



تصميم وتحليل منظومة طاقة متجددة هجينة لتغطية جزء من أحمال القطاع السكني في ليبيا

* عبد الحفيظ أحمد عقيلة¹، ياسر فتحي نصار¹

¹إقسام الهندسة الميكانيكية والطاقات المتجددة، كلية الهندسة، جامعة وادي الشاطئ، ليبيا

الملخص

في ظل الاهتمام المتزايد بأنظمة الطاقة المتجددة الهجينة (HRESS) كحل مستدام للحد من التلوث وتحقيق أهداف التنمية المستدامة، تم إجراء دراسة تصميمية وتحليلية لمنظومة طاقة هجينة لتلبية الاحتياجات الكهربائية والحرارية لمنزل في منطقة سمنو بجنوب ليبيا. استهدفت الدراسة القطاع السكني، الذي يستهلك 53% من الطاقة في ليبيا، مع التركيز على الاستفادة من الطبيعة الجغرافية والمناخية للمنطقة. تم تحليل أنماط الاستهلاك المنزلي تحت الظروف الزمنية الفعلية، مع مراعاة فترة التشغيل الدنيا للأجهزة (10 دقائق)، وتوزيع الأحمال على مصادر الطاقة المتجددة الأكثر ملاءمة، باستخدام برامج SAM، Excel، و Jupyter Notebook. تم تصميم منظومة هجينة تجمع بين الطاقة الشمسية الكهروضوئية (560 W)، طاقة الرياح (5 توربينات × 500W)، بطاريات تخزين (7.5 kWh)، الطاقة الشمسية الحرارية (2.5 m²)، طاقة الكتلة الحيوية (مفاعل حيوي 8 m³)، وطاقة القشرة الأرضية. غطت المنظومة الاحتياجات الكهربائية السنوية البالغة 8,540 kWh، مع فائض 504 kWh للشبكة، بينما لبّت الاحتياجات الحرارية البالغة 23,288 kWh سنويًا. اقتصاديًا، بلغت تكلفة رأس المال 8,769 دولارًا، مع تكلفة طاقة المستوية (LCOE) \$/kWh 0.064، مما يعكس جدواها الاقتصادية. بيئيًا، خفضت المنظومة انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 10,915 kg سنويًا، مع استغلال نفايات الطعام ومخلفات الدواجن لتوليد غاز الميثان، مما قلل الاعتماد على الغاز الأحفوري. حققت المنظومة توازنًا بين الجوى الاقتصادية والبيئية، مما يجعلها حلًا مستدامًا وفعالًا للقطاع السكني. تُسهم نتائج الدراسة في فتح آفاق بحثية جديدة لتطبيق هذه الأنظمة في المناطق الحضرية والريفية، تعزيزًا لأمن الطاقة والاستدامة.

الكلمات المفتاحية: الأحمال الكهربائية، الأحمال الحرارية، الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، طاقة الكتلة الحيوية، طاقة جوف الأرض

Design and Analysis of a Hybrid Renewable Energy System to Meet Part of the Residential Energy Demand in Libya

* Abdulhafeez Ahmed Aqila¹ and Yasser Fathi Nassar¹

¹Department of Mechanical Engineering and Renewable Energy, Faculty of Engineering, Wadi Al-Shatti University, Libya

Abstract

In light of the growing interest in hybrid renewable energy systems (HRESSs) as a sustainable solution for reducing pollution and achieving the Sustainable Development Goals, a design and analytical study was conducted for a hybrid energy system to meet the electrical and thermal needs of a house in the Samnu area of southern Libya. The study targeted the residential sector, which consumes 53% of Libya's energy, with a focus on leveraging the region's geographical and climatic

characteristics. Household consumption patterns were analyzed under real-time conditions, taking into account the minimum operating time of appliances (10 minutes), and load distribution across the most suitable renewable energy sources was determined using SAM, Excel, and Jupyter Notebook. The hybrid system was designed by integrating photovoltaic solar energy (560 W), wind energy (5×500 W turbines), storage batteries (7.5 kWh), solar thermal energy (22.5 m²), biomass energy (38 m³ bioreactor), and geothermal energy. The system covered annual electricity demand of 8,540 kWh, with a surplus of 504 kWh supplied to the grid, while meeting annual thermal demand of 23,288 kWh. Economically, the capital cost was \$8,769, with a levelized cost of energy (LCOE) of \$0.064/kWh, reflecting its economic feasibility. Environmentally, the system reduced carbon dioxide emissions by 10,915 kg annually by utilizing food waste and poultry manure to generate methane, thereby reducing reliance on fossil fuels. The system achieved a balance between economic and environmental viability, making it a sustainable and efficient solution for the residential sector. The study's findings contribute to opening new research avenues for implementing such systems in urban and rural areas, enhancing energy security and sustainability.

Keywords: electrical loads, thermal loads, solar photovoltaics (PV), wind energy, biomass energy, geothermal energy

المقدمة والدراسات السابقة

تتجه رؤية العالم نحو قضايا السلامة البيئية والاقتصاد المستدام، في حين تعد صناعة الطاقة من أهم المؤثرات على تلك القضايا، بسبب حرق الوقود الأحفوري في محطات الطاقة التقليدية، مثل الفحم والنفط والغاز الطبيعي [1]. مما يجعل قطاع صناعة الطاقة يتصدر قائمة الأولويات البيئية من حيث الانبعاثات، إذ يسهم بحوالي 75% من إجمالي الانبعاثات الملوثة على مستوى العالم والتي تشكل تهديداً كبيراً للمناخ العالمي [2] إلى جانب ذلك، ترتبط تقلبات أسعار النفط باعتبارات جيوسياسية؛ مما يؤثر على ميزانيات الدول والاقتصاد العالمي بشكل عام [3]. وعلى الرغم من الجهود الدولية المبذولة للتحويل نحو مصادر الطاقة المتجددة، والتي بلغت ساعاتها المركبة في نهاية عام 2024 من الخلايا الشمسية حوالي 1418969 MW، وطاقة الرياح حوالي 1017199 MW، وطاقة الكتلة الحيوية حوالي 150261 MW، وطاقة جوف الأرض حوالي 14846 MW [4]. مع ذلك، لا يزال نظام توليد الطاقة العالمي يعتمد بشكل كبير على الوقود الأحفوري، حيث يشكل حوالي 80% من إنتاج الطاقة الكهربائية والحرارية [5]. هذا الاعتماد المفرط يمثل تحدياً رئيسياً أمام تحقيق أهداف اتفاقية باريس للمناخ وخطط الانتقال الطاقوي في العديد من الدول [6]. وفي سياق هذه التحديات، يبرز القطاع السكني كأحد أكبر القطاعات المستهلكة للطاقة. حيث سجل ما نسبته حوالي 58% من إجمالي استهلاك الكهرباء للعام 2024، مما يؤكد الحاجة الملحة إلى تطوير استراتيجيات فعالة خلال إعادة تقييم شامل لموارد الطاقة المتاحة لتحديد البدائل المستدامة النظيفة التي يمكن أن تلبي النمو السريع في الطلب على الطاقة [7]. وفي هذا السياق، تشهد ليبيا تحديات كبيرة في مجال الطاقة، حيث يعتمد اقتصادها وصناعة الطاقة فيها بشكل رئيسي على النفط. وبالتالي، هذا الاعتماد يجعلها عرضة لتقلبات الأسواق العالمية والتغيرات البيئية. ولهذا يعتمد قطاع صناعة الطاقة بشكل كبير على الغاز والنفط في توليد الكهرباء. حيث تقدر الطاقة الكهربائية المنتجة في ليبيا بحوالي 33 TWh سنوياً [8]. وعلى الرغم من التباين في البيانات الواردة بشأن استهلاك القطاع السكني، إلا أنها تتراوح بين 36% و53% [9]. هذه الأرقام تسلط الضوء على الدور المحوري للقطاع السكني في استهلاك الطاقة، في ظل التحديات المتزايدة المتعلقة باستنزاف الموارد الطبيعية وتغير المناخ في توليد الطاقة، مما يدفع إلى التحول نحو الطاقات المتجددة والنظيفة كحل مستدام لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة في هذا القطاع. وعليه، حققت أنظمة الطاقة الهجينة على نطاق واسع نجاحات باهره بكافة المقاييس العلمية والعملية من خلال عدد كبير من

الأبحاث العلمية المنشورة في هذا المجال. تهدف هذه المراجعة إلى استعراض الأبحاث والدراسات في هذا المجال، مع التركيز على تحديد الفجوة البحثية.
من بين هذه الدراسات:

محمياً؛ أجريت دراسة لتقدير امكانيات طاقة الرياح في منطقة الجبل الغربي بليبيا: دراسة حالة مدينتي نالوت ويفرن، توفر معلومات ومعرفة عن توفر طاقة الرياح واختيار نوع توربينات الرياح المناسبة لكل موقع معين. يمكن لطاقة الرياح سد العجز في امدادات الطاقة التي تعاني منه البلاد، بالإضافة الى تلطيف البصمة الكربونية. كشفت النتائج المتحصل عليها الجدوى الاقتصادية للاستثمار في طاقة الرياح في منطقة الجبل الغربي، حيث قدرت LCOE بحوالي 4.3 سنتا لكل كيلووات ساعة في مدينة نالوت، بينما بلغت 4.5 سنتا لكل كيلووات ساعة في مدينة يفرن، وذلك عند استخدام توربينة رياح نوع SUZLON 3.3 MW. إضافة إلى منع انبعاث ما يقدر 3.3 طن من CO₂ لكل كيلووات قدرة من توربينات الرياح في الهواء الجوي سنويا [10]. وأيضاً أجريت دراسة تقييم الجدوى الفنية والاقتصادية لنظام طاقة هجين معزول عن الشبكة لقرية البيضان الريفية بالقرب من مدينة اجدابيا شرق ليبيا. نظراً لعدم توفر الكهرباء لتلك القرية، فقد أصبح تركيب أنظمة طاقة هجينة خارج الشبكة أمراً لا مفر منه في المناطق الريفية. لقد أثبتت الدراسة أن تقنيات الطاقة المتجددة يمكن أن تكون بديلاً قابلاً للتطبيق عوضاً عن تمديد الشبكة المكلف في المناطق الريفية في جميع انحاء العالم. تم استخدام برنامج HOMER لنمذجة وتحديد المكونات وحجم النظام الهجين. وقد أظهرت النتائج الحصول على ثلاث تكوينات متاحة وفعالة من حيث التكلفة. وعند مقارنة الأنظمة الثلاثة، فإن النظام الهجين المدمج بين الألواح الشمسية الكهروضوئية وتوربينات الرياح هو النظام القابل للتطبيق الذي يجب أخذه في الاعتبار في هذا المشروع، حيث بلغت تكلفة رأس المال للمشروع \$ 17527، بينما وصلت تكلفة الصيانة والتشغيل السنوية \$ 651. وحيث حقق النظام تكلفة الطاقة المستوية (LCOE) تبلغ \$/kWh 0.033. وبالتالي، فقد كشفت نتائج التصميم والتحسين والحساسية أن التكنولوجيا الطاقة المتجددة هي الخيار الفعال لتوليد الطاقة الكهربائية لقرية البيضان [11]. كما أجريت دراسة تصميم جديد لنظام الطاقة الهجين المدمج يتضمن مركزاً شمسياً طبقياً مكافئاً، وطاقة الحيوية لمنطقة براك- وادي الشاطي- ليبيا. ركزت هذه الدراسة على تعزيز الاستخدام المستدام للموارد المحلية والصدقية للبيئة، مما يجعل أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة ضرورة لتلبية احتياجات الطاقة المستقبلية. ومع ذلك، تعاني أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية من انخفاض العائد الكهربائي بسبب ارتفاع درجات الحرارة في تلك المنطقة. لذا، اقترح الباحثون استخدام المراكز الشمسية على شكل طبق، مع الاستفادة من الطاقة الحيوية الناتجة عن المخلفات الزراعية. وبالتالي، تظهر النتائج الدراسة أن النظام المقترح، الذي تم تقييمه في مدينة براك- ليبيا، يتألف من مفاعل حيوي بسعة 36560 m³، ومراكز شمسية بقدرة 1230 kW، بمساحة 6006 m². وبالتالي، من المتوقع أن يولد النظام 5670534 kWh سنوياً، حيث قدرت تكلفة رأس مال للمشروع بـ \$ 12365896، وتكلفة الطاقة المستوية (LCOE) بـ \$/kWh 0.075. كما سيسهم في تقليل انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 7.8 ألف طن سنوياً [12].

دولياً؛ في فلسطين: أجريت دراسة لتصميم نظام طاقة هجينة معزولة عن الشبكة لمحافظة جنين شمال الضفة الغربية في فلسطين. استخدمت هذه الدراسة سلسلة زمنية ساعية مدتها عامان من بيانات الطاقة الشمسية وسرعة الرياح والكتلة الحيوية وبيانات الحمل الكهربائي، وتوصلت الدراسة إلى تحديد المكونات وحجم نظام الطاقة المتجددة الهجين باستخدام برنامج HOMER. يتكون نظام الطاقة المتجددة الهجين المقترح HRES من حقل للطاقة الشمسية الكهروضوئية بقدرة 80 MW، ومزرعة رياح بقدرات 66 MW، ونظام كتلة حيوية بقدرة 50 MW باستثمار قدرة \$ 323 M. يولد النظام المقترح 389 GWh سنوياً وهو ما يكفي لتلبية 100% من الطلب على الطاقة الكهربائية في محافظة جنين، مع فائض في الطاقة الكهربائية بنحو 4.57%. وقد وجد أن التكلفة المستوية للطاقة (LCOE) \$/kWh 0.313 [13].

