطاقة الكهربائية، وهو ما يُمثل نحو 6.8% من إجمالي إنتاج الكهرباء على المستوى الوطني. كما يُظهر تحليل الانبعاثات أن المخلفات الحيوانية وحدها تُسهم في إنتاج ما يقارب 10,479 طن من مكافئ CO₂ سنوياً [19]. ما يبرز الحاجة إلى حلول مستدامة في هذا القطاع [20]. وفي إطار الاستدامة البيئية، تُقدّر الانبعاثات الناتجة عن استخدام الوقود الأحفوري في الأنشطة الزراعية بنحو 1.82 مليون طن CO₂ سنوياً. وفي المقابل، تُهدر نسبة كبيرة من المخلفات الزراعية والحيوانية دون استغلال، على الرغم من قيمتها الاقتصادية العالية؛ إذ يمكن إعادة تدويرها بالكامل تقريباً (بنسبة تصل

إلى 100%) لإنتاج الغاز الحيوي والسماد العضوي من خلال تخمير المخلفات الزراعية والحيوانية في الهاضمات الحيوية. كما يمكن خفض الانبعاثات الكربونية بما يقارب 50% عند الاعتماد على أنظمة طاقة صديقة للبيئة [21] [22]. وقد تناولت العديد من الدراسات، سواء على المستويين الدولي والمحلي، هذه المشكلة، وطرحت سياساتٍ واستراتيجياتٍ واضحة للتحويل نحو أنظمة طاقة متجددة، صديقة للبيئة، وأكثر استدامة [23] [24].

في ليبيا، أشار Mohamed et al إلى أن المخلفات الزراعية والحيوانية يمكن أن تُولّد نحو $10^6 \times 480$ متر مكعب من غاز الميثان سنويًا، وهو ما يُسهم في خفض الانبعاثات الكربونية بمقدار 1.25 مليون طن من مكافئ CO₂ في السنة، ويُعزّز في الوقت ذاته استغلال الكتلة الحيوية كمصدر محلي متجدد للطاقة [25]. كما بيّنت دراسة Rajab et al أن تكلفة الكهرباء المنتجة من الأنظمة الشمسية في المزارع تتراوح بين 0.065-0.089 دولار لكل كيلوواط-ساعة، مع فترات استرداد تتراوح بين 5-6 سنوات [26]. واقترح Nassar et al نظامًا هجينًا مدمجًا يجمع بين المركز الشمسي ذو الطبق المكافئ والطاقة الحيوية؛ حيث أظهر النموذج المقترح قدرة توليد بلغت 1.23 ميغاواط، وإنتاجًا سنويًا قدره 5.67 غيغاواط-ساعة، بتكلفة كهرباء بلغت 0.075 دولار لكل كيلوواط-ساعة، وبلغت فترة الاسترداد 20.04 سنة، مع تحقيق خفض في انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنحو 7.8 ألف طن سنويًا [21].

في تونس، قدّم Jemili et al دراسة هدفت إلى تحسين استغلال المخلفات الزراعية لإنتاج الكهرباء، حيث تم تطوير نموذج أمثل لتخطيط سلسلة الكتلة الحيوية يشمل مراحل الجمع والنقل والتحويل، وأظهرت النتائج أن التكلفة المستوية للكهرباء (LCOE) تراوحت بين 0.071-0.083 دولار لكل كيلوواط-ساعة تبعًا لموقع المعالجة وكفاءة التحويل، مع طاقة إنتاجية وصلت إلى 42 غيغاواط-ساعة في السنة، أي ما يعادل نحو 5.2 % من الطلب الوطني على الكهرباء. كما بيّنت الدراسة أن المخلفات الجافة تحتوي على طاقة حرارية تتراوح بين 14-17 ميغا جول لكل كيلوغرام، مما يبرز الجدوى التقنية والاقتصادية لاستخدام هذه الموارد في إنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية مطبوعًا [27]. وفي السياق نفسه، أكد Banacloche et al من خلال دراسة ميدانية لتقنية هجينة تجمع بين المركبات الشمسية والكتلة الحيوية بسعة 25 ميغاواط حراري، أن الدمج بين النظامين يرفع كفاءة الاسترداد الحراري بنسبة 21 % ويخفض الانبعاثات الكربونية بنحو 45 % مقارنة بالتشغيل المنفصل، مع تكلفة كهرباء تقديرية تصل إلى 0.069 دولار لكل كيلوواط-ساعة ضمن ظروف التشغيل المحلية [28]. كما درس Mebarki et al إمكانية استغلال مخلفات التمور لإنتاج $10^6 \times 24$ متر مكعب من غاز الميثان سنويًا، بما يعادل 120 غيغاواط-ساعة من الكهرباء، مع تحقيق خفض في الانبعاثات بنسبة 52 % وتكلفة كهرباء بلغت 0.073 دولار لكل كيلوواط-ساعة [29].

في مصر، قدّم Abdelhady et al تطبيقًا تقنيًا لتصميم شبكة من محطات طاقة الكتلة الحيوية الزراعية، استنادًا إلى تقدير الموارد المتاحة من المخلفات الزراعية وتوزيعها الجغرافي؛ حيث أظهرت النتائج أن الموارد الزراعية يمكن أن توفر نحو 10 مليون طن/سنة من المخلفات الجافة القابلة للاستغلال، مما يتيح إنتاجًا كهربائيًا يُقدّر بحوالي 11 تيراواط-ساعة/سنة، وهو ما يمثل نحو 5.5 % من إجمالي الإنتاج الكهربائي الوطني عام 2019 كما أشارت الدراسة إلى أن متوسط التكلفة المستوية للطاقة لمحطات الكتلة الحيوية يبلغ حوالي 6.77 سنت أمريكي لكل كيلوواط-ساعة، مقارنةً بـ 8.5 سنت أمريكي لكل كيلوواط-ساعة للكهرباء المنتجة من الوقود الأحفوري، وأن التصميم الأمثل يقترح إنشاء شبكة تضم 5 محطات بقدرة 460 ميغاواط لكل محطة، مما يؤكد إمكانات الكتلة الحيوية كخيار مجدٍ اقتصاديًا وبيئيًا لدعم توليد الكهرباء من مصادر متجددة. وفي

السياق نفسه [30]. أظهر Abdelrahman et al أن مخلفات قصب السكر يمكن أن تنتج نحو 62×10^6 متر مكعب من غاز الميثان سنويًا، وهو ما يعادل 310 غيغاواط-ساعة من الكهرباء، مع تحقيق خفض في الانبعاثات بنسبة 48 % وتكلفة كهرباء بلغت 0.071 دولار لكل كيلوواط-ساعة [31]. كما قدم Mohamed et al دراسة تطبيقية في مدينة الغردقة لتصميم نظام هجين يجمع بين الطاقة الشمسية الكهروضوئية والكتلة الحيوية والتخزين بالبطاريات، حيث أظهرت النتائج أن النظام يغطي الأحمال الكهربائية بنسبة 69 % من الكتلة الحيوية و25 % من الطاقة الشمسية و6 % من الشبكة، كما بينت الدراسة قدرة النظام على خفض الانبعاثات من 231,578 كيلوغرام من ثاني أكسيد الكربون سنويًا في حالة الاعتماد على مولدات الديزل إلى 12,196 كيلوغرام CO₂ سنويًا، مؤكدة أن دمج الطاقة الشمسية مع الكتلة الحيوية يحقق أداءً اقتصاديًا وبيئيًا أفضل مقارنة بالاعتماد الكامل على الديزل [32].

في الجزائر، قدم Kermadi and Berkouk دراسة تقنية-اقتصادية لتقييم إمكانية تغطية الأحمال الكهربائية للمزارع في جنوب-شرق الجزائر باستخدام أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية المستقلة. وركزت الدراسة على تصميم منظومة كهروضوئية لتغذية الأحمال الزراعية، بالاعتماد على نمذجة النظام وتحليله باستخدام برنامج HOMER. وقد تم اقتراح نظام شمسي بقدرة مركبة تتراوح بين 20-40 كيلوواط، قادر على تلبية الطلب الكهربائي لمزرعة نموذجية بصورة موثوقة على مدار العام. وأظهرت النتائج أن التكلفة المستوية للكهرباء للنظام الشمسي تتراوح بين 0.09-0.14 دولار أمريكي لكل كيلوواط-ساعة، إضافة إلى تحقيق خفض ملحوظ في استهلاك الوقود الأحفوري وانبعاثات CO₂. وتؤكد هذه النتائج الجدوى التقنية والاقتصادية لاعتماد الطاقة الشمسية في دعم القطاع الزراعي في المناطق الصحراوية الجزائرية البعيدة عن الشبكة الكهربائية [33].

في فلسطين، قدم Abu-Jray et al دراسة حول تصميم شبكة مصغرة في إحدى المناطق النائية بقطاع غزة تعمل بالطاقة الشمسية ومخلفات معاصر زيت الزيتون، بهدف تعزيز الاعتماد على مصادر الطاقة المحلية وتقليل الانبعاثات. يتضمن النظام المقترح ألواحًا شمسية بقدرة 250 كيلوواط مع وحدة توليد من الكتلة الحيوية بقدرة 60 كيلوواط، بإجمالي إنتاج سنوي قدره 512 ميغاواط-ساعة لتغطية حمل كهربائي يُقدَّر بنحو 485 ميغاواط-ساعة سنويًا. وبلغت التكلفة المستوية للطاقة 0.081 دولار لكل كيلوواط-ساعة، مع تقليل انبعاثات CO₂ بحوالي 6.4 طن سنويًا، مما يوضح الجدوى البيئية والاقتصادية لاعتماد هذا النوع من الأنظمة في المناطق الحضرية [34]. قدم Nassar et al دراسة حول إمكانات الطاقة المتجددة، مع التركيز على مقترحات تحقيق الاستدامة من خلال استغلال موارد الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والكتلة الحيوية، حيث أوضحت النتائج أن متوسط الإشعاع الشمسي السنوي في فلسطين يصل إلى 5.4 كيلوواط-ساعة لكل متر مربع في اليوم، مما يتيح إنتاجًا يتجاوز 1.8 غيغاواط-ساعة سنويًا عند استخدام أنظمة شمسية بقدرة 500 كيلوواط. كما بينت الدراسة أن تطبيق استراتيجيات الطاقة المتجددة يمكن أن يخفض انبعاثات CO₂ بنحو 18 ألف طن سنويًا، ويغطي أكثر من 20 % من الطلب الوطني على الكهرباء بحلول عام 2030، مما يعزز أمن الطاقة ويقلل الاعتماد على الوقود المستورد [35]. كما قدم Al-Saidi et al دراسة لتقييم تقنيات تحويل النفايات إلى طاقة لتعويض النقص في إمدادات الكهرباء بقطاع غزة، حيث أظهر النموذج أن استغلال النفايات الصلبة البلدية بطاقة معالجة تبلغ 350 طنًا يوميًا يمكن أن ينتج نحو 28 غيغاواط-ساعة سنويًا من الكهرباء. وبلغت التكلفة المستوية للطاقة 0.089 دولار لكل كيلوواط-ساعة، مع تقليل انبعاثات الكربون بحوالي 9.2 ألف طن سنويًا، مما يؤكد الجدوى الاقتصادية والبيئية لتبني تكنولوجيا تحويل النفايات إلى طاقة في دعم منظومة الكهرباء في فلسطين [36].

في الهند، استعرض Kumar et al نموذجًا تحليليًا لنظام هجين يدمج الطاقة الشمسية والكتلة الحيوية والديزل لتزويد قرية ريفية في شرق البلاد بقدرة 850 كيلوواط، حيث أظهرت النتائج أن النظام المقترح يحقق تكلفة كهرباء منخفضة بلغت 0.068 دولار لكل كيلوواط-ساعة، مع فترة استرداد قدرها 6.2 سنوات، إلى جانب خفض انبعاثات CO2 بنسبة 57% مقارنة بالتشغيل التقليدي المعتمد على الديزل [37]. وفي البرازيل، قَدّم Silva et al دراسة لمنظومة هجينة تعتمد على الخلايا الشمسية والكتلة الحيوية بقدرة 45 كيلوواط-ذروة، حيث حققت إنتاجًا سنويًا قدره 152 ميغاواط-ساعة بتكلفة 0.082 دولار لكل كيلوواط-ساعة، مع خفض لانبعاثات CO2 بنحو 98 طنًا سنويًا [38]. وفي الولايات المتحدة، طَوّر Lazarus et al نظامًا هجينًا بقدرة 55 كيلوواط من الخلايا الشمسية و75 كيلوواط من الكتلة الحيوية، مسجلًا إنتاجًا سنويًا بلغ 410 ميغاواط-ساعة وفترة استرداد قدرها 7.4 سنوات، مع خفض في الانبعاثات تجاوز 350 طنًا سنويًا [39] في الصين، قَدّم Zhang et al منظومة تجمع بين الخلايا الشمسية والكتلة الحيوية بقدرة 200 كيلوواط استطاعت توليد 1.05 غيغاواط-ساعة سنويًا، بتكلفة منخفضة بلغت 0.067 دولار لكل كيلوواط-ساعة، مع تقليل الانبعاثات بأكثر من 500 طن سنويًا [40]. وفي ألمانيا، قَدّم Schlattmann et al محطة هجينة بقدرة 750 كيلوواط حققت إنتاجًا سنويًا بلغ 3.9 غيغاواط-ساعة، مع خفض في الانبعاثات يقارب 1200 طن CO2 سنويًا، مؤكدة الجدوى الاقتصادية والبيئية للأنظمة الهجينة مقارنة بالأنظمة التقليدية [41]. وفي فرنسا، قَدّم Collet et al تقييمًا تقنيًا لمحطات البيوغاز الزراعية مع تطيل تكاملها الطاقى وتحسين تشغيل وحدات التوليد المشترك للكهرباء والحرارة، حيث اعتمدت الدراسة على محطات بقدرات كهربائية نموذجية تتراوح بين 150-500 كيلوواط كهربائي، وبكفاءة كهربائية تقارب 35-40% وكفاءة كلية تصل إلى نحو 80%، وأظهرت النتائج أن تحسين إدارة الطاقة واستغلال الحرارة المرافقة يسهم في خفض انبعاثات CO2 بنسبة تقارب 30-60% مقارنة بالأنظمة المرجعية المعتمدة على الوقود الأحفوري، مع تحقيق توازن اقتصادي أفضل عند دمج مصادر متجددة مساندة [42]. وفي بريطانيا، تناول Styles et al التقييم الاقتصادي والبيئي لمحطات البيوغاز الزراعية مع دراسة دور تكاملها مع مصادر متجددة مثل الطاقة الشمسية في تحسين الأداء، حيث شملت الدراسة مزارع بقدرات كهربائية تتراوح بين 100-500 كيلوواط كهربائي، وأظهرت النتائج أن إنتاج الكهرباء من البيوغاز يحقق خفضًا في الانبعاثات الكربونية يصل إلى نحو 35-70% من مكافئ CO2 مقارنة بالكهرباء التقليدية، مع فترات استرداد اقتصادية تراوحت بين 6-10 سنوات تبعًا لحجم المزرعة والدعم المتاح، مؤكدة أن نظم البيوغاز الزراعية تمثل خيارًا فعالًا لتعزيز استدامة الطاقة في المناطق الريفية البريطانية عند دمجها ضمن منظومات طاقة هجينة [43]. وعلى الرغم من تعدد الدراسات التي تناولت منظومات الطاقة الهجينة، فإن التطبيقات العملية الموجهة للقطاع الزراعي، المعتمدة على الموارد المحلية لتحقيق الاكتفاء الذاتي، لا تزال محدودة. وتسهم هذه الدراسة في معالجة هذه الفجوة من خلال تطوير نموذج متكامل للطاقة المتجددة في القطاع الزراعي.

