Wadi Alshatti University Journal of
Pure and Applied Sciences

مجلة جامعة وادي الشاطئ
للعلوم البحتة والتطبيقية

Volume 3, No. 2, July-December 2025 Online ISSN: 3006-0877 المجلد 3، الاصدار 2، يوليو-ديسمبر 2025

RESEARCH ARTICLE **RENEWABLE ENERGY**

Design of a Hybrid Renewable Energy System to Meet Housing Thermal Loads: Performance Evaluation Under Real Conditions of a House in Samno Region, Libya

Abdul Hafeez Ahmed Aqila [1*], Ahmed Abubaker[1], Yasser Fathi Nassar[2]

[1]Department of Mechanical and Renewable Energy Engineering, Engineering Faculty,Wadi Elshatti University, Libya
[2]Research Center for renewable and sustainable development studies, Wadi Alshatti University, Libya

ARTICLE HISTORY
Received 17 July 2025
Revised 01 August 2025
Accepted 04 August 2025
Online 06 August 2025

KEYWORDS
Solar thermal energy;
Biomass energy;
Geothermal energy;
Thermal loads;
Libya.

A B S T R A C T

Hybrid renewable energy systems (HRESs) offer promising prospects for meeting residential heat demand in Libya. This research proposes the design of a hybrid renewable energy system that incorporates solar thermal, biomass, and geothermal energy. The analysis is applied to a realistic residential load case located in the Samno region in southern Libya, taking advantage of the region's unique geography and climate. First, the optimal size of the system components is investigated based on Solargis climate data, biomass energy data, and residential heat load data. The system components are modeled and analyzed using SAM software with the help of Excel and Jupyter Notebook. The results show that the proposed hybrid system is capable of meeting residential heat demand, with an initial capital cost of approximately $3,027 and a levelized cost of energy (LCOE) of approximately $0.054/kWh. Furthermore, the system contributed to a reduction of 425 kg of carbon dioxide emissions annually. The results of this work are expected to open new horizons for researchers and planners of hybrid renewable energy systems and their use to reduce the increasing energy demand for thermal loads in urban and rural areas.

تصميم نظام طاقة متجددة هجين لتلبية الاحمال الحرارية المنزلية: تقييم الأداء تحت الظروف الحقيقية لمنزل في منطقة سمنو-ليبيا

عبدالحفيظ أحمد عقيلة[1,*]،أحمد أبوبكر[1]، ياسر فتحي نصار[2]

الملخص

تتيح أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة (HRESs) آفاقًا واعدة لتلبية الاحتياجات الحرارية في القطاع السكني في ليبيا. يقترح هذا البحث تصميم منظومة طاقة متجددة هجينة تتضمن الطاقة الشمسية الحرارية، وطاقة الكتلة الحيوية، وطاقة القشرة الأرضية. يطبق التحليل على حالة واقعية لحمل منزلي يقع في منطقة سمنو بجنوب ليبيا للاستفادة من الطبيعة الجغرافية والمناخية للمنطقة. أولاً، يتم بهذا البحث تحديد الحجم الأمثل لمكونات المنظومة الهجينة وفقًا للبيانات المناخية من منصة Solargis، وبيانات الطاقة الكتلة الحيوية، وبيانات الحمل الحراري المنزلي. ثم يتم نمذجة وتحليل مكونات المنظومة باستخدام برنامج SAM وبمساعدة كل من برنامج Excel و Jupyter Notebook. أظهرت النتائج أن المنظومة الهجينة المقترحة، قادرة على تلبية الاحتياجات الحرارية المنزلية، بتكلفة رأس مال للمشروع حوالي $ 3027، وتكلفة طاقة مستوية (LCOE) حوالي $/kWh 0.054. بالإضافة إلى ذلك، أسهمت المنظومة في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 425 kg سنويًا. ومن المتوقع أن تفتح نتائج هذا العمل آفاقًا جديدة للباحثين ومخططي أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة واستخدامها للحد من الطلب المتزايد على الطاقة للأحمال الحرارية في المناطق الحضرية والريفية.

الكلمات المفتاحية

الطاقة الشمسية الحرارية
طاقة الكتلة الحيوية
طاقة القشرة الأرضية
الاحمال الحرارية
ليبيا

المقدمة

تتجه رؤية العالم المعاصر نحو قضايا السلامة البيئية والاقتصاد المستدام. في حين تعد صناعة الطاقة من أهم المؤثرات على تلك القضايا، بسبب حرق الوقود الاحفوري بكميات هائلة في محطات الطاقة التقليدية مثل الفحم والنفط والغاز الطبيعي، مما يجعل صناعة الطاقة تتصدر قائمة الأولويات البشرية من حيث الانبعاثات الضارة، والتي تشكل تهديداً كبيرًا للمناخ العالمي. إلى جانب ذلك، ترتبط تقلبات أسعار النفط باعتبارات جيوسياسية مما يؤثر على ميزانيات الدول والاقتصاد العالمي بشكل عام [1] [2]. إلا أن هذه التحديات لاتزال قائمة، حيث يعتمد مزيج الطاقة العالمي الحالي بحوالي 80% على الوقود الأحفوري في انتاج الطاقة الكهربائية والحرارية. في حين أن القطاع السكني يشكل حوالي 58% من استهلاك الطاقة الكهربائية في العالم للعام 2024، بينما تمثل الاحمال الحرارية نحو 45% من إجمالي استهلاك الطاقة في هذا القطاع [3]. لذلك، يعد توسيع نطاق استخدام أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة التي تجمع بين الطاقة الشمسية الحرارية، وطاقة الكتلة الحيوية، والطاقة القشرة الأرضية في إنتاج الطاقة الحرارية خطوة حيوية في مواجهة التحديات البيئية، حيث بلغت السعات المركبة في العالم من الطاقة الشمسية الحرارية حوالي 6876 MW، و من طاقة الكتلة الحيوية حوالي

*Corresponding author
https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_23

150261 MW، ومن الطاقة الجوفية حوالي 14846 MW في نهاية عام 2024 [4]. ولذلك، تعد أنظمة توليد الطاقة القائمة على طاقة الكتلة الحيوية والطاقة الجوفية من بين الأنظمة الأكثر فاعلية واستدامة. وقد تمت دراسة إمكانات تلك الطاقات في العديد من البلدان حول العالم، مع تحقيق نتائج إيجابية تؤكد جدوى هذه الأنظمة كمصادر طاقة مستدامة [5] [6] [7].

في هذا السياق، تشهد ليبيا تحديات كبيرة في مجال الطاقة، حيث يعتمد اقتصادها وصناعة الطاقة فيها بشكل رئيسي على النفط. هذا الاعتماد يجعلها عرضه لتقلبات الأسواق العالمية والتغيرات البيئية. حيث تقدر الطاقة الكهربائية المنتجة في ليبيا بحوالي 31 TWh سنوياً [8]. حيث يعتبر القطاع السكني المستهلك الأكبر للطاقة الكهربائية. وعلى الرغم من التباين في البيانات الواردة بشأن نسب استهلاك الطاقة الكهربائية في هذا القطاع، والتي تتراوح بين 36% و53%، إلا أن الدراسات تشير إلى أن الاحمال الحرارية تشكل حوالي 28% من إجمالي استهلاك الكهرباء في البلاد [9]. هذه الأرقام تسلط الضوء على الدور المحوري للقطاع السكني في استهلاك الطاقة، مما يعكس الحاجة الملحة لتطوير استراتيجيات ترشيد الاستهلاك، مع التركيز على دمج الطاقات المتجددة كحل مستدام لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة خاصةً الاحمال الحرارية. وعلى الرغم من أن استخدام الطاقات المتجددة في ليبيا يعود إلى سبعينيات القرن الماضي [10]، إلا أن تطبيقاتها كانت دائماً ترتكز على الطاقة الشمسية والطاقة الرياح. ومع ذلك، فإن إدخال طاقة الكتلة الحيوية والطاقة الجوفية كمصادر أخري للطاقات المتجددة يمكن أن يمثل إضافة مهمة، خاصةً في تغطية الأحمال الحرارية.

وبالتالي، بناءً على الموقع الجغرافي المميز لليبيا ضمن منطقة الحزام الشمسي، يعد دمج الطاقة الشمسية الحرارية وطاقة الكتلة الحيوية وطاقة القشرة الأرضية نهجاً تكاملياً فعالًا لتلبية الاحمال السكنية الحرارية. حيث تتوفر الطاقة الشمسية بمعدلات إشعاع شمسي عالية طوال النهار تصل إلى حوالي 6.89 kWh/m^2، مما يمكنها من تغطية جزء كبير نسبياً من الاحمال الحرارية مثل تسخين المياه. كما تبرز طاقة الكتلة الحيوية الصلبة، مثل النفايات العضوية المتاحة بكثرة من مخلفات الطعام والنفايات الزراعية الناشئة خلال موسم الحصاد، إمكانات كبيرة. حيث بلغت مخلفات الطعام في مدينة طرابلس حوالي 572,937 ton سنوياً أي بمعدل 1569 ton يومياً خلال عام 2023، وبلغت مخلفات الطعام في مدينة صبراتة حوالي 61700 ton سنوياً أي بمعدل 169 ton يومياً خلال عام 2024. وعند النظر إلى متوسط استهلاك الفرد الواحد، فإن كل فرد يسهم بمقدار 541 kg سنوياً، وهذا يعادل حوالي 1.4 kg يومياً للفرد من المخلفات الغذائية [11] [12]. كما تقدر القيمة الحرارية الاجمالية للنفايات الزراعية في ليبيا بحوالي 17.7 TJ [13]. إن إعادة استخدام هذه النفايات للاستفادة منها في توليد الطاقة يعد إجراء بناء في معالجة مشكلات التخلص منها، ويعزز من استدامة الموارد في البلاد في ذات الوقت. في هذا السياق، أشارت دراسة أجريت في نيجيريا إلى أن استخدام النفايات في توليد الطاقة يمكن أن يساهم في خفض انبعاثات الغازات الدفيئة بنسبة تصل إلى 75% [14]. وعلى الرغم من أن هذه الدراسة أجريت في نيجيريا، إلا أن نتاجها يمكن أن يكون ذا صلة بليبيا. كما تعد طاقة القشرة الأرضية مصدراً وعداً في جميع انحاء الدول الافريقية، ومع ذلك، تتفاوت الامكانات المحلية لهذه الطاقة بشكل كبير من منطقة الى أخرى، مما يعكس التباين في الخصائص الجيولوجية والحرارية. وبالرغم من ذلك، لاتزال هذه الإمكانات غير مستغلة إلى حد كبير. وبعد مراجعة العديد الدراسات حول طاقة القشرة الأرضية، لوحظ أن الدراسات المتعلقة بليبيا في هذا المجال محدودة للغاية. وبالتالي، تم الرجوع إلى دراسات من الدول المجاورة لفهم إمكانات القدرة الحرارية الأرضية في المناطق القريبة من ليبيا. أظهرت هذه الدراسات أن الإمكانات القدرة الحرارية في المناطق القريبة من ليبيا تندرج تحت فئة المحتوى الحراري المنخفض، وبالتالي، هذا النوع هو الأكثر ملاءمة للتطبيقات المباشرة مثل تدفئة و تبريد المساحات وغيرها [15] [16] [17].