في نيجيريا؛ تم اقتراح منهجية لتصميم نظام هجين مستقل يعمل بالطاقة الكهروضوئية ومولد ديزل والبطاريات تخزين لمقر إقامة في Marcus Poli Estate Gwarinpa في العاصمة أبوجا وسط نيجيريا، وتمت نمذجة وتحسين نظام باستخدام برنامج HOMER. ولتحقيق هذا الهدف تم تحديد تكلفة رأس المال وتكلفة الطاقة LCOE والتكلفة الحالية الصافية NPC لأنواع مختلفة من الموارد لتغطية الحمل الكهربائي، للحصول على التكوين الأمثل للنظام الهجين. وتظهر نتائج التحليل أنه من بين خمسة تكوينات لأنظمة هجينة لتغطية الحمل الكهربائي، فإن النظام الهجين الذي يتألف من الطاقة الكهروضوئية ومولد الديزل والبطاريات هو الأكثر اقتصادياً، حيث تبلغ التكلفة الحالية الصافية \$ 118,771 وتكلفة الطاقة المستوية $0.340 \$/kWh$ (LCOE). تتطوي خطة العمل على أساس النمذجة الفعالة من حيث التكلفة والتي تهدف إلى تقليل تكلفة إنتاج الطاقة والحد من الانبعاثات الكربونية في المستقبل القريب [14].

في إثيوبيا: أجريت دراسة حالة في شمال إثيوبيا 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 محطة هجينة 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 [15]. بالرغم من وجود العديد من الدراسات التي تناولت تصميم أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة، إلا أن معظمها اعتمد على حساب الأحمال الكهربائية باستخدام الوحدات (Wh)، دون مراعاة القدرة الفعلية للأجهزة المنزلية والفترة الزمنية الحقيقية لتشغيلها. تتميز هذه الدراسة بتبني نهج مبتكر يعتمد على حساب الاحمال الكهربائية بناءً على قدرة الأجهزة والفترة الزمنية الفعلية لتشغيلها (10 دقائق كحد أدنى)، مما يسمح بتحديد حجم منظومة التوليد بدقة أكبر، يتركز على الألواح الكهروضوئية (PV)، وتوربينات الرياح، وأنظمة تخزين الطاقة (البطاريات) لتغطية الاحمال الكهربائية. هذه الحقيقة ظلت غائبة عن ساحة البحث العلمي ولم يتم مناقشتها على حسب علم الباحث). هذا النهج يعتبر (حسب علم الباحث) إضافة جديدة في مجال أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة. بالإضافة إلى ذلك، تركز هذه الدراسة على تغطية الأحمال الحرارية المنزلية باستخدام مزيج من مصادر الطاقة المتجددة، بما في ذلك الطاقة الشمسية الحرارية، وطاقة الكتلة الحيوية (المستمدة من النفايات والمخلفات المتاحة في موقع الدراسة)، وطاقة القشرة الأرضية. يتميز هذا النهج بتكامله في معالجة الاحمال الحرارية المتنوعة؛ مثل: التدفئة، والتبريد، وتسخين المياه، والطهي، مع تحديد حجم المفاعل الحيوي المناسب لاستغلال الكتلة الحيوية المتاحة. بذلك، تسد هذه الدراسة فجوة بحثية في تصميم أنظمة الطاقة الهجينة المتكاملة لتغطية الاحمال الكهربائية والحرارية المنزلية في إحدى المنازل منطقة سمنو - ليبيا، مع مراعاة الظروف المناخية والموارد المحلية المتاحة. منهجية البحث

اعتمدت منهجية البحث على أساليب وتقنيات لجمع وتحليل البيانات، حيث بدأت بتحديد موقع الدراسة. بعد ذلك، تم جمع بيانات شاملة ومتنوعة شملت: البيانات المناخية والمتحصل عليها من منصة Solargis، والبيانات الاقتصادية، والبيانات البيئية، والبيانات الفنية، والأحمال الكهربائية، والأحمال الحرارية، وكميات النفايات المنزلية. بعد ذلك، تم

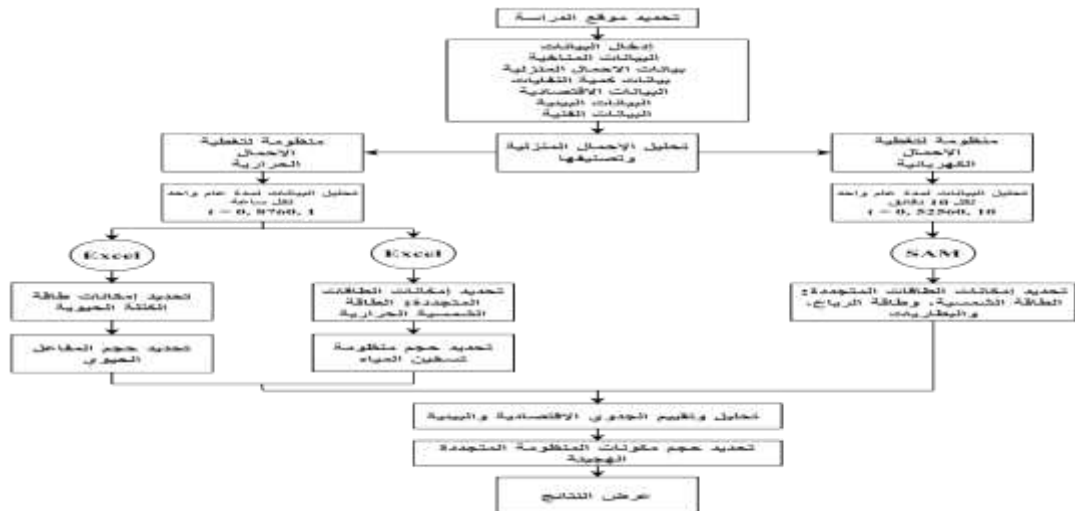
تحليل البيانات المناخية لمدة عام كامل بغرض تحديد إمكانيات الطاقات المتجددة المتوفرة، مع تقسيم التحليل إلى فترتين زمنيتين بناءً على تصنيف الأحوال؛ في التحليل الأول: تم اعتماد فترة زمنية فعلية لكل 10 دقائق، لتقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV) وطاقة الرياح لتغطية الأحمال الكهربائية. وفي التحليل الثاني: تم اعتماد فترة زمنية ساعية (كل ساعة)، لتقنيات الطاقة الشمسية الحرارية وطاقة الكتلة الحيوية لتغطية الأحمال الحرارية. هذا التقسيم سمح بتقييم أداء كل تقنية بشكل دقيق وفقاً لخصائصها الزمنية ومتطلبات الأحوال. عقب ذلك، تم تقييم الجدوى الاقتصادية والاثار البيئية للنظام المقترح لتحديد الحجم الأمثل لمكونات منظومة الطاقة الهجينة. وذلك بالاستعانة ببرنامج SAM، وبرنامج Excel وأيضاً بمساعدة برنامج Jupyter Notebook. والشكل (1): يوضح المنهجية المتبعة في البحث.

فرضيات وحدود الدراسة ومصادر الالايقين في النتائج

في سياق هذه الدراسة، تم وضع الفرضيات التالية لتسهيل التحليل:

1. إهمال الفقد في الطاقة من خلال أسلاك التمديد ونقاط التوصيل.
 2. اعتبار كفاءات الأجهزة المساندة (محول التردد، أجهزة التحكم، المحولات، البطارية) ثابتة.
 3. استهلاك مستقر لغاز الطهي بمعدل حوالي 0.96 kg يوميًا.
 4. اعتبار كفاءات الأجهزة الحرارية الكهربائية 100%.
 5. اعتبار الكمية الموردة من مخلفات الدجاج مجانية ومتاحة.
 6. اعتبار نسبة الميثان في الغاز الحيوي 50% [16].
 7. إنتاجية غاز الميثان مستقرة على طول السنة.
 8. اعتماد معامل تغطية يبلغ 80% للمنظومة الشمسية الحرارية لتسخين المياه [17].
 9. اعتماد متوسط قيم معامل توليد غاز الميثان من النفايات $0.191 \text{ m}^3/\text{kg}$ [18].
- 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. وأيضاً 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 المركبات الشمسية الأخرى، بدلاً من المجمعات الشمسية المستوية التقليدية. وأما مصادر الالايقين في النتائج فسيبها: البيانات المناخية والتشغيلية

شكل 1: مخطط المنهجية المتبعة في البحث



والاقتصادية، حيث أشار Nassar et al إلى وجود تفاوت كبير في أسعار المعدات والأجهزة يصل حوالي 360%، وكذلك استخدام القيم الفيزيائية ومعاملات تحويل أيضا تعتبر من مصادر اللاتيقين، ومن أمثلة هذه القيم وجود تباين في قيم معاملات التحويل الخاصة بتوليد غاز الميثان من النفايات، حيث تتراوح هذه القيم بين $0.191 \text{ m}^3/\text{kg}$ و $0.5 \text{ m}^3/\text{kg}$ من النفايات [19،20].

البيانات الأساسية لموقع الدراسة

البيانات الجغرافية

يقع المنزل قيد الدراسة في منطقة سمنو في بلدية وادي البوانيس، التي تعتبر واحدة من البلديات الواقعة في المناطق الجنوبية لليبييا. تشمل هذه البلدية (تمهنت- سمنو- الزينغ)، 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 و 781 km عن مدينة طرابلس. كما موضح في الشكل (2). يقدر عدد سكان المنطقة حسب تقرير مصلحة الأحوال المدنية بالمنطقة للعام 2024 بحوالي 16453 نسمة. حيث يعتمد سكانها على الزراعة وتربية الحيوانات، مما يجعل من المنطقة مصدراً واعداً لطاقة الكتلة الحيوية. وبذلك يمكن إنتاج الغاز الحيوي وأيضاً السماد العضوي لزيادة خصوبة التربة الرملية الصحراوية. مما يسهم في تقليل التلوث البيئي وتعزيز الأمن الغذائي في المنطقة [21].



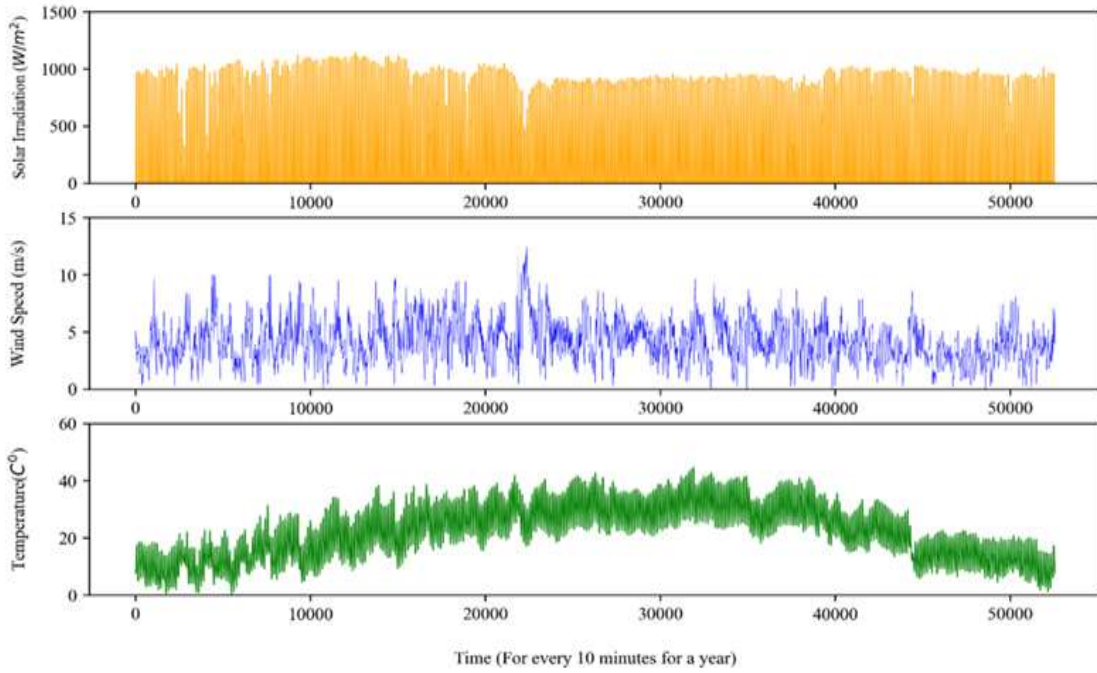
شكل 2: الموقع الجغرافي لموقع الدراسة

البيانات المناخية

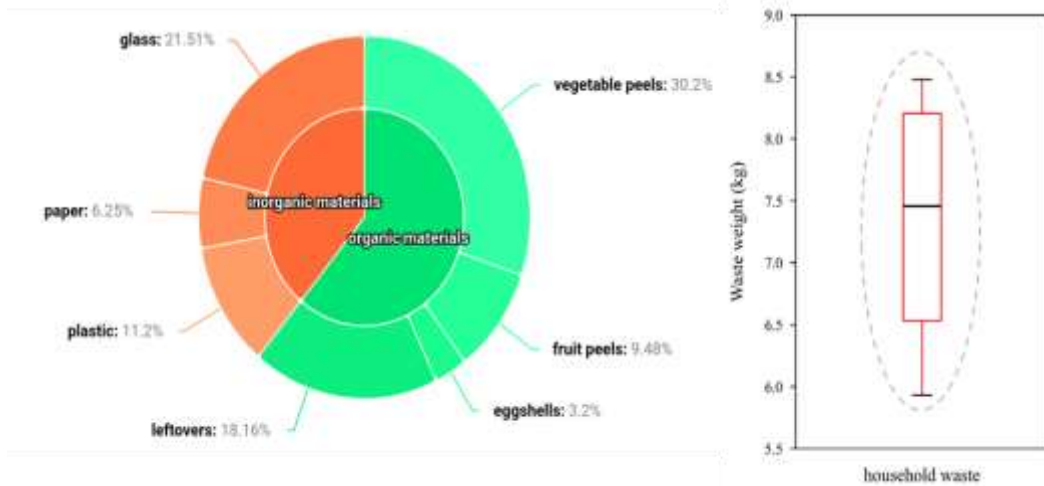
تشير البيانات المناخية المتحصل عليها من منصة Solargis، أن منطقة سمنو تتمتع بمناخ صحراوي، حيث ترتفع درجات الحرارة خلال الموسم الحار من مايو إلى سبتمبر. تصل متوسط درجات الحرارة خلال تلك الموسم إلى 32°C . يعد يوليو الشهر الأكثر حرارة، وتصل فيه درجة الحرارة إلى 40°C . بينما تنخفض درجات الحرارة بشكل ملحوظ خلال الموسم الباردة من نوفمبر إلى فبراير، ويصل متوسط درجات الحرارة خلال تلك الموسم إلى 13°C . يعد يناير الشهر الأكثر برودة، حيث تصل فيه درجة الحرارة إلى 3°C . ومع ذلك، يبلغ متوسط ساعات السطوع الشمسي فيها إلى أكثر من 4300 ساعة في السنة، كذلك يشهد متوسط الإشعاع الشمسي تقلبات موسمية كبيرة على مدار العام، ويصل متوسط الإشعاع الشمسي اليومي إلى $264 \text{ Wh} / \text{m}^2$. كما أنها تتمتع بمصادر ريفية تتفاوت بشكل ملحوظ حسب تغيرات الموسم على مدار العام. يعد شهر مايو الأكثر رياحاً، وتصل فيها متوسط سرعة الرياح إلى $4.7 \text{ m} / \text{s}$. في المقابل، يعد شهر ديسمبر الأكثر هدوءاً، ويصل متوسط سرعة الرياح فيه إلى $3.4 \text{ m} / \text{s}$ [22]. كما هو موضح في الشكل (3).