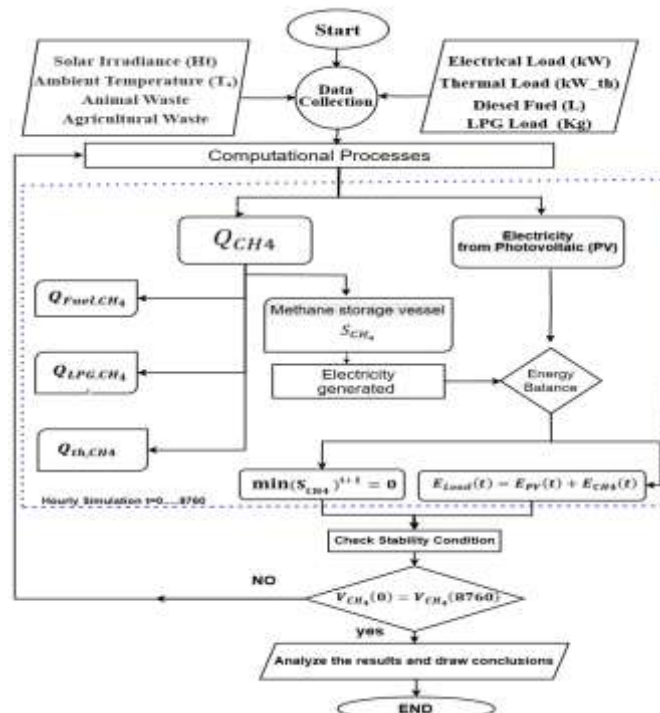
- مساهمة البحث العلمية

يسهم هذا البحث في تطوير نموذج متكامل لمنظومة طاقة هجينة (HRES) مخصصة لتلبية احتياجات الطاقة في القطاع الزراعي، بالاعتماد على الموارد المحلية المتمثلة في الطاقة الشمسية والمخلفات الزراعية والحيوانية، ويتميز هذا العمل بعدة جوانب علمية وتطبيقية، من أبرزها:

- دمج تقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية مع تقنيات الكتلة الحيوية لإنتاج الكهرباء والحرارة والوقود ضمن منظومة طاقة هجينة متكاملة.

- محاكاة الأداء الفعلي للمنظومة المقترحة في ظل ظروف مناخية وتشغيلية واقعية، بما يعكس السلوك الحقيقي للنظام.
 - تقديم تصميم هندسي متكامل وقابل للتطبيق العملي في المزارع، يساهم في تعزيز استقلالية الطاقة وتحسين الأداء البيئي.
 - دعم الاستدامة الزراعية من خلال تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري وخفض الانبعاثات الكربونية.
- هذا وقُسم ما تبقى من البحث إلى الأجزاء التالية، استعرض الجزء الثاني منهجية البحث، والذي تم فيه عرض وجمع البيانات الميدانية، وخطوات التصميم، والتحليل الطاقة والاقتصادي والبيئي، وتطوير معادلات اتزان الطاقة، وحساب مؤشرات الجدوى الاقتصادية والانبعاثات. بينما مثلت النتائج المتحصل عليها في الجزء الثالث الذي اشتمل على عرض نتائج تحليل الأداء الحراري والكهربائي وإنتاج الغاز الحيوي للنظام، وعرضت الاستنتاجات والتوصيات في الجزء الرابع، وختمت الدراسة بقائمة المراجع التي استخدمت في الدراسة.
- 2- منهجية البحث

استندت الدراسة في تحليل وتصميم المنظومة المقترحة إلى بيانات ميدانية حقيقية ومتسلسلة زمنياً، جُمعت من عدد من المزارع في منطقة الدراسة، وشملت بيانات الأحمال الكهربائية والحرارية للمزرعة، واستهلاك الوقود، وكميات المخلفات الزراعية والحيوانية، إضافةً إلى الظروف المناخية المطية. وقد جرى تحليل هذه البيانات ومعالجتها، إلى جانب محاكاة أداء المنظومة المقترحة في ظل الظروف المناخية والتشغيلية الفعلية، بما يضمن تمثيلاً واقعياً لسلوك النظام. يوضح الشكل (1) المخطط الانسيابي لألية عمل منظومة الطاقة الهجينة المقترحة وطريقة إجراء الحسابات خلال سنة تشغيلية كاملة على أساس ساعي. تبدأ العملية بجمع البيانات المناخية والأحمال الكهربائية والحرارية وبيانات المخلفات، ثم تُستخدم هذه البيانات لحساب إنتاج الكهرباء من الألواح الشمسية وكميات غاز الميثان الناتجة من الهضم الحيوي. بعد ذلك يتم توزيع الطاقة المنتجة لتغطية الأحمال المختلفة مع الأخذ في الاعتبار تخزين غاز الميثان وموازنة الطاقة الكهربائية. وفي نهاية فترة المحاكاة، يتم التحقق من استقرار المنظومة، ثم تحليل النتائج واستخلاص الاستنتاجات النهائية.



الشكل 1: المخطط الانسيابي لمنهجية الدراسة

1.2-الموقع الجغرافي لمنطقة الدراسة:

تُعدّ ليبيا من الدول ذات الامتداد الجغرافي الواسع والموقع الاستراتيجي في شمال إفريقيا، إذ تقع بين خطي عرض 19° و 33° شمالاً وخطي طول 9° و 25° شرقاً، وهو ما يضعها ضمن ما يُعرف بمنطقة الحزام الشمسي، كما تطل على البحر الأبيض المتوسط من الجهة الشمالية بساحل يمتد لأكثر من 1900 كيلومتر [43]. وتتسم ليبيا بمناخ صحراوي جاف في معظم مناطقها، يقابله مناخ متوسطي معتدل في الشمال الساحلي، حيث تتراوح درجات الحرارة السنوية بين نحو 8 درجات مئوية شتاءً و 45 درجة مئوية صيفاً، بينما يبلغ متوسط الرطوبة النسبية قرابة 60 % في المناطق الساحلية وينخفض إلى نحو 10 % في المناطق الجنوبية الصحراوية [44]. وتُظهر البيانات المناخية أن ليبيا تمتلك إمكانات كبيرة في مجال الطاقة المتجددة، ولا سيما الطاقة الشمسية، إذ يتراوح متوسط الإشعاع الشمسي الأفقي الكلي (GHI) بين 2500 و 7200 واط-ساعة لكل متر مربع في اليوم، ما يجعلها من أغنى دول العالم من حيث وفرة الإشعاع الشمسي وإمكانية استغلاله في توليد الطاقة الكهربائية بطرق اقتصادية وفعالة [45]. ويُعدّ النشاط الزراعي في ليبيا محدوداً نسبياً، ويتمركز أساساً في الشريط الساحلي الضيق، إضافةً إلى مناطق الواحات في الداخل، وذلك نتيجة للطبيعة الصحراوية السائدة في البلاد. وتُقدّر مساحة الأراضي الزراعية بنحو 2 مليون هكتار، أي ما يعادل قرابة 1 % من إجمالي مساحة البلاد [46]. ويوضح الشكل (2) التوزيع الجغرافي للأنشطة الزراعية في ليبيا، حيث تتركز نسبة معتبرة من هذه الأنشطة في المناطق الجنوبية، مستفيدةً من توافر المساحات الواسعة وإمكانية الاعتماد على المياه الجوفية وأنظمة الري المحوري بوصفها مصادر رئيسية لدعم النشاط الزراعي [17].



الشكل 2: التوزيع الجغرافي للأنشطة الزراعية في ليبيا

لتمثيل الواقع الزراعي في منطقة الدراسة، تم اختيار مجموعة من المزارع في مواقع جغرافية مختلفة تعكس تنوع الأنشطة الزراعية. ويعرض الشكل (3) المواقع المختارة التي استُخدمت في جمع البيانات وتحليل منظومة الطاقة الهجينة المقترحة.

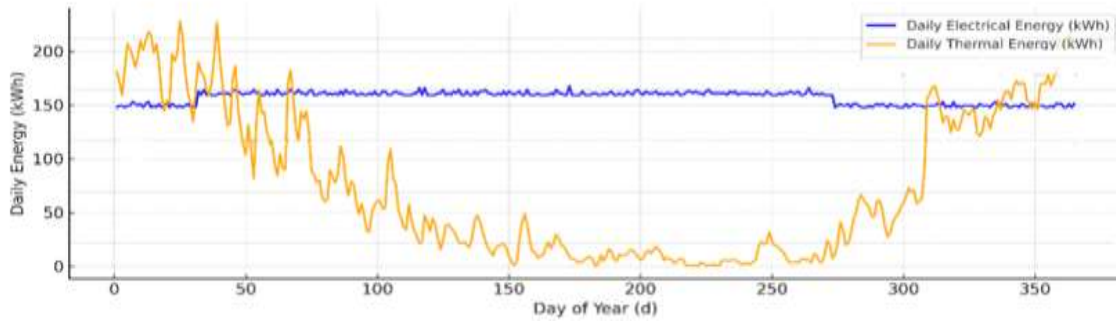


الشكل 3: التوزيع المكاني لعينة المزارع المعتمدة في الدراسة [47]

وضح الشكل (3) صوراً فضائية لمزارع موزعة في مناطق جنوب ليبيا، تُظهر اعتماد الزراعة على المياه الجوفية، وما يرتبط بذلك من استهلاك مرتفع للطاقة. وقد استُخدمت هذه المواقع كنماذج تطبيقية لتقييم الأحمال والطاقة والمخلفات ضمن الدراسة.

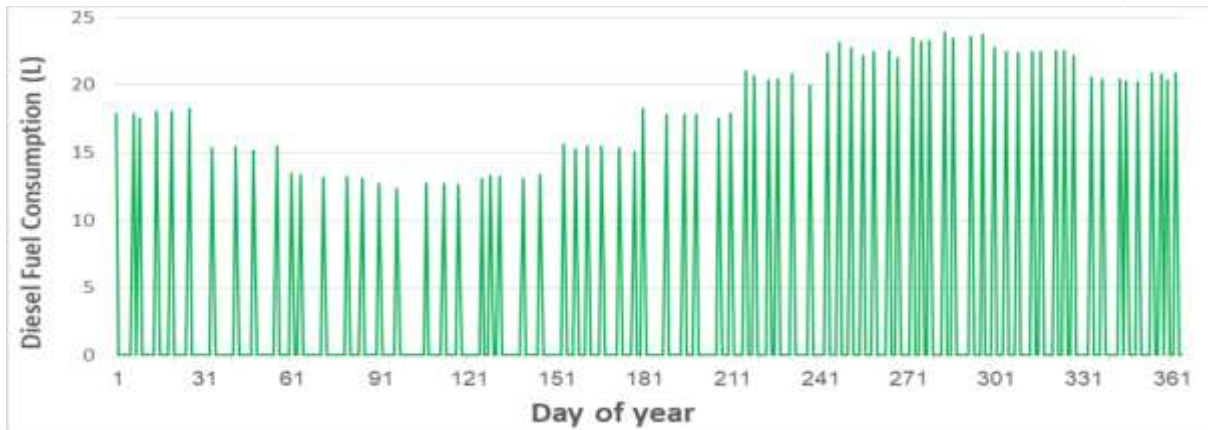
2.2- استهلاك الطاقة في القطاع الزراعي

يعتمد القطاع الزراعي في ليبيا اعتماداً كاملاً (100%) على شبكة الكهرباء العامة لتلبية احتياجاته من الطاقة. ويبلغ الاستهلاك السنوي للطاقة الكهربائية في المزرعة نحو 56 ميغاواط-ساعة، تُستخدم في تشغيل المضخات والمعدّات والإنارة، في حين يُقدّر الاستهلاك السنوي من الطاقة الحرارية بحوالي 28 ميغاواط-ساعة لأغراض التدفئة وتسخين المياه. كما يُقدّر الاستهلاك السنوي من وقود الديزل بحوالي 2700 لتر، ويُستخدم أساساً في تشغيل الجرارات والمعدّات الزراعية داخل المزرعة، إضافةً إلى استهلاك 325 كيلوغراماً من غاز الطهي سنوياً. ويواجه القطاع الزراعي تحديات ملحوظة في إمدادات الطاقة، من أبرزها الانقطاعات المتكررة للتيار الكهربائي، التي تتراوح بين 6 و8 ساعات يومياً خلال فصل الصيف، مما يؤدي إلى تراجع الكفاءة الإنتاجية وزيادة الاعتماد على مولدات الديزل كمصدر طاقة احتياطي. وقد تم اعتماد بيانات الاستهلاك الكهربائي وأنماط الانقطاع المستخدمة في هذه الدراسة بالاستناد إلى السجلات والبيانات الرسمية الصادرة عن الشركة العامة للكهرباء في ليبيا. ويوضح الشكل (4) التغيرات اليومية في استهلاك الطاقة، ممثلةً في الأحمال الكهربائية والحرارية للمزرعة، على مدار عام كامل [48].



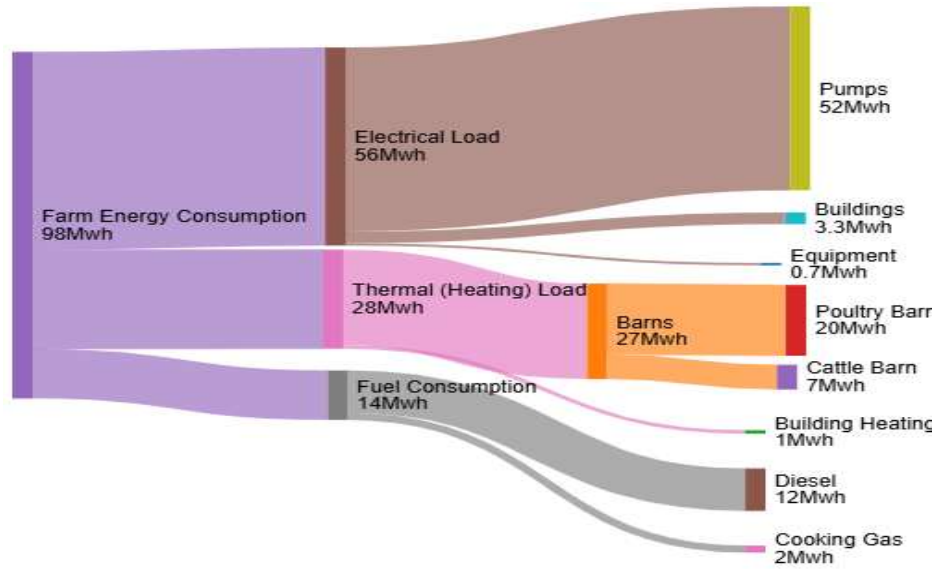
الشكل 4: التغيرات اليومية في استهلاك الطاقة لمزرعة خلال عام كامل

يُظهر الشكل (4) منحنى الحمل الكهربائي (باللون الأزرق) درجة من الاستقرار النسبي على مدار السنة، مما يعكس انتظام تشغيل الأنظمة الكهربائية، مثل الإنارة ووسائل التهوية. في المقابل، يُظهر منحنى الحمل الحراري (باللون البرتقالي) تذبذباً موسميًا واضحًا، يُعزى إلى تغيّر درجات الحرارة واختلاف متطلبات التدفئة والتبريد على مدار العام. وقد جرى تقدير استهلاك وقود الديزل بالاعتماد على البيانات التشغيلية الفعلية للمزرعة، حيث يوضّح الشكل (5) نمط الاستهلاك السنوي لوقود الديزل من خلال تسجيل الكميات اليومية المستهلكة خلال أيام السنة.