تتصدر أنظمة الطاقة الهجينة كالطاقة الشمسية الحرارية وطاقة الكتلة الحيوية وطاقة القشرة الأرضية مكانةً بارزةً في البحث والممارسة العلمية. على المستوى المحلي والدولي، توفر مراجعة الأبحاث السابقة المدرجة في هذه الدراسة نظرة عامة على التطورات الرئيسية في هذا المجال.

على المستوى المحلي؛ أجريت دراسة لتصميم نظام طاقة الهجين مدمج يتضمن مركز شمسي طبقي مكافئ، وطاقة كتلة حيوية لمنطقة براك- وادي الشاطئ- ليبيا. ركزت هذه الدراسة على تعزيز الاستخدام المستدام للموارد المحلية والصديقة للبيئة، مما يجعل أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة ضرورية لتلبية احتياجات الطاقة المستقبلية. ومع ذلك، تعاني أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية من انخفاض العائد الكهربائي بسبب ارتفاع درجات الحرارة في تلك المنطقة. لذا، اقترح في البحث استبدالها بمركزات شمسية على شكل طبق، مع الاستفادة من الطاقة الحيوية الناتجة عن المخلفات الزراعية. وبالتالي، اظهرت نتائج الدراسة أن النظام المقترح، الذي تم تقييمه في مدينة براك- ليبيا، ويتألف من مفاعل حيوي بسعة 36560 m^3، ومركزات شمسية بقدرة 1230 kW، وبمساحة 6006 m^2، من المتوقع أن يضيف للنظام 5670534 kWh، وبتكلفة رأس مال $ 12365896. كما سيسهم في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 7800 ton سنوياً [18].

على المستوي الدولي؛ في فلسطين؛ أجريت إحدى الدراسات على تقييم إمكانات الطاقة المتجددة في محافظة جنين الواقعة في الضفة الغربية، من خلال بيانات زمنية لمصادر الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والكتلة الحيوية، الى جانب بيانات الحمل الكهربائي المسجلة على مدى عام كامل. وقد استخدمت الدراسة برنامج (SAM) لتقدير الإمكانات المتاحة، في حين تم تحديد التكوين الأمثل لنظام طاقة متجددة هجين باستخدام أداة (HOMER) لتحسين موارد الطاقة الهجينة. وقد اقترحت الدراسة نظاماً هجيناً يتكون من محطة طاقة شمسية كهروضوئية بقدرة 80 MW، ومزرعة للرياح بقدرة 66 MW، بالإضافة الى نظام طاقة من الكتلة الحيوية بقدرة 50 MW، باستثمار أولي يقدر بـ 323 M$. وأظهرت النتائج أن النظام قادر على توليد 389 GWh سنوياً، وهو ما يغطي كامل الطلب السنوي على الكهرباء في المنطقة المستهدفة 372 GWh، مع فائض طفيف في الإنتاج بنسبة 4.57%. ويغطي عجز في الحمل يقدر بنحو 109.6 MWh سنوياً فقط، وهو ما يعادل أقل من ساعتين من انقطاع التيار الكهربائي في العام. كما قدرت تكلفة الطاقة المستوية (LCOE) بقيمة 0.313 $/kWh [19].

في اثيوبيا؛ أجريت دراسة حالة في شمال أثيوبيا تهدف إلى تحسين تصميم محطة طاقة هجينة تعتمد على الطاقة الشمسية وطاقة الكتلة الحيوية لتزويد مصنع نسيج بالطاقة. يدمج هذا النهج الاعتبارات الاقتصادية والتقنية والبيئية لتحقيق نظام طاقة مستدام وفعال. بدأت الدراسة بتحديد

واضح لقضايا البحث المتعلقة بالهدف. وهو تحسين كفاءة الطاقة وتقليل التكاليف مع مراعاة الجوانب البيئية. لتحقيق هذه الغاية، تمت نمذجة غلاية كتلة حيوية باستخدام برنامج (MATLAB)، ودمجها في نموذج محطة طاقة شمسية باستخدام برنامج (TRNSYS). أظهرت نتائج التصميم والتحليل كفاءة للمحطة الهجينة بلغت 31.5%، مع زيادة في مساهمة الطاقة الشمسية بنسبة 23.5%. أدى ذلك إلى تكلفة مستوية للطاقة (LCOE) تبلغ حوالي 0.094 $/kWh. تم تقييم أداء النظام المصمم خلال شهري أغسطس وأكتوبر، حيث أظهر امتثالاً لمواصفات التصميم. كما تم تحليل جدوى المحطة المقترحة في ظل عدم اليقين في أسعار الكهرباء وفقدان الطاقة بسبب انقطاع التيار الكهربائي في الصناعات الإثيوبية. بلغت خسائر انقطاع الكهرباء التي تم رصدها في دراسة الحالة حوالي 0.043 $/kWh، وهي أقل من القيم المذكورة في العديد من الأبحاث، مما يؤكد على إمكانات المحطة المقترحة كمصدر طاقة موثوق وفعال [20].

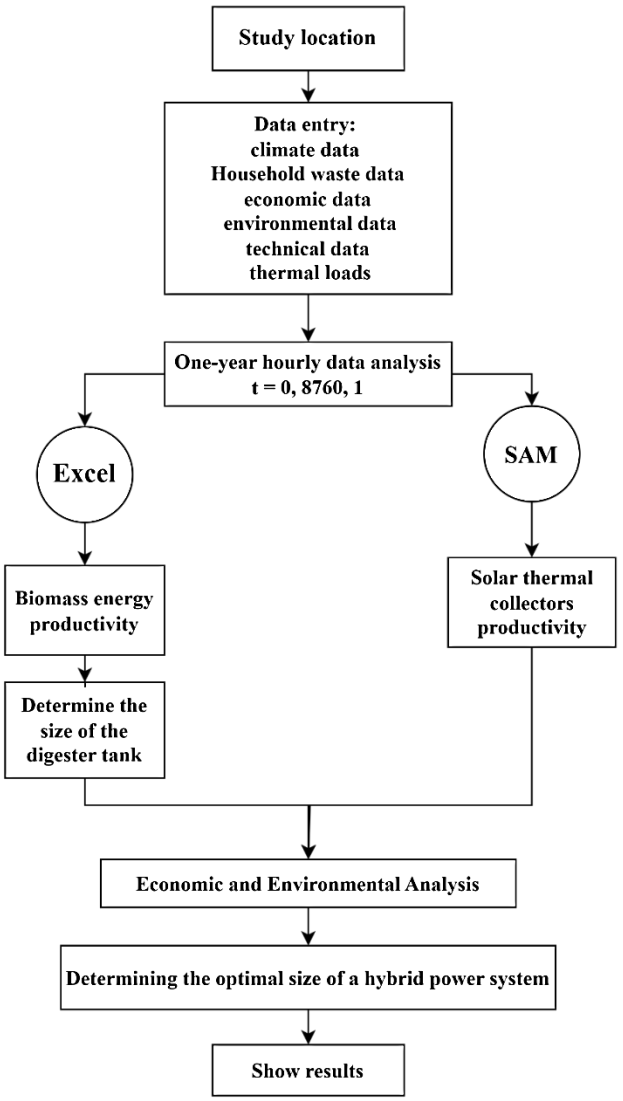
في الهند؛ أجريت دراسة تهدف إلى تصميم وتحليل منظومة طاقة متجددة هجينة لتلبية احتياجات الطاقة في منطقة ريفية بولاية البنجاب في الهند. تم استخدام برنامج HOMER Pro لنمذجة ومحاكاة النظام، والذي يتكون من ألواح شمسية كهروضوئية PV، ومولد يعمل بالكتلة الحيوية، ومحول، وبطاريات تخزين. استهدفت الدراسة توفير إمداد مستمر بالطاقة لـ770 أسرة، مع التركيز على تقليل التكاليف وتعظيم الكفاءة. تم تقييم عدة تكوينات للنظام باستخدام تقنية (TOPSIS)، بناءً على معايير مثل التكلفة الحالية الصافية (NPC) وتكلفة الطاقة المستوية (LCOE) وفترة استرداد رأس المال (PBTM). أظهرت النتائج أن التكوين الأمثل يتكون من مولد كتلة حيوية بقدرة 10 كيلوواط، ومجموعة ألواح كهروضوئية بقدرة 1.1 kW، وخمس بطاريات ليثيوم أيون، ومحول بقدرة 3.96 kW. وكشف التحليلات أن النظام المقترح قادر على توليد 35.6% من الكهرباء المطلوبة باستخدام الطاقة الكهروضوئية، و64.4% الكتلة الحيوية، مع تحقيق تكامل طاقة متجددة بنسبة 100%. بلغت فترة استرداد رأس المال 1.58 سنة، مما يعكس جدوى اقتصادية عالية. تؤكد الدراسة أن هذه المنظومة يمكن تطبيقها في المناطق الريفية بالدول النامية الأخرى [21].

في الصين؛ أجريت دراسة حالة لمزرعة صغيرة في منطقة جينان بالصين لتقييم نظام متكامل للتبريد والتدفئة والطاقة (RESs) يعتمد على مصادر الطاقة المتجددة، تحديداً الطاقة الشمسية وطاقة الكتلة الحيوية. يهدف النظام إلى تعزيز كفاءة الطاقة والاستدامة البيئية من خلال دمج مزيج الطاقات المتجددة (RESs) في أنظمة (CCHP). نظراً للتقلبات المرتبطة باستخدام الطاقة الشمسية، تم اقتراح تقنية التخمير بدرجة حرارة ثابتة لإنتاج الغاز الحيوي من الكتلة الحيوية، مما يضمن استقرارًا في الإنتاج. يتكون النظام المقترح من محرك يعمل بالغاز الحيوي وألواح شمسية، مما يجمع بين مصدرين متجددين للطاقة. أظهرت نتائج الدراسة أن تطبيق تصميم التحسين أدى إلى تحسينات ملحوظة في كفاءة الطاقة، حيث حقق النظام قيماً بلغت 20.94% في توفير التكاليف و11.73% في الحفاظ على الطاقة و40.79% في خفض معدل انبعاثات الكربون. علاوة على ذلك، أثبت النظام متانته في التعامل مع تقلبات الطاقة الشمسية وتغيرات إنتاج الغاز الحيوي، مما يجعله مناسباً لتزويد المناطق الريفية واللامركزية بالطاقة بشكل مستدام. كما تم تحليل تأثير هذه المتغيرات على التصميم، مما أكد قدرة النظام على التكيف مع الظروف المتغيرة. ختاماً، توفر هذه الدراسة نموذجاً فعالاً لدمج الطاقات المتجددة في أنظمة التبريد والتدفئة [22].