بيانات كمية النفايات

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 تقدير 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 الخضراوات والفواكه، وقشور البيض، وبقايا الطعام، والتي مثلت النسبة الأكبر من النفايات والتي بلغت حوالي 61.04% . هذا يشير إلى إمكانية استخدامها لإنتاج الغاز الحيوي. أما المواد غير العضوية بلغت حوالي 38.96% ، وشملت الورق والبلاستيك والزجاج. كما هو موضح في الشكل (4). 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.



شكل 3: الإشعاع الشمسي وسرعة الرياح ودرجة الحرارة للمنطقة تحت الدراسة



شكل 4: كميات النفايات المنزلية وتصنيفها

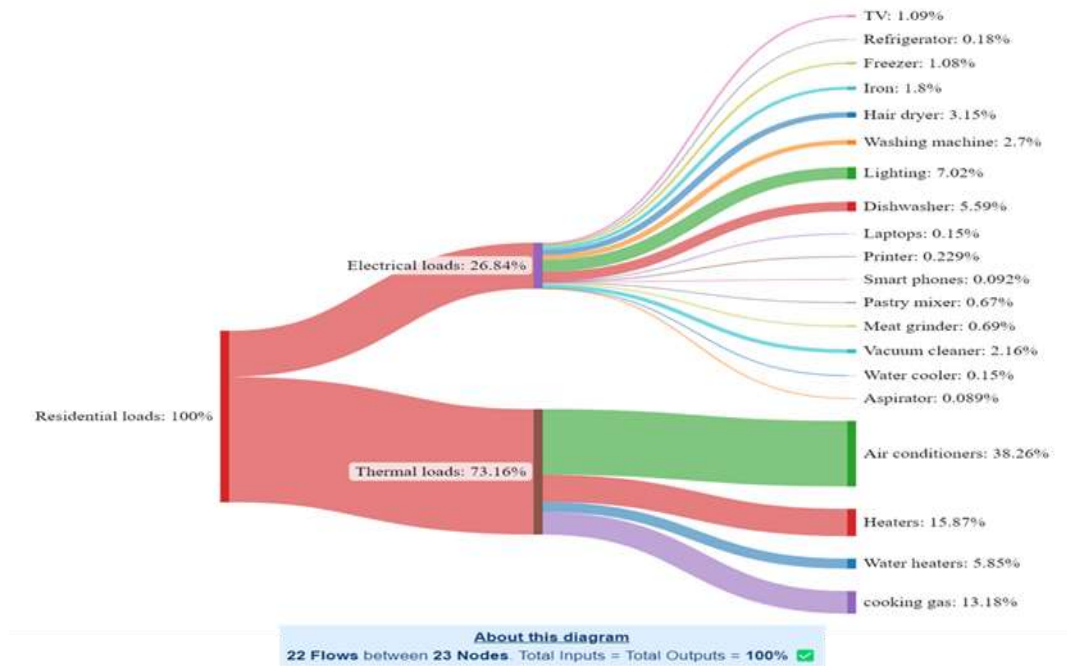
بيانات الأحمال المنزلية

تصنيف الأحمال

انطلاقاً من الهدف المتمثل في تحقيق الاستفادة القصوى من الطاقات المتجددة، تم إجراء هذه الدراسة على منزل سكني يقع في منطقة سمنو، حيث تبلغ مساحته الإجمالية $300 m^2$ ، ويتألف من ثلاث غرف نوم، وغرفتي جلوس، وصالة، ومطبخ، وثلاث حمامات. ويعيش فيه سبعة أفراد. بهدف تحليل ومعالجة الأحمال المنزلية بشكل دقيق، تم تصنيف الأحمال المنزلية إلى فئتين رئيسيتين هما:

الأحمال الكهربائية: تشمل هذه الفئة الأجهزة الكهربائية مثل الإضاءة، والثلاجات، والغسالات، والتلفزيونات وغيرها، وأيضاً الأجهزة الحرارية التي تكون مدة تشغيلها لا تتعدى 10 دقائق، مثل مكواة الملابس ومجفف الشعر.

الأحمال الحرارية: تتضمن هذه الفئة الأجهزة التي تعتمد على التسخين، مثل سخانات المياه، وأجهزة التدفئة والتبريد واستخدام غاز الطهي. يبين الشكل (5) تصنيف الأحمال المنزلية ونسبة استهلاكها في المنزل محل الدراسة

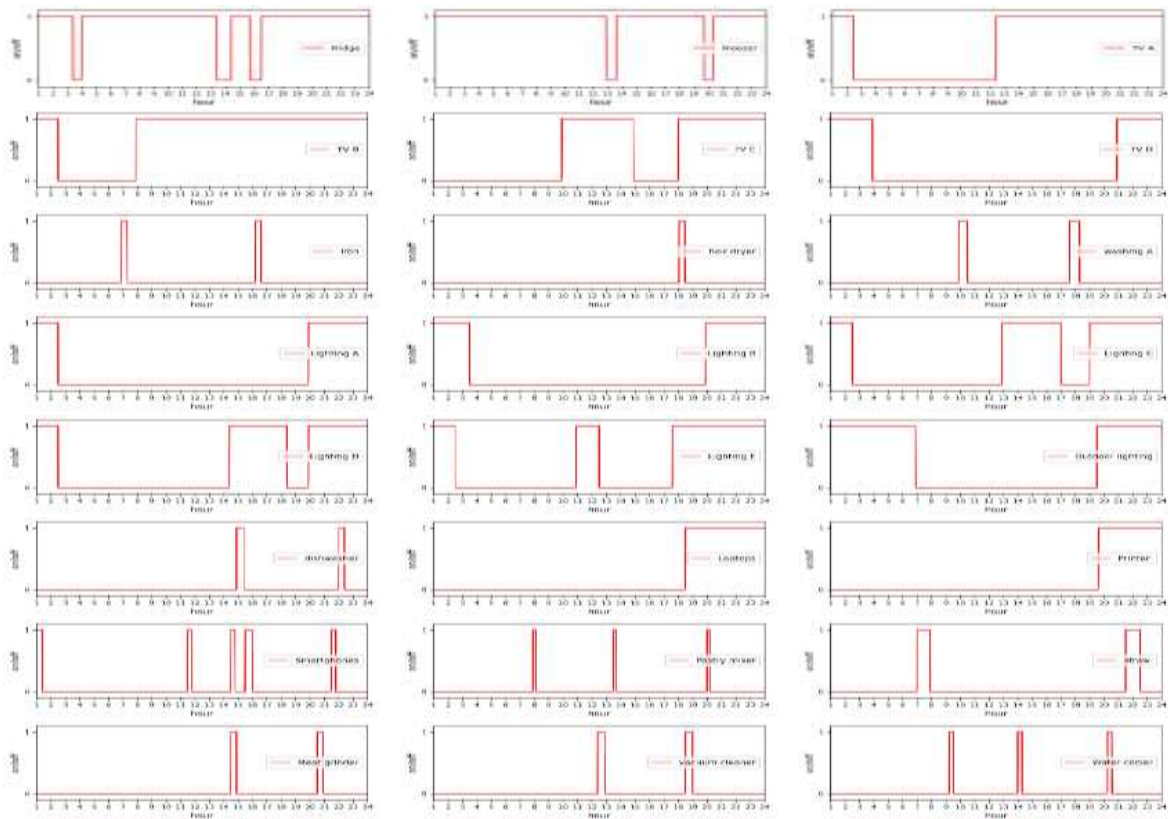


شكل 5: تصنيف الأحمال السكنية للمنزل محل الدراسة

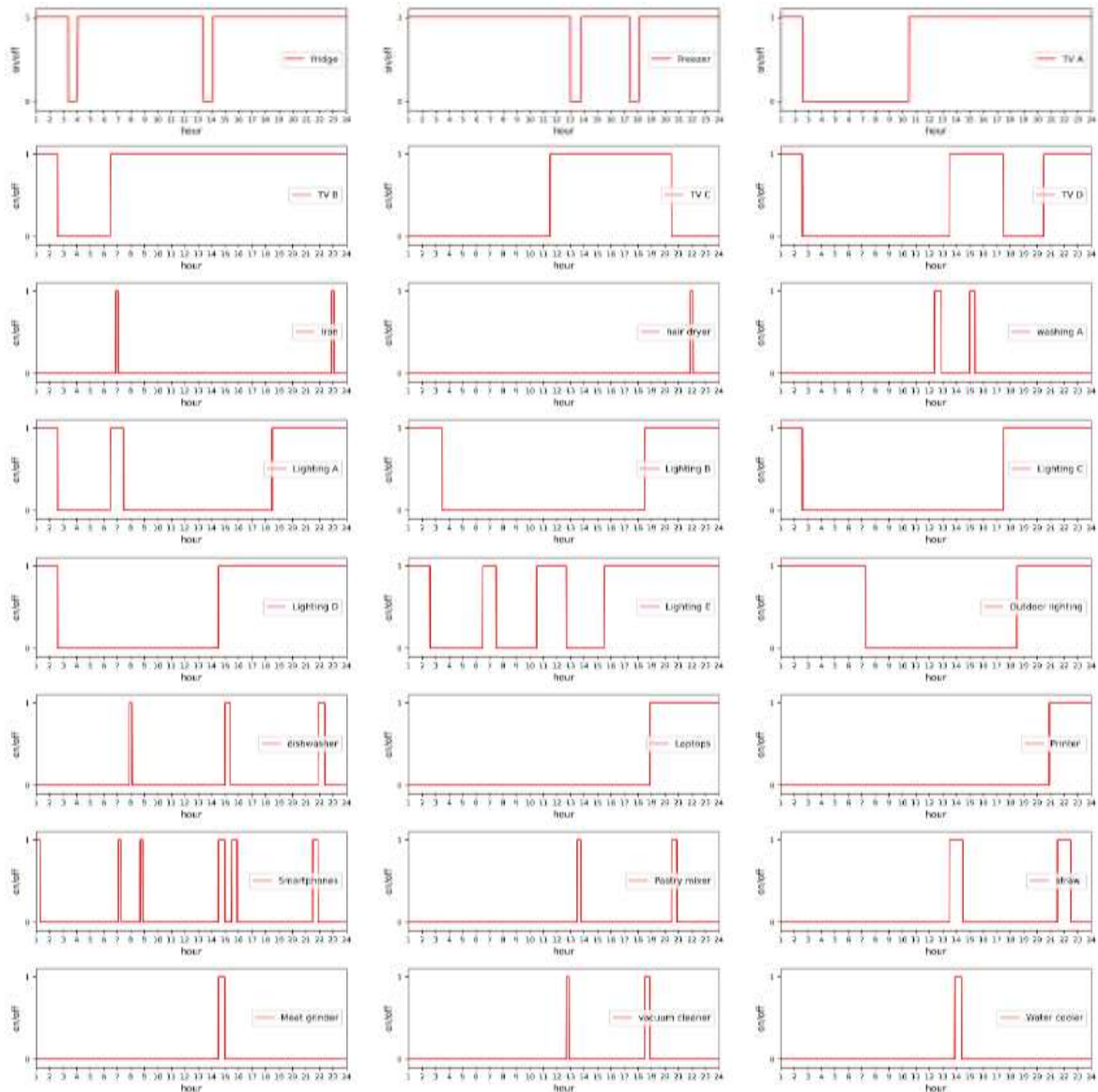
2. الأحمال الكهربائية

تعد الأحمال الكهربائية أحد الأحمال الأساسية في أنظمة الطاقة، حيث تمثل الطلب الفعلي على الطاقة الناتج عن تشغيل الأجهزة الكهربائية. في هذه الدراسة، تم تسجيل نمط استخدام الأجهزة الكهربائية واستهلاكها داخل منزل لمدة عام كامل والتي بلغت $8540 kWh$ سنوياً. وذلك تحت الظروف التشغيلية الحقيقية لأدنى فترة تشغيل الأجهزة الكهربائية المنزلية، والتي تبلغ 10 دقائق. كما هو مبين في الشكل (6) و(7) نمط استخدام الأجهزة الكهربائية خلال يوم واحد في فصل الصيف وفصل الشتاء على التوالي. بينما يعرض الشكل (8) الأحمال الكهربائية اليومية لكل من فصلي الصيف والشتاء، مبيئاً التباين في الطلب على الطاقة بين الفصلين. وأخيراً، يوضح الشكل (9) نسب مشاركة الأجهزة الكهربائية المختلفة في الحمل الكهربائي للمنزل قيد الدراسة، مما يسلط الضوء على مساهمة كل جهاز في الاستهلاك.