الشكل 5: الاستهلاك اليومي لوقود الديزل خلال سنة كاملة

يُظهر الشكل (5) منحنى استهلاك الوقود، الذي يعبر عن الاستهلاك اليومي لوقود الديزل المستخدم في تشغيل المعدات الزراعية، تذبذبًا ملحوظًا تبعًا لاحتياجات التشغيل الزراعي وظروف العمل في الحقول، وهو ما يعكس تباين مستوى النشاط الزراعي خلال فترات السنة المختلفة. ولغرض توضيح البنية التشغيلية لاستهلاك الطاقة داخل المزرعة، أُجري تحليل تفصيلي لتدفقات الأحمال الكهربائية والحرارية واستهلاك الوقود، بما يتيح فهمًا أدق لآلية توزيع الطاقة على مختلف المرافق والأنظمة التشغيلية. ويُظهر الشكل (6) التوزيع الفعلي للطاقة على مدار سنة تشغيلية كاملة، مما يوفر تصورًا شاملاً لهيكل الأحمال داخل المزرعة.



الشكل 6: لتوزيع التفصيلي للأحمال داخل المزرعة

يوضح مخطط سانكي في الشكل (6) التوزيع التفصيلي لاستهلاك الطاقة داخل المزرعة، حيث يبلغ إجمالي الاستهلاك السنوي للطاقة نحو 98 ميغاواط-ساعة في السنة، موزعة على ثلاثة قطاعات رئيسية. يتمثل القطاع الأول في الأحمال الكهربائية بمقدار 56 ميغاواط-ساعة في السنة، وتشمل تشغيل المضخات والمباني والمعدات الزراعية. أما القطاع الثاني فيتمثل في الحمل الحراري لأغراض التدفئة بطاقة 28 ميغاواط-ساعة في السنة، ويُستخدم بصورة رئيسية في تدفئة حظائر الدواجن والأبقار. في حين يمثل القطاع الثالث استهلاك الوقود الأحفوري بما يعادل 14 ميغاواط-ساعة من الطاقة الكهربائية المنتجة فعلياً في السنة، والمتمثل في وقود الديزل وغاز الطهي. ويُبرز هذا التوزيع الارتفاع النسبي لاستهلاك الطاقة المرتبط بسخن المياه والتدفئة، مما يعكس الطبيعة كثيفة الاستهلاك للطاقة في الأنشطة الزراعية المحلية، ويؤكد الحاجة إلى حلول طاقة مستدامة وأكثر موثوقية للحد من التكاليف وتعويض عدم استقرار الشبكة الكهربائية.

3.3- إمكانات الكتلة الحيوية في المزرعة

تنتج المزرعة كميات متنوعة من المخلفات العضوية التي يمكن استغلالها كمصدر للطاقة الحيوية، بما يسهم في توليد غاز الميثان (CH_4) بصورة مستدامة [49]. وتشمل هذه المخلفات النفايات الحيوانية الناتجة عن تربية الأبقار والأغنام والإبل والدواجن، إضافة إلى المخلفات الزراعية المتمثلة في بقايا المحاصيل والنباتات. ويُقدَّر متوسط إنتاج النفايات الحيوانية في المزرعة بنحو 2-5 كيلوغرام لكل رأس في اليوم، في حين تُقدَّر كمية المخلفات الزراعية العضوية بحوالي 0.3-1.2 طن لكل هكتار في السنة [50] [51]. واعتمد النظام المقترح على استغلال المخلفات الحيوانية والنباتية المتوفرة داخل المزرعة لإنتاج الطاقة الحيوية باستخدام وحدة هضم حيوي. ويُعدّ الغاز الحيوي الناتج مصدرًا مستدامًا للطاقة الحرارية والكهربائية، بما يسهم في تعويض جزءٍ معتبر من الطلب على الطاقة، والحد من الانبعاثات الكربونية، وتعزيز كفاءة واستدامة النظام البيئي المحلي. ويوضح الجدول (1) الكميات التقديرية للمخلفات الحيوانية المنتجة في المزرعة، في حين يستعرض الجدول (2) كميات المخلفات الزراعية الناتجة عن مختلف الأنشطة الزراعية.

الجدول (1) الكميات للمخلفات الحيوانية

المخلفات Kg	نسبة التحصيل	إنتاج الروث / kg (hoof/year)	عدد الحيوانات	نوع الثروة الحيوانية
6205	0.77	134.3	60	الضأن (sheep)
3102	0.77	134.3	30	الماعز (Goat)
15912	0.85	936	20	الابقار (Cow)
9180	0.85	720	15	الإبل (Camel)
668	0.99	1.5	450	دجاج (poultry)
35	إنتاج الروث السنوي (ton/year)			

جدول (2) كميات المخلفات الزراعية طن لكل سنة

كمية المخلفات بالطن	نسبة المخلفات الى لانتاج	الانتاج Ton	الخضروات
6	0.3	20	البصل
8	0.4	20	البطاطا
12.5	0.5	25	الطماطم
1.875	0.5	3.75	الباذنجان
1.8	0.6	3	الفلفل
3.6	0.4	9	الجزر
0.24	0.6	0.4	الفول
13.05	0.5	25	البطيخ
2	0.5	4	الخيار
43		ton	المحاصيل
40	0.5	80	البرسيم
1.56	1.3	1.2	القمح
1.44	1.2	1.2	الشعير
20.5		ton	الفواكه
4.5	0.3	15	البرتقال
6	0.4	15	العنب
3	0.6	5	الزيتون
7	0.7	10	النخيل

110.5		247.4	المجموع الكلي
-------	--	-------	---------------

تُعدّ هذه البيانات أساسًا مهمًا لتقييم إمكانات إنتاج الغاز الحيوي ضمن النظام المقترح. وتعتمد كمية غاز الميثان السنوية الناتجة عن عملية التخمر اللاهوائي لهذه المخلفات على طبيعة النفايات وتركيبها ومحتواها العضوي، ويمكن تقديرها باستخدام معادلة (1) القياسية المعتمدة في الدراسات العلمية والمتخصصة في إنتاج الغاز الحيوي من المخلفات الزراعية والحيوانية [36] [52] [13] [53].

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n MCF_i \times MW_i \times WCR_i, \text{ ton } CH_4/\text{year} \quad (1)$$

حيث يرمز MCF_i إلى عامل تحويل الميثان، ويُعبّر عن كمية غاز الميثان الناتجة لكل طن من المخلفات ($\text{ton } CH_4/\text{ton waste}$) بينما يرمز MW_i إلى الكتلة السنوية للمخلفات الناتجة داخل حدود المزرعة WCR_i معدل جمع المخلفات الذي يعبر عن النسبة الفعلية من المخلفات التي يمكن جمعها ومعالجتها لإنتاج الغاز الحيوي. أما الرمز الفرعي i فيشير إلى نوع المخلفات داخل المزرعة، وتشمل المخلفات الزراعية (1) والمخلفات الحيوانية (2) بعد ذلك يمكن تقدير الطاقة الكهربائية المنتجة من المولد الحيوي في المزرعة باستخدام المعادلة (2) الموضحة [53].

$$P_g = \dot{m}_{CH_4} \times LHV_{CH_4} \times \eta_g \quad (2)$$

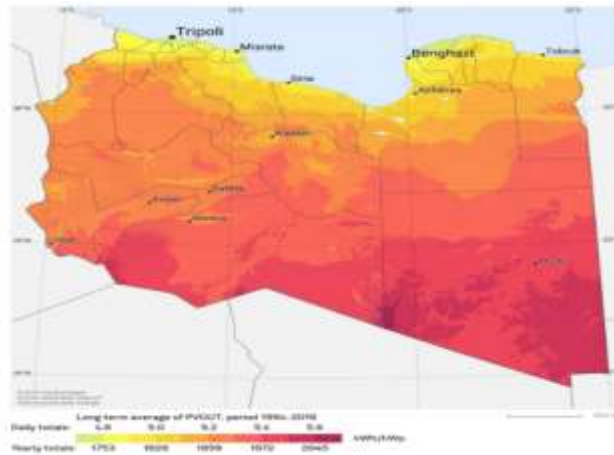
حيث يشير P_g إلى القدرة الكهربائية للمولد الحيوي في المزرعة وحدة (kW)، ويمثل \dot{m}_{CH_4} معدل تدفق كتلة غاز الميثان الناتج من عملية الهضم الحيوي (kg/h)، بينما يرمز LHV_{CH_4} إلى القيمة الحرارية لغاز الميثان والبالغة $13.78 \text{ kWh/kg } CH_4$ أما η_g فتمثل كفاءة المولد الكهربائي في المزرعة المتراوحه عادة بين 35% و40% لأنظمة المزارع الصغيرة، يعد تحديد الحجم الأمثل للهاضم الحيوي خطوة أساسية في تصميم منظومة الكتلة الحيوية داخل المزرعة، إذ يجب أن يتناسب حجم الهاضم مع كمية المخلفات المتولدة ومحتواها المائي لضمان كفاءة عملية التخلل اللاهوائي وإنتاج الغاز الحيوي بصورة مستقرة. ويمكن تقدير حجم الهاضم الحيوي المطلوب V_{Bio} باستخدام العلاقة التجريبية التالية، التي تربط بين كمية المخلفات السنوية ونسبة محتواها المائي، كما هو موضح في المعادلة (3) [54] [55]:

$$V_{Bio} = \frac{Q_{mass}}{LHV_{CH_4}} \times RT \quad (3)$$

يُقدر الحجم اللازم للهاضم الحيوي V_{Bio} استنادًا إلى إجمالي التدفق الكتلي اليومي للمواد العضوية الداخلة إلى الهاضم Q_{mass} (kg/day). وكثافة المزيج داخل الهاضم LHV_{CH_4} (kg/m^3)، إضافة إلى زمن المكوث الهيدروليكي RT الذي يعبر عن الفترة الزمنية المطلوبة لإتمام عملية التخلل اللاهوائي، والذي يتراوح عادة بين 25 و35 يومًا تبعًا لدرجة الحرارة ونوع المخلفات المستخدمة. وتستخدم هذه المعطيات لتحديد السعة التصميمية المثلى للهاضم الحيوي بما يضمن استقرار العملية الحيوية وكفاءة إنتاج الغاز الحيوي V_{Bio} وحجم الهاضم المطلوب (m^3) [56].

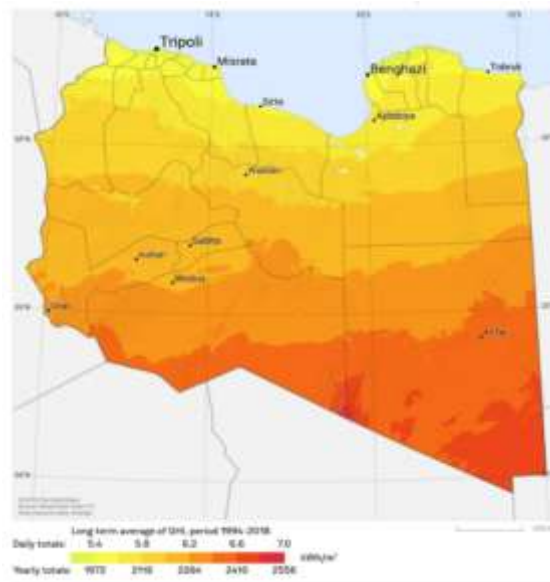
4.3-إمكانات الطاقة الشمسية

تُظهر نتائج الدراسات المناخية الحديثة أن ليبيا تمتلك موارد شمسية استثنائية تجعلها من أغنى دول العالم بالإشعاع الشمسي، إذ يتراوح متوسط الإنتاج السنوي للطاقة من الأنظمة الكهروضوئية بين 1753 kWh/kWp في المناطق الساحلية و2045 kWh/kWp في الجنوب الليبي، مع متوسط سطوع شمسي يتراوح بين 3100-3900 ساعة في السنة [57]. مما يؤكد تميز ليبيا بقدرة عالية على استغلال الطاقة الشمسية لإنتاج الكهرباء [58]، وتعدّ هذه الخصائص المناخية مؤشراً واضحاً على الجدوى الاقتصادية لاعتماد الطاقة الشمسية كخيار استراتيجي ومستدام لتغطية الطلب المتزايد على الطاقة، خاصة في المناطق الزراعية والنائية ذات الأجواء الصافية ومعدلات الإشعاع المرتفعة على مدار العام [59]. الشكل 7 و8 يوضح إمكانية إنتاجية الألواح الكهروضوئية ومتوسط الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح مائل بزاوية 29 درجة ومتمجه جنوباً على التوالي [60] [61] [62].



الشكل 7: متوسط إنتاجية الألواح الكهروضوئية

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Libya_PVOUT_Photosolar-power-potential-map_GlobalSolarAtlas_World-Bank-Esmap-Solargis.png



الشكل 8: متوسط الإشعاع الشمسي المائل السنوي عند زاوية 29

https://solargis.com/resources/free-maps-and-gis-data?locality=libya&utm_source=chatgpt.com

تم الحصول على البيانات المناخية والمتمثلة في شدة الإشعاع الشمسي الأفقي والإشعاع الشمسي المنعكس من السماء الأفقي من قاعدة البيانات SODA [63]. وقد جرى تحويل الإشعاع الشمسي الأفقي إلى إشعاع شمسي على سطح مائل باستخدام نموذج Liu & Jordan، وذلك استناداً إلى توصيات عدد من الباحثين المطينين [58] [59] [64] [65] [66] [67]. ويُعزى اعتماد هذا النموذج إلى أن آلية التحويل المدمجة ضمن منصة SODA لا تُعدّ موصى بها في الدراسات التطبيقية الخاصة بظروف المنطقة محل الدراسة.