يتمثل هدف الدراسة الحالية في: تصميم منظومة طاقة متجددة هجينة لتغطية الاحمال الحرارية المنزلية، تشمل الطاقة الشمسية الحرارية وطاقة الكتلة الحيوية وطاقة قشرة الأرضية، يتم ذلك، من خلال معرفة الظروف المناخية المؤثرة على أداء أنظمة الطاقة المتجددة وتحديد كميات النفايات والمخلفات المتاحة في موقع الدراسة، والتي سيتم استخدامها كمصادر لطاقة الكتلة الحيوية. مع تحديد حجم المفاعل الحيوي المناسب لاحتواء تلك الكميات. ومع ذلك، سيتم تصنيف الاحمال الحرارية وتقسيمها إلى أقسام محددة: مثل التدفئة والتبريد وتسخين المياه والطهي، لتحديد أنظمة الطاقة المناسبة لكل نمط من أنماط الاحمال.

منهجية البحث

يوضح الشكل (1) المنهجية المتبعة في البحث، حيث اعتمدت الدراسة على أساليب وتقنيات لجمع وتحليل البيانات، فبدأت بتحديد موقع الدراسة، تم جمع البيانات مثل: البيانات المناخية والمتحصل عليها من منصة Solargis، والبيانات الاقتصادية، والبيانات البيئية، والبيانات الفنية، والاحمال الحرارية، وكميات النفايات المنزلية. ثم تم تحليل البيانات من خلال تحديد إمكانات الطاقة المتجددة



الشكل 1: منهجية متبعة في البحث

لكل ساعة على مدار عام، مع التركيز على الطاقة الشمسية الحرارية وطاقة الكتلة الحيوية، لتقدير إنتاجية المجمعات الشمسية الحرارية وطاقة الكتلة الحيوية. عقب ذلك، أجري التحليل الاقتصادي والبيئي لتقييم الجدوى الاقتصادية والاثار البيئية للنظام المقترح. وأخيراً، تم تحديد الحجم الأمثل لمنظومة الطاقة الهجينة. وذلك بالاستعانة ببرنامج SAM برنامج Excel وأيضاً بمساعدة برنامج Jupyter Notebook.

فرضيات وحدود الدراسة ومصادر اللايقين في النتائج

في سياق هذه الدراسة، تم وضع الفرضيات التالية كمنطلق للتحليل:

1. استهلاك مستقر لغاز الطهي بمعدل تقريبي 0.96 kg يوميًا.
2. اعتبار كفاءات الأجهزة الحرارية الكهربائية 100%.
3. اعتبار الكمية الموردة من مخلفات الدواجن متاحة.
4. اعتبار نسبة الميثان في الغاز الحيوي 50% [23].
5. إنتاجية غاز الميثان مستقرة على طول السنة.
6. اعتماد معامل تغطية يبلغ 80% للمنظومة الشمسية الحرارية لتسخين المياه [24].
7. اعتماد متوسط قيم معامل توليد غاز الميثان من النفايات 0.19 m^3/kg [25].
8. الاعتماد على طاقة القشرة الأرضية في تغطية احمال التدفئة والتبريد.

أما حدود الدراسة تتمثل في اقتصار الدراسة على موقع واحد، إلا أن النهج المتبع قابل للتطبيق على مواقع أخرى تتشابه في خصائصها المناخية وأنماط الحياة، مما يعزز إمكانية تعميم النموذج المقترح. بالإضافة إلى ذلك، لم يتم تقييم تأثير ظروف مختلفة من التشغيل على إنتاجية وتصميم المفاعل الحيوي. وأيضًا لم يتم تحديد الخصائص الجيولوجية والحرارية للقشرة الأرضية في منطقة الدراسة. علاوة على ذلك، لم تتناول الدراسة عملية المفاضلة لتقنيات متقدمة لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة حرارية، مثل الانابيب المفرغة أو المركزات الشمسية الأخرى، بدلاً من المجمعات الشمسية المستوية التقليدية.

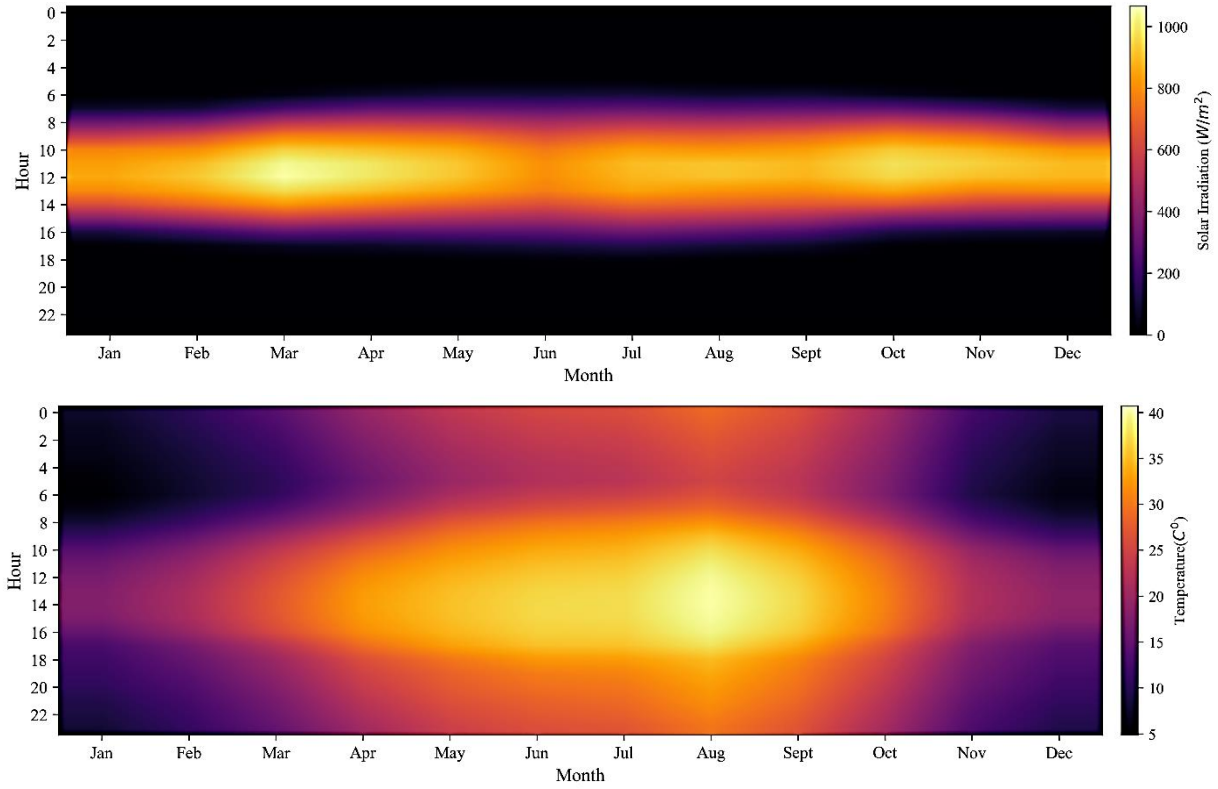
أما مصادر اللايقين في النتائج فسببها: البيانات المناخية والتشغيلية والاقتصادية (حيث أشار Nassar et al إلى وجود تفاوت كبير في أسعار المعدات والأجهزة، يصل حوالي 360%)، وكذلك استخدام القيم الفيزيائية ومعاملات التحويل التي تعتبر أيضا من مصادر اللايقين، ومن أمثلة هذه القيم وجود تباين في قيم معاملات التحويل الخاصة بتوليد غاز الميثان من النفايات، حيث تتراوح هذه القيم بين 0.191 m^3/kg و 0.5 m^3/kg من النفايات [26] [27].