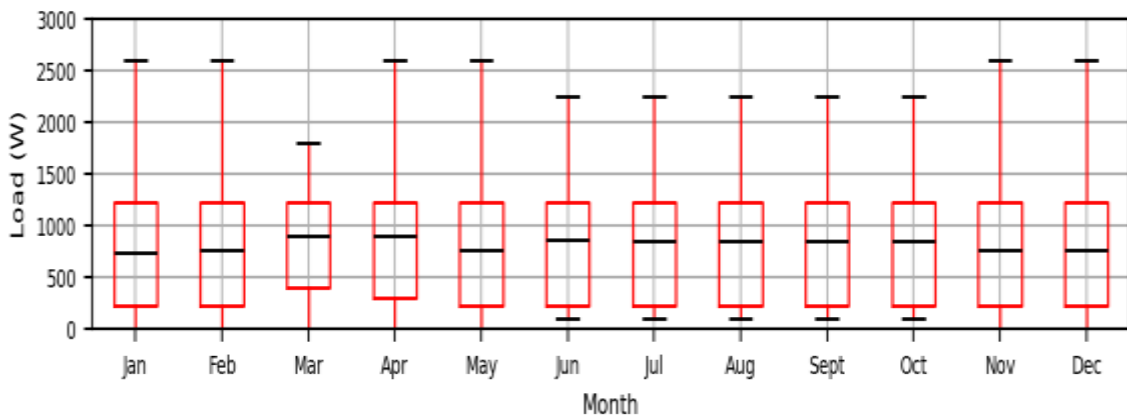
كما نلاحظ من الاشكال السابقة أن استهلاك الطاقة الكهربائية يعتمد على الظروف المناخية، بحيث يكون أعلى استهلاك في فصل الصيف يصل إلى حوالي 6000 W ، بالمقابل 4000 W في فصل الشتاء. ونتيجة ذلك، فإن الحمل الكهربائي يأتي من الأجهزة الكهربائية المنزلية المعاصرة، مثل الإضاءة والثلاجات والغسالات وغيرها. وفي واقع الأمر، نجد أن الاستهلاك الطاقة خلال ساعات الصباح يتركز على أجهزة المطبخ الصغيرة. وبالتالي يكون استهلاك طاقة أقل عموماً خلال النهار حيث يكون السكان غالباً خارج المنزل. ويرتفع الطلب على الطاقة مع عودة السكان إلى منازلهم بحدود الساعة الثانية ظهراً، مما يؤدي إلى زيادة استخدام الكهرباء. وينخفض استهلاك الطاقة تدريجياً أثناء ساعات النوم، بسبب تقليل استخدام الإضاءة وأجهزة الترفيه والأجهزة الرئيسية. وبالتالي، فإن الطلب على الأحمال السكنية، الذي يركز بشكل خاص على استهلاك الكهرباء في الأسر الريفية، لا يختلف بشكل كبير من منزل إلى آخر، بغض النظر عن الظروف الاجتماعية والاقتصادية لسكانه وعدد الأشخاص الذين يعيشون فيه [23].



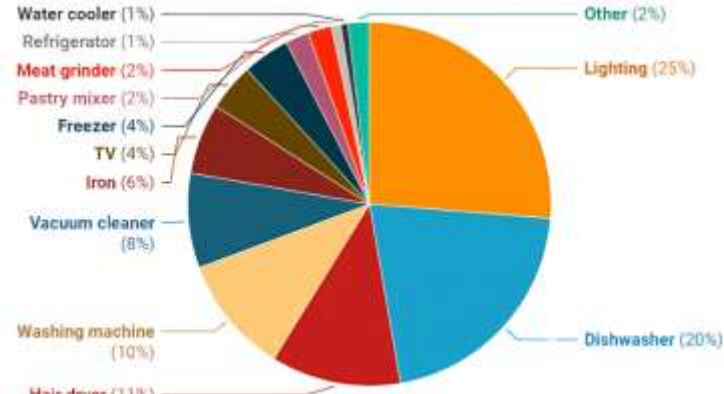
شكل 6: نمط استخدام الأجهزة الكهربائية خلال يوم واحد في فصل الصيف الموافق (2024/7/14)



شكل 7: نمط استخدام الأجهزة الكهربائية خلال يوم واحد في فصل الشتاء الموافق (2024/12/18)



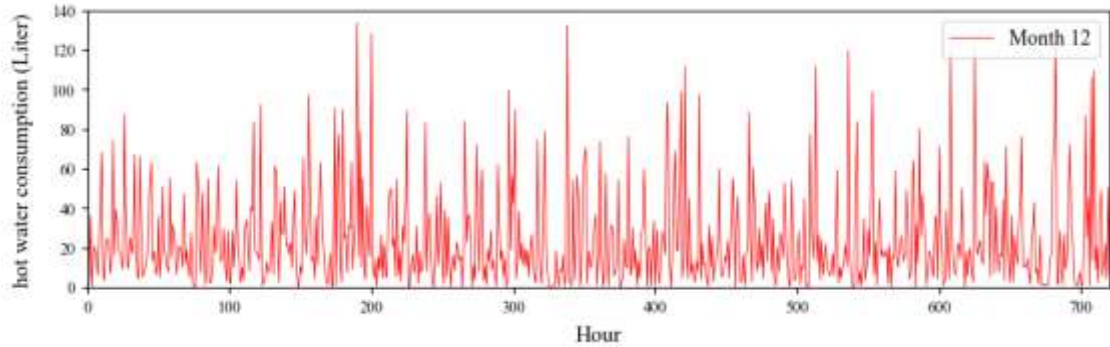
شكل 8: المخطط الصندوقي للأحمال الكهربائية خلال العام



شكل 9: نسب مساهمة الأجهزة الكهربائية في الحمل للمنزل قيد الدراسة

الاحمال الحرارية

يمثل الحمل الحراري للمنزل محل الدراسة النسبة الأكبر، حيث بلغ حوالي 23288 kWh سنوياً. ويلاحظ أن هذا الحمل يتوزع بشكل موسمي، حيث يصل الحمل في فصل الصيف إلى حوالي 12577 kWh ، وفي فصل الشتاء إلى حوالي 6192 kWh . حيث تمثل سخانات المياه والدفائيات الكهربائية المستهلك الأكبر في فصل الشتاء. بينما تمثل المكيفات المستهلك الأساسي في فصل الصيف. وبالتالي، بلغ كمية المياه الساخنة يومياً حوالي 590 لتر (أي ما يعادل 84 لترًا للفرد الواحد). يمثل الشكل (10) نمط استهلاك الماء الساخن خلال شهر 12 من عام 2024 لمنزل الدراسة. بينما تقتصر الأحمال في فصل الصيف على المكيفات. والشكل (11) يوضح نمط استخدام الأجهزة الحرارية (التبريد) والمتمثلة في المكيفات خلال يوم واحد في فصل الصيف، ونمط استخدام الأجهزة الحرارية والمتمثلة في سخانات المياه والدفائيات خلال يوم واحد في فصل الشتاء. أما فيما يتعلق بمتوسط استهلاك غاز الطهي، فقد تم قياسه بحوالي 0.96 kg يومياً، ما يعادل نحو 350.4 kg سنوياً (أي ما يعادل حوالي 4500 kWh سنوياً).



شكل 10: نمط استهلاك الماء الساخن خلال شهر 12 من عام 2024

النمذجة الرياضية لمكونات النظام

في إطار تصميم وتحليل النظام الهجين، يتم التعبير عن مكونات النظام رياضياً لوصف لتحويل الطاقة والاقتصاد والبيئة.

تقدير الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح ألواح الخلايا الشمسية بالرغم من أن جميع المعلومات المناخية تم الحصول عليها من منصو SolarGis إلا أن الإشعاع الشمسي الكلي الساقط على سطح الخلايا الشمسية تم حسابها وذلك لأن منصة SolarGis تستعمل نموذج Moneer [24] بينما أشارت الدراسات المحلية إلى أن نموذج Liu&Jordan هو الأنسب لمنطقة الجنوب [25-29].

الألواح الكهروضوئية

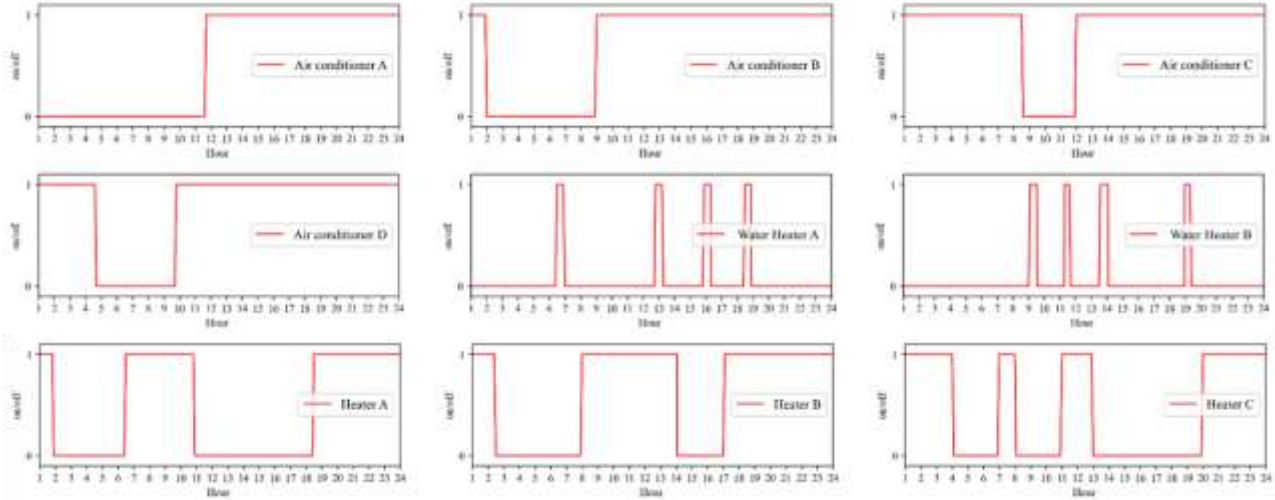
يمكن تقدير كمية الطاقة الكهربائية المنتجة من الخلايا الشمسية من المعادلة التالية [30-36]:

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

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

يمثل P_{STC} القدرة المنتجة من الخلية الشمسية في ظروف الاختبار القياسية. و β_p معامل درجة الحرارة للقدرة، بينما T_{STC} و T_{cell} هما درجة حرارة الخلية ودرجة الحرارة القياسية للخلية عند ظروف الاختبار القياسية، وكذلك تمثل H_t و H_{STC} الإشعاع الشمسي الكلي والإشعاع الشمسي عند الظروف القياسية. وايضاً T_{∞} تمثل درجة حرارة الهواء المحيط.

تم اختيار أنواع محددة من معدات الطاقة المتجددة استناداً على



شكل 11: نمط استخدام الأجهزة الحرارية (التدفئة والتبريد) خلال يوم واحد في فصل الصيف والشتاء (7/14-12/18) من عام 2024

نتائج أبحاث مطية للوصول إلى أفضل أداء لهذه المنظومات تحت الظروف الحقيقية لمدينة سبها والتي تتميز بارتفاع شديد لدرجات الحرارة والتي بدورها تؤثر على أداء الألواح الكهروضوئية. لذلك، تم اختيار الألواح الكهروضوئية من نوع Thin-Film Solar Panel [37,38]. يظهر الجدول (1) المواصفات الألواح الكهروضوئية المختارة في النظام الهجين.

جدول 1: مواصفات الألواح الكهروضوئية المختارة في النظام الهجين [32]

المواصفات	البند
STM545-565-72M-T8S	نوع اللوح الشمسي
560 W	القدرة
21.87 %	الكفاءة
0.4 %/°C	معامل درجة الحرارة للقدرة
820 \$/kW _p	تكلفة رأس المال
17 \$/kW _p	تكلفة الصيانة والتشغيل
25 y	عمر الخلايا الشمسية

2. توربينات الرياح

يمكن تقدير كمية الطاقة الكهربائية المنتجة من طاقة الرياح باستخدام المعادلة التالية [39-44]:

$$E_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & v(t) \leq v_{c-in} \text{ or } v(t) \geq v_{c-out} \\ P_r \frac{v(t) - v_{c-in}}{v_r(t) - v_{c-in}} & v_{c-in} \leq v(t) \leq v_r \\ P_r & v_r \leq v(t) \leq v_{c-out} \end{cases} \quad (3)$$

يمثل P_r القدرة المقدرة لتوربين الرياح عند سرعة الرياح التشغيلية v_r ، بينما يمثل v_{c-in} و v_{c-out} سرعتي الرياح عند الدخول والخروج على التوالي. وفي نفس الصدد عملية اختيار معدات الطاقة المتجددة، وقع الاختيار في هذه الدراسة على توربينات الرياح من نوع ATO-X5-500، نظرًا لاستجابتها للمناخ الصحراوي. والجدول (2) يظهر مواصفات توربينات الرياح المختارة.