تُحسب القدرة الكهربائية المنتجة من لوح شمسي معين باستخدام المعادلة (4) [68]:

$$P_{PV} = P_{STC} \left[1 + \beta_P (T_{cell} - T_{STC}) \right] \frac{H_t}{H_{STC}} \quad (4)$$

حيث تمثل P_{PV} القدرة الكهربائية المنتجة من اللوح الشمسي، بينما تشير P_{STC} إلى القدرة الاسمية للوح الشمسي عند شروط الاختبار القياسية (STC) ويعبّر الرمز β_P عن معامل درجة الحرارة للقدرة الكهربائية للوح الشمسي، في حين تمثل T_{cell} درجة حرارة الخلية الشمسية و T_{STC} درجة حرارة الخلية عند شروط الاختبار القياسية وباللغة 25 °C. أما H_t فيشير إلى الإشعاع الشمسي الساقط على مستوى اللوح عند الزمن t، في حين يعبّر H_{STC} عن شدة الإشعاع الشمسي عند شروط الاختبار القياسية والتي تساوي 1000 W/m^2 بينما تُحسب درجة حرارة سطح الخلية من العلاقة (5) [69]:

$$T_{cell} = T_{\infty} + 7.8 \times 10^{-2} H_t \quad (5)$$

تم اختيار ألواح شمسية من نوع (Monocrystalline Mono-Si) استناداً على توصية باحث مطينين [26] [70] [71] [72] [73] [74]، نظراً لملائمتها للظروف الجوية القاسية للمنطقة الجنوبية. الخصائص التقنية والاقتصادية للألواح الشمسية مدرجة في الجدول (3)

الجدول 3: الخصائص الكهربائية المرتبطة بالتحويل الطاقة لعدد من الأنظمة الكهروضوئية التجارية [75] [74].

الخاصية	القيمة
الشركة المصنعة	Jinko Solar
نوع التقنية	(PERC / TOPCon) (G12 132 خلية)
أبعاد اللوح	2278 × 1134 × 35 mm
القدرة العظمى (Pmax)	540 W
جهد نقطة القدرة العظمى (Vmp)	41.8 V
تيار نقطة القدرة العظمى (Imp)	12.9 A
معامل درجة الحرارة للقدرة العظمى (β_P)	- 0.34 % / °C
معامل درجة الحرارة للجهد (β_{Voc})	-0.26 % / °C
عامل درجة الحرارة للتيار (α_{Isc})	+0.045 % / °C
درجة حرارة التشغيل الاعتيادية (NOCT)	45°C

الخاصية	القيمة
الكفاءة	21.3 – 21.6 %
العمر التشغيلي	25 سنة

5.3- قيود تصميم المنظومة المقترحة

يتطلب إعداد منظومة طاقة فعّالة لمزرعة تحديد مجموعة من الشروط التصميمية والتشغيلية التي يجب أن تتوافر لضمان كفاءة وأداء النظام، وتشمل ما يلي:

- تلبية جميع احتياجات المزرعة من الطاقة الكهربائية والحرارية اعتماداً حصرياً على النظام الهجين المقترح، مع تحقيق استمرارية الإمداد دون أي انقطاع للطاقة ($LPSP=0$).
 - استغلال جميع المخلفات الحيوانية والنباتية المتولدة داخل المزرعة لإنتاج الغاز الحيوي.
- يتم حساب $LPSP$ من المعادلة (6) [76]:

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^{8760} [E_{Load}(t) - E_{HRES}(t)]}{\sum_{t=1}^{8760} E_{Load}(t)} = 0 \quad (6)$$

حيث $E_{Load}(t)$ يمثل الحمل الكلي، $E_{HRES}(t)$ يمثل إنتاجية النظام الهجين للطاقة.

6.3- تحديد حجم مكونات النظام الهجين

يجب أن تُصمَّم مكونات النظام الهجين المقترح بأحجام مناسبة تُمكنه من تغطية متطلبات الطاقة وتشغيل الآلات الزراعية داخل المزرعة بنسبة 100%. ولغرض استكمال عملية تصميم منظومة الطاقة الهجينة وتحديد أحجام مكوناتها بدقة، كان من الضروري اعتماد مجموعة من القيم التشغيلية والمعاملات الفيزيائية المرتبطة بالأحمال الكهربائية والحرارية واستهلاك الوقود. وتمثل هذه المعاملات الأساس في حساب متطلبات الطاقة للمزرعة، وتقدير كمية غاز الميثان اللازمة لتغطية مختلف أنواع الأحمال. ويعرض الجدول (4) القيم المعتمدة للمتغيرات الرئيسية، بما في ذلك الاستهلاك السنوي لوقود الديزل وغاز الطهي، والقيم الحرارية الدنيا (LHV) للوقود، وكفاءات التحويل الكهربائي والحراري، والتي استُخدمت في النماذج الحسابية لضمان تمثيل دقيق لأداء النظام تحت الظروف التشغيلية الفعلية.

الجدول (4): القيم الفيزيائية والمعاملات التشغيلية المستخدمة في تصميم منظومة الطاقة الهجينة [77] [78] [79] [80] [81].

الوصف	الرمز	القيمة	الوصف	الرمز	القيمة
استهلاك الديزل (kg/year)	Q_{diesel}	2268	القيمة الحرارية للديزل $kWh/kg \text{ diesel}$	LHV_{diesel}	12.7
استهلاك غاز الطهي (kg/year)	Q_{LPG}	325	القيمة الحرارية لغاز LPG $kWh/kg \text{ LPG}$	LHV_{LPG}	12.06
غاز الميثان المنتج (kg/year)	Q_{CH_4}	12,493	القيمة الحرارية للميثان $kWh/kg \text{ CH}_4$	LHV_{CH_4}	13.78
الحمل الحراري (kwh/year)	E_{lead_th}	28000	كفاءة التحويل الحراري	η_{th}	90%
الحمل الكهربائي (kwh/year)	E_{lead_E}	56000	كفاءة المولد الغازي	η_g	40%

يُخصَّص غاز الميثان الناتج عن وحدة الهضم الحيوي لتغطية الأحمال الحرارية واحتياجات غاز الطهي، وكذلك لتشغيل المعدات الزراعية، في حين يُوجَّه الفائض منه إلى توليد الطاقة الكهربائية بواسطة مولد يعمل بالغاز الحيوي. وتُحدَّد كمية غاز الميثان اللازمة لتغطية الحمل الحراري للمزرعة بالاعتماد على الطلب الحراري وكفاءة منظومة التدفئة، ويمكن تقديرها باستخدام العلاقة (7) [82].

$$Q_{th,CH_4} = \frac{E_{load_th}}{LHV_{CH_4} * \eta_{th}} \quad (7)$$

حيث Q_{th} ترمز بكمية غاز الميثان المطلوبة لتغطية الحمل الحراري (kg/h). وتعتمد عملية الحساب على الحمل الحراري الفعلي للمزرعة (kWh) وبناءً على هذه المعطيات، يمكن تحديد معدل استهلاك الميثان اللازم لتوفير الإمداد الحراري المطلوب.

كما يمكن تقدير كمية غاز الميثان اللازمة لتشغيل الآلات والمعدات الزراعية من خلال موازنة القيمة الحرارية للذيول والميثان من العلاقة (8) [83].

$$Q_{Fuel,CH_4} = \frac{Q_{diesel} \times LHV_{diesel}}{LHV_{CH_4}} \quad (8)$$

حيث يُرمز Q_{Fuel,CH_4} إلى الكمية اللازمة لتشغيل الآلات والمعدات الزراعية (kg/year). كما يمكن تقدير كمية غاز الميثان اللازمة للطهي كبديل لغاز الطهي من خلال موازنة القيمة الحرارية الطهي والميثان من العلاقة (9) [84]:

$$Q_{LPG,CH_4} = \frac{Q_{LPG} \times LHV_{LPG}}{LHV_{CH_4}} \quad (9)$$

حيث يُرمز Q_{LPG,CH_4} إلى كمية الغاز اللازمة لاحتياجات الطهي المنزلية (kg/year). تستخدم المعادلة (10) لتقدير كمية غاز الميثان اللازمة لتغطية العجز في الحمل الكهربائي بعد مساهمة منظومة الخلايا الشمسية، ويُحسب هذا العجز عبر الفرق بين الحمل الكهربائي المطلوب والطاقة المنتجة من

$$Q_{E,CH_4} = \frac{E_{Load.E} - E_{PV}}{LHV_{CH_4} * \eta_g} \quad (10)$$

منظومة الخلايا الكهروضوئية يتم تحويل هذا العجز إلى كمية مكافئة من غاز الميثان.

حيث يمثل Q_{E,CH_4} كمية غاز الميثان المكافئة لتغطية عجز الكهرباء من الخلايا الشمسية، ويمثل E_{PV} القدرة الكهربائية المنتجة من منظومة الخلايا الشمسية الكهروضوئية.

في إطار تقييم استقرار منظومة إنتاج الميثان وقدرتها على تلبية الطلب بصورة موثوقة ومستدامة، تُستخدم المعادلة (11) لتمثيل التطور الزمني لمستوى مخزون الميثان داخل النظام. ويتيح هذا النموذج حساب كمية الغاز المتوافرة في كل ساعة على مدار سنة تشغيلية كاملة، بالاعتماد على موازنة معدلات الإنتاج والاستهلاك في كل فترة زمنية. ويمكن هذا التمثيل الديناميكي من تقييم انتظام إمدادات الغاز وتقادي حالات الفائض أو العجز، فضلاً عن التحقق من كفاية مخزون الميثان واستدامته في تغطية مختلف احتياجات المزرعة على مدار العام.

$$S_{CH_4}^t = S_{CH_4}^{(t-1)} + Q_{CH_4}^t - Q_{Fuel,CH_4}^t - Q_{LPG,CH_4}^t - Q_{th,CH_4}^t \quad (11)$$

حيث يشير $S_{CH_4}^t$ إلى مستوى حجم الميثان في الخزان عند الزمن t بينما $S_{CH_4}^{(t-1)}$ تدل على مستواه قبل ساعة، بينما يمثل $Q_{CH_4}^t$ إجمالي الميثان المنتج من منظومة الهضم الحيوي في تلك اللحظة. وبعد خصم مختلف المتطلبات التشغيلية لغاز الميثان، والتي تشمل تشغيل المعدات الزراعية، واحتياجات غاز الطهي، وتغطية أحمال التدفئة والتسخين، تُوجَّه الكمية المتبقية من الغاز الحيوي لتعويض العجز في الحمل الكهربائي داخل المنظومة. ويُشترط في هذا السياق عدم استهلاك غاز الميثان خلال ساعات النهار، بما يتيح لمنظومة الخلايا الشمسية الكهروضوئية تغطية الحمل الكهربائي بالكامل خلال تلك الفترة، في حين يُعتمد على الغاز

المخزن لمعادلة النقص الكهربائي خلال فترات المساء أو خلال الأيام ذات الإشعاع الشمسي المنخفض. وبناءً على هذا الإطار التشغيلي، يمكن تحديد السعة المناسبة لخزان تخزين غاز الميثان باستخدام العلاقة (12) [85]:

$$V_{CH_4}^t = \eta_{comp} \frac{1}{\rho_{CH_4}} S_{CH_4}^t; \quad 0 < V_{CH_4}(t) \leq SV_{CH_4}$$

$$\text{And } SV_{CH_4} = \max[V_{CH_4}^t]_{t=1 \rightarrow 8760} \quad (12)$$

حيث تشير ρ_{CH_4} إلى كثافة غاز الميثان المضغوط عند ضغط 25MPa، وتُقدَّر بحوالي 189 kg/m^3 [86] [87] [88]. أما η_{comp} فتُمثل كفاءة الضاغط وتُقدَّر بحوالي 0.95، في حين يرمز إلى SV_{CH_4} سعة خزان التخزين بوحدة m^3 [89]. ولضمان استقرار النتائج للنظام، يجب أن يتحقق الشرط معادلة (13):

$$V_{CH_4}(0) = V_{CH_4}(8760) \quad (13)$$

حيث تمثل $V_{CH_4}(0)$ ، $V_{CH_4}(8760)$ حجم غاز الميثان الابتدائية والنهائية داخل خزان التخزين على مدار السنة.

استهلاك الطاقة في الضاغط

وتحسب الطاقة الكهربائية المستهلكة بواسطة الضواغط $P_{Comp}(t)$ بوحدة ميغا واط ساعة من العلاقة (14) [90]:

$$P_{Comp}(t) = \frac{Q_{CH_4}(t)}{\eta_{CH_4} \times \rho_{CH_4}} \Delta p_{CH_4} \quad (14)$$

حيث: يشير CH_4 إلى الغاز الميثان. Δp فرق الضغط بين مدخل ومخرج الضاغط (MPa).

7.3- الجوانب الاقتصادية والبيئية

يسهم إدراج الأثر البيئي والتكلفة الاجتماعية للانبعثات ضمن التقييم الاقتصادي في تعزيز القدرة التنافسية لمصادر الطاقة النظيفة في سوق الطاقة. وتتميز المنظومة المدروسة بإنتاج ثلاثة أشكال رئيسية من الطاقة، تشمل الطاقة الحرارية لتلبية متطلبات التسخين والتدفئة، والطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل الأجهزة الكهربائية والمضخات وأنظمة الإنارة، إضافةً إلى وقود الميثان المستخدم في تشغيل المعدات والآلات الزراعية. ويؤدي هذا التنوع في نواتج الطاقة إلى زيادة تعقيد عملية احتساب مؤشرات التكلفة المستوية، مثل التكلفة المستوية للكهرباء (LCOE)، والتكلفة المستوية للحرارة (LCOH)، والتكلفة المستوية لوقود الميثان (LCOF)، مقارنةً بالأنظمة التي تنتج شكلاً واحداً من الطاقة فقط. وانطلاقاً من ذلك، تم في هذا البحث تطوير منهجية تحليلية تهدف إلى تقدير القيم المستوية لمخرجات الطاقة المختلفة من خلال تحديد المساهمة النسبية لكل شكل من أشكال الطاقة ضمن إجمالي الإنتاج السنوي للمزرعة، الأمر الذي يتيح إجراء تقييم اقتصادي وبيئي متكامل لأداء المنظومة. وبناءً على هذه المنهجية، يمكن التعبير عن مؤشرات التكلفة المستوية المعدلة وفق العلاقات التالية:

$$LCOE = \frac{\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} (CC_{pv} + CC_{bm} \times f_{bm,E} + CC_{wc} \times f_{wc,E}) + f_{CH_4,E} \times \left[\frac{r(1+r)^{n_{St}}}{(1+r)^{n_{St}} - 1} CC_{St} + COM_{St} \right] + OME_{pv} + OME_{bm} - NC_{CO_2E}}{E_{(bim+pv)}}$$

$$LCOH = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} (CC_{bm} \times f_{bm,th} + CC_{wc} \times f_{wc,th}) + OME_{bm,ht} - NC_{CO_2,H}$$

$$E_{bim_{ht}}$$

$$LCOCH$$

$$\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} (CC_{bm} \times f_{bm,F} + CC_{wc} \times f_{wc,th}) + f_{CH_4,F} \times \left[\frac{r(1+r)^{n_{st}}}{(1+r)^{n_{st}} - 1} CC_{St} + COM_{St} \right]$$

$$+ OME_{bm} - NC_{CO_2,F}$$

$$= \frac{\quad}{Q_{CH_4}}$$

حيث تشير الرموز السفلية PV، CH₄، bm إلى كلٍ من: طاقة الكتلة الحيوية، وغاز ميثان، الطاقة الشمسية الكهروضوئية، ويرمز CC_i لتكلفة رأس المال للمشروع بالدولار، OME_i مصاريف الصيانة \$/year، تكلفة الضرر البيئي، r-نسبه الفائدة السنوية الحقيقية (2.5%)، n-عمر المنظومة (25 سنة). أما فيعبر عن صافي التكلفة الكربونية السنوية الناتجة عن الانبعاثات أو الوقود المحققة من النظام (بالدولار/سنة). وتشير الرموز الفرعية (E,H,CH) إلى إنتاج الطاقة الكهربائية، والطاقة الحرارية، وغاز الميثان على التوالي، ويمكن تقدير قيمها من خلال العلاقات التالية.