البيانات الأساسية لموقع الدراسة

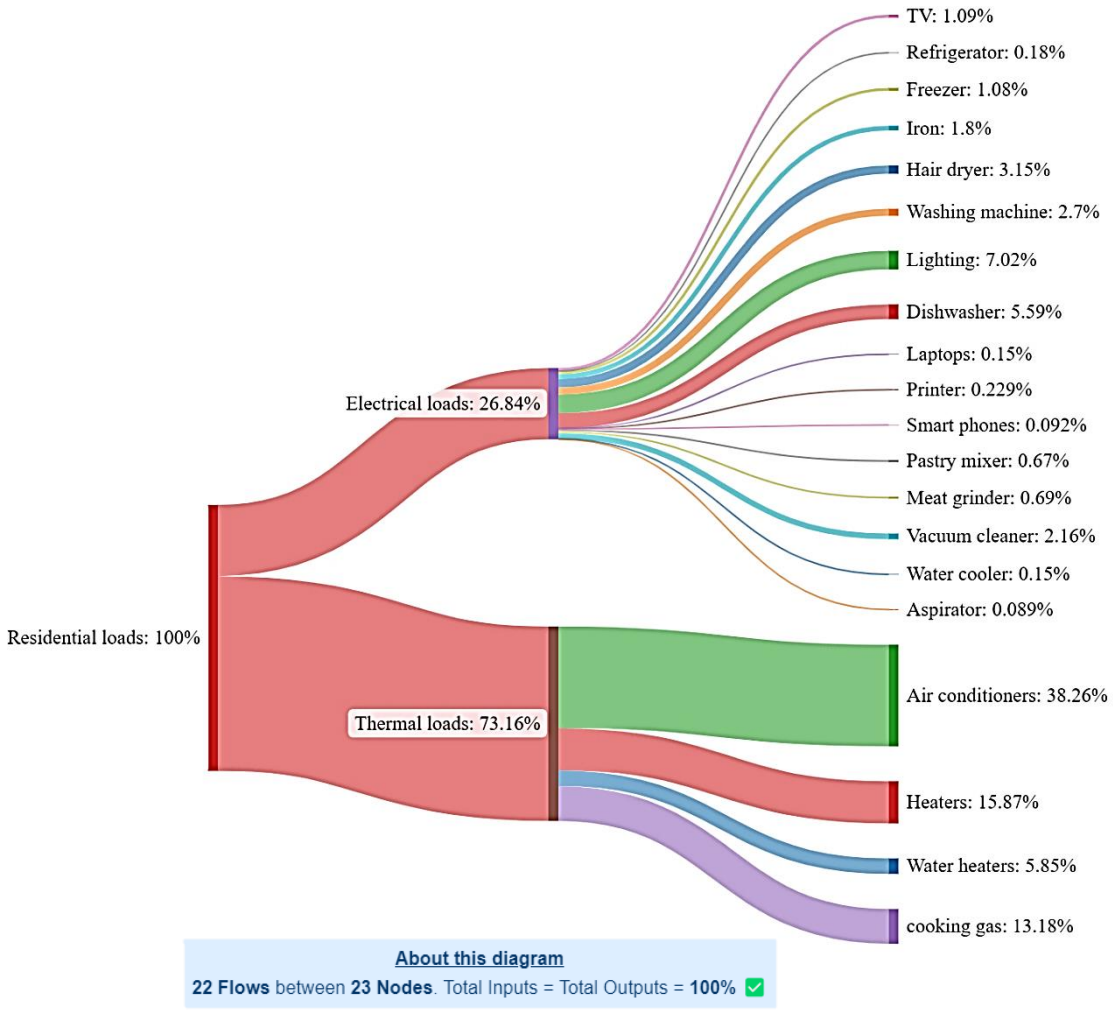
البيانات الجغرافية والمناخية

يقع المنزل قيد الدراسة في بلدية وادي البوانيس، التي تعتبر واحدة من البلديات الواقعة في المناطق الجنوبية لليبيا. تتكون هذه البلدية من سلسلة من المناطق، من بينها منطقة سمنو، حيث تعد منطقة سمنو أكبر مناطق وادي البوانيس. تقع منطقة سمنو في الجنوب الغربي من ليبيا، عند إحداثيات خط الطول 14.889° شرقاً وخط العرض 27.221° شمالاً، وتبعد المنطقة حوالي 60 km عن مدينة سبها و781 km عن مدينة طرابلس. كما موضح في الشكل (2). يقدر عدد سكان المنطقة حسب تقرير مصلحة الأحوال المدنية بالمنطقة للعام 2024 بحوالي 16453 نسمة. يسود منطقة سمنو المناخ الصحراوي، حيث تشهد ارتفاعاً ملحوظًا في درجات الحرارة خلال فصل الصيف، لتصل إلى ذروتها عند 42 درجة مئوية. وفي المقابل، تنخفض درجات الحرارة بشكل كبير خلال فصل الشتاء، لتصل إلى 5 درجات مئوية. بالإضافة إلى ذلك، تتمتع بمتوسط ساعات سطوع شمسي يبلغ 4300 ساعة سنوياً، مع معدل إشعاع شمسي يصل إلى 1200 W/m^2. كما هو موضح في الشكل (3). تتميز منطقة سمنو بطابعها الزراعي والحيواني الفعال، حيث يعتمد سكانها على الزارعة وتربية المواشي كمصادر رئيسية للرزق. لذلك يتغذى سكان المنطقة بشكل أساسي على الغذاء الطبيعي الذي يتم إنتاجه محلياً. على عكس سكان المدن الذين يعتمدون بشكل أكبر على الأغذية المصنعة. بالتالي، مع تزايد الأنشطة الزراعية والحيوانية في المنطقة، تزداد كميات النفايات العضوية الناتجة، مثل مخلفات الطعام العضوي والمحاصيل الزراعية، والفضلات البشرية والحيوانية، التي يمكن أن تمثل مصدراً مهماً للطاقة الحيوية، حيث يمكن تحويلها إلى غاز الميثان أو سماد عضوي من خلال التحلل. مما يسهم في تقليل التلوث البيئي وتعزيز الامن الغذائي في المنطقة [28].

الشكل 2: الموقع الجغرافي للموقع الدراسة



الشكل 3: الاشعاع الشمسي ودرجة الحرارة للموقع الدراسة



الشكل 4: تصنيف الاحمال السكنية للمنزل محل الدراسة

بيانات الاحمال

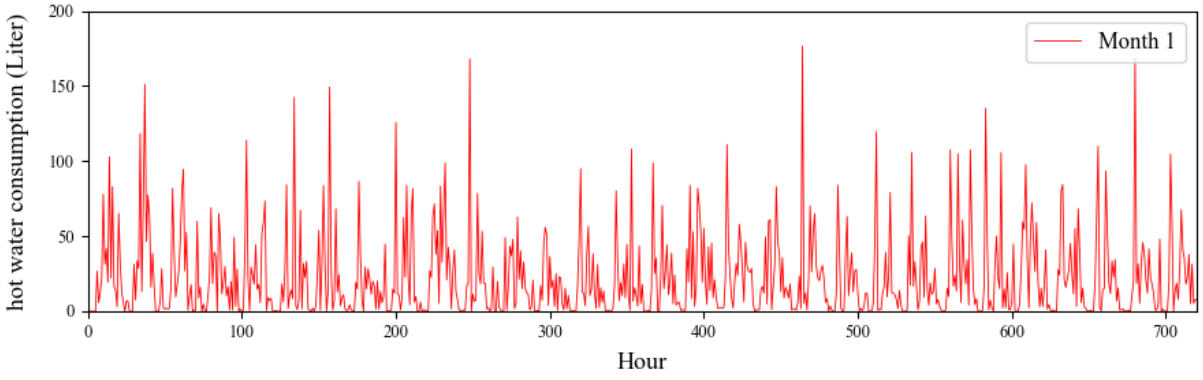
1. الاحمال الكهربائية

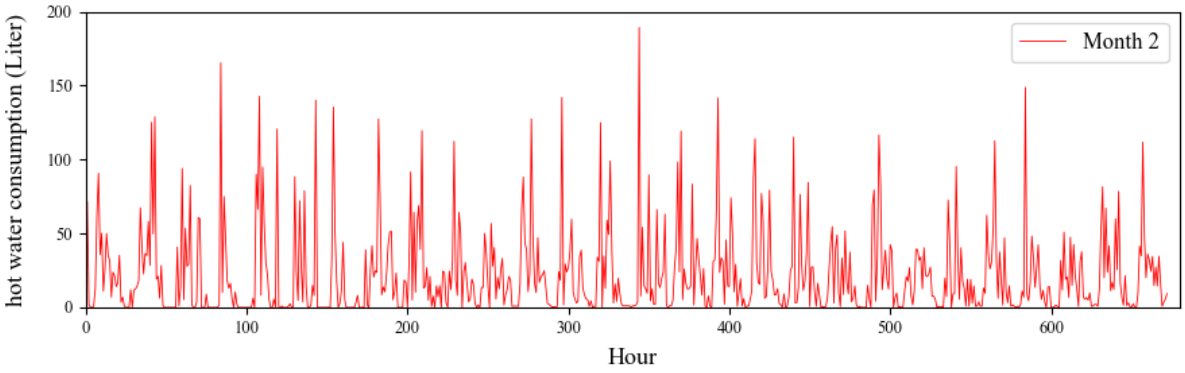
انطلاقًا من إطار استمرارية الدراسة حول تصميم منظومة طاقة متجددة هجينة، والتي تم في دراسة سابقة التركيز على تحليل ومعالجة الاحمال الكهربائية بشكل خاص، وتغطيتها بمنظومة طاقة هجينة، تتكون من طاقة الشمسية، وطاقة الرياح، وبطاريات تخزين [29]. وتأسيسًا على ذلك، سيتم التركيز في هذه الدراسة على تحليل ومعالجة الاحمال الحرارية على أساس الصورة النهائية لاستهلاك الطاقة، وكانت على النحو التالي:

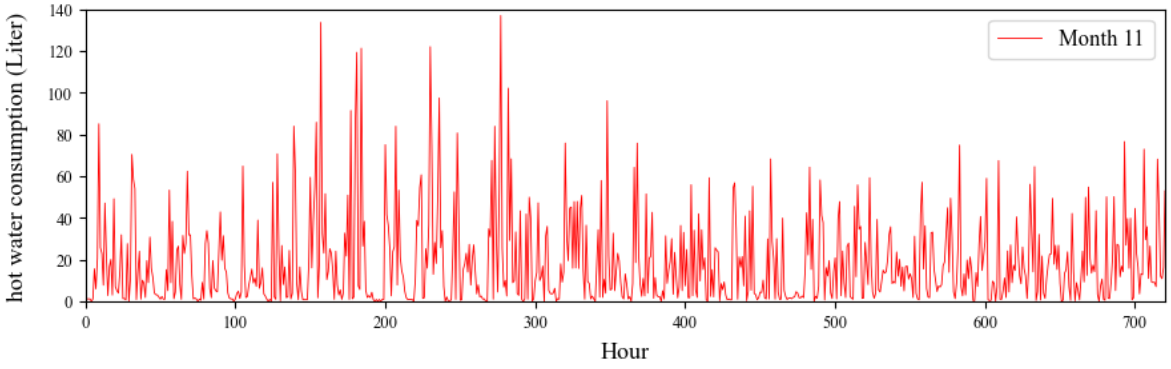
الاحمال الكهربائية: تشمل هذه الفئة الأجهزة الكهربائية مثل: الإضاءة، والثلاجات، والغسالات، والتليفزيونات وغيرها، وأيضاً الأجهزة الحرارية المنخفضة التي تكون مدة تشغيلها لا تتعدى 10 دقائق. مثل: مكوه، ومجفف الشعر. والتي تم تحليلها ومعالجتها في دراسة سابقة. والاحمال الحرارية العالية: تتضمن هذه الفئة الأجهزة التي تعتمد على التسخين، مثل: سخانات تسخين المياه، والتدفئة والتبريد واستخدام الغاز للطهي. يبين الشكل (4) تصنيف الاحمال السكنية ونسبة استهلاكها في المنزل محل الدراسة.