جدول 2: مواصفات توربينات الرياح المختارة في الدراسة [45]

المواصفات	البند
ATO-X5-500	نوع التوربينة
500 W	القدرة
2 m/s	سرعة الرياح لتشغيل التوربينة " v_{c-in} "
50 m/s	سرعة الرياح لفصل التوربينة " v_{c-out} "
12 m/s	سرعة الرياح المقدرة
1200 \$/kW	تكلفة الإنشاء
65 \$/kW	تكلفة الصيانة والتشغيل
25 y	عمر توربينة الرياح

البطاريات

يمكن تقدير مستوى الطاقة الكهربائية المخزنة في مجموعة البطاريات على النحو التالي [46-52]:

$$E_{Batt}(t) = E_{Batt}(t-1)(1-\delta) + \left[E_{PV} + E_{WT} - \frac{E_{Load}}{\eta_{inv}} \right] \times \eta_{Batt} \quad (4)$$

حيث $E_{Batt}(t-1)$ تمثل حالة شحن مجموعة البطاريات عند زمن $(t-1)$ ، و δ معامل الاستهلاك الذاتي، و $E_{PV}(t)$ و $E_{WT}(t)$ هما الطاقة المنتجة من الألواح الكهروضوئية وتوربينات الرياح على التوالي. ويمثل $E_{Load}(t)$ الحمل الكهربائي المطلوب تغطيته. بينما يعبر η_{Batt} و η_{inv} كفاءة كل من العاكس والبطارية. كما يظهر جدول (3) مواصفات البطاريات المختارة لدعم النظام الهجين.

جدول 3: مواصفات البطاريات المختارة في الدراسة [53]

المواصفات	البند
PVX-1040T	نوع البطارية
12 V	الفولتية
300 \$/kWh	تكلفة الإنشاء
25 \$/kWh	تكلفة الصيانة والتشغيل
5 years	عمر البطارية

المجمعات الشمسية الحرارية

يمكن حساب الكسب الحراري للمجمعات الشمسية لتسخين المياه، من خلال المعادلة التالية [54-56].

$$Q_u = \eta_c A_c H_t \quad (5)$$

حيث يشير H_t إلى شدة الاشعاع الشمسي المائل (W/m^2)، وأما بالنسبة للمدخلات الأخرى كما هي موضحة في الجدول (4).

جدول 4: مواصفات المجمع الشمسي [56]

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

طاقة الكتلة الحيوية

تقدر إمكانات طاقة الكتلة الحيوية من النفايات المنزلية الصلبة (MSW) من المعادلة (6) [57-60]:

$$BE_{CH_4} = W_{MW} OR G_{MW} \quad (6)$$

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

$$BE_{th} = LHV_{CH_4} \eta_{th} BH_{CH_4} \quad (7)$$

تم أخذ في الحسبان أن القيمة الحرارية للميثان (LHV_{CH_4}) للمتر المكعب $36MJ$ 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 ونسبة محتوى المواد العضوية، وزمن الاحتفاظ الهيدروليكي للمواد العضوية. كما هو موضح في المعادلة (8). بعد ذلك، يحسب الحجم الإجمالي للمفاعل الحيوي بحيث يكون حجمه أكبر من حجم التشغيل، وذلك لمراعاة العوامل الكيميائية. حيث اعتبر حجم التشغيل 80% من الحجم الإجمالي، كما هو موضح في المعادلة (9) [60]:

$$V_o = S_d * OR * HRT \quad (8)$$

$$V_t = \frac{V_o}{0.8} \quad (9)$$

حيث يشير V_o و V_t إلى حجم التشغيل والحجم الإجمالي للمفاعل على التوالي (m^3)، و S_d كمية النفايات المنزلية يومياً (m^3/day)، و HRT هو مدة الاحتفاظ الهيدروليكي، والذي تم تحديده بـ 26 يوماً استناداً على الدراسة التجريبية [40]. وبالتالي، نظراً لاعتماد نظام المفاعل الحيوي بنظام الدفعات، فهذا يعني أنه سيتم إزالة المواد العضوية المتحللة قبل إدخال مواد عضوية جديدة. جدول (5): يوضح مواصفات خاصة بالكتلة الحيوية.

جدول 5: مواصفات خاصة بالكتلة الحيوية [61]

المواصفات	البند
$4000 \$/kW$	تكلفة
$100 \$/kW$	تكلفة الصيانة والتشغيل
20 year	عمر المفاعل الحيوي، n

طاقة القشرة الأرضية

في ظل غياب المعلومات حول الطاقة الحرارية الجوفية، تم الاستناد على دراسة تجريبية أجريت في مدينة طرابلس حول تدرج درجات الحرارة عبر الطبقات السطحية الأرضية. أظهرت النتائج أن الإمكانيات الحرارية في المناطق الليبية تتدرج تحت فئة 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 بوردرة سوداء وتغطية المناطق بغطاء بلاستيكي، حيث بلغت درجات الحرارة القصوى لذلك 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 وربها بالماء دائماً، وبهذا الإجراء، تم تسجيل درجات حرارة بلغت 19°C خلال شهري مايو ويونيو [62]. وبناء على هذه النتائج، يمكن القول بأنه يمكن تغطية أحمال التبريد والتدفئة من الطاقة الحرارية لقشرة الأرض.

التحليل الاقتصادي والبيئي

إن دمج الضرر البيئي في الحسابات الاقتصادية يعطي فرصة عادلة للطاقات المتجددة في التنافس في سوق الطاقة حتى في الدول التي تدعم أسعار الطاقة مثل ليبيا.

منظومة الأحمال الكهربائية

يمكن تقدير تكلفة الطاقة السنوية (LCOE) لمنظومة الأحمال الكهربائية. وفقاً للمعادلات التالية [63-66]:

$$LCOE = \frac{\left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right) \times (C_{PV} + C_{Wind}) + \left(\frac{i(1+i)^m}{(1+i)^m - 1}\right) \times C_{Batt} + C_{O\&M} - (C_{CO_2})}{\sum_{t=1}^{52560} (E_{Load}(t) + E_{grid}(t))} \quad (10)$$

حيث أن: n تشير إلى عمر المحطة، وهو 25 عاماً للأنظمة الكهروضوئية وتوربينات الرياح، بينما m هو العمر الافتراضي لأنظمة التخزين، ويمكن اعتبارها 5 أعوام. ويمثل i معدل الخصم الحقيقي، والذي تم اعتماد قيمته 4% للنظام بالكامل. أما C_{PV} و C_{Wind} و C_{Batt} فتشير إلى تكاليف رأس المال لكل من الأنظمة الكهروضوئية وتوربينات الرياح وأنظمة التخزين (البطاريات) على التوالي. وكذلك يعبر $C_{O\&M}$ عن تكلفة التشغيل والصيانة الأنظمة، سواء كانت التوليد أو التخزين. ويشير E_{Load} إلى الحمل الكهربائي المطلوب تغطيته، وأيضاً E_{grid} يشير إلى الطاقة المصدرة للشبكة. وأما ما يتعلق بالتحليل البيئي فيكون من خلال تقييم دورة حياة ثاني أكسيد الكربون والتي تظهر خلال المعادلة (11). وحيث: يمثل $EF_{CO_2_{ele}}$ معامل انبعاث ثاني أكسيد الكربون لنظام الطاقة في ليبيا. وتمثل ϕ_{CO_2} السعر الدولي لثاني أكسيد الكربون، والتي حددت قيمته بحوالي $70 \text{ \$/tonCO}_2$ [67-69].

$$C_{CO_2} = \phi_{CO_2} \times EF_{CO_2_{ele}} \sum_{t=1}^{52560} E_{Load}(t) + E_{grid}(t) \quad (11)$$

منظومة الاحمال الحرارية

وفي هذا القسم، سيتم تقدير تكلفة الطاقة السنوية (LCOH) لجزء من المنظومة الخاص بتغطية الأحمال الحرارية، بالإضافة إلى ذلك، دمج تكلفة الضرر البيئي (C_{CO_2}) ضمن التحليل لضمان شمولية التقييم. ويحسب ذلك وفقاً للمعادلات التالية:

$$LCOH = \frac{\left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}\right) \times (C_{FPC} + C_{BM}) + (C_{O\&MFPC} + C_{O\&MBM}) - (C_{CO_2})}{\sum_{t=1}^{8760} E_{LWH}(t) + E_{LLPG}(t)} \quad (12)$$

$$C_{CO_2} = \phi_{CO_2} \times \left[EF_{CO_2_{ele}} \times \left(0.8 \times \sum_{t=1}^{8760} E_{LWH}(t) \right) + \left(EF_{CO_2_{LPG}} \times \sum_{t=1}^{8760} E_{LLPG}(t) \right) - \left(EF_{CO_2_{CH_4}} \times \left(\sum_{t=1}^{8760} E_{CH_4} + 0.2 \times \sum_{t=1}^{8760} E_{LWH}(t) \right) + (CO_{2,dig}) \right) \right] \quad (13)$$

حيث n هو العمر الافتراضي المتوقع لأنظمة الطاقة حسب مواصفاتها. وتشير E_{LWH} و E_{LLPG} إلى قيم الحمل المستهلكة سنويًا لتسخين المياه، والغاز المسال (LPG) على التوالي، وكما تمثل $EF_{CO_2_{LPG}}$ و $EF_{CO_2_{ele}}$ و $EF_{CO_2_{CH_4}}$ معاملات انبعاثات ثاني أكسيد الكربون لكل حمل طاقي. كما هو موضح في الجدول (6).

جدول 6: معاملات انبعاثات CO_2 المستخدمة لكل حمل طاقي [70]

القيمة	معاملات
0.857 kg/kWh	معامل انبعاثات CO_2 لتوليد الكهرباء، $EF_{CO_2_{ele}}$
2.98 kg CO_2 /kg LPG	معامل انبعاثات CO_2 الناتج عن الغاز المسال، $EF_{CO_2_{LPG}}$
2.75 kg CO_2 /kg CH_4	معامل انبعاثات CO_2 الناتج عن الغاز الميثان، $EF_{CO_2_{CH_4}}$

ولإتمام عملية التصميم حددت القيود التالية:

1- ضرورة التخلص من جميع النفايات المنزلية العضوية. وفقًا لما هو مبين في المعادلة (14). وعند العجز سيتم توريد الكمية اللازمة من المخلفات الحيوانية (الدواجن) إلى موقع الدراسة. وذلك نظرًا لانتشار نشاط تربية الدواجن في المنطقة. وفقًا للمعادلات (15) و(16).

$$W_{MW} \geq \frac{1}{CF_{CH_4} * LHV_{CH_4}} \sum (E_{LPG} + 0.2 * E_{LWH}) \quad (14)$$

$$m_{MSW} * CF_{CH_4_{MSW}} + m_{LSW} * CF_{CH_4_{LSW}} \geq 1.2 * m_{LPG} \quad (15)$$

$$m_{CH_4} = \frac{m_{LPG} * LHV_{LPG}}{LHV_{CH_4}} \quad (16)$$

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 (17) [71-80].

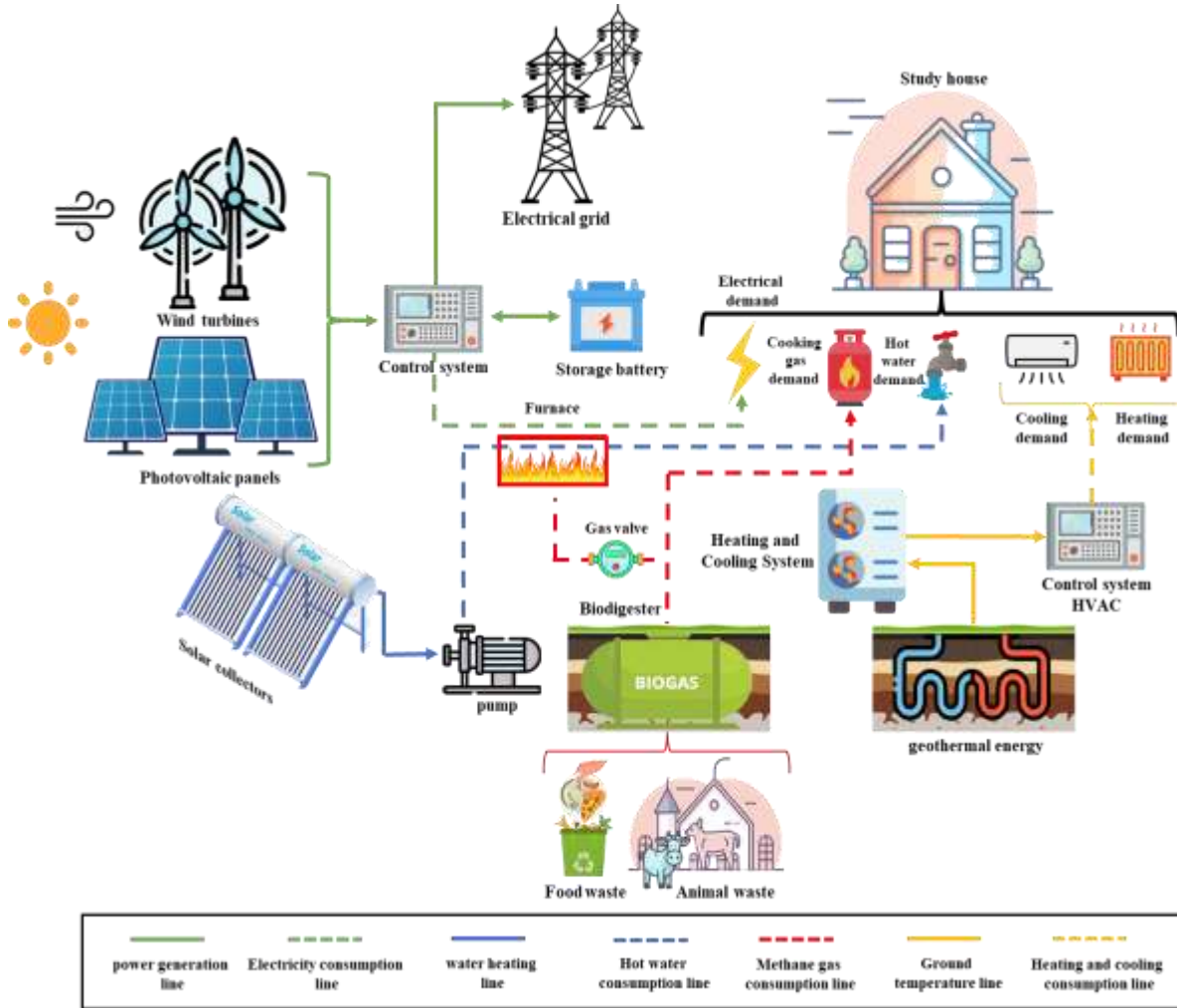
$$LPSP = \frac{\sum_{i=1}^{8760} [E_{Load}(t_i) - E_{HR}(t_i)]}{\sum_{i=1}^{8760} E_{Load}(t_i)} = 0 \quad (17)$$