$$NC_{CO_2,E} = SC_{CO_2}$$

$$\times \left[(E_{CH_4} + E_{PV}) \times EF_{CO_2,E} - E_{PV} \times LC_{pv} \right.$$

$$\left. - (EF_{CO_2,CH_2} + LC_{CH_4}) \times \rho_{CH_4} \times Q_{STO} \right]$$

$$NC_{CO_2,H} = SC_{CO_2} \times Q_h \times \rho_{CH_4} \left[(EF_{CO_2,E} \times LHV_{CH_4} \times \eta_{th} - (EF_{CO_2,CH_2} + LC_{CH_4})) \right]$$

$$NC_{CO_2,CH} = SC_{CO_2} \times \left[EF_{CO_2,d} \times Q_{diesel} \times \rho_{diesel} - (EF_{CO_2,CH_2} + LC_{CH_4}) \times \rho_{CH_4} \times Q_F \right]$$

يستعرض الجدول (5) القيم والمعاملات الأساسية التي تم اعتمادها في حساب الجوانب الاقتصادية والبيئية الخاصة بهذا البحث، بما في ذلك تكاليف المستوية، وانبعاثات CO₂. وقد استخدمت هذه البيانات كمدخلات رئيسية في عمليات التقييم والتحليل للوصول إلى النتائج الاقتصادية والبيئية النهائية للدراسة.

جدول (5): المعلومات الأساسية الاقتصادية والبيئية المتعلقة بمكونات نظام الطاقة الهجين (HRES)

المرجع	العمر التشغيلي (سنة)	انبعاثات CO ₂ طوال دورة الحياة	التشغيل والصيانة	التكلفة الرأسمالية	التقنية
[91]	25	1.97 kg CO ₂ /kg CH ₄	3-5% من التكلفة الرأسمالية	10-30 \$/ Mw	الكتلة الحيوية/الميثان

المرجع	العمر التشغيلي (سنة)	انبعاثات CO2 طوال دورة الحياة	التشغيل والصيانة	التكلفة الرأسمالية	التقنية
[93] [92]	25	40g CO ₂ /KWh	13–70 \$/kW	3000.660 \$ / kW	الالواح الشمسي
[94]	10	3.5 kg CO ₂ /kg CH ₂	0.0162 \$/kg CH ₂	30–50 \$/kg CH ₂	خزان تخزين الميثان
[95]			\$29–50/ton wastes		تجميع المخلفات

فترة استرداد رأس المال

تشير فترة الاسترداد (PBP) إلى عدد السنوات اللازم لاسترداد الاستثمار الأولي من خلال صافي الربح من المنظومة [21]

$$PBP = \frac{CE_{inv}}{R_E + R_{th} + R_{CH_4} + NC_{CO_2 total} - COM_{total}} \quad (21)$$

حيث تمثل CE_{inv} التكلفة الاستثمارية الكلية للمنظومة، بينما يعبر R_E عن الإيراد السنوي الناتج من إنتاج الطاقة الكهربائية، والذي يُحتسب بسعر 0.10 دولار لكل كيلوواط-ساعة، ويمثل R_{th} الإيراد السنوي من إنتاج الحرارة، ويعبر R_{CH_4} الإيراد من تشغيل الآلات الزراعية ويُقدّر على أساس سعر وقود الديزل البالغ 0.027 دولار لكل لتر، كما تمثل $NC_{CO_2 total}$ العائد البيئي الناتج عن خفض انبعاثات CO₂، باعتماد سعر كربون مقدارها 70 دولارًا لكل طن CO₂، في حين تشير COM_{total} تكاليف التشغيل والصيانة السنوية. يسمح هذا الأسلوب بتحديد التكلفة الحقيقية لإنتاج الطاقة عبر النظام الهجين مقارنةً بالديزل، وتقدير فترة الاسترداد والعائد الاقتصادي السنوي، مما يسهم في دعم اتخاذ قرار استثماري مستدام لمنظومات الطاقة الزراعية في ليبيا.

8.3-فرضيات وحدود الدراسة ومصادر الالايقين في النتائج

لتسهيل التحليل تم تبني الفرضيات التالية:

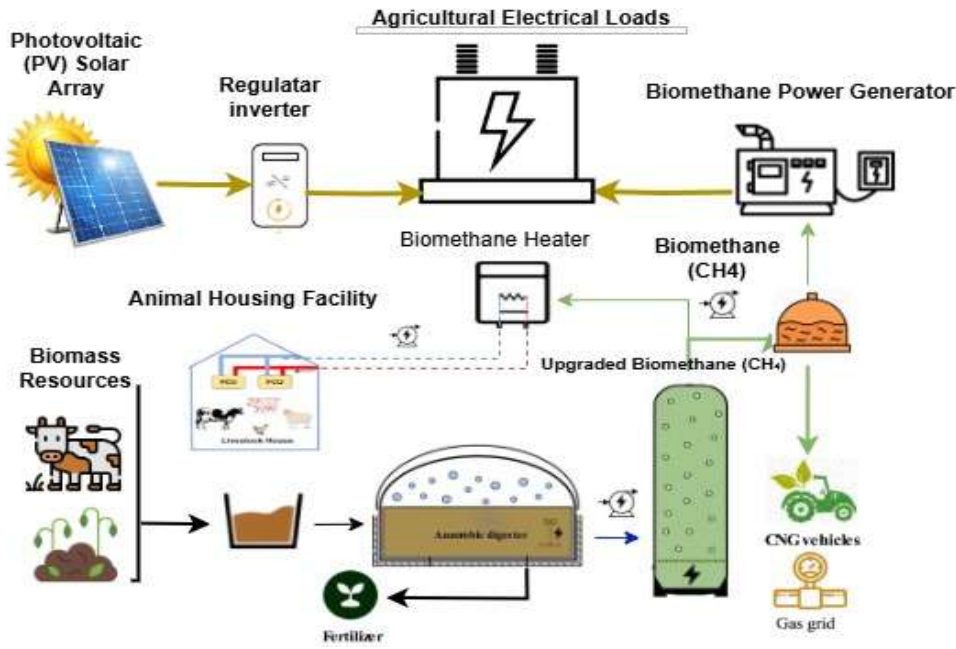
1. جميع المزارع تمتلك خصائص متقاربة من حيث المساحة وأنماط الإنتاج الزراعي، مما يسمح بتمثيلها بمزرعة نموذجية بمساحة (15 هكتار).
 2. الكفاءة الحرارية والكهربائية لوحدات التحويل (CHP) و (PV) ثابتة أثناء فترة التشغيل ولا تتأثر بتقدم المكونات أو تذبذب الأحمال.
 3. إنتاج غاز الميثان من المخمر ثابت لكل ساعة.
 4. إهمال قيمة الرابض للمنظومة بعد انتهاء عمر المحطة.
 5. إهمال الانحدار في إنتاج الطاقة في المنظومة.
 6. لم تُدرج تكاليف النقل أو المعالجة للمخلفات الزراعية، إذ افترض أن جميع العمليات تتم داخل المزرعة.
 7. إهمال أي تسرب أو فقد في الطاقة خلال التوليد أو النقل أو التخزين
- أما حدود الدراسة فتمثلت في:

1. لم تقم الدراسة بدراسة حساسية تأثير بعض المتغيرات على اتخاذ القرار مثل سعر الكربون، تغيير كفاءة الأجهزة.
2. لم تشمل الدراسة تأثير تغير نمط النشاط الزراعي على أداء وتصميم المنظومة.
3. لم تشمل الدراسة تأثير تغير الموقع الجغرافي على التصميم وأداء المنظومة

تمثل البيانات المناخية والاقتصادية وأيضاً استخدام القيم الفيزيائية مثل القيمة الحرارية للوقود والكثافة أهم مصادر الالايقين في النتائج. حيث رصد Nassar et al تفاوتاً في الأسعار بلغ 360 % كما يوجد قيم مختلفة لمعامل انبعاث CO2 لمنظومة الطاقة الكهربائية في ليبيا يتراوح 753-1037 kgCO2/Mwh [91].

4-النتائج والمناقشة

يوضح هذا القسم البنية العامة لمنظومة الطاقة المتكاملة المعتمدة في المزرعة التي تجمع بين الطاقة الشمسية وطاقة الكتلة الحيوية بهدف تغطية الأحمال الزراعية المختلفة وتحقيق تشغيل مستقر وفعال للمنظومة، ويبين الشكل (9) مسارات تحويل الطاقة وتكامل مكونات المنظومة من مصادر الإنتاج إلى الاستخدامات النهائية.

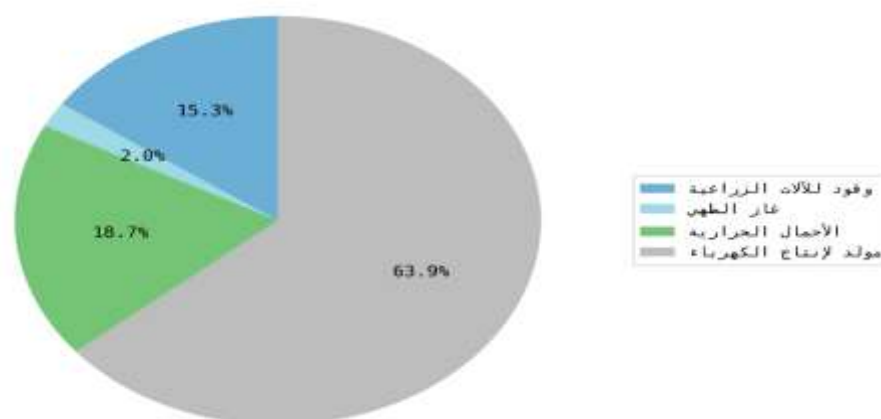


الشكل 9: مكونات المنظومة الهجينة المقترحة

يوضح الشكل (9) منظومة الطاقة المتجددة الهجينة المقترحة للاستخدام في المزارع التي تجمع بين نظام الألواح الشمسية ومنظومة إنتاج الغاز الحيوي لتغطية أحمال الطاقة الكهربائية والحرارية والوقود. وتستخدم المخلفات الحيوانية والزراعية كمصدر للكتلة الحيوية، حيث تُطَّل داخل الهاضم اللاهوائي لإنتاج غاز الميثان، بينما يُستفاد من الجزء الصلب المتخمر كسماد عضوي. ويوجَّه جزء من الغاز الناتج لاستخدامه كوقود للألات الزراعية وغاز الطهي، ويُخصَّص جزء آخر للغلاية بهدف توفير الحرارة اللازمة للتدفئة والتسخين، فيما يُستخدم المتبقي لتشغيل المولد الكهربائي وتوليد الطاقة اللازمة للأحمال الزراعية. ويسهم هذا التكامل بين النظام الشمسي ومنظومة الغاز الحيوي في تحقيق استقلالية طاقة المزرعة والحدّ من الانبعاثات الكربونية، مما يعزّز الاستدامة البيئية ويدعم مبادئ الاقتصاد الدائري في القطاع الزراعي.

1.4-تحديد أحجام منظومات الطاقة الشمسية والكتلة الحيوية

أظهرت نتائج التحليل أن توازن الطاقة في منظومة المزرعة، إضافةً إلى استقرار التشغيل، قد تحقق عند سعة 8 kW لحقل الألواح الكهروضوئية (PV) المخصص لتوليد الكهرباء، وسعة 15 m³ للهاضم الحيوي المستخدم في معالجة المخلفات الزراعية والحيوانية. ينتج عن عملية الهضم الحيوي ما يقارب 12,493 kg/year من غاز الميثان (CH₄)، ويتم توزيعه بحسب أولويات التشغيل كما موضح في الشكل (10).

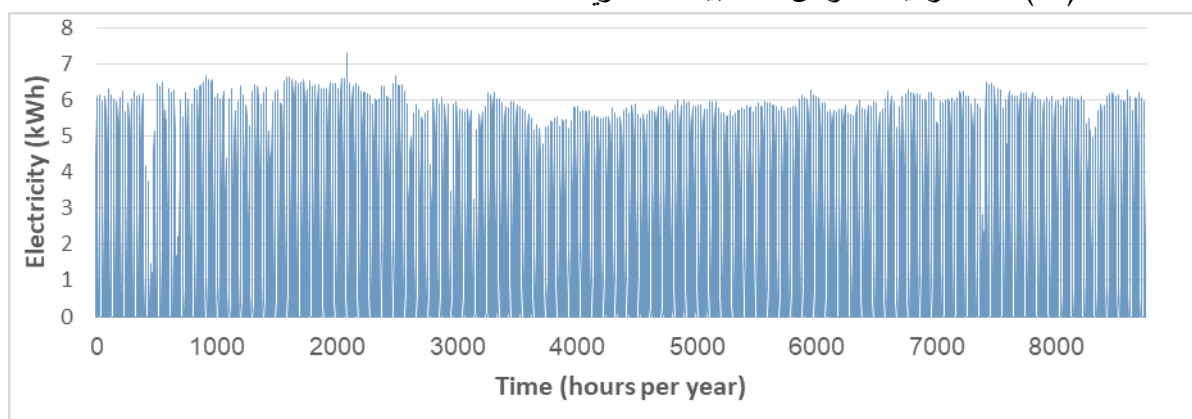


الشكل 10: التوزيع النسبي لاستخدامات غاز الميثان اعتمادًا على حجم الطلب السنوي.