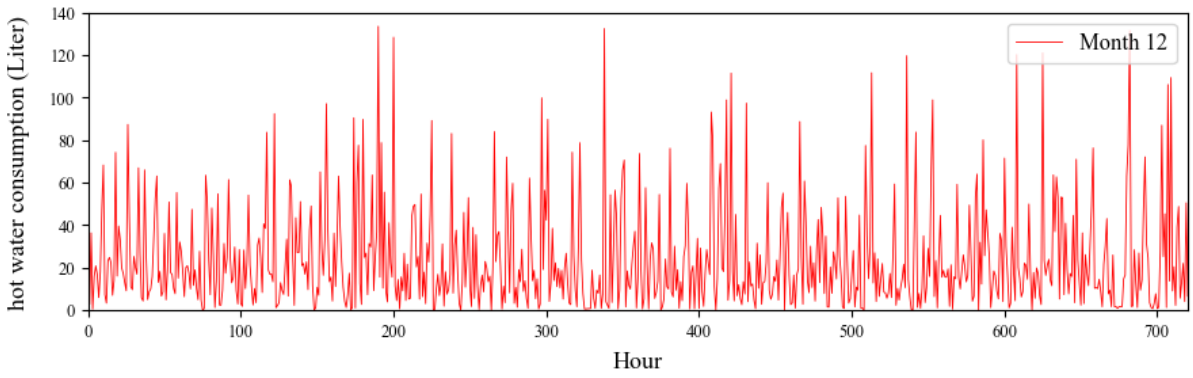
2. الاحمال الحرارية

يمثل الحمل الحراري للمنزل محل الدارسة النسبة الأكبر، حيث بلغ حوالي 23288 kWh سنويًا. ويلاحظ أن هذا الحمل يتوزع بشكل موسمي بين فصلي الصيف بحوالي 12577 kWh، والشتاء بحوالي 6192 kWh؛ حيث يتركز استهلاك الطاقة في فصل الشتاء على تشغيل سخانات المياه وأجهزة التدفئة الكهربائية، وبالتالي، بلغ كمية المياه الساخنة يوميًا حوالي 590 لتراً (أي ما يعادل 84 لتراً للفرد الواحد). يمثل الشكل (5) نمط استهلاك الماء الساخن للمنزل محل الدراسة. بينما تقتصر الاحمال في فصل الصيف على المكيفات. والشكل (6) يوضح نمط استخدام الأجهزة الحرارية (التبريد) والمتمثلة في المكيفات خلال يوم واحد في فصل الصيف، ونمط استخدام الأجهزة الحرارية (التدفئة) والمتمثلة في سخانات المياه والمدافئ خلال يوم واحد في فصل الشتاء. أما فيما يتعلق بمتوسط استهلاك غاز الطهي، فقد تم رصده وتقديره بحوالي 0.96 kg يومياً، أي ما يقدر بنحو 350.4 kg سنوياً (أي ما يعادل حوالي 4600 kWh سنوياً).









الشكل 5: نمط استهلاك المياه الساخنة خلال أشهر فصل الشتاء للمنزل محل الدراسة

النفايات المستخدمة كمواد خام لإنتاج الغاز الحيوي في موقع الدراسة

يعد تقدير الوزن الإجمالي للنفايات المنزلية الخطوة الأساسية في عملية تصميم أنظمة إدارة النفايات. نظراً لطبيعة هذه النفايات التي يتم التخلص منها بشكل دوري، تم رصد وتقدير وتوصيف كميتها بشكل يومي على مدار أسبوع. حيث بلغ متوسط وزنها حوالي 7.33 kg يومياً. تضمنت النفايات المنزلية مزيجاً من المواد العضوية وغير العضوية. شملت المواد العضوية قشور الخضروات والفواكه، وقشور البيض، وبقايا الطعام، والتي مثلت النسبة الأكبر من النفايات والتي بلغت حوالي 61.04%. هذا يشير إلى إمكانية استخدامها كمواد خام لإنتاج الغاز الحيوي (CH_4). أما المواد غير العضوية بلغت حوالي 38.96%، وشملت الورق والبلاستيك والزجاج. كما هو موضح في الشكل (7). ومن القيود التي وضعتها الدراسة ضرورة التخلص من جميع أنواع النفايات المذكورة. وفي حالة عدم كفاية هذه النفايات، تم اقتراح توريد مخلفات زراعية وحيوانية، خاصة أن المنطقة محل الدراسة تتميز بطابع زراعي وحيواني بارز.

النمذجة الرياضية لمكونات النظام

المجمعات الشمسية الحرارية

يمكن حساب الكسب الحراري للمجمعات الشمسية لتسخين المياه، من خلال المعادلة التالية [30]:

$$Q_u = \eta_c A_c H_t \quad (1)$$

حيث يشير H_t إلى شدة الاشعاع الشمسي المائل (W/m^2)، وأما بالنسبة للمدخلات الأخرى فهي مدرجة في الجدول (1).

الجدول 1: مواصفات المجمع الشمسي

البند	المواصفات
مساحة المجمع الشمسي، A_C	$1.25\ m^2$
زاوية ميل المجمع الشمسي، β	30°
كفاءة المجمع، η	60 %
تكلفة رأس المال	$\$440/m^2$
تكلفة الصيانة والتشغيل السنوية	$\$20/m^2$
عمر المجمع الشمسي، n	$20\ year$

طاقة الكتلة الحيوية

تقدر إمكانات طاقة الكتلة الحيوية من خلال تجميع النفايات المنزلية الصلبة (MSW). تحسب من المعادلة التالية [31]:

$$BE_{CH_4}(m^3 CH_4) = W_{MW}\ OR\ G_{MW} \quad (2)$$

حيث يمثل W_{MW} المتوسط السنوي من النفايات المنزلية الصلبة، OR نسبة محتوى النفايات العضوية في إجمالي النفايات المنزلية الصلبة، G_{MW} يمثل معامل إنتاج الميثان من النفايات المنزلية الصلبة (m^3/kg). سيتم بعد ذلك تحويل الغاز CH_4 إلى طاقة حرارية من خلال المعادلة التالية [31]:

$$BE_{th} = LHV_{CH_4}\eta_{th}BE_{CH_4} \quad (3)$$

باعتبار القيمة الحرارية للميثان (LHV_{CH_4}) 36 MJ/m^3 والكفاءة الحرارية (η_{th}) 90%.

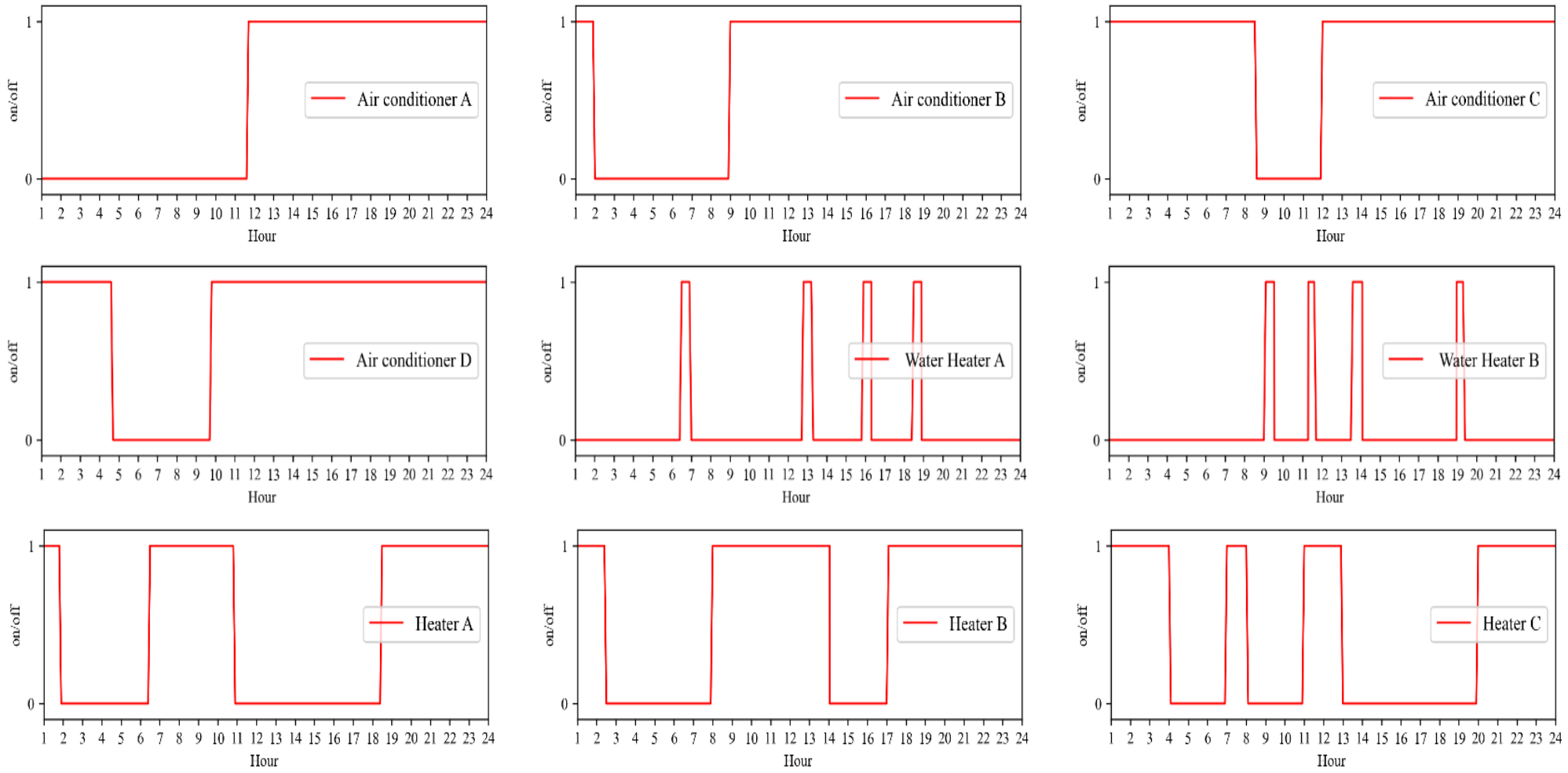
بالتالي، يعد تحديد حجم التشغيل للمفاعل الحيوي من العوامل المهمة التي يجب مراعاتها خلال عملية التصميم، ولتحقيق ذلك، يجب الأخذ بالاعتبار كمية النفايات اليومية (S_d)، ونسبة محتوى المواد العضوية (OR)، وزمن الاحتفاظ بالمواد العضوية داخل المفاعل (HRT)، والذي تم تحديده بـ26 يوم، نظراً لاعتماد نظام المفاعل الحيوي على نظام الدفعات، فهذا يعني أنه سيتم إزالة المواد العضوية المتحللة قبل إدخال مواد العضوية جديدة. كما هو موضح في المعادلة (4). بعد ذلك، يحسب الحجم الإجمالي (V_t) للمفاعل الحيوي بحيث يكون حجمه أكبر من حجم التشغيل (V_o)، وذلك لمراعاة العوامل الكيميائية. حيث اعتبر حجم التشغيل 80% من الحجم الإجمالي، كما هو موضح في المعادلة (5) [32]. ويوضح جدول (2): مواصفات خاصة بالكتلة الحيوية.