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

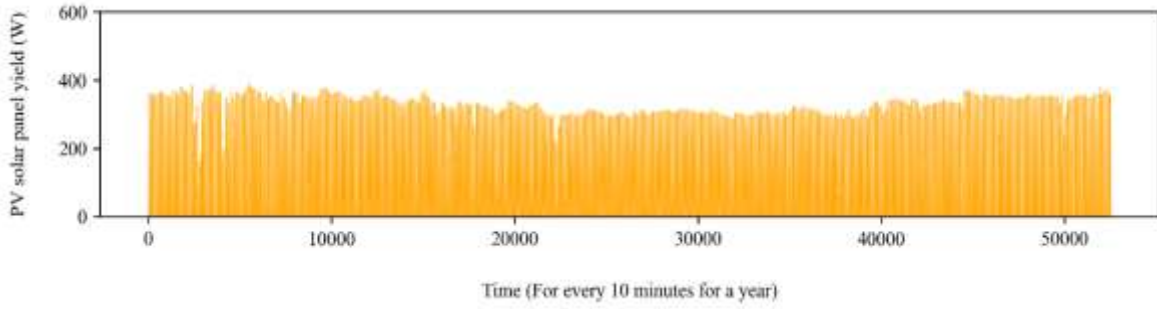
يوضح الشكل (12) مخططاً توضيحياً للمنظومة المقترحة، والتي تتكون من عدة مصادر طاقة متجددة لتغطية الأحمال الكهربائية والحرارية. يتكون النظام من منظومتين: منظومة الأحمال الكهربائية، وتتكون من ألواح شمسية كهروضوئية، وتوربينات رياح، وبطاريات. ومنظومة الأحمال الحرارية، وتتكون من المجمعات الشمسية الحرارية، والتي تغطي 80% من حمل تسخين المياه. والمفاعل الحيوي والذي سيوفر الغاز الحيوي للطهي بالكامل، وأيضاً سيساهم في 20% من حمل تسخين المياه. وطاقة القشرة الأرضية والتي ستساهم في تغطية أحمال التدفئة والتبريد بالكامل. وتدار عمليات النظام بوحدة تحكم، مما يضمن استمرار تغطية الأحمال الكهربائية والحرارية أوتوماتيكياً.



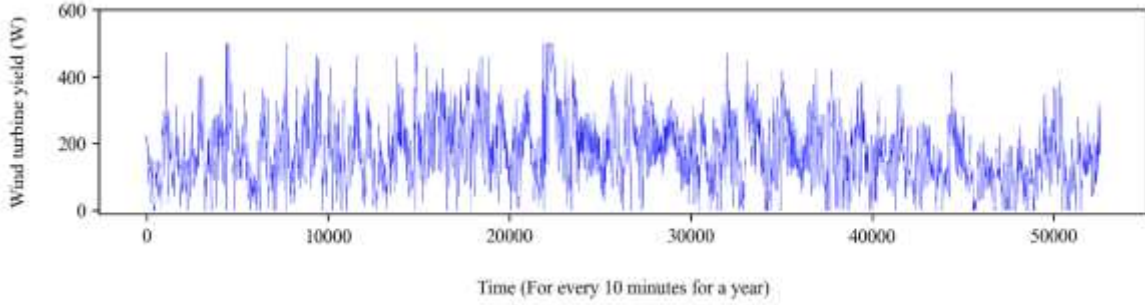
شكل 12: مخطط المنظومة المقترحة للطاقة المتجددة الهجينة

منظومة الأحمال الكهربائية

في هذا القسم يتم عرض ومناقشة النتائج المتحصل عليها من عملية تصميم وتحليل منظومة الأحمال الكهربائية، والتي تشمل: الألواح الكهروضوئية وتوربينات الرياح والبطاريات تحت الظروف الفعلية لتغطية الأحمال الكهربائية في منزل في منطقة سمنو. باستخدام برنامج SAM وبمساعدة برنامج Excel وبرنامج Jupyter. تم تقدير الأداء الطاقى للوح شمسي كهروضوئي بقدرة 560 واط وتوربينة الرياح بقدرة 500 واط لكل 10 دقائق لمدة عام. كما موضح في الشكل (13) و(14).

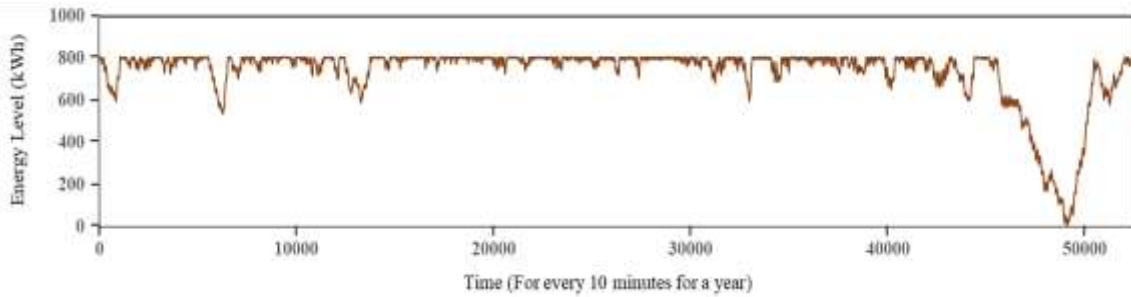


شكل 13: الأداء الطاقوي للوح شمسي كهروضوئي بقدرة 560W لكل 10 دقائق



شكل 14: الأداء الطاقوي لتوربينة الرياح بقدرة 500W لكل 10 دقائق

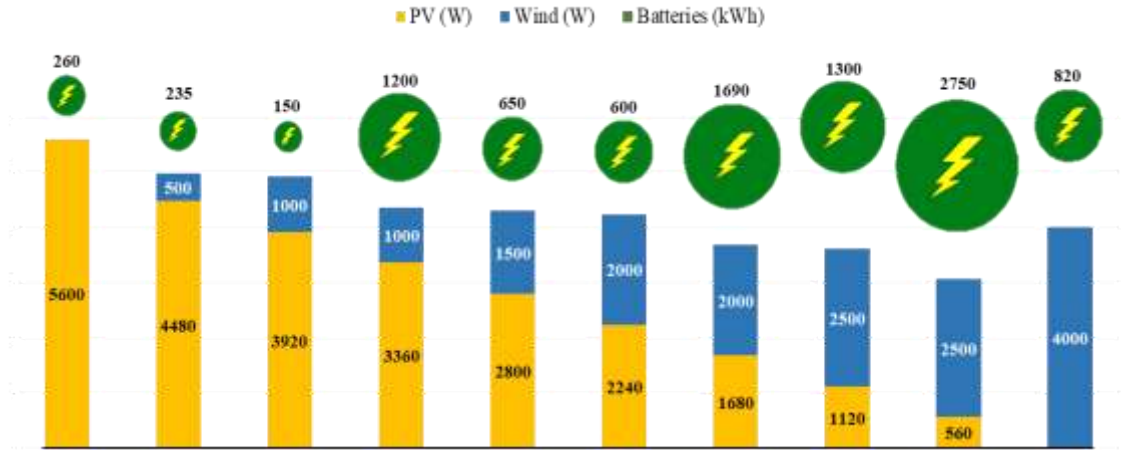
كما يتضح من الشكلين (13) و(14)، أن الأداء الطاقوي لكل من اللوح الشمسي الكهروضوئي وتوربينة الرياح يعتمد بشكل كبير على العوامل البيئية، مثل الإشعاع الشمسي وسرعة الرياح. تُبرز النتائج أن الأداء الطاقوي للوحدة الشمسية الكهروضوئية يتسم باستقرار نسبي، حيث بلغ أعلى إنتاج يومي حوالي 387 واط/يوم، كما بلغ متوسط الإنتاج اليومي حوالي 102 واط/يوم، ويعزى ذلك إلى انتظام الإشعاع الشمسي خلال ساعات الذروة. بينما أظهرت توربينة الرياح تذبذبات أعلى في الأداء، وهو ما يرتبط بالتغيرات السريعة في سرعة الرياح وكثافتها. حيث بلغ أعلى إنتاج يومي 500 واط/يوم، مع متوسط إنتاج بلغ 175 واط/يوم. هذه الفروق تعكس اختلاف حساسية كل نظام للمتغيرات البيئية. وكما تم تمثيل دورة مستوى تخزين الطاقة في إحدى أنظمة التخزين لمنظومة الطاقة المتجددة الهجينة لكل 10 دقائق لمدة عام كامل. كما هو موضح في الشكل (15).



شكل 15: مستوى تخزين الطاقة في البطاريات لكل 10 دقائق

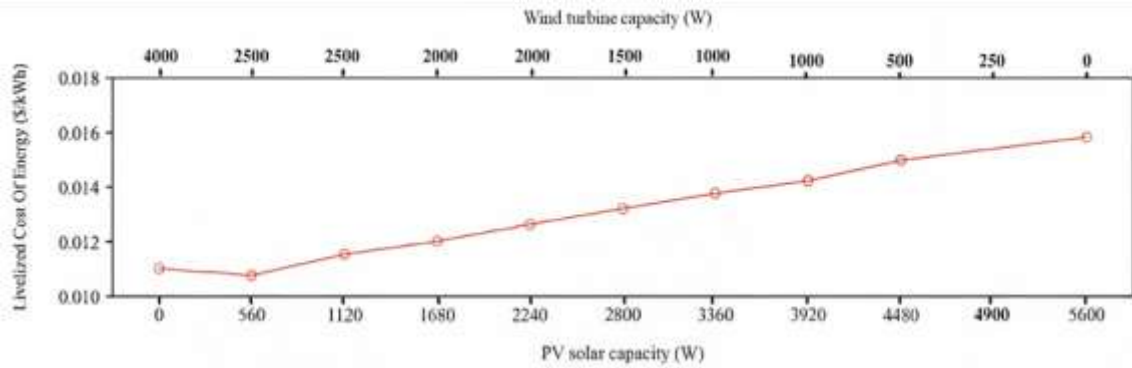
ويتضح من الشكل (15) نموذج لمفهوم مستوى تخزين الطاقة في أنظمة التخزين لمنظومة الطاقة الهجينة لكل 10 دقائق لمدة عام كامل. مما يشير إلى استقرار المنظومة. ومن خلال عملية التحليل، تم دمج مصادر الطاقة المتجددة بقدرات مختلفة مع كمية الطاقة المخزنة سنويًا في أنظمة التخزين، مما أدى إلى تكوين عدة منظومات طاقة هجينة. كما موضح في الشكل (16).

شكل 16: إنتاجية المنظومة الهجينة بقدرات مركباتها من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح



يظهر بوضوح في الشكل (16) أن دمج مصادر الطاقة المتجددة مثل الألواح الكهروضوئية وتوربينات الرياح، مع البطاريات يمكن أن يؤدي هذا المزيج إلى تحسين كفاءة نظم الطاقة الهجينة. باستخدام هذا النهج المتكامل، يمكن توفير الطاقة الكهربائية بشكل مستدام خاصةً في فترات الذروة. لذلك، تم تحليل 10 تكوينات متنوعة تختلف في مشاركة مصادر الطاقة في تزويد الطاقة الكهربائية. هذه الاستراتيجية تعكس كيفية استعادة الأنظمة الهجينة من توازن متناغم بين مصادر الطاقة لتلبية احتياجات الطاقة بكفاءة وفعالية. وكما يشير أيضًا إلى كيفية تأثير مشاركة مصادر الطاقة المتجددة (الألواح الكهروضوئية وتوربينات الرياح) على أنظمة التخزين (البطاريات).

وتمشيًا مع ما تم نكره، تم تطبيق دالة الهدف من خلال حساب تكلفة الطاقة المستوية (LCOE) ضمن المعايير المحددة في إطار البحث والتي تعتبر الفيصل في تحديد حجم منظومة الطاقة الهجينة المقترحة. تم دمج تحليل دورة حياة ثاني أكسيد الكربون لجميع مكونات منظومة الطاقة الهجينة. وفقًا للمعادلة (10). يوضح الشكل (17) تكلفة الطاقة المستوية (LCOE) لجميع تكوينات منظومات مصادر الطاقة المتجددة الهجينة في هذه الدراسة.