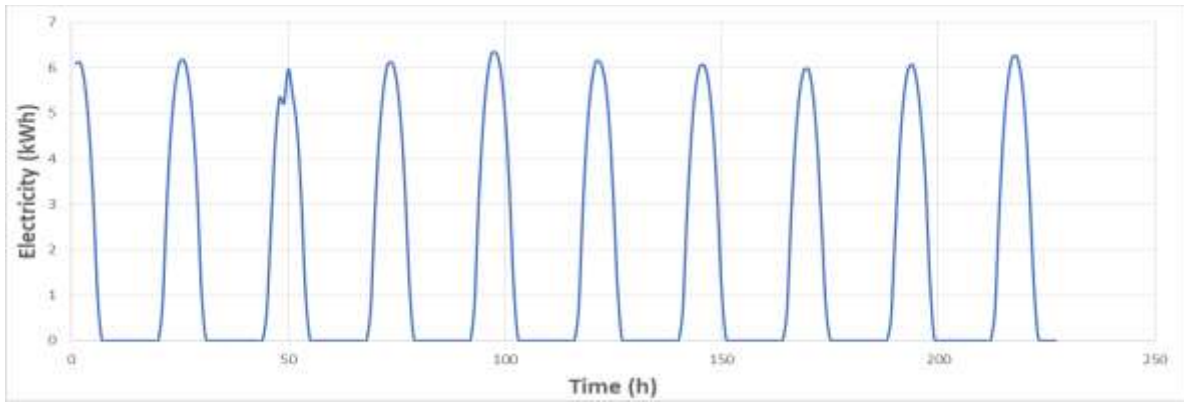
يوضح الشكل (10) التوزيع النسبي لاستخدامات غاز الميثان الناتج عن عملية الهضم الحيوي في منظومة المزرعة، حيث يتم تخصيص الغاز لتغطية الأحمال الحرارية ووقود الآلات الزراعية وغاز الطهي، إضافة إلى استخدامه في توليد الكهرباء، بما يعكس تنوع استخدامات الغاز داخل المنظومة.

2.4- الأداء الديناميكي للمنظومة المقترحة

يعرض في هذا القسم تحليلًا زمنيًا مفصّل لتدفقات الطاقة الكهربائية والحرارية والوقود التي جرى حسابها وتتبعها ساعياً على مدار سنة تشغيلية كاملة (8760 ساعة)، بهدف تقييم الأداء الديناميكي للمنظومة الهجينة وقياس نجاعتها في تحقيق التوازن بين الإنتاج والاستهلاك، وضمان استقرار الإمداد بالطاقة طوال العام. ويُبين الشكل (11) التغير الساعي في إنتاج الطاقة الكهربائية من الألواح الشمسية على مدار السنة، في حين يوضح الشكل (12) مقطعاً زمنياً مختاراً من هذه البيانات السنوية

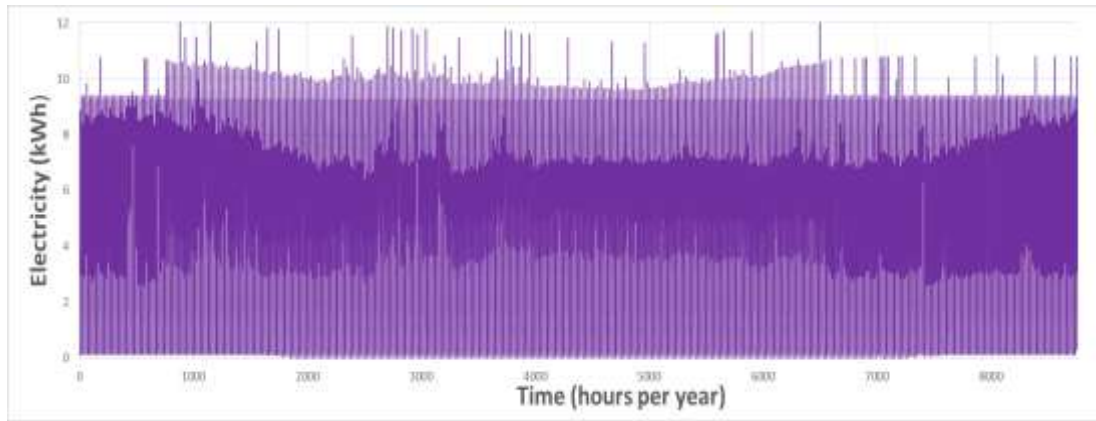


الشكل 11: إنتاج الطاقة الشمسية

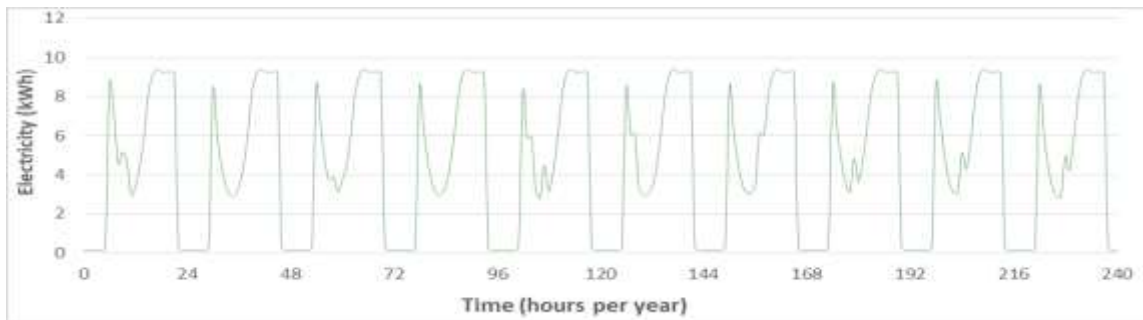


الشكل 12: مقطع زمني لإنتاج الكهرباء من الألواح الشمسية

ظهر المنحنى في الشكل (11) التغير الساعي في إنتاج الكهرباء من الألواح الشمسية على مدار السنة، في حين يوضح الشكل (12) مقطعاً زمنياً مختاراً من بيانات الإنتاج السنوي لغرض التوضيح، حيث بلغ الإنتاج السنوي من المنظومة الشمسية نحو 15MWh/year، وهو ما يمثل المساهمة الرئيسية في تغطية الأحمال النهارية للمزرعة. كما يُلاحظ من الشكل (11) اندثار إنتاجية الخلايا الشمسية خلال فصل الصيف، بالرغم من ارتفاع شدة الإشعاع الشمسي، ويُعزى هذا الانحدار إلى ارتفاع درجة حرارة سطح الخلية نتيجة زيادة درجة حرارة الهواء الجوي، مما يؤثر سلباً على كفاءة الألواح الشمسية، وهو ما يتوافق مع ما أورده الباحثون في [96] [97] [98] [99].

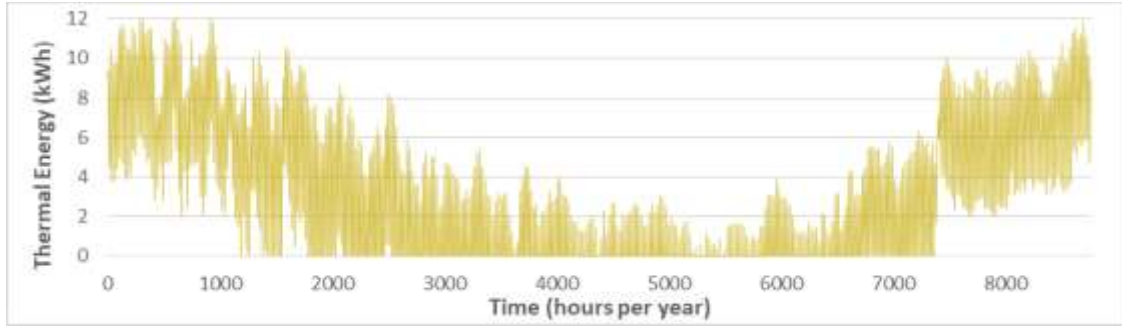


الشكل 13: إنتاج الكهرباء من الميثان لكل ساعة لمدة سنة



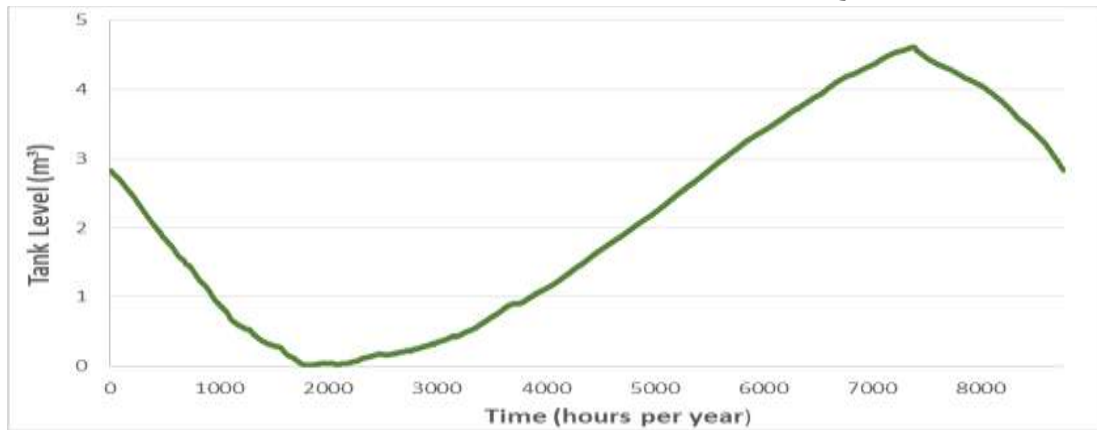
الشكل 14: إنتاج الكهرباء من الميثان في بعض الاوقات

الشكل (13) يوضح المنحنى الذي يمثل إنتاج الكهرباء من مولد الكهرباء باستخدام غاز الميثان الناتج من الهاضم الحيوي، ويُظهر المنحنى زيادة ملحوظة في فترات المساء وأثناء غياب الإشعاع الشمسي، حيث يعمل المولد كمصدر طاقة إضافي يغطي العجز في الشبكة الداخلية للمزرعة. في حين يبين الشكل (14) مقطعاً زمنياً مختاراً من هذه البيانات السنوية، أُخذ لغرض توضيح نمط التغير الساعي للإنتاج بشكل أكثر وضوحاً، وقد بلغت القدرة الكهربائية المنتجة من الميثان حوالي 41MWh/year. كما يوضح الشكل (15) التغير الساعي في إنتاج الطاقة الحرارية من الميثان على مدار السنة.



الشكل 15: إنتاج الطاقة الحرارية من الميثان

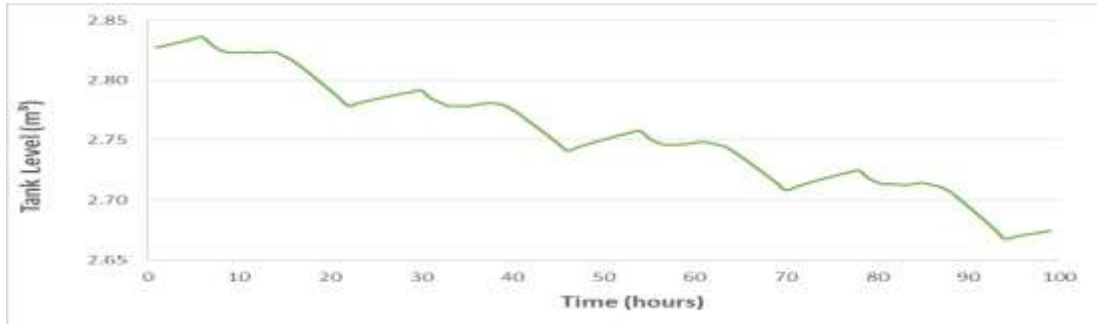
يوضح الشكل (15) التغير الساعي للطاقة الحرارية الناتجة عن استغلال جزء من غاز الميثان المنتج في المزرعة على مدار السنة، بإجمالي إنتاج يقارب 28 ميغاواط-ساعة سنوياً، حيث يرتفع الطلب في فصل الشتاء وينخفض خلال الصيف. وتُستخدم هذه الطاقة في تدفئة الحظائر والمباني وتسخين المياه. كما يبين الشكل (16) السلوك الديناميكي لخزان التخزين خلال سنة تشغيلية كاملة، بهدف تقييم ملاءمة سعته في استيعاب فائض الإنتاج وتغطية فترات السحب. ويؤكد هذا التحليل قدرة الخزان على دعم استقرار تشغيل المنظومة وتحقيق التوازن بين الإنتاج والاستهلاك.



الشكل 16: سلوك مستوى الخزان خلال سنة تشغيلية كاملة

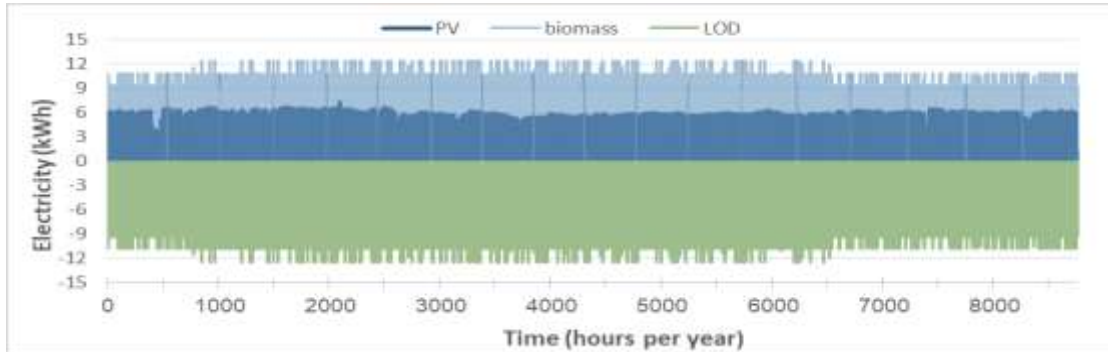
يُبين الشكل (16) التغير الزمني لمستوى خزان التخزين بسعة 4.6 متر مكعب على مدار سنة تشغيلية كاملة، حيث يُلاحظ انخفاض مستوى الخزان خلال فترات السحب المرتفع، يقابله ارتفاع تدريجي خلال فترات زيادة الإنتاج. ويعكس هذا السلوك الدور التنظيمي للخزان في تحقيق التوازن بين إنتاج الطاقة واستهلاكها داخل المنظومة. كما يوضح الشكل (17) السلوك الزمني لخزان التخزين من خلال اختيار فترة تشغيلية ممثلة مدتها 100 ساعة من بيانات التشغيل السنوية،

وذلك بهدف إبراز ديناميكية عمليتي الشحن والتفريغ على المدى القصير، وتقييم استجابة الخزان للتغيرات السريعة في معدلات السحب والتغذية خلال هذه الفترة.