$$V_o = S_d * OR * HRT \quad (4)$$

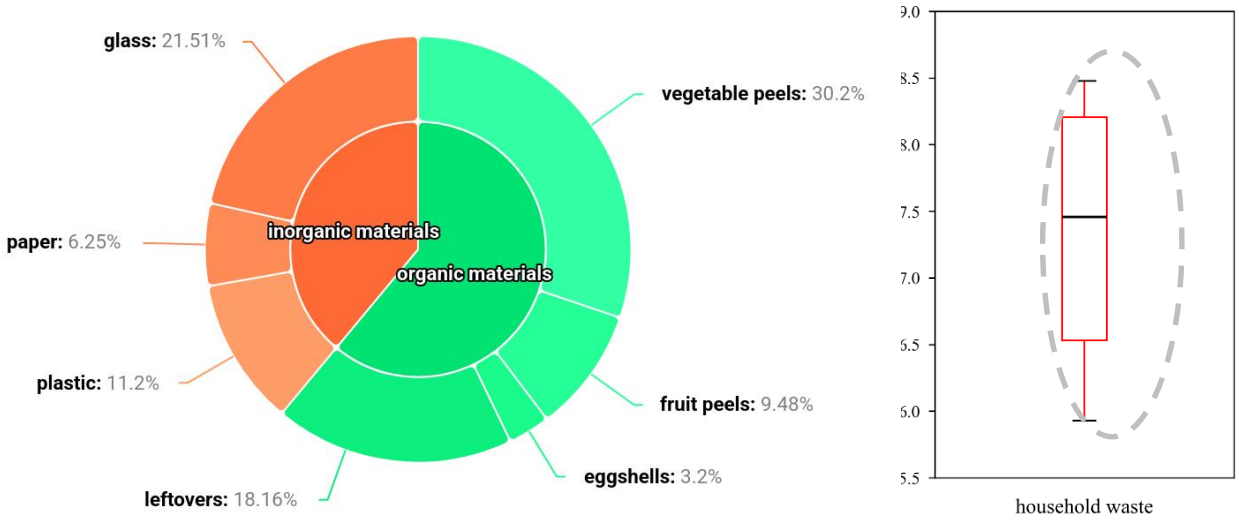
$$V_t = \frac{V_o}{0.8} \quad (5)$$

الجدول 2: مواصفات خاصة بالكتلة الحيوية

البند	المواصفات
تكلفة رأس المال	$3000\ ^{\$}/_{kW}$
تكلفة الصيانة والتشغيل السنوي	$100\ ^{\$}/_{kW}$
عمر المفاعل الحيوي، n	$20\ year$



الشكل 6: نمط استخدام الأجهزة الحرارية (التدفئة والتبريد) خلال يوم واحد في فصل الصيف وفي فصل الشتاء (14/7-18/12 من عام 2024)



الشكل 7: كمية النفايات المنزلية وتصنيفها

طاقة القشرة الأرضية

في ظل غياب المعلومات حول الطاقة الحرارية لمنطقة الدراسة، تم الاستناد على دراسة تجريبية أجريت في مدينة طرابلس حول تدرج درجات الحرارة عبر الطبقات الأرضية. أظهرت النتائج أن الإمكانات الحرارية في المناطق الليبية تندرج تحت الفئة المحتوي الحراري المنخفض، مما يجعلها مناسبة للتطبيقات المباشرة مثل تدفئة وتبريد المباني. حيث بينت الدراسة أنه بالإمكان الحصول على درجات حرارة مرتفعة للتدفئة في فصل الشتاء، وذلك بتغطية التربة بمادة بودرة سوداء وتغطية المناطق بغطاء بلاستيكي، حيث بلغت أقصي درجات الحرارة لتلك العملية 47 °C خلال شهري ديسمبر ويناير. وفي المقابل يمكن الوصول إلى درجات حرارة منخفضة لتبريد المباني في فصل الصيف، وذلك بزراعة أعشاب فوق المنطقة وريها بالماء دائماً، وبهـــذا الإجراء تم تسجيل درجات حرارة بلغت 19 °C خلال شهري مايو ويونيو [33]. وبناء على هذه النتائج، يمكن القول بأنه يمكن تغطية الأحمال التبريد والتدفئة من الطاقة الحرارية لقشرة الأرض.

التحليل الاقتصادي والبيئي

دمج العامل البيئي في التحليل الاقتصادي يزيد من فرص منافسة الطاقات المتجددة والنظيفة في سوق الطاقة حتى في الدول المنتجة للنفط والتي تدعم أسعار الطاقة مثل ليبيا. ولتقييم الجدوى الاقتصادية للمنظومة المقترحة في هذه الدراسة، تم تقدير تكلفة الطاقة المستوية (LCOE)، بالإضافة إلى ذلك، تم دمج تكلفة الضرر البيئي (C_{CO_2}) ضمن التحليل لضمان شمولية التقييم. ويحسب ذلك من المعادلات التالية [34]:

$$LCOE = \frac{\left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n-1}\right) \times (C_{FPC} + C_{BM}) + \left(C_{O\&M_{FPC}} + C_{O\&M_{BM}}\right) - (C_{CO_2})}{\sum_{t=1}^{8760}(E_{WH}(t) + E_{LPG}(t))} \quad (7)$$

$$C_{CO_2} = \emptyset_{CO_2} \times \left[EF_{CO_{2\,ele}} \times \left(0.8 \times \sum_{t=1}^{8760} E_{WH}(t)\right) + \left(EF_{CO_{2\,LPG}} \times \sum_{t=1}^{8760} E_{LPG}(t)\right) - \left(EF_{CO_{2\,CH_4}} \times \left(\sum_{t=1}^{8760} E_{CH_4} + 0.2 \times \sum_{t=1}^{8760} E_{LWH}(t)\right) + (CO_{2,dig})\right)\right] \quad (8)$$

تشير هذه المدخلات إلى الاتي: i معدل سعر الفائدة الحقيقي ويساوي 4%، و n العمر الافتراضي المتوقع للأنظمة، بينما تشير E_{WH} و E_{LPG} الى قيمة الحمل المستهلك سنوياً لتسخين المياه، وقيمة الحمل المستهلك سنوياً من الغاز المسال على التوالي، وكما تمثل $\emptyset_{CO_2}$ السعر الدولي لثاني أكسيد الكربون والتي حددت قيمته بحوالي 70 $/ton، ويعبر $CO_{2,dig}$ عن كمية ثاني أكسيد الكربون المنبعثة من المفاعل الحيوي. وكما تمثل $EF_{CO_{2\,ele}}$ و $EF_{CO_{2\,LPG}}$ و $EF_{CO_{2\,CH_4}}$ معاملات انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لكلًا من منظومة الطاقة الكهربائية في ليبيا وغاز الطهي وغاز الميثان على التوالي. أدرجت هذه القيم في الجدول (3).

الجدول (3): معاملات انبعاثات CO_2 [35]

معامل الانبعاث	القيمة
معامل انبعاث CO_2 لتوليد الكهرباء، $EF_{CO_{2\,ele}}$	0.857 kg/kWh
معامل انبعاث CO_2 الناتج عن الغاز المسال، $EF_{CO_{2\,LPG}}$	2.98 kg/kg_{LPG}
معامل انبعاث CO_2 الناتج عن الغاز الميثان، $EF_{CO_{2\,CH_4}}$	2.75 kg/kg_{CH_4}

ولإتمام عملية التصميم وضعت القيود التالية:

1- ضرورة التخلص من جميع النفايات المنزلية العضوية. وفقًا لما هو مبين في المعادلة (9). وعند العجز سيتم توريد الكمية اللازمة من المخلفات الحيوانية. وفقًا للمعادلة (10). مع الحفاظ على نفس المحتوى الحراري للغازات من خلال المعادلة (11).

$$W_{MW} \geq \frac{1}{CF_{CH_4} * LHV_{CH_4}} \sum (E_{LPG} + 0.2 \times E_{WH}) \quad (9)$$

$$m_{MSW} \times CF_{CH_4 MSW} + m_{LSW} \times CF_{CH_4 LSW} \geq 1.2 \times m_{CH_4} \quad (10)$$

$$m_{CH_4} = \frac{m_{LPG} \times LHV_{LPG}}{LHV_{CH_4}} \quad (11)$$

حيث تشير هذه الرموز إلى الآتي: m_{MSW} إلى كمية المواد العضوية من نفايات الطعام، ويمثل m_{LSW} الكمية الإضافية اللازمة من المخلفات الحيوانية، وأما $CF_{CH_4 MSW}$ و $CF_{CH_4 LSW}$ فيدلان على معاملات التحويل لتوليد غاز الميثان (CH_4) من نفايات الطعام والمخلفات الحيوانية على التوالي. يعبر m_{CH_4} عن كمية غاز الميثان (CH_4) المنتج، بينما يمثل m_{LPG} كمية الغاز المسال (LPG) المطلوب تغطيته. وأما LHV_{LPG} و LHV_{CH_4} فيدلان على القيمة الحرارية لكل من الغاز المسال (LPG) وغاز الميثان (CH_4) على التوالي.

2- يجب أن يكون نظام الطاقة المتجددة الهجين المقترح قادرًا على إمداد الطاقة دون انقطاع (LPSP)، وفقًا لما هو مبين في المعادلة (12) [36].

$$LPSP = \frac{\sum [E_{Load} - E_{HR}]}{\sum E_{Load}} \quad (12)$$

كما تشير E_{Load} إلى حمل الاستهلاك الطاقي، بينما يشير E_{HR} إلى طاقة المولدة من منظومة الطاقة الهجينة.