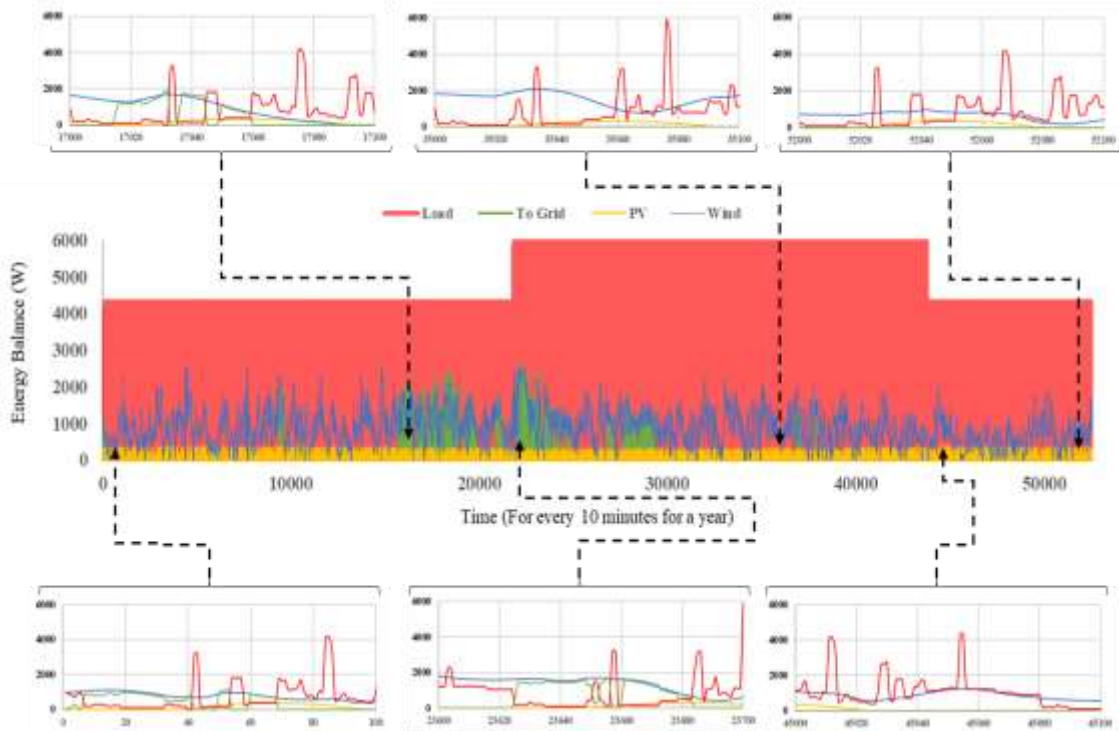


شكل 17: تكلفة الطاقة المستوية (LCOE) لتكوينات مصادر الطاقة المتجددة الهجين

يشير التحليل الاقتصادي الموضح في الشكل (17) إلى أن المنظومة الهجينة المقترحة لتغطية الاحمال الكهربائية تحقق الحد الأدنى لتكلفة الطاقة المستوية (LCOE) بحوالي 0.0107 \$/kWh. وذلك بتكلفة رأس المال تقدر بحوالي \$ 5742. توزعت هذه التكلفة على المكونات الرئيسية للمنظومة والتي شملت: طاقة شمسية كهروضوئية بقدرة W 560، وتوربينات رياح بقدرة إجمالية 2500 W، بالإضافة إلى نظام تخزين (البطاريات) بسعة 7.5 kWh. هذه القيمة من التكلفة (LCOE) تعكس كفاءة المنظومة الهجينة المقترحة تعتمد على مصادر متعددة للطاقة. تلك النتائج تبرز أهمية الاستثمار في الطاقات المتجددة. سواءً على المستوى المحلي أو الدولي. مما يعكس ذلك التزامنا بتحقيق التنمية

المستدامة والحفاظ على البيئة. ومن الناحية البيئية، فقد ساهمت المنظومة في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO_2) بمقدار 10490 kg سنويًا. وبناءً على ذلك، تم تقدير تكلفة الضرر البيئي المتجنب الناتج عن هذه الانبعاثات المنخفضة بحوالي \$ 734.

ومع ذلك، تم تمثيل عملية ائزان الطاقة بين التوليد والحمل الكهربائي تحت الظروف الزمنية الفعلية، والتي كانت لكل 10 دقائق لمدة عام كامل. وهنا تجدر الإشارة إلى أن تمثيل هذا الكم الهائل من البيانات يصعب توضيح سلوك العملية بشكل دقيق، ولذلك تم تقسيم البيانات إلى فترات زمنية أصغر لتوضيح سلوك العملية بدقة أكبر. تم اختيار بعض الفترات الزمنية مع الشكل العام. كما موضح في الشكل (18).



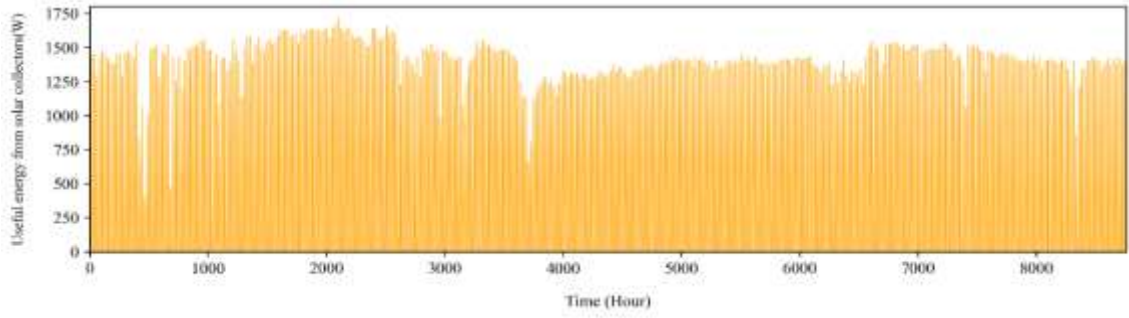
شكل 18: ائزان الطاقة في منظومة الطاقة المتجددة الهجينة المقترحة

يشير الشكل (18) توازن الطاقة بين توليد الطاقة الكهربائية والحمل الكهربائي الذي يتمثل في الحمل الكهربائي المنزلي والحمل المصدر للشبكة. تضم منظومة توليد الطاقة الهجينة لوح شمسي كهروضوئي بقدرة 560 W، وخمس توربينات رياح قدرة كل منها 500 W، بقدرة إجمالية تبلغ 2500 W، وبطاريات تخزين بسعة 7.5 kWh. تبلغ مشاركة الطاقة الشمسية في توليد الطاقة بحوالي 898 kWh سنويًا. بينما تسهم طاقة الرياح بحوالي 7692 kWh سنويًا. وبالتالي، تبلغ الطاقة الإجمالية المنتجة 8590 kWh، هذه الطاقة تكفي لتلبية الطلب السنوي على الطاقة الكهربائية يبلغ kWh 8540. ويصدر الفائض والذي يقدر بحوالي 504 kWh إلى الشبكة العامة الكهربائية.

منظومة الأحمال الحرارية

المجمعات الشمسية الحرارية

أظهرت نتائج التحليل كمية الطاقة المنتجة من المجمعات الشمسية الحرارية لكل ساعة لمدة عام كامل. كما هو موضح في الشكل (19).



شكل 19: الأداء الحراري للمجمعات الشمسية الحرارية

وبناءً على تحليل أداء المجمعات الشمسية الحرارية، أظهرت النتائج أن المساحة المجمعات الشمسية بلغت حوالي 2.5 m^2 ، وسعة الخزان الحراري 165 لتر قادر على تلبية احتياجات تسخين المياه والتي بلغت حوالي 1080 kWh سنويًا، وقد حققت المجمعات طاقة حرارية منتجة تبلغ 3500 kWh سنويًا. ومن الناحية الاقتصادية، بلغت تكلفة رأس المال للمجمعات الشمسية حوالي \$ 1100، بينما بلغت التكاليف السنوية للصيانة والتشغيل نحو \$ 50. بالإضافة إلى ذلك، تم تقدير تكلفة الطاقة المستوية الحرارية (LCOH) بنحو \$/kWh 0.091. 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.

نتائج الطاقة الحيوية

كشفت نتائج التحليل إمكانية استغلال النفايات العضوية من الطعام ومخلفات الدواجن المتاحة في موقع الدراسة لإنتاج غاز الميثان. تقدر الكميات اليومية من النفايات العضوية من الطعام 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 حجم الإجمالي للمفاعل الحيوي المناسب لاستيعاب هذه الكميات اليومية من النفايات العضوية من الطعام ومخلفات الدواجن، بالإضافة إلى كمية الماء المضافة، حيث بلغ سعته 8 m^3 . وبالتالي، يمكن لهذا المفاعل إنتاج كمية من غاز الميثان تقدر بحوالي 1 kg يوميًا (ما يعادل 1.52 m^3 يوميًا). وبالتوازي مع ذلك، تطلق عملية التخمر انبعاثات من ثاني أكسيد الكربون (CO_2) تقدر بحوالي 900 g يوميًا. كما هو موضح في الشكل (20). وفي المقابل، بلغ الطلب اليومي المقدر للغاز المستخدم للطهي 0.96 kg. مما يشير إلى أن هذا الإنتاج المقدر من غاز الميثان يمكن الاستغناء به تمامًا عن غاز الطهي الأحفوري. وايضًا سد عجز إمداد الطاقة الشمسية بقيمة 20% من حمل تسخين المياه. وكما 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 \$/kg 0.244. وأما فيما يتعلق بالنتائج البيئية، حيث بلغ كمية الانبعاثات ثاني أكسيد الكربون من عملية إنتاج الميثان حوالي 315 kg سنويًا. وبالتالي، تقدر ضريبة تكلفة الضرر البيئي لهذه الانبعاث بحوالي \$ 22. وبناءً 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.



شكل 20: مخطط توضيحي لمداخلات ومخرجات المفاعل الحيوي

وأما بالنسبة لطاقة القشرة الأرضية فتم استخدامها لتغطية أحمال التبريد والتدفئة، حيث بلغت الطاقة المستهلكة للتبريد حوالي 12577 kWh والتدفئة 5112 kWh في السنة. وبناءً على التحليلات السابقة، تم تقدير الجدوى الاقتصادية والبيئية لمنظومة الأحمال الحرارية، باستثناء طاقة القشرة الأرضية والتي لم يتوفر عليها أي معلومات في موقع الدراسة. وبناءً على ذلك، بلغت تكلفة رأس المال لمنظومة الأحمال الحرارية حوالي \$ 3027، بينما بلغت تكلفة الطاقة المستوية (LCOE) حوالي \$ 0.054/kWh. وكما أدت المنظومة إلى خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 425 kg سنوياً. الاستنتاجات

بناءً على النتائج التي تم الحصول عليها، تُعد أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة خياراً واعداً وفعالاً لتلبية الاحتياجات المتكاملة من الطاقة الكهربائية والحرارية في القطاع السكني، وذلك نظراً لقدرتها على دمج مصادر طاقة متنوعة لتحقيق استقرار الإمداد الطاقوي. وقد أظهر تحليل أنماط استهلاك الطاقة تحت الظروف الزمنية الفعلية، مع مراعاة فترة التشغيل الدنيا للأجهزة الكهربائية (10 دقائق)، نتائج أكثر دقة في تقدير الاستهلاك الحقيقي للأجهزة، مما يعزز كفاءة التخطيط الطاقوي. ومن الناحية الاقتصادية، بلغت تكلفة رأس المال للمنظومة الهجينة المقترحة حوالي 8,769 دولار أمريكي، بينما سجلت تكلفة الطاقة المستوية (LCOE) \$ 0.064/kWh، مما يعكس جدواها الاقتصادية العالية وتنافسيتها مقارنة بأنظمة الطاقة التقليدية. بالإضافة إلى ذلك، تُسهم هذه الأنظمة في خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون بمقدار 10,915kg سنوياً، مما يعزز دورها في التخفيف من آثار التغير المناخي. كما أظهرت النتائج أن كمية النفايات المنزلية قادرة على توليد كمية كافية من غاز الميثان يومياً، مما يوفر بديلاً مستداماً للغاز الأحفوري في تطبيقات الطهي، ويسهم في تقليل الاعتماد على الموارد غير المتجددة. وبشكل عام، حققت منظومات الطاقة الهجينة المقترحة توازناً مثالياً بين الجدوى الاقتصادية والاستدامة البيئية، مما يجعلها حلاً متكاملًا وفعالاً لتلبية الاحتياجات الطاقوية الحالية والمستقبلية، مع دعم أهداف التنمية المستدامة. هذه الاستنتاجات تؤكد على أهمية تبني أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة كحل استراتيجي لتحقيق أمن طاقوي مستدام وذو بصمة كربونية منخفضة.

References

- [1] Liu, H., Khan, I., and Zakari, A. 2022. Roles of trilemma in the world energy sector and transition towards sustainable energy: A study of economic growth and the environment. Energy Policy. 170:113238, 2022.
- [2] Fathi, N., Aissa, K., and Alsadi, S. 2018. Air Pollution Sources in Libya. Rev. J Ecol. Environ. Sci. 6(1):63-79.