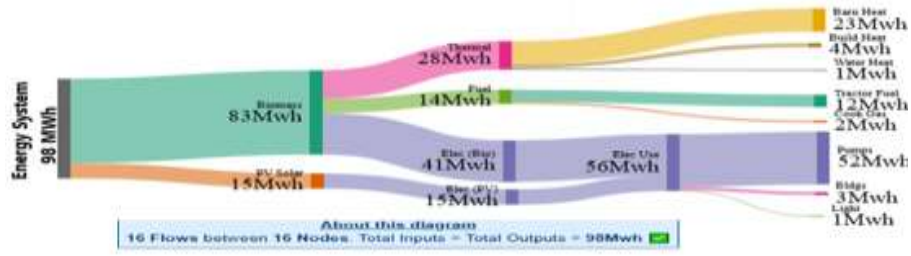
الشكل:17 سلوك مستوى الخزان خلال فترة تشغيلية 100 ساعة

بين الشكل (17) التغير الزمني لمستوى الخزان خلال فترة مقدارها 100 ساعة، حيث يُلاحظ الانخفاض التدريجي في مستوى الخزان نتيجة تفوق معدلات السحب على معدلات التغذية خلال معظم الفترة المختارة، مع وجود تذبذبات طفيفة تعكس التغير اللحظي في ظروف التشغيل. ولتوضيح مدى توافق الإنتاج الكهربائي مع الطلب على مدار سنة تشغيلية كاملة، يبين الشكل (18) التوازن بين مصادر إنتاج الطاقة الكهربائية المختلفة والحمل الكهربائي الساعي للمزرعة، بما يتيح تقييم قدرة المنظومة المقترحة على تغطية الطلب الكهربائي وضمان استقرار التشغيل.



الشكل: 18 توازن الطاقة الكهربائية بين الإنتاج والطلب

يُظهر الشكل (18) توازن الطاقة بين الإنتاج الكلي والطلب الكهربائي في المزرعة، حيث يمثل المنحنى الأخضر الحمل الكهربائي اليومي (Load Demand)، بينما يشير المنحنى الأزرق إلى إنتاج PV، المنحنى السماوي إلى إنتاج المولد الكهربائي الذي يعمل بغاز الميثان. يُظهر الشكل نجاح النظام الهجين المقترح في تحقيق تغطية كاملة للحمل الكهربائي ($LPSP = 0$) طوال العام دون الحاجة إلى مصادر طاقة إضافية.



الشكل 19: اتزان الطاقة في المنظومة الهجينة

يُوضَّح الشكل (19) البنية العامة لتدفقات الطاقة داخل المنظومة الهجينة المقترحة التي تجمع بين منظومي الطاقة الشمسية والكتلة الحيوية. حيث يتم توليد الكهرباء من كلتا المنظومتين وتوجيهها إلى الأحمال الكهربائية المختلفة داخل المزرعة مثل المضخات والمباني والإنارة. أما منظومة الكتلة الحيوية فتنتج إضافةً إلى الكهرباء كلاً من الطاقة الحرارية والوقود الحيوي. وتُستخدم الطاقة الحرارية في تغطية احتياجات تدفئة الحظائر والمباني وتسخين المياه، في حين يُستهلك الوقود الحيوي لتشغيل المعدات الزراعية وغاز الطهي.

3.4- التقييم الاقتصادي والبيئي للمنظومة

يُعدّ دمج الأثر البيئي لانبعاثات الكربون في التقييمات الاقتصادية خطوةً أساسيةً نحو تحقيق تطيلٍ أكثر واقعيةً لجدوى أنظمة الطاقة المتجددة. إذ إن احتساب تكلفة الكربون يعزّز القدرة التنافسية لمصادر الطاقة المتجددة في سوق الطاقة، ويتيح تقييمًا يعكس الأثر البيئي الحقيقي، كما يُبرز التفوق الاقتصادي والبيئي لمصادر الطاقة النظيفة مقارنةً بالأنظمة التقليدية المعتمدة على الوقود الأحفوري. وانطلاقاً من العلاقات الرياضية المطوّرة في المعادلات (15-17)، جرى حساب كلٍّ من التكلفة المستوية للكهرباء (LCOE)، والتكلفة المستوية للطاقة الحرارية (LCOH)، والتكلفة المستوية لوقود الميثان (LCOF)، والمبيّنة في الجدول (6)، مع مراعاة الانبعاثات الكربونية المصاحبة لدورة حياة مكونات المنظومة الهجينة المقترحة، وكذلك التكلفة البيئية الناتجة عن هذه الانبعاثات.

الجدول (6) القيم المحسوبة للتكلفة المستوية ومساهمة في المنظومة الهجينة

نوع الطاقة	الرمز	التكلفة المستوية	الوحدة	نسبة المساهمة في المنظومة %
الكهرباء	LCOE	0.038	\$/kWh	58%
الحرارة	LCOH	0.042	\$/kWh_th	28%
وقود	LCOF	0.16	\$/kg CH ₄	14%

لتقييم الأداء البيئي للمنظومة الهجينة، تم حساب صافي تكلفة الكربون لمختلف مخرجات الطاقة، بما في ذلك الكهرباء والطاقة الحرارية وغاز الميثان والطاقة الشمسية. ويعكس هذا المؤشر مقدار الانبعاثات الكربونية التي تم تجنبها نتيجة إحلال مصادر الطاقة المتجددة محل الوقود الأحفوري، حيث تشير القيمة السالبة إلى وفورات بيئية. وقد بلغ صافي إجمالي تكلفة الكربون للمنظومة نحو -5372 دولارًا، مما يدل على أثر بيئي إيجابي ملموس. كما تُظهر نتائج الجدول (7) أن المنظومة تحقق جدوى اقتصادية مقبولة وتسهم بفعالية في خفض الانبعاثات، بما يعزز استدامتها وإمكانية تطبيقها في المزارع الليبية.

الجدول (7): نسبة مساهمة مصادر الطاقة في خفض CO₂ للمنظومة الهجينة ومقارنة بالنظام التقليدي (بالطن).

نوع الطاقة	التقليدي	المنظومة	نسبة المساهمة في المنظومة %
------------	----------	----------	-----------------------------

59%	25.85	57.27	توليد الكهرباء من الكتلة الحيوية
74%	7.57	28.89	الطاقة الحرارية المنتجة من الكتلة الحيوية
53%	7.01	13.58	غاز الميثان
96%	0.63	15.17	الكهرباء المنتجة من الألواح الشمسية

تم تقدير فترة استرداد رأس المال للنظام الهجين باستخدام المعادلة (21) التي تعبر عن النسبة بين الكلفة الاستثمارية الأولية والعائد السنوي الناتج من بيع الطاقة وتجنب انبعاثات الكربون. أظهرت النتائج أن فترة الاسترداد تبلغ حوالي **3.9 سنوات**، وهو ما يؤكد الجدوى الاقتصادية العالية للنظام المقترح مقارنةً بالأنظمة التقليدية العاملة بالديزل.

5- الاستنتاجات

تشير نتائج هذه الدراسة إلى أن منظومة الطاقة الهجينة المقترحة، القائمة على دمج الطاقة الشمسية والكتلة الحيوية، تمثل حلاً فعالاً ومستداماً لتلبية احتياجات الطاقة في القطاع الزراعي الليبي، ولا سيما في المناطق الريفية والنائية. وقد أظهرت النتائج أن النظام، المكوّن من حقل خلايا شمسية بقدرة 8 كيلوواط، وهاضم حيوي بسعة 15 مترًا مكعبًا، ومولد كهربائي بقدرة 12 كيلوواط، قادر على تحقيق الاكتفاء الذاتي الكامل بالاعتماد على الموارد المحلية المتاحة داخل المزرعة. وبلغ إجمالي الإنتاج السنوي من غاز الميثان نحو 12,493 كيلوغرامًا، حُصص منه ما يقارب 1910 كيلوغرامات لتشغيل الآلات والمعدات الزراعية، ونحو 250 كيلوغرامًا لتغطية احتياجات غاز الطهي، في حين استُخدم الجزء المتبقي في توليد الطاقة الكهربائية والحرارية. كما أظهرت النتائج الاقتصادية أن التكلفة الاستثمارية للنظام تبلغ نحو 50,000 دولار أمريكي، مع تكلفة مستوية للكهرباء قدرها 0.038 دولار لكل كيلوواط-ساعة، وللطاقة الحرارية 0.042 دولار لكل كيلوواط-ساعة، ولوقود الميثان 0.16 دولار لكل كيلوغرام، وفترة استرداد رأس المال تُقدّر بحوالي 3.9 سنوات. وعلى الصعيد البيئي، أسهمت المنظومة المقترحة في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بنسبة تجاوزت 50%، بما يعادل نحو 78.5 طنًا سنويًا، وبقيمة اقتصادية تُقدّر بحوالي 5,372 دولارًا أمريكيًا.

6- التوصيات

استنادًا إلى نتائج التحليل التقني والاقتصادي والبيئي للمنظومة الهجينة المقترحة، وما أظهرته من استقرار تشغيلي خلال عام كامل من التشغيل، تُطرح التوصيات التالية لدعم التطبيق العملي للنظام وتوسيع استخدامه مستقبلاً في القطاع الزراعي الليبي.

- التوسع في تطبيق منظومات الطاقة الهجينة (الشمسية/الكتلة الحيوية) في المزارع الليبية، خاصة في المناطق النائية.
- إجراء تحليل حساسية اقتصادي وبيئي لمتغيرات الأسعار والكفاءة وتكلفة الكربون.
- دراسة تأثير التغيرات المناخية طويلة الأمد على أداء المنظومة.
- تحسين استراتيجيات تشغيل وإدارة خزان غاز الميثان.
- دراسة دمج تقنيات تخزين طاقة إضافية لتعزيز مرونة النظام.
- تقييم الأثر الاجتماعي والاقتصادي لتطبيق المنظومة على المجتمعات الزراعية.
- دعم إدماج هذه المنظومات ضمن السياسات الوطنية للطاقة المتجددة في ليبيا.

المراجع

- [1] Moumani, K. 2023. Management of sustainable development in the light of Arab and international cooperation: A case study of the Arab vision of management of sustainable development. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 1 (1): 1–8.
- [2] Carlson, C. J., Trisos, C. H., Oppenheim, B., Bansal, S., Davies, S. E., Diongue, A., and Niang, A. 2025. Pathways to an Intergovernmental Panel on Pandemics: Lessons from the IPCC and IPBES. *The Lancet Microbe*. 6 (10): 101178.
- [3] Inweer, M.-I., and Nassar, Y. 2025. Carbon emissions life cycle assessment of cement industry in Libya. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 162–173.
- [4] International Energy Agency. 2016. *Water–Energy Nexus*. Paris, France.
- [5] World Bank. 2021. *Electricity Use in Agriculture: Opportunities for Efficiency and Sustainability*. World Bank Group. Washington, DC, USA.
- [6] International Energy Agency (IEA). 2024. *CO₂ Emissions from Fuel Combustion – Highlights 2024*. Paris, France.
- [7] Ben Hassen, T., El Bilali, H., and Allahyari, M. S. 2022. Impacts of the Russia–Ukraine conflict on global food security and supply chains. *Food Security*. 14 (4): 1003–1025.
- [8] Nellemann, C. 2009. *The Environmental Food Crisis: The Environment’s Role in Averting Future Food Crises—A UNEP Rapid Response Assessment*. United Nations Environment Programme (UNEP). Nairobi, Kenya.
- [9] Almhdi, E., and Miskeen, G. 2025. Power and carbon footprint evaluation and optimization in transitioning data centres. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 221–229.
- [10] Imbayah, I., AlAshhab, A., Maqra, M., and Khaleel, M. 2025. Design of a PV solar-covered parking system for the College of Renewable Energy Tajoura, Libya: A PVsyst-based performance analysis. *University of Zawia Journal of Engineering Sciences and Technology*. 3 (2): 288–307.
- [11] Alkhazmi, A., Fathi, N., El-Khozondar, H., Rekik, S., Hadi, H., Elmnifi, M., Khaleel, M., Imbayah, I., and Abuhelwa, M. 2026. Design and analysis of PV solar street lighting systems in remote areas: A case study. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 4 (1): 1–14.
- [12] Abdullallah, A., Fathi, N., Mohammed, S., and Ghatus, M. 2025. Integrating electricity sub-grid with pumped hydropower storage system for grid stability and sustainability. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 3 (2): 322–332.
- [13] Aqila, A., Abubaker, A., and Fathi, Y. 2025. Design of a hybrid renewable energy system to meet housing thermal loads: Performance evaluation under real conditions of a house in Samno region, Libya. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 3 (2): 179–191.
- [14] Aqila, A., Nassar, Y., El-Khozondar, H., and Suliman, S. 2025. Design of hybrid renewable energy system (PV/Wind/Battery) under real climatic and operational conditions to meet full load of the residential sector: A case study of a house in Samno village – Southern region of Libya. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 3 (1): 168–181.
- [15] Salim, E., Abubaker, A., Ahmed, B., and Nassar, Y. 2025. A brief overview of hybrid renewable energy systems and analysis of integration of isolated hybrid PV solar system with pumped hydropower storage for Brack city – Libya. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 3 (1): 152–167.

- [16] Amer, K., Irhouma, M., Hamdan, M., Aqila, A., Ahmed, A., Fakher, M., and Alkhazmi, A. 2025. Economic-Environmental-Energetic (3E) analysis of photovoltaic solar energy systems: Case study of Mechanical & Renewable Energy Engineering Departments at Wadi AlShatti University. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 3 (1): 51–58.
- [17] Saad, A. A. H. 2025. Experimental assessment of the solar energy potential in the Gulf of Libya. International Journal of Applied Mathematics. 38 (7): 472–487.
- [18] Inweer, M., et al. 2025. Carbon footprint life cycle assessment of cement industry in Libya. Discover Concrete and Cement. 1 (1): 37.
- [19] Nassar, Y., et al. 2025. Towards green economy: Case of electricity generation sector in Libya. Solar Energy and Sustainable Development Journal. 14 (1): 334–360.
- [20] Alnaas, J. F., Sharif, A., and Altraiki, M. S. 2025. Sustainable energy future for Libya: Assessing the solar energy potential of twenty-three urban areas. Journal of the Academic Forum. 9 (1): 119–140.
- [21] El-Khozondar, R. et al. 2024. A new design for a built-in hybrid energy system, parabolic dish solar concentrator and bioenergy (PDSC/BG): A case study – Libya. Journal of Cleaner Production. 44 (1): 40944.
- [22] Alengebawy, A., Eissa, M., and Khalil, M. 2024. Anaerobic digestion of agricultural waste for biogas production: A review. Environmental Chemistry Letters.
- [23] H., Salem, et al. 2025. Technical and environmental cost-benefit analysis of strategies towards a green economy in the electricity sector in Libya. Economics and Policy of Energy and the Environment. 2025 (2).
- [24] Khaleel, M., Imbayah, I., and El-Khozondar, H. 2025. Renewable energy transition pathways and net-zero strategies. International Journal of Electrical Engineering and Sustainability. 4 (3): 1–16.
- [25] Elmnifi, M., Almaktar, M., Vambol, S., Trush, O., Sydorenko, V., and Mykhailov, V. 2024. Agricultural waste in Libya as a resource for biochar and methane production: An analytical study. Ecological Questions. 35 (2): 117–128.
- [26] Assalai, N. A. A., Ajaj, M. O., and Othman, F. S. 2025. Using solar energy in remote Libyan areas and establishing model farms (Al-Saddada area). The Open European Journal of Applied Sciences. 34–45.
- [27] Anvari, S., Khalfaou, A., Mhamdi, A., and Zribi, A. 2024. Analysis of agricultural waste/by-product biomass potential for three agri-food value chains in Tunisia: Olive oil, date palm, and almonds. Renewable Energy. 23 (4): 1238–1253.
- [28] Jemili, A., Znouda, E., Stinner, W., and Bouden, C. 2024. Techno-economic optimization of agricultural biomass to electricity supply chain network: A case study of Tunisia. Renewable Energy Focus. 50: 100604.
- [29] Khedher, N. B., et al. 2022. Modeling of biogas production and biodegradability of date palm fruit wastes with different moisture contents. Journal of Cleaner Production. 375: 134103.
- [30] Abdelhady, S., Shalaby, M. A., and Shaban, A. 2021. Techno-economic analysis for the optimal design of a national network of agro-energy biomass power plants in Egypt. Energies. 14 (11): 3063.
- [31] Metwally, A. A., Abo-Bakr, R. M., and Ahmed, D. S. 2024. Sustainable methane energy from bagasse treated via bokashi technology: Comparative between neural network and mathematical modeling. Clean Technologies and Environmental Policy. 26 (3): 661–676.