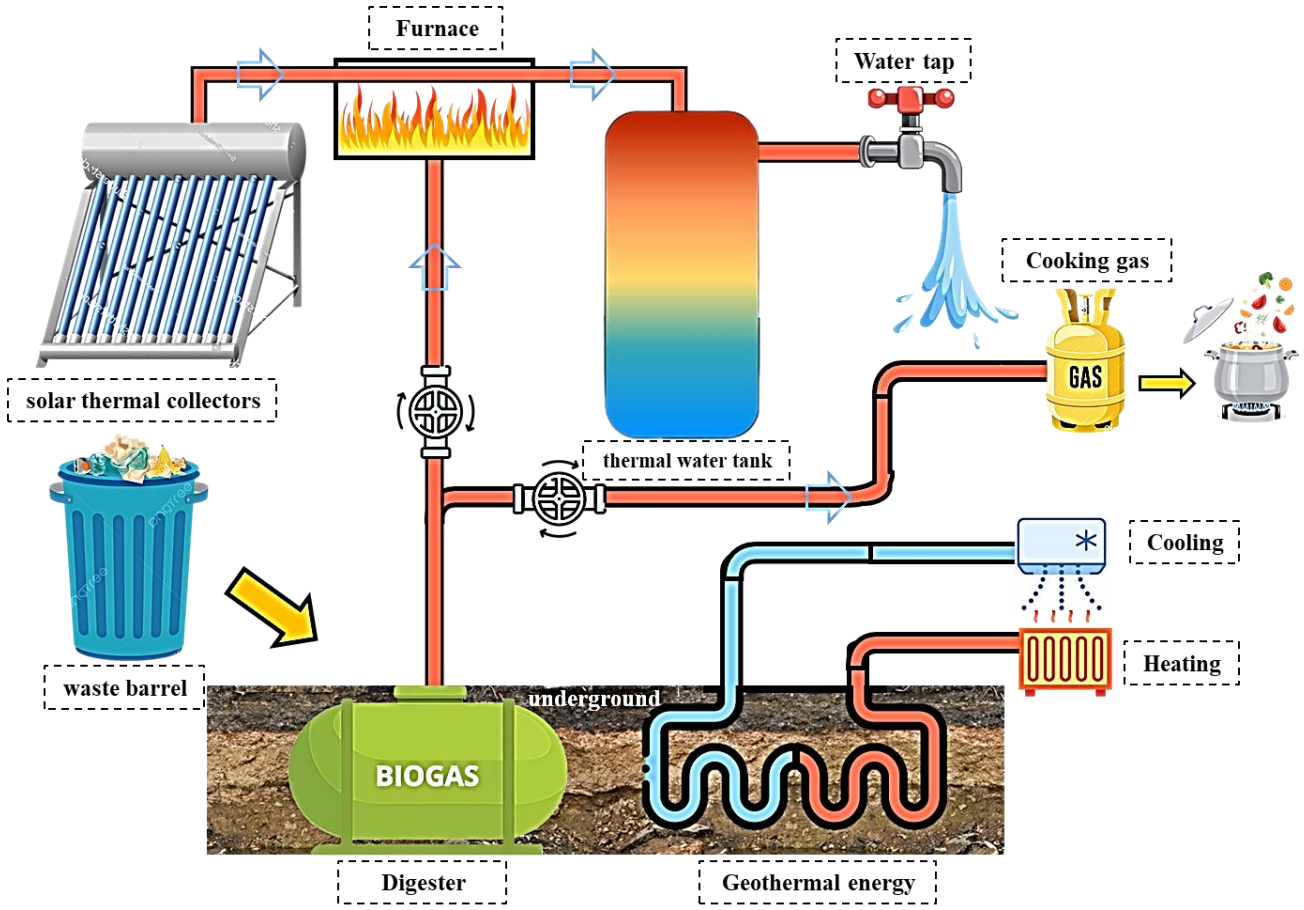
النتائج والمناقشة

مخطط منظومة الطاقة الهجينة المقترحة

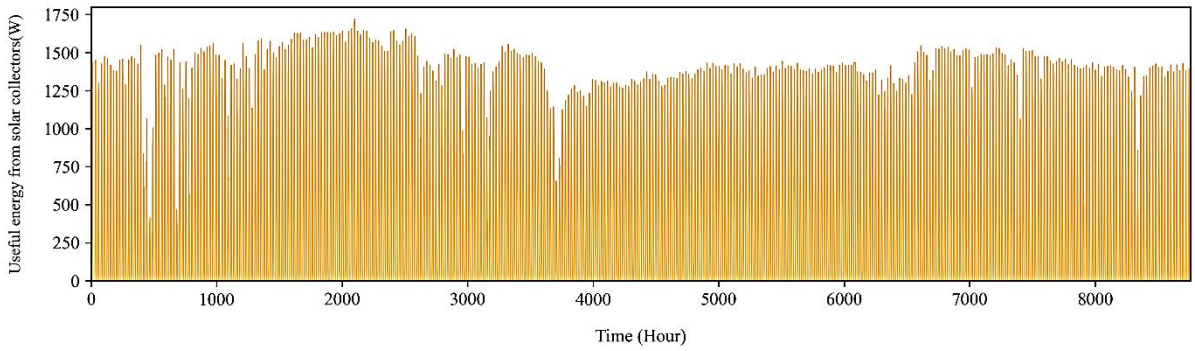
يوضح الشكل (8) المخطط التوضيحي لمنظومة الطاقة المتجددة الهجينة المقترحة، والتي تتكامل فيها عدة مصادر طاقة متجددة لتلبية الاحتياجات الحرارية. تتكون المنظومة من المجمعات الشمسية الحرارية التي تغطي 80% من احتياجات تسخين المياه، والمفاعل الحيوي الذي يساهم في 20% من تسخين المياه، بالإضافة إلى توفير الغاز الحيوي للطهي. وأما بالنسبة لطاقة القشرة الأرضية فتساهم لتغطية أحمال التدفئة والتبريد. وكما تدار عمليات المنظومة وحدة تحكم، مما يضمن استمرار تغطية الاحمال الحرارية بنسبة 100%.

الأداء الديناميكي للمجمعات الشمسية الحرارية

أظهرت نتائج التحليل الموضحة في الشكل (9) كمية الطاقة المنتجة من المجمعات الشمسية الحرارية لكل ساعة لمدة عام كامل.



الشكل 8: مخطط المنظومة الطاقة الهجينة المقترحة



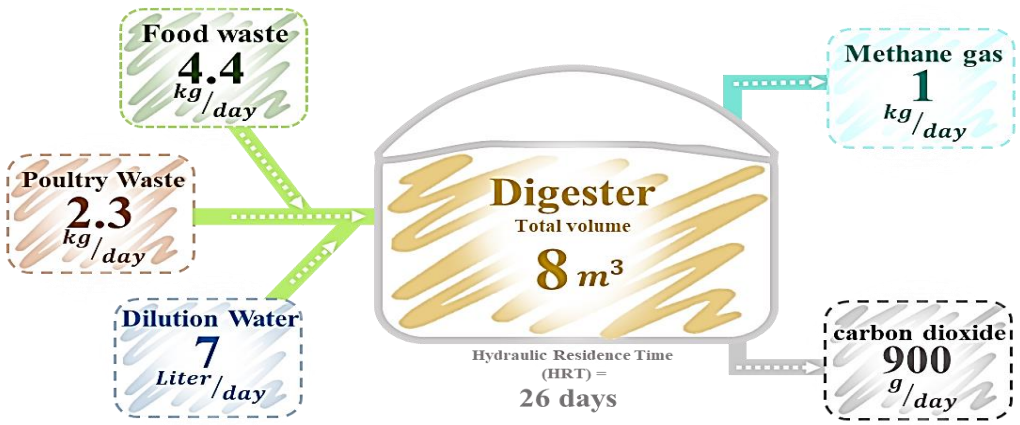
الشكل 9: أداء الحراري للمجمعات الشمسية الحرارية

وبناءً على تحليل أداء المجمعات الشمسية الحرارية، أظهرت النتائج أن مساحة المجمعات الشمسية بلغت حوالي 2.5 m^2، وسعة الخزان الحراري 165 لتر قادر على تلبية احتياجات تسخين المياه والتي بلغت حوالي 1080 kWh، وقد حققت المجمعات طاقة حرارية منتجة تبلغ 3500 kWh. ومن الناحية الاقتصادية، بلغت تكلفة رأس المال الأولية للمجمعات الشمسية حوالي $ 1100، بينما بلغت التكاليف السنوية للصيانة والتشغيل نحو $ 50. بالإضافة إلى ذلك، تم تقدير تكلفة الطاقة المستوية الحرارية (LCOH) بنحو 0.091 kWh/$. مما يعكس كفاءة اقتصادية عالية للنظام. وأما بالنسبة للأثر البيئي، فقد أسهم النظام في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 740 kg سنويًا. وبناءً على ذلك، تم تقدير تكلفة الضرر البيئي المتجنب الناتج عن هذه الانبعاثات المنخفضة بحوالي $ 52، مما يعزز الجدوى البيئية للنظام.

أداء منظومة طاقة الكتلة الحيوية

كشفت نتائج التحليل إمكانية استغلال النفايات العضوية من الطعام ومخلفات الدواجن المتاحة في موقع الدراسة لإنتاج غاز الميثان. تقدر الكميات اليومية من نفايات الطعام العضوية بحوالي 4.4 kg/day، بينما تبلغ كميات مخلفات الدواجن بحوالي 2.31 kg/day، بالإضافة إلى كمية مضافة من الماء إلى المفاعل الحيوي بحوالي 7 Liter/day. بناءً على ذلك، تم تحديد الحجم الإجمالي المناسب للمفاعل لاستيعاب هذه الكميات اليومية من النفايات العضوية من طعام ومخلفات الدواجن، بالإضافة إلى كمية المـــاء المضافة، حيث بلغت سعته 8 m^3. وبالتالي، يمكن لهذا المفاعل إنتاج كمية من غاز الميثان تقدر بحوالي 1 kg يومياً (أي ما يعادل 1.52 m^3 يومياً). وبالتوازي مع ذلك، تطلق عملية التخمير كمية من غاز CO_2 تقدر بحوالي 900 g يومياً. كما هو موضح في الشكل (10). وفي المقابل، بلغ الطلب اليومي المقدر للغاز المستخدم للطهي بـ 0.96 kg. مما يشير إلى أن هذا الإنتاج المقدر من غاز الميثان يمكننا من الاستغناء تماماً عن غاز الطهي الأحفوري. حيث يمكن إنتاج طاقة حرارية حيوية من غاز الميثان تبلغ حوالي 49.31 MJ. هذه النتائج تؤكد إمكانية استغلال نفايات الطعام ومخلفات الدجاج كمصدر مستدام للطاقة.

وفيما يتعلق بالتحليل الاقتصادي والبيئي، أظهرت النتائج الاقتصادية أن تكلفة رأس المال لمنظومة طاقة الكتلة الحيوية بلغت $ 1927، وبالجانب تكلفة الصيانة والتشغيل والتي بلغت حوالي $ 64. وأخيرًا، قدرت تكلفة الطاقة المستوية للميثان (LCOM) بحوالي 0.244 $/kg. وأما فيما يتعلق بالنتائج البيئية، حيث بلغت كمية انبعاثات ثاني أكسيد الكربون من عملية إنتاج الميثان حوالي 315 kg سنويًا. وبالتالي، تقدر ضريبة تكلفة الضرر البيئي لهذه الانبعاث بحوالي $ 22. وبناء على هذه النتائج، تعد هذه البيانات مؤشرًا قويًا على جدوى تطبيق هذا المصدر من الطاقة في التطبيقات الحرارية المنزلية. حيث تظهر التحليلات الاقتصادية والبيئية كفاءة النظام في تقليل تكلفة الطاقة المستوية للميثان (LCOM) وتحقيق استدامة الطاقة، مما يعزز دورها كبديل واعد لمصادر الطاقة التقليدية.



الشكل 10: مخطط توضيحي لمدخلات ومخرجات المفاعل الحيوي

وبناءً على التحليلات السابقة، تم تقدير الجدوى الاقتصادية والبيئية للمنظومة المتكاملة، باستثناء طاقة القشرة الأرضية والتي لم يتوفر عليها أي معلومات في موقع الدراسة. وبالتالي، تم الاستناد على الأبحاث والدراسات السابقة في هذا مجال. وبناءً على ذلك، بلغت تكلفة رأس المال للمنظومة المتكاملة بحوالي $ 3027، بينما بلغت تكلفة الطاقة المستوية (LCOE) حوالي $/kWh 0.054. وكما ساهمت المنظومة إلى خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار kg 425 سنويًا.