- [3] Patidar, A., Jain, P., and Dhasmana, P. 2024. Impact of global events on crude oil economy: a comprehensive review of the geopolitics of energy and economic polarization. *GeoJournal*. 89:50.
- [4] Salem. M., 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*. 12:133-167.
- [5] Youssef, A. 2026. Nuclear Plants Trends for Development Planning in Egypt. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences* 4(1):277-286.
- [6] 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.
- [7] Al-Maghalseh, M., Hammad, A., Hamdan M., and Abdelhafez, E. 2026. Thermal Comfort of Buildings Integrated Photovoltaics (BIPV). *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 4(1):146-164.
- [8] Yahya W., and Nassar, Y. 2023. Future Study of Renewable Energy in Libya. *Int. J. Adv. Eng. Res. Sci. IJAERS*. 7:2456–1908.
- [9] Aqila, A., Abubaker, A., and Nassar, 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.
- [10] Salem, M., Elmabruk, A., Irhouma, M., and Mangir, I. 2025. Assessment of Wind Energy Potential in Western Mountain: Nalut and Yefren as Case Study. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 3(1):35-42.
- [11] Ben Dalla, L., Karal, Ö., EL-Sseid, M., and Alsharif, A. 2026. An IoT-Enabled, THD-Based Fault Detection and Predictive Maintenance Framework for Solar PV Systems in Harsh Climates: Integrating DFT and Machine Learning for Enhanced Performance and Resilience. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 4(1): 41-55.
- [12] Nassar, Y., and El-khozondar, H. 2024. 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.* 441:140944.
- [13] Nassar, Y., and Alsadi, S. 2022. Design of an isolated renewable hybrid energy system: a case study. *Mater. Renew. Sustain. Energy*. 11:225–240.
- [14] Abah, D., Iliyasu, N., Aliyu, A., and Kabir, A. 2023. Design and Simulation of Hybrid Power Supply for Residential Consumer. presented at the 1st Faculty of Engineering and Technology Conference (FETiCON 2023), Nigeria, 2023, pp. 5–7. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/376608180>
- [15] Abdullah, A., Mohammed, S., and Ghatas, 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.
- [16] Salah, W., et al. 2025. Assessment of waste to energy approaches to compensate for the shortage in energy supply in Gaza, Palestine. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 19(6):2318-2332.
- [17] Nassa, Y. 2017. Thermodynamic Analysis and Optimization Procedure for Domestic Solar Water Heating System. *American Journal of Energy and Power Engineering*. 2(6):92-99.
- [18] Awad, A., 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(4):46-56.

- [19] Chien, C., and LIMa, L. 2018. The characterisation and treatment of food waste for improvement of biogas production during anaerobic digestion – a review. *J. Clean. Prod.* 172:1545–1558.
- [20] Elmnifi, M., et al. 2026. Energy recovery from municipal solid waste incineration: Benghazi Libya—case study. *Future Smart Cities.* 2(1):167-192.
- [21] Libya, M. 2025. The Oasis Town of Samnu. Accessed: Jul. 31, 2025. [Online]. Available: <https://libyaobserver.ly>
- [22] Team solargis, “Solar resource maps & GIS data.” Accessed: Aug. 04, 2025. [Online]. Available: <https://solargis.com>
- [23] 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.
- [24] Fathi, N., Hafez, A., and Alsadi, S. 2020. Multi-Factorial Comparison for 24 Distinct Transposition Models for Inclined Surface Solar Irradiance Computation in the State of Palestine: A Case Study. *Front. Energy Res.* 7:163.
- [25] Fathi, N. 2020. Analytical-numerical computation of view factor for several arrangements of two rectangular surfaces with non-common edge. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 159: 120130.
- [26] Alsadi, S., El-Khozondar, H., and Refaat, S. 2022. Determination of the Most Accurate Horizontal to Tilted Sky-Diffuse Solar Irradiation Transposition Model for the Capital Cities in MENA Region. 2022 3rd International Conference on Smart Grid and Renewable Energy (SGRE), Doha, Qatar, 1-6.
- [27] Nassar, Y., Hala, J., Belhaj, S., Alsadi, S., and Abuhamoud, N. 2022. View Factors in Horizontal Plane Fixed-Mode Solar PV Fields. *Front. Energy Res.* 10:859075.
- [28] Khaleel, M., 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.
- [29] Alatrash, A., et al. 2025. Optimum Number of Glass Covers of Thermal Flat Plate Solar Collectors. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences.* 2(1): 1-10.
- [30] Amer, K., Irhouma, M., Ibrahim, M., and Aqila, 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 Univ. J. Pure Appl. Sci.* 3(1):52–58.
- [31] El-Khozondar, H., et al. 2025. Economic and Environmental Implications of Solar Energy Street Lighting in Urban Regions: A Case Study. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences.* 3(1):42-151.
- [32] Salim, E., Abubaker, A., Ahmed, B., and Fathi, N. 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.
- [33] Alsharif, A., et al. 2023. Mitigation of Dust Impact on Solar Photovoltaics Performance Considering Libyan Climate Zone: A Review. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences.* 3(1):152-167.
- [34] 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.* 3(2):221-229.

- [35] Alkhazmi, A., et al. 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.
- [36] Al-Mathnani, A., Mohammed, A., Al-Hashmi, S., and Geepalla, E. 2025. Control and Modification of 12-Pulse Static Compensator with PV Cell Using New Control Algorithm. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 3(1):30-34.
- [37] Nassar, Y., and Alsadi, S. 2022. Mapping of PV Solar Module Technologies Across Libyan Territory. presented at the 2022 Iraqi International Conference on Communication and Information Technologies (IICCIT), Iraq, 2022, pp. 64–71
- [38] Alfathi, S., Miskeen, G., and Mremi, W. 2026. Evaluation and Prediction Performance of Solar Panel and Wind Turbine Systems Using Simulation. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 4(1):94-104.
- [39] Elnaggar, M., El-Khozondar, H., and Nassar, Y. 2024. Assessing the Techno-economic viability of wind farms to address electricity shortages and Foster sustainability in Palestine. *Results Eng.* 24:1–17.
- [40] Elmabruk, A., Salem, E., Khaleel, M., and Mansour, A. 2025. Prediction of Wind Energy Potential in Tajoura and Mislata Cities. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 3(2):125-131.
- [41] 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*. 3(2):52-62.
- [42] Ahmed, B., Fathi, N., El-Khozondar, H., and Khaleel, M. 2026. Optimal Design of Hybrid Renewable Energy System (PV/Wind/PHS) Under Multiple Constraints of Connection to the Electricity Grid: A Case Study. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 4(1):83-93.
- [43] Amhimmid, A., El-Osta, W., Fathi, Y., El Khozondar, H., and Salem, M. 2024. Financial Modeling of Social and Environmental Impacts of Wind Farm in Urban Zones: A Case Study of Zawia-Libya. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*. 15(4):17-29.
- [44] Elmariami, A., et al. 2023. Life Cycle Assessment of 20 MW Wind Farm in Libya. *Appl. Sol. Energy*. 59:64–78.
- [45] Mohammed, S. et al. 2023. Carbon and Energy Life Cycle Analysis of Wind Energy Industry in Libya. *Solar Energy and Sustainable Development Journal*. 2(1):50-69.
- [46] "ATO-X5-500." Accessed: Aug. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.ato.com/>
- [47] Cheng, K., and Member, S. 2010. Battery-Management System (BMS) and SOC Development for Electrical Vehicles. *IEEE*. 60:76–88.
- [48] Abuqila, M., Fathi, N., and Nyasapoh, M. 2025. Estimation of the Storage Capacity of Electric Vehicle Batteries under Real Weather and Drive-mode Conditions: A Case Study. *Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences*. 3(1):58-71.
- [49] Albadry, O., et al. 2025. Static Analysis of Energy Storage Systems in Electric Vehicle Case Study: Lithium-Ion Battery. In *Engineering for Palestine Conference (ENG4PAL) PPU, Hebron, Palestine, September 29-30, 2025*. <https://www.researchgate.net/publication/401318896>
- [50] Khaleel, M., et al. 2025. Battery technologies in electrical power Systems: Pioneering secure energy transitions. *Journal of Power Sources*. 653:237709.
- [51] Latiwash, I., Fathi, N., and Abubaker, A. 2025. Performance analysis and sizing optimization of a utility scale stand-alone renewable energy PV/Battery storage system for

- urban zones. University of Zawia Journal of Engineering Sciences and Technology. 3(2):261-275.
- [52] Halim, A., Fathi, Y., Khozondar, H., and Bayoumi, E. 2023. Fast Charging of Lithium-ion Battery for Electric Vehicles Application," 2023 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES), Gaza, Palestine, State of, 2023, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/ieCRES57315.2023.10209433>.
- [53] El-Khozondar, H., Albardawil, M., Asfour, M., and Abu-Khater, I. 2023. DC off-Grid PV System to Supply Electricity to 50 Boats at Gaza Seaport. 2023 8th International Engineering Conference on Renewable Energy & Sustainability (ieCRES), Gaza, Palestine, State of, 2023, pp. 1-5, <https://doi.org/10.1109/ieCRES57315.2023.10209467>.
- [54] "ecodirect." Accessed: Aug. 04, 2025. [Online]. Available: <https://www.ecodirect.com/>
- [55] Elnaggar, M., and El-Khozondar, H. 2023. Enhancing solar water heater system for utmost useful energy gain and reduction in greenhouse gas emissions in Gaza. Int. J. Environ. Sci. Technol. 20:3749–3764.
- [56] Nassar, Y., et al. 2024. Optimum Number of Glass Covers of Thermal Flat Plate Solar Collectors. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 2(1):1-10.
- [57] Mohammed, M., Mohammed, E., and Elzer, R. 2026. Techno-Economic Feasibility of Parabolic Trough Solar Steam for Thermal Enhanced Oil Recovery. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 4(1):184-190.
- [58] Nassar, Y., Mangir, I., and Hafez, A. 2023. Feasibility of innovative topography-based hybrid renewable electrical power system: A case study. Clean. Eng. Technol. 14:1–15.
- [59] Alsadi, S., et al. 2024. Renewable energy potential in the State of Palestine: Proposals for sustainability. Renewable Energy Focus. 49:100576.
- [60] Ogbozige, F. 2023. Design of Household anaerobic Bio-Digester for Biogas Production From Abattoir Waste. Niger. J. Trop. Eng. 1:50–58.
- [61] EIA, "Cost and Performance Characteristics of New Generating Technologies, Annual Energy Outlook 2022," Energy Information Administration, 2022. [Online]. Available: https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/table_8.2.pdf
- [62] Nassar, Y., and ElNoaman, A. 2006. Evaluation of the underground soil thermal storage properties in Libya. Renew. Energy. 31:593–598.
- [63] Mohammed, S., Algassie, H., Mahammed, A., El-Khozondar, H., and Alatrash, A. 2025. Exploring Promised Sites for Establishing Hydropower Energy Storage (PHES) Stations in Libya by Using the Geographic Information Systems (GIS). Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 3(1):85-94
- [64] Inweer, M., and Fathi, N. 2025. Carbon Emissions Life Cycle Assessment of Cement Industry in Libya. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 3(2):162-173.
- [65] Imbayah, I., et al. 2026. Modeling A 600 MW Floating Photovoltaic System in Al-Khums city, Libya: Performance Analysis and Implementation Using PVSyst. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 4(1):223-237.
- [66] El-Khozondar, H., et al. 2026. Feasibility of Concentrating Solar Power as a Solar Fuel for Electrical Power Stations: A Case Study of Ubari Gas-Power Station in Libya. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 4(1):56-69.
- [67] Abdullallah, A., et al. 2026. Leveraging Hydrogen for Covering Energy Shortage in an Electricity Subgrid. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 4(1):245-254.

- [68] Al-Maghalseh, M. The Environmental Impact and Societal Conditions of PV Power Plants: A Case Study of Jericho Gate-Palestine Stat Of. Wadi Alshatti University Journal of Pure and Applied Sciences. 3(2):16-31.
- [69] Inweer, M., et al. 2025. Carbon footprint life cycle assessment of cement industry in Libya. *Discov. Concr. Cem.* 1:37.
- [70] Nassar, Y., Salem, M., and El-Khozondar, H. 2025. Estimation of CO2 Emissions from the Electric Power Industry Sector in Libya. *Res.*14:100567.
- [71] Abdunnabi, M., et al. 2020. Dynamic analysis and sizing optimization of a pumped hydroelectric storage-integrated hybrid PV/Wind system: A case study. *Energy Conversion and Management.* 229:113744.
- [72] El-Khozondar, H., et al. 2023. Standalone hybrid PV/wind/diesel-electric generator system for a COVID-19 quarantine center. *Environmental Progress and Sustainable Energy.* 42(3):e14049.
- [73] Yasser, F., et al. 2024. Design of reliable standalone utility-scale pumped hydroelectric storage powered by PV/Wind hybrid renewable system. *Energy Conversion and Management.* 322:119173.
- [74] Imbayah, I., belghasem, A., 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.
- [75] Hala J., et al., 2025. Technical-economical-environmental assessment of grid-connected hybrid renewable energy power system for Gaza Strip-Palestine. *Engineering Science and Technology, an International Journal.* 69: 102120.
- [76] Alsharif, A., et al. 2024. Optimal Sizing of Hybrid Renewable System for Residential Appliances. 2024 IEEE 4th International Maghreb Meeting of the Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (MI-STA). Tripoli, Libya. 290-295.
- [77] Irhouma, M., et al. 2026. Optimum Design of an off-Grid hybrid PV/diesel/battery power system for Brack Alshatti city, Libya. *Fezzan University scientific Journal.* Under press.
- [78] Alnadhif, M., et al. 2026. Design of a Multi-Source Hybrid Renewable Energy System (Solar, Wind, Biomass, and Hydrogen) for Achieving Sustainability. *Fezzan University scientific Journal.* Under press.
- [79] Imbayah, I., et al. 2026. Hybrid Photovoltaic-Battery-Diesel System for Ubari Power Plant Conversion into a Green Hydrogen Production Center. *Fezzan University scientific Journal.* Under press.
- [80] Latiwash, I., et al. 2026. Energy, economic, and environmental analysis of a solar cell energy system connected with a hydrogen system to cover the electrical load of an urban area. *Fezzan University scientific Journal.* Under press.