- [32] Mohamed, H., Menoufi, K., and Shehata, N. 2020. Design and optimization of a grid-tied PV–biomass hybrid renewable energy system with battery storage: A case study for a small building in Hurghada, Egypt. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 1234–1242.
- [33] Kermadi, M., and Berkouk, E. M. 2015. Techno-economic feasibility study for the use of photovoltaic energy on the south-east Algerian farms. *Revue des Energies Renouvelables*. 18 (4): 587–594.
- [34] El-Khozondar, H., El-Batta, F., El-Khozondar, R., Al-Afif, R., and Pfeifer, C. 2021. Microgrid for remote area in Gaza Strip powered by solar energy and olive oil mill waste. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Sustainable Energy & Environmental Protection (SEEP 2021)*, Vienna, Austria.
- [35] Alsadi, S., et al. 2024. Renewable energy potential in the State of Palestine: Proposals for sustainability. *Renewable Energy Focus*. 49: 100576.
- [36] Salah, W. A., Abuhelwa, M., Elnaggar, M., Nassar, Y. F., El-Khozondar, H. J., and Bashir, M. J. 2025. Assessment of waste-to-energy approaches to compensate for the shortage in energy supply in Gaza, Palestine. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*.
- [37] Thirunavukkarasu, M., Sundaram, E. G., and Saravanan, R. 2022. An examination of the techno-economic viability of hybrid renewable energy systems for a tea manufacturing plant in rural India. *Frontiers in Energy Research*. 10: 806870.
- [38] Silva, C. M., Souza, R., and Barros, V. 2020. Design and techno-economic assessment of a hybrid photovoltaic–biogas system for dairy farms in Brazil. *Renewable Energy*. 156: 1202–1214.
- [39] Lazarus, W., Crozier, J., and Goodrich, R. 2019. Techno-economic performance of hybrid solar photovoltaic and biogas CHP systems in livestock farms in Minnesota, USA. *Journal of Cleaner Production*. 231: 914–926.
- [40] Liu, Z., Ji, L., Wu, Y., and Huang, G. 2022. Techno-economic feasibility analysis of optimally sized biomass/PV/DG hybrid system under different operation modes in remote areas. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 52: 102117.
- [41] Schlattmann, K., Braun, M., and Moser, A. 2018. Integration of photovoltaic generation into agricultural biogas plants: Operational optimization and emission reduction potential in Germany. *Applied Energy*. 228: 1867–1878.
- [42] Collet, P., Hélias, A., Lardon, J., Steyer, A., and Bernard, O. 2017. Life cycle assessment of agricultural biogas plants in France: Influence of energy integration and digestate management. *Applied Energy*. 204: 1428–1444.
- [43] Styles, A., Adams, D., and Williams, T. 2018. Environmental and economic assessment of on-farm biogas production systems in the UK. *Journal of Cleaner Production*. 172: 432–444.
- [44] NASA. 2024. Surface Meteorology and Solar Energy (SSE) Data Set. NASA Langley Research Center. Available online: <https://power.larc.nasa.gov/>.
- [45] Ahmed, A. A., et al. 2021. Assessment of solar energy potential and performance of photovoltaic systems in Libya. *Energy Reports*. 7: 824–837.
- [46] World Health Organization. 2022. Advancing the implementation of One Health in the Eastern Mediterranean Region.
- [47] Google Earth. 2024. Satellite images of agricultural areas in Libya (Sebha, Awbari, Wadi Al-Atbah, Wadi Al-Shati, Ghadwa). Imagery © Maxar Technologies.

- [48] General Electricity Company of Libya (GECOL). 2023. Annual Report on Electric Power Generation, Consumption, and Grid Performance in Libya. Tripoli, Libya. Available online: <https://gecol.ly/>.
- [49] Monaem, E., Mohamed, A., Sergij, V., Oleksandr, T., Volodymyd, S., and Viktor, M. 2024. Agricultural waste in Libya as a resource for biochar and methane production: An analytical study. *Ecological Questions*. 35: 1–20.
- [50] Falconnier, G. N., et al. 2016. Unravelling the causes of variability in crop yields and treatment responses in southern Mali. *Field Crops Research*. 187: 113–126.
- [51] Rosenberg, L., and Kornelius, G. 2017. Experimental investigation of biogas production from feedlot cattle manure. *Journal of Energy*. 28 (4): 1–8.
- [52] Awad, H., et al. 2023. Energy, economic and environmental feasibility of energy recovery from wastewater treatment plants in mountainous areas: A case study of Gharyan city – Libya. *Acta Innovations*. 50: 46–56.
- [53] Miskeen, A. B., et al. 2023. Electricity from wastewater treatment plants. *Journal of Solar Energy and Sustainable Development*. 12 (2): 24–37.
- [54] Abanades, S., et al. 2022. A critical review of biogas production and usage with legislations framework across the globe. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 19 (4): 3377–3400.
- [55] Murphy, J., Braun, R., Weiland, P., and Wellinger, A. 2011. Biogas from crop digestion. *IEA Bioenergy Task*. 37: 1–23.
- [56] Liu, X., et al. 2018. Effects of hydraulic retention time on anaerobic digestion performance of food waste to produce methane as a biofuel. *Environmental Technology & Innovation*. 11: 348–357.
- [57] Fathi, Y., et al. 2023. Solar and wind atlas for Libya. *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability*. 27–43.
- [58] Fathi, Y., El-Khozondar, H., and Aqila, A. 2025. Determining the least risky solar radiation transposition model for estimating global inclined solar irradiation. *Solar Energy and Sustainable Development Journal*. 14: 1–16.
- [59] Abdulwahab, S., Fathi, Y. F., El-Khozondar, H. J., Khaleel, M., Ahmed, A. A., and Alsharif, A. 2023. Meeting solar energy demands: Significance of transposition models for solar irradiance. *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability*. 90–105.
- [60] Nassar, Y. F., et al. 2023. Regression model for optimum solar collectors' tilt angles in Libya. *Proceedings of the 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES)*.
- [61] Nassar, Y. F., et al. 2022. A generic model for optimum tilt angle of flat-plate solar harvesters for Middle East and North Africa region. *Applied Solar Energy*. 58 (6): 800–812.
- [62] Alsadi, S., Fathi, Y., and Ali, A. 2016. General polynomial for optimizing the tilt angle of flat solar energy harvesters based on ASHRAE clear sky model in mid and high latitudes. *Solar Energy*.
- [63] SODA-PRO. 2024. Solar Radiation Data. Available online: <https://www.soda-pro.com/>.
- [64] Nassar, Y. F., et al. 2025. Sensitivity of global solar irradiance to transposition models: Assessing risks associated with model discrepancies. *e-Prime – Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*. 11: 100887.

- [65] Alsadi, S., Fathi, Y., and Ali, A. 2016. General polynomial for optimizing the tilt angle of flat solar energy harvesters based on ASHRAE clear sky model in mid and high latitudes. *Solar Energy*.
- [66] Abuhamoud, N. M., Miskeen, G. M., El-Khozondar, H. J., Alsadi, S. Y., Ahwidi, O. M., and Nassar, Y. F. 2022. Investigating the applicability of horizontal to tilted sky-diffuse solar irradiation transposition models for key Libyan cities. *IEEE Maghreb Meeting on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA)*. 9–14.
- [67] Fathi, Y. F., Alsadi, S. Y., El-Khozondar, H. J., and Refaat, S. S. 2022. Determination of the most accurate horizontal to tilted sky-diffuse solar irradiation transposition model for capital cities in MENA region. *Proceedings of the International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE)*.
- [68] Nassar, Y. F., Alsadi, S. Y., Ali, K. A., Yousef, A. H., and Fakher, M. A. 2019. Numerical analysis and optimization of area contribution of the PV cells in the PV/T flat-plate solar air heating collector. *Journal of Solar Energy Research Updates*. 6: 43–50.
- [69] Yasser, N. F., et al. 2023. Thermoelectrical analysis of a new hybrid PV-thermal flat plate solar collector. *Proceedings of the 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES)*.
- [70] Teyabeen, A. A., Elhatmi, N. B., Essnid, A. A., and Mohamed, F. 2021. Comparison of seven empirical models for estimating monthly global solar radiation: Case study Libya. *Proceedings of the 12th International Renewable Energy Congress (IREC)*. 1–6.
- [71] Garada, A. S. 2023. Annual Technical Reports on Solar Energy Deployment in Libya. PhD Dissertation. Cardiff University. Cardiff, UK.
- [72] Omar, A., and Ghanem, S. 2022. Climatic characteristics and renewable energy potential in Libya. *AlQalam Journal of Medical and Applied Sciences*. 185–192.
- [73] Nassar, Y. F., El-Khozondar, H. J., Alsadi, S. Y., Abuhamoud, N. M., and Miskeen, G. M. 2022. Atlas of PV solar systems across Libyan territory. *Proceedings of the International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*. 1–6.
- [74] Fathi, Y. F., Alsadi, S. Y., Miskeen, G. M., El-Khozondar, H. J., and Abuhamoud, N. M. 2022. Mapping of PV solar module technologies across Libyan territory. *Iraqi International Conference on Communication and Information Technologies (IICCIT)*. 227–232.
- [75] Fathi, Y. F., El-Khozondar, H. J., Alsadi, S. Y., Abuhamoud, N. M., and Miskeen, G. M. 2022. Atlas of PV solar systems across Libyan territory. *International Conference on Engineering & MIS (ICEMIS)*. 1–6.
- [76] Ahmad, S., Agrira, A., and Nassar, Y. 2025. The impact of loss of power supply probability on design and performance of wind/pumped hydropower energy storage hybrid system. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 52–62.
- [77] Zhai, X., Chen, X., and Wu, Y. 2021. Research on the experimental performance of gas-fired boiler. *E3S Web of Conferences*.
- [78] World Nuclear Association. 2016. Heat values of various fuels.
- [79] Monney, I., Tiimub, B. M., and Bagah, H. C. 2013. Characteristics and management of household solid waste in urban areas in Ghana: The case of WA. *Civil and Environmental Research*. 3 (9): 10–21.

- [80] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2021. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva, Switzerland.
- [81] Palmer, G. 2017. Methane number. *The Journal of Natural Gas Engineering*. 2 (2): 134–142.
- [82] Ciula, J., Pawłowski, A., and Wnukowski, M. 2022. Efficiency analysis of the generation of energy in a biogas CHP unit. *Journal of Ecological Engineering*. 23 (7): 143–156.
- [83] Ahmad, Z., Kaario, O., Qiang, C., Vuorinen, V., and Larmi, M. 2019. A parametric investigation of diesel/methane dual-fuel combustion progression stages in a heavy-duty optical engine. *Applied Energy*. 251: 113191.
- [84] Kimutai, S. K., Kimutai, I. K., and Manirambona, E. 2025. Impact of biogas adoption on household energy use and livelihood improvement in Kenya: An overview toward sustainability. *International Journal of Energy Sector Management*. 19 (3): 551–568.
- [85] Monney, I., Tiimub, B. M., and Bagah, H. C. 2013. Characteristics and management of household solid waste in urban areas in Ghana: The case of WA. *Civil and Environmental Research*. 3 (9): 10–21.
- [86] Li, X., Zhang, Y., and Wang, L. 2023. Accurate thermophysical properties of methane at high pressures using modified equations of state. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 111: 104633.
- [87] Patel, N., Kumar, R., and Sundaram, S. 2022. High-pressure density measurements of methane and validation with EOS models. *Fluid Phase Equilibria*. 560: 113500.
- [88] Chang, Y., Yao, Y., Zheng, S., Zhang, K., Wang, H., and Wang, F. 2024. Enhanced prediction of CH₄ adsorption in coal at high pressure and temperature. *Energy & Fuels*. 38 (22): 21956–21972.
- [89] Ingersoll, J. G. 2024. Renewable methane with green hydrogen as storage and transport medium for intermittent wind and solar PV energy. *Hydrogen*. 5 (2): 209–229.
- [90] Yasser, N. F., El-Khozondar, H. J., Khaleel, M. M., Ahmed, A. A., Alsharif, A. H., and Elmnifi, M. H. 2024. Design of reliable standalone utility-scale pumped hydroelectric storage powered by PV/wind hybrid renewable system. *Energy Conversion and Management*. 322: 119173.
- [91] Fathi, N., Mangir, I., Hafez, A., El-Khozondar, H., Salem, M., and Awad, H. 2023. Feasibility of innovative topography-based hybrid renewable electrical power system: A case study. *Cleaner Engineering and Technology*. 14: 100650.
- [92] Xu, J., et al. 2025. Study on energy allocation strategy of multiple electrolyzers for renewable energy-based hydrogen production system. *Journal of Physics: Conference Series*. 3012 (1): 012059.
- [93] Mulumba, A. N., and Farzaneh, H. 2024. Techno-economic analysis of a hydrogen-based hybrid renewable energy system for off-grid power supply in Kenya. *International Journal of Hydrogen Energy*. 178: 151474.
- [94] Gerloff, N. 2023. Levelized and environmental costs of power-to-gas generation in Germany. *International Journal of Hydrogen Energy*. 48 (49): 18541–18556.
- [95] Cho, H. H., Strezov, V., and Evans, T. J. 2024. Life cycle assessment of power-to-methane and renewable methane production technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 206: 114856.

- [96] Skoplaki, E., and Palyvos, J. A. 2009. Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations. *Renewable Energy*. 34 (1): 23–29.
- [97] Isdayrah, A. R. M., and Mohamed, A. R. H. 2025. Evaluating the effect of weather patterns on solar PV using historical data in Libya. *Middle East Journal of Pure and Applied Sciences*. 41–47.
- [98] Aqila, A. H., Fathi, Y. N., and Othman, F. S. 2023. Experimental assessment of photovoltaic system efficiency under real operating conditions in southern Libya. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 143–154.
- [99] Alsharif, A. H., Ahmed, A. A., Fathi, Y. N., Khaleel, M. M., El-Khozondar, H. J., Alhoudier, T. E., and Esmail, E. M. 2023. Mitigation of dust impact on solar photovoltaics performance considering Libyan climate zone: A review. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 1 (1): 22–27.