الاستنتاجات

تناول هذا البحث دراسة تصميمية وتحليلية لمنظومة طاقة متجددة هجينة لتغطية الأحمال الحرارية المنزلية لمنزل في منطقة سمنو بجنوب ليبيا، للاستفادة من الطبيعة الجغرافية والمناخية للمنطقة. وقدرت الاحمال الحرارية السنوية بحوالي kWh 23288. ولتحقيق التوازن الأمثل، تم توزيع الأحمال على مصادر الطاقة المتجددة الأكثر ملاءمة لكل حمل. وبناء على ذلك، تم تصميم منظومة طاقة هجينة تجمع بين الطاقة الشمسية الحرارية، وطاقة الكتلة الحيوية، وطاقة القشرة الأرضية. حيث استخدمت (2.5 متر مربع من مجمعات الطاقة الشمسية و165 لتر خزان الحراري) لتغطية 80% من حمل تسخن المياه المقدرة بحوالي kWh/year 1080. بينما استخدم ($8\ m^3$ مفاعل الحيوي) لاحتواء kg 7 من نفايات يومية لتوليد 365 kg سنويا من غاز الميثان والذي بدوره سيعوض kg 0.96 يوميًا من غاز الطهي وايضًا لسد عجز إمداد الطاقة الشمسية بقيمة 20% من حمل تسخين المياه. وأما بالنسبة لطاقة القشرة الأرضية تم استخدامها لتغطية احمال التبريد والتدفئة kWh 12577 و 5112kWh في السنة على التوالي. وعليه، تعتبر المنظومة المتجددة الهجينة المقترحة قادرة على تغطية الأحمال الحرارية السنوية بكفاءة. كما تم تقييم الجدوى الاقتصادية والبيئية للمنظومة المقترحة، حيث بلغ الاستثمار للمشروع $ 3027، والدفعات السنوية لصيانة والتشغيل حوالي $ 114 لكل لسنة. وقدرت تكلفة LCOE بحوالي 0.054 $/kWh. وأما بالنسبة للجدوى البيئية، فقد منعت المنظومة من انبعاث 425 kg من CO_2 سنويًا.

التوصيات

1. اجراء نموذج مصغر للمنظومة لتأكد من فعاليتها وتطابق أدائها مع الظروف الواقعية من حيث الإمكانيات والاحمال.
2. إجراء قياسات حقيقية للأحمال الكهربائية والحرارية والكهروحرارية في عدة منازل موزعة على مناطق مختلفة في ليبيا.

Author Contributions: "All authors have made a substantial, direct, and intellectual contribution to the work and approved it for publication."
Funding: "This research received no external funding."
Data Availability Statement: "The data are available at request."
Conflicts of Interest: "The authors declare no conflict of interest."

References

[1] A. M. Makhzom and K. R. Aissa, "Carbon Dioxide Life Cycle Assessment of the Energy Industry Sector in Libya: A Case Study," *Int. J. Electr. Eng. Sustain. IJEES*, 2023, https://ijees.org/index.php/ijees/index
[2] M. Inweer, and Y. Nassar, "Carbon Emissions Life Cycle Assessment of Cement Industry in Libya." *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*, vol. 3, no. 2, pp. 162-173. https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_21
[3] "Electricity demand growth surged in 2024," 2024. https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2025/electricity
[4] "Renewable Capacity Statistics," 2024. https://www.irena.org/
[5] C. Okafor and C. Nzekwe, "Biomass utilization for energy production in Nigeria: A review," vol. 3, p. 100043, 2022.
[6] I. Al-Rikabi and A. Omara, "Renewable Energy in Sudan: Current Status and Future Prospects," *Eng. Rep.*, vol. 7, 2025, https://doi.org/10.1002/eng2.13116
[7] Y. Nassar and H. El-Khozondar, "Renewable energy potential in the State of Palestine: Proposals for sustainability," *Renew. Energy Focus*, vol. 49, p. 100576, 2024.
[8] A. Khalil, Z. Rajab, and A. Asheibi, "The Economic Feasibility of Photovoltaic Systems for Electricity Production in Libya," 2019, http://repository.uob.edu.ly/handle/123456789/758
[9] M. Abdunnabi, "Energy savings strategy for the residential sector in Libya and its impacts on the global environment and the nation economy," *Adv. Build. Energy Res.*, 2023, https://doi.org/10.1080/17512549.2023.2209094
[10] A. M.A. Mohamed, "An investigation into the current utilisation and prospective of renewable energy resources and technologies in Libya," *Renew. Energy*, 2013, https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.07.038
[11] "Libyans Wasted 573 Tonnes of Food in 2023."
[12] W. Alhadi Aldeeb, "The Current Status of Solid Waste Handling in Western Region of Libya," *Univ. Zawia J. Eng. Sci. Technol. UZJEST*, 2024, https://doi.org/10.26629/uzjest.2024.03
[13] M. Omer Salih Eissa, "Biomass Energy Potential from Agricultural Production in Libya," *J. Agric. Mach. Sci.*, 2024, http://dergipark.org.tr/tr/pub/tarmak
[14] T. R. Ayodele, "Life cycle assessment of waste-to-energy (WtE) technologies for electricity generation using municipal solid waste in Nigeria," *Appl. Energy*, vol. 201, pp. 200–218, 2017.
[15] M. Abdel Zaher and S. Elbarbary, "Geothermal resources in Egypt integrated with GIS-based analysis," *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 365, pp. 1–12, 2018.
[16] H. Boughanmi, M. Lazaar, and A. Guizani, "A performance of a heat pump system connected a new conic helicoidal geothermal heat exchanger for a greenhouse heating in the north of Tunisia," *Sol. Energy*, vol. 171, pp. 343–353, 2018.
[17] H. Mahmoudi, N. Spahis, and M. F. Goosen, "Application of geothermal energy for heating and fresh water production in a brackish water greenhouse desalination unit: A case study from Algeria," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, pp. 512–517, 2010.
[18] Y. F. Nassar and H. J. El-khozondar, "A new design for a built-in hybrid energy system, parabolic dish solar concentrator and bioenergy (PDSC/BG): A case study – Libya," *J. Clean. Prod.*, 2024, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.140944
[19] Y. F. Nassar and S. Y. Alsadi, "Design of an isolated renewable hybrid energy system: a case study," *Mater. Renew. Sustain. Energy*, 2022, https://link.springer.com/article/10.1007/s40243-022-00216-1
[20] F. Bekele Tilahun and R. Bhandari, "Design optimization of a

hybrid solar-biomass plant to sustainably supply energy to industry: Methodology and case study," *Energy*, 2021, https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119736

[21] R. Kumar and H. Kaur Channi, "A PV-Biomass off-grid hybrid renewable energy system (HRES) for rural electrification: Design, optimization and techno-economic-environmental analysis," *J. Clean. Prod.*, vol. 349, p. 131347, 2022.

[22] L. Zhang and F. Li, Bo Sun, "Integrated Optimization Design of Combined Cooling, Heating, and Power System Coupled with Solar and Biomass Energy," *energies*, 2019, https://doi.org/10.3390/en12040687

[23] A. Salah, et al. "Assessment of waste to energy approaches to compensate for the shortage in energy supply in Gaza, Palestine," Biofuels, Bioprod. Bioref., 2025. https://doi.org/10.1002/bbb.70027

[24] H. Jouhara and M. Szulgowska-Zgrzywa, "The performance of a heat pipe based solar PV/T roof collector and its potential contribution in district heating applications," *Energy*, vol. 136, pp. 117–125, 2017.

[25] S. Suhartini, Y. P Lestari, and I. Nurika, "Estimation of methane and electricity potential from canteen food waste," *Int. Conf. Green Agro-Ind. Bioeconomy*, 2019, https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-315/230/1/012075/pdf

[26] Y. F. Nassar and S. Y. Alsadi, "Mapping of PV Solar Module Technologies Across Libyan Territory," presented at the 2022 Iraqi International Conference on Communication and Information Technologies (IICCIT), Iraq, 2022. https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10010476

[27] C. P. Chien BONG and L. Y. LIMa, "The characterisation and treatment of food waste for improvement of biogas production during anaerobic digestion – a review," *J. Clean. Prod.*, vol. 172, pp. 1545–1558, 2018.

[28] M. Libya, "The Oasis Town of Samnu." https://libyaobserver.ly/culture/oasis-town-samnu

[29] A. Aqila, Y. Nassar, H. El-Khozondar, and S. Suliman, "Design of Hybrid Renewable Energy System (PV/Wind/Battery) Under Real Climatic and Operational Conditions to Meet Full Load of the Residential Sector: A Case Study of a House in Samno Village– Southern Region of Libya," *Wadi Alshatti Univ. J. Pure Appl. Sci.*, 2025, https://doi.org/10.63318/waujpasv3i1_23

[30] M. Elnaggar and H. El-Khozondar, "Enhancing solar water heater system for utmost useful energy gain and reduction in greenhouse gas emissions in Gaza," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 20, pp. 3749–3764, 2023. Ihttps://doi.org/10.1007/s13762-022-04226-4

[31] Y. Nassar, I. Mangir, and A. Hafez, "Feasibility of innovative topography-based hybrid renewable electrical power system: A case study," *Clean. Eng. Technol.*, vol. 14, 2023, https://doi.org/10.1016/j.clet.2023.100650

[32] F. James Ogbozige, "Design of Household anaerobic Bio-Digester For Biogas Production From Abattoir Waste," *Niger. J. Trop. Eng.*, vol. 1, pp. 50–58, 2023.

[33] Y. Nassar and A. ElNoaman, "Evaluation of the underground soil thermal storage properties in Libya," *Renew. Energy*, vol. 31, pp. 593–598, 2006.

[34] K. Amer, M. Irhouma, M. Ibrahim, and A. Aqila, "Economic-Environmental-Energetic (3E) analysis of Photovoltaic Solar Energy Systems: Case Study of Mechanical & Renewable Energy Engineering Departments at Wadi AlShatti University," *Wadi AlShatti Univ. J. Pure Appl. Sci.*, 2025, https://www.researchgate.net/publication/388633356

[35] Y. Nassar, M. Salem, and H. J. El-Khozondar, "Estimation of CO2 Emissions from the Electric Power Industry Sector in Libya," vol. 14, 2025, https://doi.org/10.51646/jsesd.v14i1.415

[36] S. Ahmad and Y. Fathi, "The Impact of Loss of Power Supply Probabilityon Design and Performance of Wind/ Pumped Hydropower Energy Storage Hybrid System," *Wadi Alshatti Univ. Of Pure Appl. Sci.*, vol. 3, 2025, https://doi.org/10.63318/waujpasv3i2_06